



PATIO en calle WAGNER, 24

Lucas



Revista
Hábitat
Sustentable

ISSN 0719-0700
Vol. 10 N° 2
diciembre
2020



UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO



**Revista
Hábitat
Sustentable**

ISSN 0719-0700
Vol. 10 N°. 2
diciembre
2020



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 MARÍA 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

COMITÉ PRODUCTIVO:

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

ALEJANDRA BANCALARI CORNEJO / Departamento de Teoría y Diseño de la Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bío - Bío, Concepción, Chile

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

PORTADA:

RAFAEL LLÁCER PANTIÓN / Patio de edificio de viviendas en calle Lumberras, 24, Sevilla (España).

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, JornaTOcs 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 **PATIO DE EDIFICIO DE VIVIENDAS EN CALLE LUMBRERAS**
Rafael Llácer Pantión
- 07 **EDITORIAL**
Nina Amor Hormazábal Poblete
- 08 **EDIFICIOS PREFABRICADOS EN CHILE: DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO A 40 AÑOS DE SU CONSTRUCCIÓN. CASO DE ESTUDIO: EDIFICIOS KPD, SANTIAGO DE CHILE.**
Karin Pamela Vásquez Manquián, Alejandra Verónica Decinti Weiss, Marco Antonio Díaz Huenchuan
- 24 **COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE TRES PROTOTIPOS EN SALTILLO, COAHUILA (BLOQUES DE TIERRA, CONCRETO Y TAPA DE HUEVO)**
María Eugenia Molar Orozco, Jesús Velázquez Lozano, María Genoveva Vázquez Jiménez
- 42 **10 PREGUNTAS DE LOS EDIFICIOS ENERGÍA CERO: REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE**
Micaela D'Amanzo, María Victoria Mercado, Carolina Ganem Karlen
- 54 **EVALUACIÓN DEL BLOQUE DE TIERRA MEDIANTE UN ESTUDIO DE VIABILIDAD CONSTRUCTIVA (EVC)**
Ana Romero Girón, Jacinto Canivell, Maria Reyes Rodríguez-García, Ana Gonzalez-Serrano
- 70 **BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA (BTC) ESTABILIZADOS CON CAL Y CEMENTO. EVALUACIÓN DE SU IMPACTO AMBIENTAL Y SU RESISTENCIA A COMPRESIÓN**
Santiago Pedro Cabrera, Yolanda Aranda Jiménez, Edgardo Suárez Domínguez, Rodolfo Rotondaro
- 82 **DESEMPEÑO TÉRMICO DE FACHADAS VERDES TRADICIONALES DE ORIENTACIÓN ESTE EN VIVIENDAS SERIADAS EMPLAZADAS EN CLIMAS ÁRIDOS**
Pablo Abel Suarez, María Alicia Cantón, Érica Correa
- 94 **MEJORAS EN EL DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE EDIFICIOS EN VERANO MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE ENVOLVENTES VENTILADAS EN FACHADAS NORTE Y CUBIERTAS. EL CASO DE MENDOZA, ARGENTINA.**
Julieta Balter, Carolina Ganem, Gustavo Barea

PATIO DE EDIFICIO DE VIVIENDAS EN CALLE LUMBRERAS, 24, SEVILLA (ESPAÑA).

El patio siempre ha sido un espacio arquitectónico que ha facilitado, en su entorno, la organización de la vivienda. En el mundo mediterráneo, las culturas árabes y la romana fueron conformando sus claves; y su tipología todavía perdura. En él, luz, aire, agua, sombra y vegetación, se conjugan creando un recinto que posibilita la integración entre lo interior y lo exterior.

En estos tiempos, en los que el uso del espacio público se ha complejizado profundamente, el patio, la terraza y la azotea se han convertido en ámbitos a los que hemos vuelto nuestra mirada, redescubriéndolos.

Rafael Llácer Pantión
Arquitecto Técnico y Geógrafo
Profesor Titular del Dpto. Construcciones Arquitectónicas II de la Universidad de Sevilla

<https://miradasdibujadas.wordpress.com/>
<https://www.flickr.com/photos/128655750@N05/albums/rlacer@us.es>



EDITORIAL

Se me ha otorgado el gran honor de escribir este Editorial, precisamente para el presente volumen 10, segundo número del año 2020 de la Revista Hábitat Sustentable, cuando da inicio su segunda década de vida y pasa a formar parte del índice SCOPUS, logro muy relevante para una revista científica del ámbito académico chileno e iberoamericano, única en abordar temáticas específicas de la sustentabilidad en arquitectura y ambiente construido. Un gran motivo para sentir orgullo del competente trabajo que ha venido realizando hasta aquí el equipo editorial de HS de la Facultad de Arquitectura UBB involucrado en este proceso, donde indudablemente también juega un rol importantísimo la comunidad de autores/as, evaluadores/as y lectores/as que hace posible la sostenibilidad de la revista en el tiempo. Desde esta tribuna, entonces, y con esta una nueva motivación, los invitamos a continuar enviando sus trabajos a HS.

La Editora Responsable de HS, la Dra. Claudia Muñoz, iniciaba la edición pasada refiriendo a la pandemia causada por el coronavirus SARS-CoV-2 y escribía "en el día 104 de la cuarentena en Chile...". Hoy enteramos aproximadamente 270 días de la llegada del virus a nuestro país, la incertidumbre continúa y a ella se suma el cansancio que todos hemos acumulado ante esta vivencia, la que en muchos casos ha sido extremadamente traumática. No puedo dejar de mencionarlo, dada la importancia y urgencia que cobra la investigación científica de excelencia en el mundo y el rol que, en consecuencia, juegan los investigadores y la divulgación de su trabajo a la hora de contribuir a nuestras sociedades y a nuestro planeta, para, en última instancia, salvar vidas e impactar positivamente en la calidad de vida de todas las especies que habitamos en la Tierra.

La generación de conocimiento a través de la investigación científica es la que aportará a la consecución de esa tan ansiada y necesaria libertad, que nos permitirá vivir sin miedo y en un hábitat más sustentable, sano, justo y digno para todas y todos. A la vez, en el ámbito académico resulta abrumador observar la ploriferación de estudios, reportes, análisis, prospectivas, encuestas, etc., acerca de lo que

puede suponer el mundo, respecto de la fragilidad de nuestra existencia como especie humana y el vulnerable sistema de vida que hemos desarrollado como sociedad. Sin embargo, comenzar esta nueva década habiendo terminado la presente con la gran pandemia que estamos experimentando, impone hoy más que nunca el gran desafío de desarrollar el quehacer investigativo en asociatividad y colaboración entre actores del sector público, del productivo y del académico, ojalá más apegados a la realidad que vivimos.

Es así como, desde el enfoque editorial de HS, es primordial continuar generando aportes científico-tecnológicos hacia la sustentabilidad del ambiente construido, tales como las provenientes de Argentina, España y Chile, en los artículos aquí presentados, donde las fachadas verdes o las fachadas ventiladas se ven, una vez más, corroboradas como estrategias que contribuyen a mejorar la habitabilidad de los ocupantes; o donde se demuestra, de igual modo, que el ancestral y sostenible uso de la tierra en su versión de 'bloque de tierra' continúa siendo un material de construcción vigente, tecnológicamente mejorable y digno de innovar a partir de sus cualidades. A ellos se suman la revisión y reflexión sobre lo que se viene, "Zero Energy Buildings", y sobre la transición energética requerida para adaptarnos a los cambios climáticos y sociales que palpamos cotidianamente, cuando es tan oportuno volver a revisar temas como la prefabricación del pasado, para ayudarnos a mirar hacia el futuro.

Desde ese horizonte, finalmente, doy las gracias a este tremendo equipo editorial de HS, a cada uno de ellos sin excepción.

Nina Amor Hormazabal Poblete
Doctora en Arquitectura
Profesora asociada Departamento de Arquitectura
Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
<https://orcid.org/0000-0002-7607-7675>
nina.hormazabal@gmail.com







EDIFICIOS PREFABRICADOS EN CHILE: DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO A 40 AÑOS DE SU CONSTRUCCIÓN. CASO DE ESTUDIO: EDIFICIOS KPD, SANTIAGO DE CHILE.

Recibido 29/08/2020
Aceptado 16/12/2020

PREFABRICATED BUILDINGS IN CHILE: ENERGY DIAGNOSIS, 40 YEARS
AFTER THEIR CONSTRUCTION. CASE STUDY: KPD BUILDINGS, SANTIAGO
DE CHILE.

KARIN PAMELA VÁSQUEZ MANQUIÁN

Magíster en Eficiencia Energética y Sustentabilidad mención Edificación
Académico del Departamento de Ciencias de la Construcción,
Facultad de Ciencias de la Construcción y Ordenamiento Territorial
Universidad Tecnológica Metropolitana
Santiago, Chile
<https://orcid.org/0000-0002-1335-9624>
k.vasquezm@utem.cl

ALEJANDRA VERÓNICA DECINTI WEISS

Magíster en Eficiencia Energética y Sustentabilidad mención Edificación
Académico del Departamento de Ciencias de la Construcción,
Facultad de Ciencias de la Construcción y Ordenamiento Territorial
Universidad Tecnológica Metropolitana
Santiago, Chile
<https://orcid.org/0000-0002-3847-1487>
adecinti@utem.cl

MARCO ANTONIO DÍAZ HUENCHUAN

Magíster en Eficiencia Energética y Sustentabilidad mención Edificación
Académico del Departamento de Ciencias de la Construcción,
Facultad de Ciencias de la Construcción y Ordenamiento Territorial
Universidad Tecnológica Metropolitana
Santiago, Chile
<https://orcid.org/0000-0001-9410-5986>
marco.diaz@utem.cl

RESUMEN

Los edificios KPD son construcciones habitacionales sencillas y discretas, pero emblemáticas en Chile. Su recorrido histórico por este país inicia con un terremoto y se entrelaza con los antagónicos gobiernos de Salvador Allende y Augusto Pinochet. Estas construcciones han permanecido ajenas a las actualizaciones de la reglamentación térmica, pasando a formar parte del extenso parque habitacional construido que necesita ser diagnosticado energéticamente, para alinearlo a las exigencias térmicas nacionales y, de ese modo, mejorar la calidad de vida de sus habitantes y aportar a la carbono-neutralidad ya comprometida por Chile. Este artículo presenta un estudio de caso de evaluación de confort térmico en un conjunto habitacional de edificios KPD, ubicado en la Región Metropolitana. En concreto, se analizan cuatro edificios, idénticos en materialidad y distribución, pero con diferentes orientaciones. La metodología de evaluación consideró un triple enfoque: normativo, de etiquetado y subjetivo; e involucra a los habitantes en el diagnóstico, quienes constante e inexplicablemente, han quedado marginados en el análisis de sus propias viviendas. Los resultados del estudio han evidenciado discrepancias entre la percepción de los residentes y el rango de confort que utiliza la calificación energética nacional vigente.

Palabras clave

confort térmico, etiquetado energético, vivienda social

ABSTRACT

KPD residential buildings, although simple and discrete, are emblematic of Chile. Their story in this country starts with an earthquake and is intertwined with the antagonistic governments of Salvador Allende and Augusto Pinochet. These buildings have remained outside current thermal regulations, and have become part of an extensive built housing stock that need to be diagnosed in terms of energy, to align them with domestic thermal requirements and, in this way, improve the quality of life of their inhabitants and contribute to what Chile has already committed to in terms of carbon neutrality. This article presents a thermal comfort evaluation case study of a KPD residential building complex in the Metropolitan Region. Concretely, four buildings are analyzed, each with the same materials and distribution, but with different orientations. The evaluation methodology considered a three-fold approach: regulatory, labeling and subjective and involved their inhabitants in the diagnosis, who had constantly and inexplicably been marginalized in previous analyses of their own homes. The results show discrepancies between the residents' perception and the comfort range used by the current energy rating system in Chile.

Keywords

thermal comfort, energy labeling, social housing

INTRODUCCIÓN

La historia de la KPD en Chile comienza el 8 de julio de 1971, durante el gobierno del presidente Salvador Allende, día en que un terremoto 7,7 Richter destruyó más de 20 mil viviendas. A raíz de ello, la Ex Unión Soviética donó al país una planta de paneles prefabricados de hormigón, incluyendo las maquinarias y asesoría técnica. La fábrica se instaló en Quilpué y se llamó K.P.D. (KrupnoPanelnoyde Domostroyenie), que significa "Panel de Concreto Grande" en ruso.

Los técnicos rusos trabajaron en la puesta en marcha y capacitación de los trabajadores chilenos, por lo que "desde un punto de vista técnico, la planta constituyó para Chile una experiencia única por tratarse de prefabricación pesada avanzada que incorporaba tecnologías nuevas con alto porcentaje de mecanización y automatización, tanto en la producción como el montaje" (Bravo Heitmann, 1996, p. 14).

La KPD se convirtió así en la mayor industria de prefabricación pesada de viviendas del país, capaz de producir 2.000 viviendas por año, ya que los paneles en hormigón integraban dentro de sus componentes todas las canalizaciones y anclajes para su ensamblaje en obra.

Una vez ocurrido el Golpe de Estado, en 1973, la planta fue allanada, se expulsaron a los técnicos soviéticos y se despidió al personal chileno. Posteriormente, estos últimos fueron recontratados, ya que solo ellos estaban capacitados para hacer producir a la fábrica, la que entonces pasó a llamarse VEP, Viviendas Económicas Prefabricadas El Belloto, y funcionó hasta el año 1981. En total, se llegaron a construir 153 edificios de departamentos, ubicados en Viña del Mar, Quilpué y Santiago (Brignardello Valdivia, 2017)

Por otro lado, actualmente el consumo energético residencial en Chile, considerando el uso final que se da a la energía, determina que un 53% viene destinado a calefacción y climatización (Corporación de Desarrollo Tecnológico, In-Data - CDT, 2019), por lo que no es de extrañar que la "Hoja de ruta" establecida por el Ministerio de Energía detecte como brecha en el sector residencial que "El nivel de confort energético, principalmente respecto a la calidad térmica que se experimenta en las edificaciones, es bajo o inexistente. Adicionalmente –y debido a lo anterior–, el consumo energético en las edificaciones en el país es ineficiente" (Ministerio de Energía, Gobierno de Chile, 2015, p. 48). La Fundación Europea por el Clima en su último estudio plantea que, para lograr la descarbonización del 100% del sector de la construcción residencial, se requieren políticas en cinco áreas, siendo la primera una mejora en la envolvente de edificios nuevos y existentes (CE Delft, 2020), por lo que el acondicionar dicho parque de viviendas pasa a ser prioritario dentro de la agenda país para dar cumplimiento a los acuerdos pactados en la reciente COP25, donde de manera voluntaria Chile se

compromete a la carbono-neutralidad para el año 2050 (United Nations Climate Change, 2019).

Estas emblemáticas construcciones forman parte del 67% de viviendas construidas antes del año 2000, cuando Chile no contaba con una normativa de exigencias de acondicionamiento térmico (Energy 2 Business SpA, 2020, p. 55), de manera que realizar un diagnóstico de su desempeño energético adquiere relevancia en la medida en que contribuye a visibilizar el problema de confort térmico que afecta a las viviendas sociales del país.

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Una vivienda debe ofrecer al morador condiciones de habitabilidad y confort en su interior, sin embargo, esta no constituye un elemento aislado, se enmarca dentro de un lugar, con un clima y una geografía determinados, donde construcciones y actividades vecinas también interactúan y pueden condicionar nuestro confort y la habitabilidad de dicha vivienda.

La descripción de confort es amplia y presenta varias discrepancias. Para este estudio se considera "confort térmico" el estado que describe un equilibrio de factores ambientales y personales que hacen que una persona se sienta satisfecha y cómoda en su entorno térmico (Nicol y Roaf, 2017).

El confort térmico va más allá de una mera satisfacción: la temperatura al interior de una vivienda debe ser suficiente para proteger a los residentes de los efectos nocivos para la salud. En países con climas templados o fríos, se ha propuesto los 18°C como una temperatura interior segura y bien equilibrada para proteger salud de la población en general durante las estaciones frías (World Health Organization [WHO], 2018), lo cual se relaciona con lo afirmado por Howden-Chapman, Roebbel y Chisholm (2017) quienes confirman que los hogares fríos contribuyen al exceso de mortalidad invernal y a morbilidad por enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Otros autores suman a lo anterior la salud mental, ya que la combinación de restricciones económicas y condiciones de vida frías y húmedas conduce directamente a problemas de salud física y estrés, el que una vez activado, junto con la ansiedad y la distorsión del estado anímico, opera globalmente, pudiendo afectar las funciones inmunes, cardiovasculares y hormonales (Liddell y Guiney, 2015).

Contrariamente a lo que pueda parecer en primera instancia, el tener viviendas frías no es exclusivo de climas severos, como evidencia el artículo de Daniel, Baker y Williamson (2019) contextualizado en Australia, que plantea que, aunque las temperaturas externas están lejos de ser extremadamente frías, las temperaturas internas se hallan bajo los estándares y no son satisfactorias para los ocupantes que, la mayoría de las veces, quisieran mayores temperaturas en su hogar. Esta situación se repite en el sur de España, donde un monitoreo en tres viviendas

sociales de edificios multifamiliares construidos antes de las reglamentaciones térmicas arrojó resultados similares, con sobre el 90% de horas fuera de la banda de confort (Escandón, Suárez y Sendra, 2017).

Por consiguiente, se presenta un doble problema: por una parte, un elevado consumo de energía para mantener temperaturas de confort en viviendas deficientes y, por otra, viviendas fuera de confort por la imposibilidad de las familias que las habitan de solventar este gasto. Ambas situaciones repercuten de manera negativa en la sociedad, ya sea generando emisiones por sobre lo admisible, o bien, mermando la salud de los habitantes, lo que impacta en los ya sobre-exigidos establecimientos de salud.

ESTADO DEL ARTE

La vivienda nueva es una demanda constante. En efecto, se estima que se necesitan mil millones de viviendas nuevas en todo el mundo para 2025 (United Nations Human Settlements Programme, UN-Habitat, 2016), lo que se agrega a la necesidad de disminuir y optimizar los consumos energéticos. Es por esto que a nivel mundial los países implementan reglamentaciones térmicas obligatorias hace ya varios años y proliferan numerosas certificaciones energéticas para los nuevos hogares, incorporándose además estrategias pasivas en los diseños; todo en busca de una mayor eficiencia. La vivienda existente también deberá alinearse a este escenario.

MARCO LEGAL EN CHILE

En materia de reglamentación térmica, la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, en adelante OGUC (Gobierno de Chile, 1992) impone los requisitos para envolvente opaca y traslúcida, y organiza el país en zonas térmicas. La zonificación a la que hace referencia la OGUC es una zonificación térmica, basada en grados día de calefacción (Ministerio de Vivienda y Urbanismo [MINVU] e Instituto de la Construcción, 2006, p. 8)

Estas exigencias, indicadas en el Artículo 4.1.10, han sido progresivas: la primera fue establecida en el año 2000, donde se definió la obligatoriedad de aislación térmica en techumbre; luego, en el año 2007, se incorporó a las exigencias el resto de la envolvente, abarcando muros, pisos ventilados y ventanas. En noviembre de 2015, se añade el Artículo 4.1.10 Bis, en el que se establece que los Planes de Prevención y/o Descontaminación Atmosférica prevalecen por sobre la Ordenanza. Estos planes son instrumentos de gestión ambiental tienen por finalidad reducir los niveles de contaminación. En la actualidad, existen 15 planes vigentes en Chile, en 10 de los cuales se considera el mejoramiento de la eficiencia térmica en las viviendas, por lo que sus exigencias superan las dictadas por la OGUC (Ministerio del Medio Ambiente, 2020).

Con respecto a viviendas existentes, y en cuanto a materia normativa, los mencionados requerimientos solo se aplican

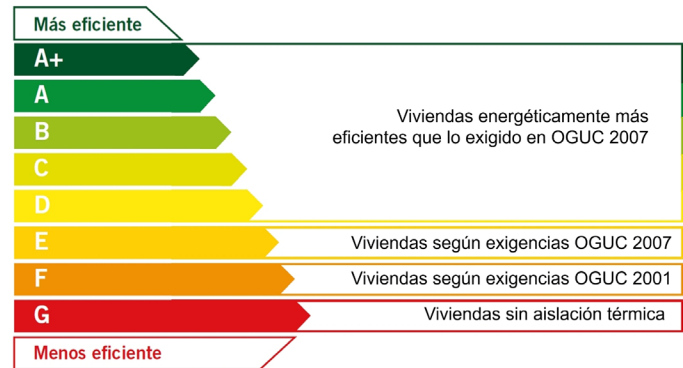


Figura 1. Relación entre etiquetas CEV y la reglamentación térmica nacional. Fuente: Elaboración de los autores en base a Manual CEV (MINVU, 2019).

en caso de ampliación, ya que al tramitar un permiso de construcción es necesario ingresar a la municipalidad respectiva el formulario de acreditación de cumplimiento para normativa de Acondicionamiento Térmico AT-01, en el que se detallan los requisitos a cumplir por la envolvente según la zona térmica y las soluciones constructivas utilizadas para esto, anexando memorias de cálculo, certificados de ensayos, fichas y planos que correspondan.

CALIFICACIÓN ENERGÉTICA DE VIVIENDAS (CEV).

La Calificación Energética de Viviendas, en adelante CEV, es un instrumento desarrollado en conjunto por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo y el Ministerio de Energía, vigente desde el año 2012, que hoy se encuentra en su versión 2.2. La CEV está diseñada para el territorio nacional, es aplicable a viviendas nuevas y existentes y se autodefine como una "evaluación objetiva y estandarizada que permite conocer y optimizar el requerimiento energético de una vivienda" (MINVU, 2019). Mediante ella, se busca que la eficiencia energética se transforme en un factor importante para la oferta y la demanda en viviendas, a través de un lenguaje atractivo para el consumidor final.

La CEV emite un informe de calificación energética y una etiqueta de eficiencia energética que entrega, entre otros, los siguientes indicadores:

- Demanda y consumo de calefacción [kWh/ m² año],
- Demanda y consumo de refrigeración [kWh/ m² año]
- Horas de desconfort, sobre y bajo la banda de confort (HD(+)), [h]

Las etiquetas en cambio poseen ocho niveles, desde la "A+" a la "G", los cuales se hallan vinculados a las etapas de la reglamentación térmica nacional, tal como se aprecia en la Figura 1.

Estas etiquetas son el resultado de una estimación teórica de los requerimientos de energía para calefacción,

enfriamiento, agua caliente sanitaria e iluminación de una vivienda en Chile. En ese marco, el sistema CEV trabaja con planillas de balance térmico dinámico llamadas PBDT, las que realizan un balance térmico cada 60 segundos, evaluando la temperatura al interior del recinto, con base en los flujos de las distintas variables de entrada.

Las variables consideradas son:

- Cargas internas: corresponden a potencias tabuladas.
- Radiación: datos climáticos de la zona, que consideran obstrucciones cercanas y lejanas.
- Envoltente: corresponde a la transferencia de calor asociada a esta.
- Infiltraciones: corresponden a renovaciones de aire por infiltraciones (RAH). tabuladas (Universidad del Bío-Bío, Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción, CITEC UBB, Dirección de Extensión en Construcción, DECON UC, 2014).
- Ventilación: renovaciones de aire hora o tasa de ventilación.
- Puentes térmicos: Corresponden a coeficientes de transmitancia [U] asociados a distintos puentes térmicos.
- Inercia térmica: Corresponden a valores tabulados para distintas materialidades.

Estos elementos son evaluados y comparados con una vivienda de referencia calificada con la letra E, que corresponde al estándar actual de construcción, es decir, normado según la OGUC. Es importante destacar que las demandas de referencia son diferentes para viviendas unifamiliares y multifamiliares, denominadas casas y departamentos, respectivamente.

DISEÑO V/S OPERACIÓN

Las certificaciones energéticas y los reacondicionamientos térmicos de viviendas, vienen implementándose hace un tiempo en distintas partes del mundo, acumulando así evidencias y experiencias que abren paso al análisis y al debate.

Así, Ramos, Gago, Labandeira y Linares (2015) afirman que en el rubro residencial las soluciones convencionales de eficiencia energética como las normas de construcción o estándares elevados, no están siendo efectivas, dado que este sector está aumentando su consumo en la mayoría de los países, lo cual se puede atribuir a un problema de comportamiento y de información. Evaluaciones en terreno están encontrando diferencias de hasta 2,5 veces en los ahorros proyectados en energía, de manera que queda cuestionado el enfoque económico de las políticas de eficiencia energética, que las asume como inversiones beneficiosas que se pagan por sí mismas. Los modelos de ingeniería en que tales políticas se basan están siendo desmentidos por la evidencia (Fowlie, Greenstone y Wolfram, 2015), en especial cuando el consumo de energía del edificio después de

la ocupación difiere notablemente del diseñado. En ese sentido, se han registrado muchos edificios ecológicos que ahorran menos energía de lo esperado, a partir de lo cual se ha llegado incluso a postular que no se puede observar una relación clara entre el uso real de energía y el nivel de certificación de los edificios (Geng, Ji, Wa, Lin y Zhu, 2019).

EL FACTOR USUARIO

La vivienda es un elemento diseñado por una persona, pero utilizada por otra y, desde ese punto de vista, la experiencia del usuario con respecto a la operación de dicha vivienda es muy relevante. A la hora de recabar información el habitante podrá señalar realmente cómo funciona la vivienda en operación. Sin embargo, pocas veces este es interpelado con esos propósitos, quedando fuera de la evaluación de su propia residencia. En algunos estudios de caso se ha evidenciado que para lograr condiciones de confort se depende, en gran medida, de la voluntad y capacidad de los usuarios, por lo que debe existir una correcta interacción entre clima, edificio y usuarios que actualmente no se ve en curso (Serghides, Dimitriou, Kyprinou y Papanicolas, 2017).

El rol protagónico de los hábitos de los usuarios en la demanda energética del hogar es un hecho, siendo el manejo ineficiente de los sistemas una importante fuente de desperdicio de energía (Cottone, Gaglio, Lo Re y Ortolani, 2015), por lo que debiera existir de parte de los profesionales de la construcción una transferencia de estrategias operativas al habitante para mermar las diferencias entre el diseño de un proyecto y su evaluación posterior al uso. Efectivamente, en el control personal se encuentran las mayores oportunidades en cuanto a rendimiento energético y satisfacción con el entorno interior (Altomonte, Schiavon y Ken, 2019). En este contexto, el modelo adaptativo es el que mayores ventajas obtendría con la interacción con el usuario (Bienvenido-Huertas, Rubio-Bellido, Pérez-Fargallo y Pulido-Arcas, 2020).

La importancia de incluir a los habitantes en las mejoras energéticas de sus viviendas se evidencia en un estudio de caso realizado en México, que revela que al confrontar viviendas nuevas con aislamiento y mejoras de eficiencia energética v/s otras sin estas características, no se alcanzaron las estimaciones previstas en disminución de consumos, lo cual se adjudicó al comportamiento humano. De esta forma, se alerta sobre la urgencia de incorporar este factor en los modelos utilizados (Davis, Martínez y Taboada, 2020). La educación en materia de energía es compleja ya que se revelan deficiencias en las investigaciones realizadas en alfabetización energética que impiden comparaciones directas y que no logran ser un aporte a las autoridades políticas en materias de educación a los usuarios en la conservación y gestión de la energía doméstica (Van den Broek, 2019).

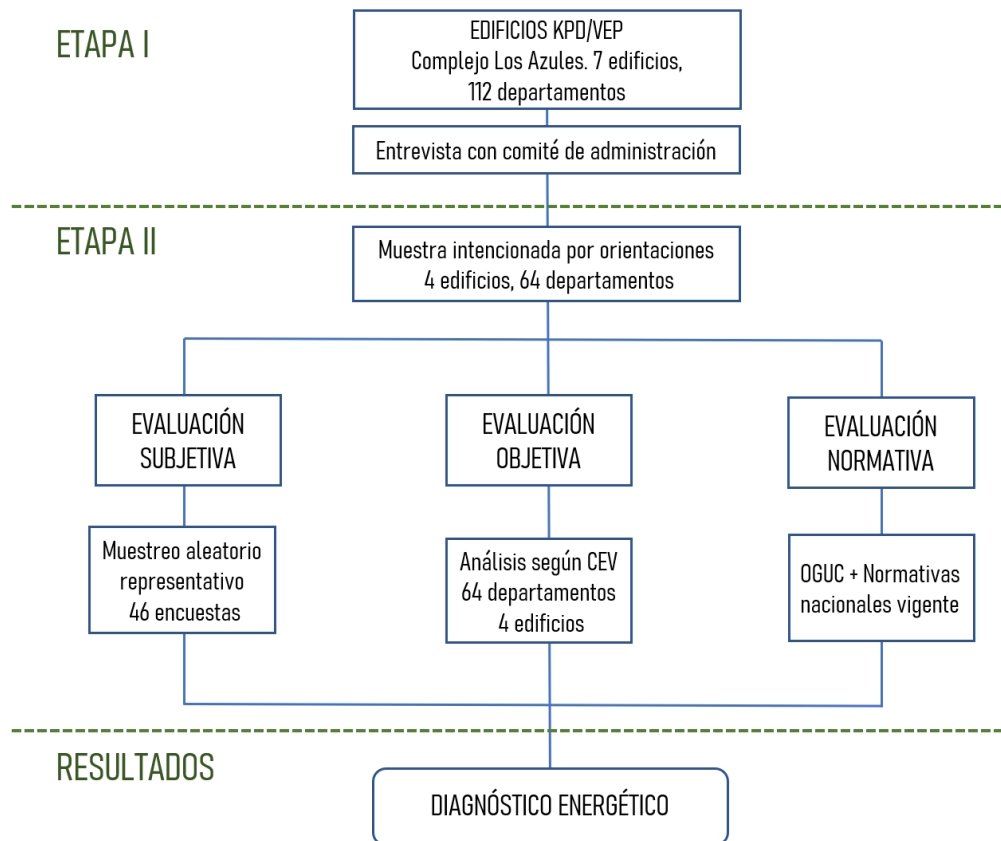


Figura 2: Esquema metodología de diagnóstico. Fuente: Elaboración de los autores.

Es preciso señalar que también existen discrepancias entre encuestas y monitoreos, las que se intentan explicar por una errada ubicación de los sensores o por las variaciones de temperatura, lo cual causaría una disconformidad superior a la esperada (Díaz Lozano Vakalis, Touchiea, Tzekovac y Siegela, 2018).

METODOLOGÍA

La metodología de diagnóstico contempló dos etapas, cuyo esquema puede verse en la Figura 2. La primera etapa correspondió a la recopilación de antecedentes técnicos, para lo cual se escogió una construcción representativa, llevándose a cabo una entrevista con el comité de administración del condominio, quienes aportaron la información inicial y, luego, con el evaluador, que otorga información complementaria. Recopilados los datos, se inició la segunda etapa, que correspondió al análisis del desempeño energético en tres frentes: normativo, que establece el grado de cumplimiento de lo dispuesto en la OGUC y que conlleva la verificación de envolvente translúcida y opaca, donde se utiliza la normativa vigente para el cálculo de transmitancias (Instituto Nacional de Normalización [INN], 2007); de etiquetado, que utiliza la herramienta CEV y que permite evaluar el desempeño energético en forma indirecta; y, de percepción, que posibilita la inclusión del punto de

vista del habitante, lo que es relevante para evidenciar la concordancia (o la incoherencia) de los resultados de la herramienta de calificación energética. En virtud de los resultados de este triple enfoque, se obtuvo el diagnóstico térmico del conjunto habitacional.

CASO DE ESTUDIO

El condominio objeto de este estudio se denomina "Conjunto Los Azules", se encuentra en la región Metropolitana, en Santiago, comuna de Macul, y fue construido el año 1979, por VEP.

ANTECEDENTES TÉCNICOS

EMPLAZAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN

El "Conjunto Los Azules" se ubica en Avenida Quilín, entre las calles Castillo Urizar y General Óscar Bonilla, comuna de Macul, en la Ciudad de Santiago de Chile y lo componen siete edificios idénticos. La Figura 3 muestra una vista general del conjunto.

Cada edificio consta de cuatro pisos, una planta de 32 x 10 m y una altura aproximada de 12 m, además de dos escaleras y cuatro departamentos por nivel, que suman 16



Figura 3. Vista general del conjunto habitacional "Conjunto Los Azules". Fuente: Elaboración de los autores en base a Google Earth.

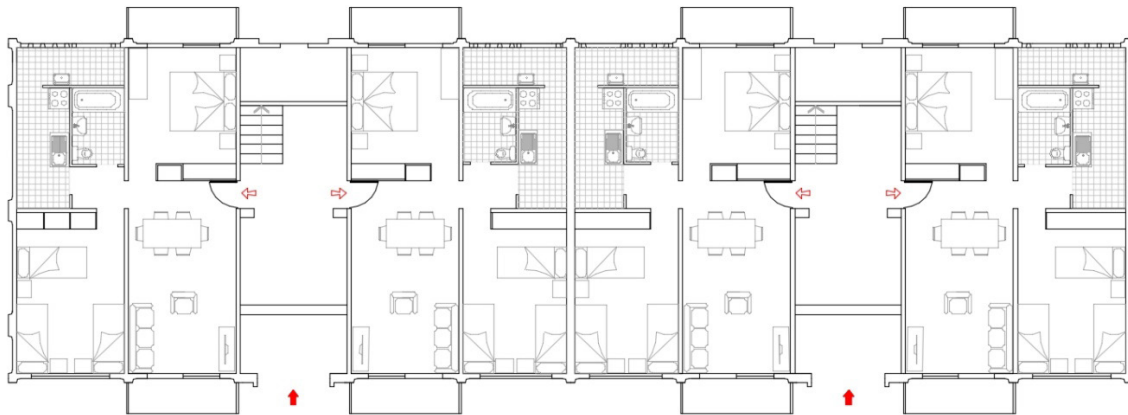


Figura 4. Distribución de los departamentos, piso 1. Fuente: Elaboración de los autores.

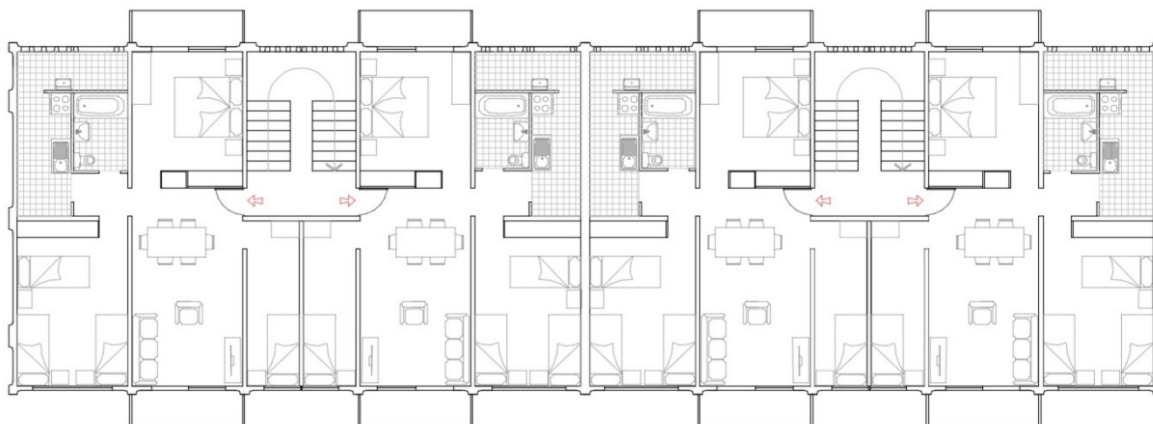


Figura 5. Distribución de los departamentos, pisos 2, 3 y 4. Fuente: Elaboración de los autores.

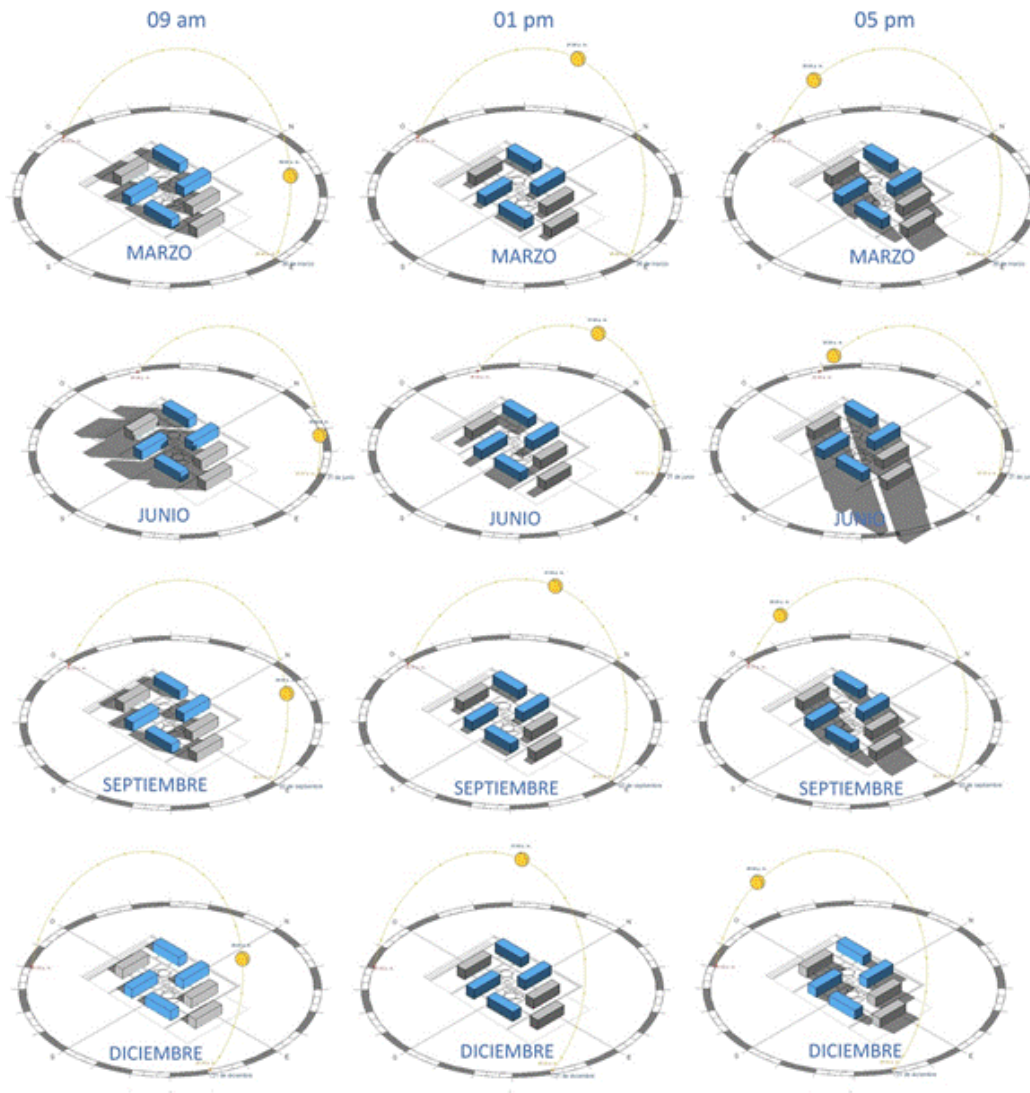


Figura 6. Trayectoria solar en los edificios analizados, en tres horarios y en las cuatro estaciones. Fuente: Elaboración de los autores.

departamentos por edificio y 112 en total. La distribución en planta del edificio se expone en las Figuras 4 y 5. Según se puede apreciar, en el primer piso, estos departamentos son más pequeños pues incluyen dos dormitorios, a diferencia de los pisos superiores que poseen tres dormitorios cada uno.

Estos edificios, si bien idénticos, varían en su orientación, como constata la Figura 3.

El estudio considera la fachada del comedor como la principal, por ser la que posee mayor superficie expuesta, de modo que determina la orientación de los edificios.

La orientación es, sin duda, una de las principales estrategias de diseño pasivo, la que influye de manera importante la demanda energética de calefacción y refrigeración del proyecto. Como ejemplo en este sentido, del conjunto de edificios de este estudio, la Figura 6 muestra la trayectoria

solar anual en tres horarios, para las cuatro estaciones del año.

Estando los departamentos en estudio en la ciudad de Santiago, se advirtió lo que sigue:

- Orientación norte: recibe radiación solar directa durante la mayor parte del día.
- Orientación sur: no recibe radiación solar directa en gran parte del año.
- Orientación este: recibe radiación solar directa por la mañana.
- Orientación oeste: recibe radiación solar durante la tarde.

Cabe notar que la CEV analiza la radiación solar y las posibles obstrucciones a esta, en dos modalidades: factor de accesibilidad de la ventana (FAV), que evalúa cada una de ellas y su orientación, así como también la existencia de

obstrucciones cercanas; y factor de accesibilidad respecto a elementos de sombra remotos (FAR), que evalúa la existencia de obstrucciones remotas para cada fachada. Ambos análisis se incluyen en esta investigación.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Los datos necesarios de considerar para el estudio del comportamiento térmico del Edificio VEP Prefabricado son los correspondientes a la configuración y materialidad de su envolvente.

- Muros: sistema de paneles prefabricados de hormigón armado. Hormigón R28=200 kg/cm²;
- Techumbre: paneles de losa de 4° piso, sobre los cuales descansan cerchas de pino insigne estructural con pares de 2"x 3", con una aislación térmica de lana mineral de 0.05m de espesor;
- Piso: de tipo ventilado, su estructura está constituida por los paneles de losa de 1° piso. Dicho piso posee una sobrelosa de hormigón liviano de 8cm de espesor;
- Ventanas: de tipo corredera, con marco de aluminio y vidrio monolítico.

RESULTADOS

ENFOQUE NORMATIVO

La OGUC presenta requisitos por zona térmica para la envolvente opaca y traslúcida, no considerando la orientación de las construcciones, por lo que el análisis se aboca a la tipología constructiva, es decir, no a un edificio en particular sino a todos.

Para verificar el cumplimiento de transmitancias establecidas en la envolvente opaca se puede optar por cuatro métodos, los que en el caso de una vivienda existente se reducen a dos: certificados de ensayo de un laboratorio reconocido o cálculo. En este estudio se trabajó con memoria de cálculo, realizada según la NCh853-2007 Acondicionamiento térmico - Envolvente térmica de edificios - Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas (INN, 2007). En el caso de los muros, fueron calculadas tres tipologías, según espesor.

Para verificar el cumplimiento de la envolvente traslúcida las exigencias varían según el tipo de vidrio involucrado, siendo estas exigencias un porcentaje máximo de superficie vidriada con respecto a los paramentos verticales de la envolvente. Lo anterior se puede realizar mediante cálculo directo de las superficies o mediante ponderaciones; estas últimas son válidas solo en algunas zonas térmicas. Aquí se trabajó con cálculo directo.

La exigencia para ventanas de vidrio monolítico en la zona 3 es del 25%, porcentaje con el que cumplen todos los departamentos evaluados.

La Tabla 1 resume las exigencias normativas y la situación del condominio en estudio.

| Elementos de la envolvente | Exigencia normativa | Situación evaluada | Estado |
|-------------------------------|---|--|-----------|
| Muros | $U \leq 1,90 \text{ W/m}^2\text{K}$ | $U = 4,70 \text{ W/m}^2\text{K}$ $U = 4,11 \text{ W/m}^2\text{K}$ $U = 3,68 \text{ W/m}^2\text{K}$ | No cumple |
| Pisos ventilados | $U \leq 0,70 \text{ W/m}^2\text{K}$ | $U = 1,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ | No cumple |
| Techumbre | $U \leq 0,47 \text{ W/m}^2\text{K}$ | $U = 0,70 \text{ W/m}^2\text{K}$ | No cumple |
| Ventanas de vidrio monolítico | Superficie < 25% de elementos verticales de la envolvente | Inferior al 20% | Sí cumple |

Tabla 1. Evaluación normativa del conjunto.
 Fuente: Elaboración de los autores.

Según la normativa vigente la comuna de Macul corresponde la zona climática Central Interior (CI), la que viene caracterizada como

Zona de temperaturas templadas con oscilación diurna moderada aumentando hacia la precordillera. Nubosidad alta. Radiación solar intensa en verano. Inviernos cortos de 4 a 5 meses. Lluvias moderadas, suele nevar en las partes altas (>500m). Heladas desde mayo a agosto. El sur algo húmedo. Vientos moderados del S y SO. (INN, 2019, p. 5)

Cabe añadir que la comuna de Macul no posee un Plan de Prevención y/o Descontaminación Atmosférica vigente en materia de mejoramiento de la eficiencia térmica en las viviendas, por lo que se aplicaron los valores OGUC.

ENFOQUE DE ETIQUETADO

La CEV, a diferencia de la normativa, sí considera las orientaciones, de modo que los resultados se presentarán por orientación.

La Figura 7 ilustra la ubicación de los siete edificios. En concreto, se analizaron las cuatro orientaciones y se evaluaron los edificios 2, 3, 4 y 5.

La herramienta CEV se aplicó a los cuatro blocks del estudio, cada uno de los cuales posee 16 departamentos, por lo que se realizaron 64 evaluaciones.

En la Figura 8 se puede observar la fachada tipo de los edificios, que luego viene esquematizada según sus diferentes orientaciones para una lectura directa de las etiquetas obtenidas en la calificación.

La herramienta CEV asigna a la vivienda una letra en base a una demanda total, como se observa en la Figura 8 y, a su

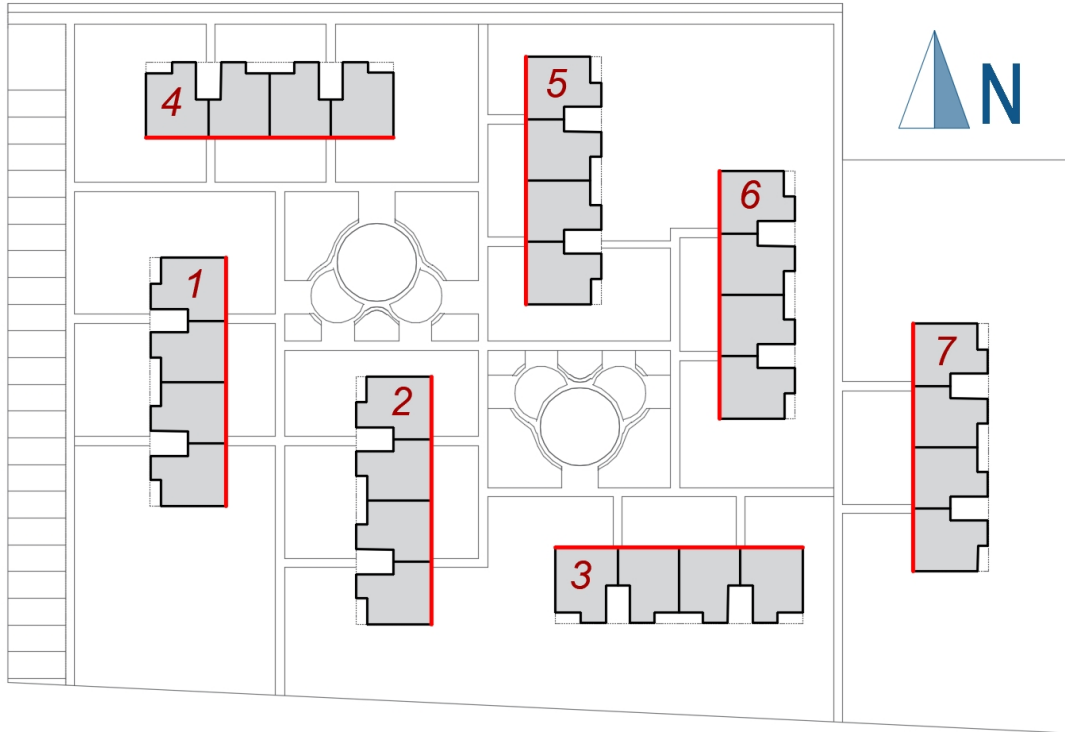


Figura 7. Orientaciones. Fachada principal evidenciada en rojo. Fuente: Elaboración de los autores.

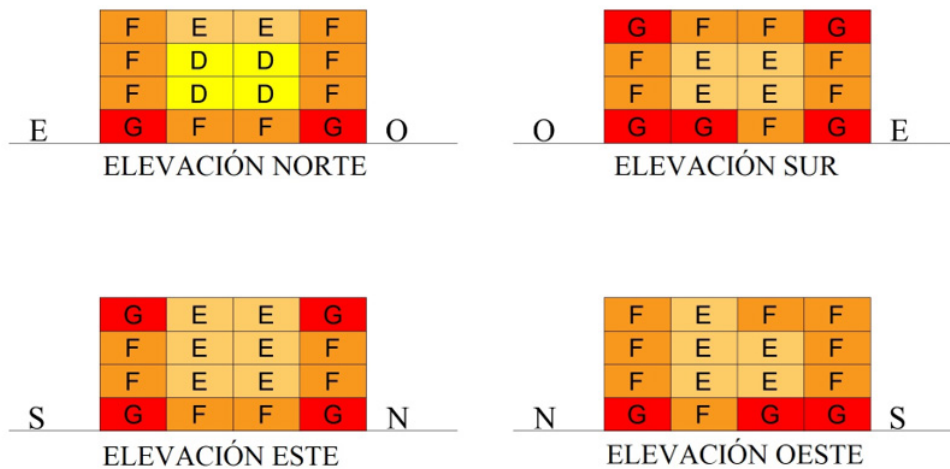


Figura 8. Calificaciones según orientación. Fuente: Elaboración de los autores.

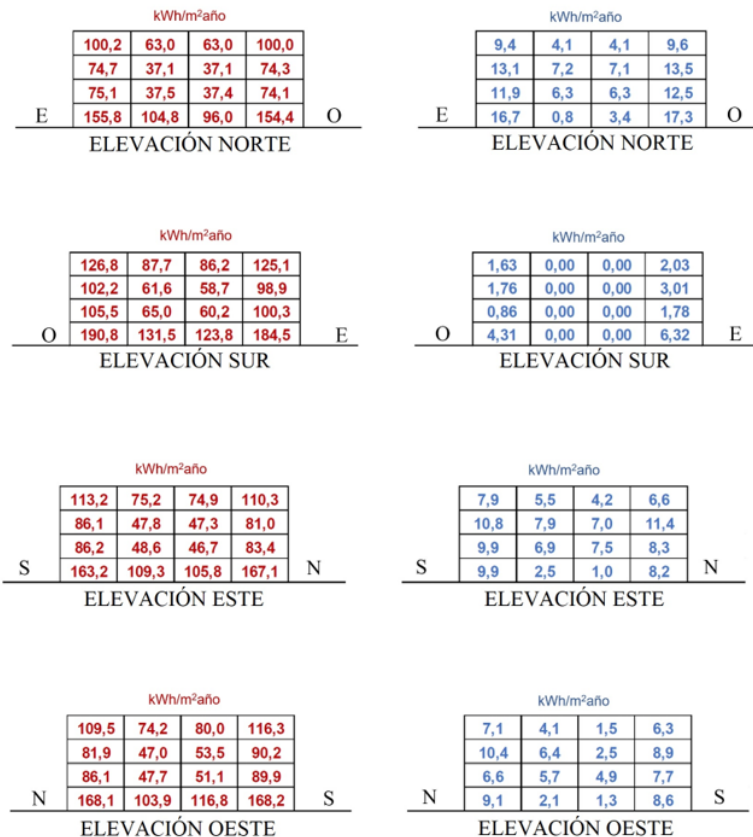
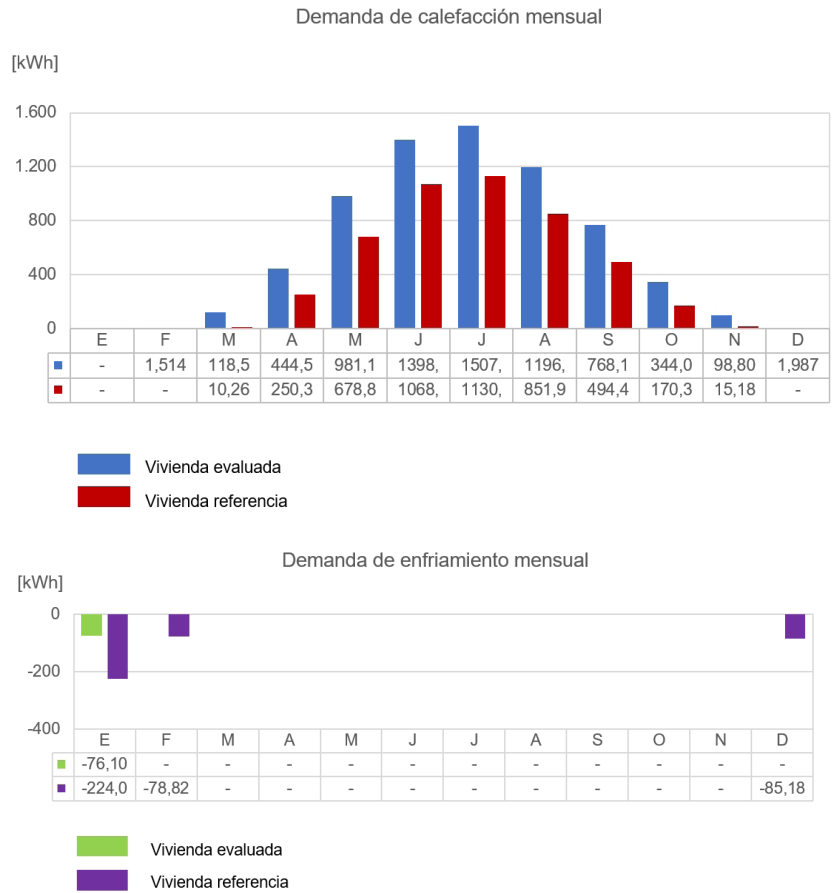


Figura 9. Demanda de calefacción mensual para un departamento. Fuente: Elaboración de los autores en base a planilla de datos entregados por CEV.
 Figura 10. Demanda de enfriamiento mensual para un departamento. Fuente: Elaboración de los autores en base a planilla de datos entregados por CEV.
 Figura 11. Demandas de calefacción y enfriamiento según orientación. Fuente: Elaboración de los autores.

| Concepto | Sensación térmica | Voto de confort | Primavera | Verano | Otoño | Invierno |
|-----------------|-------------------|-----------------|-----------|--------|-------|----------|
| Insatisfactorio | Mucho frío | -3 | | | | X |
| | Frío | -2 | | | | |
| Satisfactorio | Algo de frío | -1 | X | | X | |
| | Neutro | 0 | | | | |
| | Algo de frío | +1 | | | | |
| Insatisfactorio | Calor | +2 | | | | |
| | Mucho calor | +3 | | X | | |

Tabla 2. Ejemplo de respuesta sobre sensación térmica del departamento sin calefacción ni climatización. Fuente: Elaboración de los autores.

vez, entrega el detalle para las demandas de calefacción y enfriamiento, tanto en forma mensual (Figura 9 y 10) como anual (Figura 11), que corresponde a los resultados de un departamento usado a manera ilustrativa.

ANÁLISIS SUBJETIVO: ENCUESTAS

Para la evaluación subjetiva se realizó una encuesta en terreno a los habitantes, en persona, con el objetivo de que fueran los usuarios quienes declararan la sensación térmica de su departamento. La encuesta se aplicó a una muestra de la población, utilizando un nivel de confianza del 80% y un error de muestreo del 5% y , con lo cual resultó una muestra de 46 unidades, las que vienen sorteadas para la elección de los departamentos.

La encuesta se efectuó a la dueña o dueño de casa, de quienes se obtuvieron respuestas de un 65% y 35%, respectivamente.

La consulta solicitaba dar un voto de confort para cada estación del año, precisando si la sensación térmica en el departamento es satisfactoria o insatisfactoria, como se expresa en la Tabla 2.

Los resultados del análisis subjetivo se presentan en la Figura 12, donde se agrupan en gráficos por estación.

ANÁLISIS

Como se mencionó más arriba, se analizó, a manera de ejemplo, el comportamiento de un departamento, según el triple enfoque señalado en la metodología de diagnóstico utilizada, confrontando normativa, CEV y encuesta, para ilustrar parte de la información que se nos entrega, más allá de la letra.

Según CEV el rango de confort de la ciudad de Santiago es el indicado en la Tabla 3.

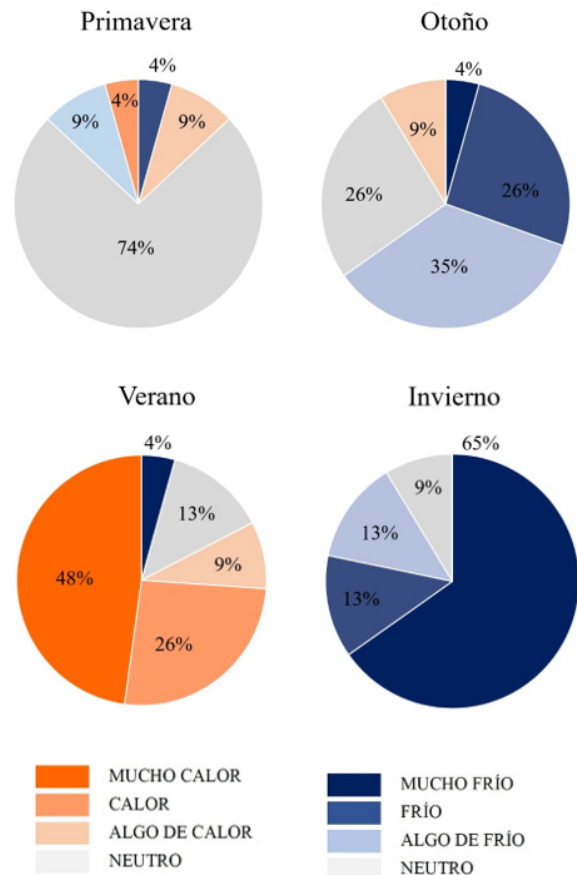


Figura 12. Voto de confort según los habitantes de las viviendas. Fuente: Elaboración de los autores.

La temperatura de confort que considera la CEV para cada zona térmica, corresponde a valores determinados con el método desarrollado por Dear y Brager, modelo adaptativo de aplicación generalizada, que determina la temperatura de confort, solo en base a la temperatura exterior medida con un termómetro de bulbo seco.

| | Enero | Abril | Julio | Octubre |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| T° máx. | 26,6 °C | 25,0 °C | 23,6 °C | 25,1 °C |
| T° mín. | 21,6 °C | 20,0 °C | 18,6 °C | 20,1 °C |

Tabla 3. Valores límites de temperatura media de confort en °C. Zona térmica de Santiago. Valores determinados con método Dear y Brager. Fuente. Elaboración de los autores en base a Manual de procedimientos. Calificación energética de viviendas en Chile (MINVU, 2019, p. 239).

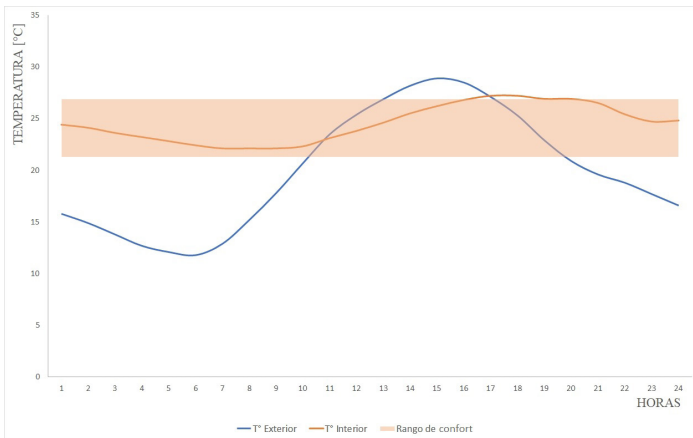


Figura 13. Día representativo de enero (verano). Fuente: Elaboración de los autores en base a planilla de datos entregados por CEV.

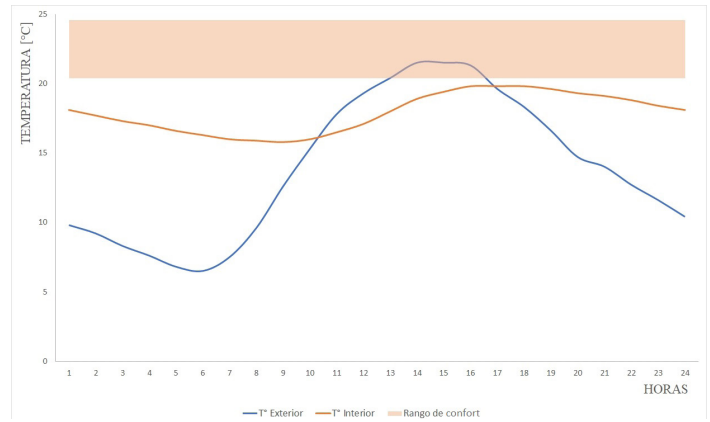


Figura 14. Día representativo de abril (otoño). Fuente: Elaboración de los autores

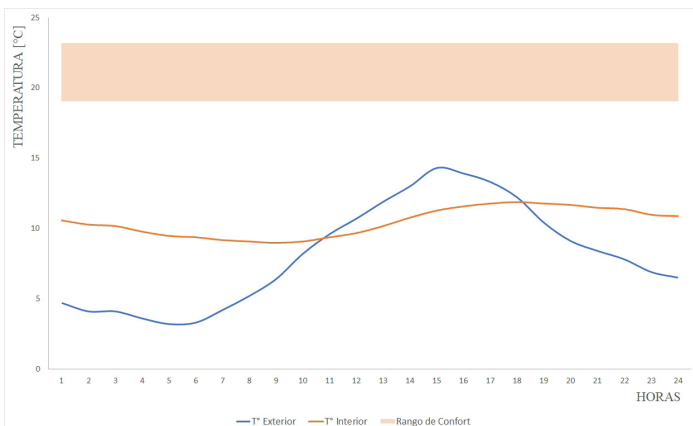


Figura 15: Día representativo de julio (invierno). Fuente: Elaboración de los autores.

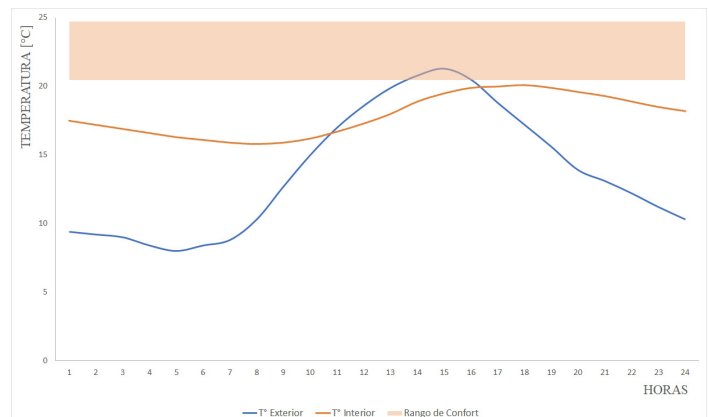


Figura 16. Día representativo de octubre (primavera). Fuente: Elaboración de los autores.

Las Figuras 13, 14, 15 y 16 muestran las oscilaciones de la temperatura al interior y exterior de un departamento, durante las veinticuatro horas de un día, para las cuatro estaciones del año.

Al confrontar esta información con la encuesta de la Tabla 2 (referente al mismo departamento), resulta concordante con la sensación de frío que se declara en invierno, otoño y primavera. Sin embargo, en el mes de enero, si bien la temperatura al interior de la vivienda se encuentra, según la norma, dentro de la zona de confort, el encuestado declara una situación insatisfactoria, con "mucho calor".

CONCLUSIÓN

Después de haber realizado el análisis térmico de una construcción de los años '70, no sorprende el hecho de que todas estas viviendas se encuentren actualmente fuera de norma, no obstante, sí sorprende la resignación de sus habitantes, quienes se manifiestan desinformados e incrédulos ante la posibilidad de mejorar dicha situación.

El triple enfoque del estudio, evidenció puntos de encuentro y de desencuentro entre la normativa, la calificación energética y la información entregada por

el usuario. Por una parte, a pesar de que el 100% de estas viviendas se encuentran fuera de norma, la CEV indica que solo un 67% de los departamentos son deficientes en relación con el actual estándar de reglamentación térmica, es decir, califican como F o G.

Al separar los requerimientos energéticos para calefacción y enfriamiento, la CEV señala que el 100% de las viviendas en verano poseen una demanda de enfriamiento mínima que garantiza que el departamento se encuentre en confort, sin mediar sistemas de climatización, lo que se aleja de la percepción de sus habitantes, quienes declaran -en un 83% de los casos- que durante el verano no se encuentran en un estado de confort térmico, sino con calor. Para la calefacción, en cambio, se evidenció mayor concordancia. Los usuarios declaran, en un 91%, sentir frío, estando, efectivamente, bajo la curva de confort térmico en todas las viviendas. Analizando las orientaciones, el edificio con orientación sur, presenta una mayor cantidad de departamentos en disconformidad, pues 3 de cada 4 son clasificados con letra F o G, pero son estos los que exhiben menor demanda de enfriamiento del conjunto, lo cual concuerda con la percepción del residente. Esta incongruencia en los resultados se debe probablemente a que la calificación energética no consideraba, en sus inicios, el sobrecalentamiento en la evaluación; y, aunque se ha avanzado en ese sentido, sin duda queda camino por recorrer.

El estudio sobre viviendas existentes aquí expuesto otorgó información relevante acerca del confort térmico del habitante, lo que finalmente permitió encontrar esta discrepancia, que podría ser corroborada con mediciones directas, en una futura investigación, con miras a perfeccionar las demandas de enfriamiento que determina la herramienta.

Sería muy útil que la CEV separara las etiquetas de calefacción y enfriamiento, de manera de que el proyecto pudiera ser evaluado fácilmente por el comprador. Actualmente, la etiqueta es única y, si bien, la información desglosada está presente, se expresa a través de gráficos, a veces muy especializados, que se alejan de la comprensión de un comprador promedio. Esto se opone claramente al espíritu de la iniciativa, que pretendía acercarse a los consumidores con un lenguaje claro y atractivo.

No cabe duda de que los icónicos departamentos KPD requieren una rehabilitación energética, la que ahora queda sujeta a la organización de la comunidad, o sea, a la posibilidad de conseguir fondos para concretarlas y al monto de estos. Desde ese horizonte, la encuesta es de gran ayuda ya que se revela como una herramienta de aplicación fácil, práctica y certera, que involucra en primera persona a los residentes en el proceso de evaluación, proporcionando información

relevante del confort térmico familiar e involucrando a las personas en la revalorización del propio domicilio.

La organización, por parte de las comunidades, es una de las principales limitantes que acusa el Ministerio para la entrega de fondos, por lo que considerar la participación del habitante de la vivienda, a través de la encuesta, que incluye la citada metodología, puede contribuir a disminuir la brecha aquí evidenciada para, en definitiva, reforzar el compromiso de los vecinos con su entorno y revalorizar el territorio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Altomonte, S., Schiavon, S. y Ken, M. (2019). Indoor environmental quality and occupant satisfaction in green-certified buildings. *Building Research & Information*, 47, 255–274. DOI: <https://doi.org/10.1080/09613218.2018.1383715>.

Bienvenido-Huertas, D., Rubio-Bellido, C., Pérez-Fargallo, A. y Pulido-Arcas, J. (2020). Energy saving potential in current and future world built environments based on the adaptive comfort approach. *Journal of Cleaner Production*, 249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119306>.

Bravo Heitmann, L. (1996). Vivienda social industrializada: la experiencia chilena (1960- 1995). *INVI*, 11(28), 14-15. Recuperado de <http://revistainvi.uchile.cl/index.php/INVI/article/view/206/181>

Brignardello Valdivia, A. (2017). *KPD. Historia social y memoria de una fábrica soviética en Chile*. Chile: América en Movimiento.

CE Delft (2020). *Zero carbon buildings 2050. Background report*. Recuperado de <https://www.cedelft.eu/en/publications/download/2913>

Corporación de Desarrollo tecnológico, In-Data (CDT). (2019). *Informe final de usos de la energía de los hogares de Chile. 2018*. Recuperado de https://www.dropbox.com/s/zika2we9vqv9oc/04%20Caracterizaci%C3%B3n_Residencial_2018.pdf?dl=1

Cottone, P., Gaglio, S., Lo Re, G. y Ortolani, M. (2015). User activity recognition for energy saving in smart homes. *Pervasive and Mobile Computing* 16, 156-170. DOI: [doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.pmcj.2014.08.006](http://dx.doi.org/10.1016/j.pmcj.2014.08.006)

Daniel, L., Baker, E. y Williamson, T. (2019). Cold housing in mild-climate countries: A study of indoor environmental quality and comfort preferences in homes, Adelaide, Australia. *Building and Environment* 151, 207–218 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.037>.

- Davis, L., Martínez, S. y Taboada, B. (2020). How effective is energy-efficient housing? *Journal of Development Economics*, 143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2019.102390>.
- Díaz Lozano, E., Vakalis, D., Touchiea, M., Tzekovac, E. y Siegela, J. (2018). Thermal comfort in multi-unit social housing buildings. *Building and Environment*, 144, 230–237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.024>.
- Energy 2 Business SpA (2020). *Trayectoria del Sector Energía hacia la Carbono Neutralidad en el contexto del ODS7*. Recuperado de http://generadoras.cl/media/page-files/1321/Informe_final_Estudio%20Carbono%20Neutralidad.pdf
- Escandón, R., Suárez, R. y Sendra, J. (2017). On the assessment of the energy performance and environmental behaviour of social housing stock for the adjustment between simulated and measured data: The case of mild winters in the Mediterranean climate of southern Europe. *Energy and Buildings*, 152, 418–433. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.063>.
- Fowlie, M., Greenstone, M. y Wolfram, C. (2015). Do Energy Efficiency Investments Deliver? Evidence from the Weatherization Assistance Program. *NBER - National Bureau of Economic Research*, Working Paper 21331. Recuperado de <https://www.nber.org/papers/w21331.pdf>
- Geng, Y., Ji, W., Wa, Z., Lin, B. y Zhu, Y. (2019). A review of operating performance in green buildings: Energy use, indoor environmental quality and occupant satisfaction. *Energy & Buildings* 183, 500–514 <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.017>.
- Gobierno de Chile (1992). Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones OGUC. Diario Oficial de la República de Chile, Chile. Recuperado de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=8201&f=2020-06-13>
- Howden-Chapman, P., Roebbel, N. y Chisholm, E. (2017). Setting Housing Standards to Improve Global Health. *International journal of environmental research and public health*, 14(12). DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph14121542>.
- Instituto Nacional de Normalización (INN) (2007). NCh853 Acondicionamiento térmico. *Envolvente térmica de edificios - Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas*. Santiago, Chile. Recuperado de <http://tipbook.iapp.cl/ak/7ba2f4bd8e4ba3715cad4afabda5061914006c38/embed/view/nch853>
- Instituto Nacional de Normalización (INN) (2019). NCh1079 Arquitectura y construcción. *Zonificación climática y térmica para el diseño de edificaciones*. Santiago, Chile.
- Liddell, C. y Guiney, C. (2015). Living in a cold and damp home: frameworks for understanding impacts on mental well-being. *Public Health*, 129(3), 191-199. DOI: [10.1016/j.puhe.2014.11.007](https://doi.org/10.1016/j.puhe.2014.11.007).
- Ministerio de Energía, Gobierno de Chile (2015). *Hoja de Ruta al 2050*. Chile. Recuperado de https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/hoja_de_ruta_cc_e2050.pdf
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) (2019). *Manual de procedimientos. Calificación energética de viviendas en Chile*. Recuperado de <https://www.calificacionenergetica.cl/manuales-cev/>
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) e Instituto de la Construcción (2006). Manual de Aplicación Reglamentación Térmica. Chile. Obtenido de https://www.iconstruccion.cl/documentos_sitio/6186_Manual_Parte1.pdf
- Ministerio del Medio Ambiente (MMA) (2020). *Planes de descontaminación atmosférica*. Recuperado de <https://ppda.mma.gob.cl/>
- Nicol, J. y Roaf, S. (2017). Rethinking thermal comfort. *Building Research & Information*, 45(7), 711-716. DOI: [10.1080/09613218.2017.1301698](https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1301698)
- Ramos, A., Gago, A., Labandeira, X. y Linares, P. (2015). The Role of Information for Energy Efficiency in the Residential Sector. *Energy Economics*, 52, S17–S29. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2015.08.022>.
- Serghides, D., Dimitriou, S., Kyprianou, I. y Papanicolas, C. (2017). The Adaptive Comfort Factor in Evaluating the Energy Performance of Office Buildings in the Mediterranean Coastal Cities. *Energy Procedia*, 134, 683-691. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.588>.
- United Nations Climate Change (2019). *Annual Report 2019*. Recuperado de https://unfccc.int/sites/default/files/resource/unfccc_annual_report_2019.pdf
- United Nations Human Settlements Programme, UN-Habitat. (2016). *Urbanization and Development. Emerging Futures. World Cities Report 2016*. Recuperado de <https://unhabitat.org/sites/default/files/download-manager-files/WCR-2016-WEB.pdf>
- Universidad del Bío-Bío, Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción, CITEC UBB, Dirección de Extensión en Construcción, DECON UC (2014). *Manual de Hermeticidad al Aire de las Edificaciones*. Concepción, Chile. Recuperado de http://construccionsustentable.uc.cl/images/Documentos/Manual_de_hermeticidad_al_aire_de_edificaciones.pdf

Van den Broek, K. (2019). Household Energy Literacy: A critical review and a conceptual typology. *Energy Research & Social Science*, 57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101256>.

World Health Organization (WHO). (2018). *WHO Housing and health guidelines*. Recuperado de <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/276001/9789241550376-eng.pdf>





INFLUENCIA EN EL RENDIMIENTO ENERGÉTICO EN EDIFICIOS HISTÓRICOS PROVOCADO POR EL ENTORNO URBANO Y LAS MODIFICACIONES DE PROYECTO: EL CASO DE LA CASA DUCLÓS

Recibido 25/08/2020
Aceptado 05/12/2020

INFLUENCE ON ENERGY PERFORMANCE IN HISTORICAL BUILDINGS CAUSED BY THE URBAN ENVIRONMENT AND PROJECT MODIFICATIONS: THE CASE OF THE DUCLÓS HOUSE

DAVID BIENVENIDO-HUERTAS

Doctor en Arquitectura

Investigador, Departamento de Construcciones Arquitectónicas II
Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior
de Ingeniería de Edificación
Sevilla, España

<https://orcid.org/0000-0003-0716-8589>

jbienvenido@us.es

ISIDRO CORTÉS

Doctor en Arquitectura

Profesor titular, Departamento de Expresión Gráfica
e Ingeniería en Edificación

Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación
Sevilla, España

<https://orcid.org/0000-0003-4541-2327>

icortes@us.es

RESUMEN

Los edificios históricos constituyen parte fundamental del patrimonio cultural tangible de la sociedad actual. El cumplimiento de las exigencias de ahorro energético para mitigar el cambio climático, sin embargo, puede verse limitado aquí debido a las características propias de estos edificios. Además, en el caso de las construcciones históricas, los principios de diseño bioclimático aplicados por los arquitectos, desde principios del siglo XX hasta la actualidad, pueden haber perdido efectividad. Ello ocurre, a veces, por las modificaciones en proyecto o por efectos del desarrollo urbanístico. En este estudio se analizan estos dos aspectos en un determinado edificio histórico ubicado en Sevilla: la Casa Duclós de José Luis Sert. Este presenta modificaciones en la cubierta, cuando se compara la proyectada y la construida. Asimismo, su entorno urbano se ha transformado desde que la Casa fue edificada. Para el análisis expuesto en este artículo, se realizaron simulaciones energéticas utilizando datos climáticos correspondientes al periodo 2000-2019. Los resultados muestran la influencia que tuvieron las modificaciones de la cubierta proyectada y la expansión urbanística en el rendimiento energético del edificio, con respecto a la concepción original del inmueble.

Palabras clave

patrimonio arquitectónico, ahorro de energía, estrategias urbanas, arquitectura moderna.

ABSTRACT

Historic buildings are a fundamental part of the tangible cultural heritage of today's society. However, the energy saving requirements to limit climate change may present limitations with respect to the characteristics of these buildings. In the case of historical buildings from the early 20th century to the present, the bioclimatic design principles applied by architects may have been limited. In some cases, it may be due to project modifications or urban expansion. In this study, these two aspects are analyzed in a case of a historic building located in Sevilla: The Duclós House by José Luis Sert. This building presents modifications in the roof between the projected and the built one. Likewise, the urban environment is different from the one existing when it was built. The analysis was carried out with energy simulations using weather data from 2000 to 2019. The results show the influence that the modifications of the projected roof and the urban expansion had on the energy performance of the building with respect to the original idea of the building.

Keywords

Architectural heritage, energy saving, urban strategies, modern architecture

INTRODUCCIÓN

Actualmente, existe un claro objetivo por conseguir un ahorro energético en los edificios existentes (Akande, Odeleye, Coday y JimenezBescos, 2016). Si bien, la mayor parte de los estudios se han centrado en el análisis energético de edificios residenciales, administrativos o comerciales, se detecta que existe escasez de investigaciones dedicadas a analizar el rendimiento energético de edificios patrimoniales (Lidelöw, Örn, Luciani y Rizzo, 2019). Los existentes están orientados a disminuir el consumo energético para garantizar unas condiciones de conservación apropiadas (De Rubeis, Nardi, Muttillio y Paoletti, 2019), o bien, de habitabilidad adecuadas para sus usuarios (Sugár, Talamon, Horkai y Kita, 2020). Sin embargo, a pesar de estos esfuerzos, hay una falta de estudios que consideren el impacto que han tenido las modificaciones de los edificios patrimoniales en su rendimiento energético. Aspectos, tales como la expansión urbanística, pueden modificar el rendimiento energético de los edificios, al alterar las condiciones de sombreado del edificio existente (Lobaccaro *et al.*, 2019). Un ejemplo de ello fue reportado por Baño Nieva y Vigil-Escalera del Pozo (2005) en un edificio con invernaderos que favorecen la captación de radiación solar en Madrid. El crecimiento urbanístico provocó el desarrollo de edificaciones de mayor altitud en sus alrededores, lo que ocasionó que el diseño previo planteado por los arquitectos quedará inutilizado. A ello se suman factores como la imposición de las técnicas tradicionales de una región en los procesos de ejecución de estos edificios, la que puede causar modificaciones en su rendimiento energético con respecto a lo originalmente proyectado.

Ante estas circunstancias, el presente estudio plantea un análisis del impacto energético actual de un edificio histórico de principios del siglo XX, considerando las modificaciones que ha sufrido, tanto a efectos de ejecución como de crecimiento urbanístico. El caso seleccionado fue la Casa Duclós, obra de José Luis Sert, ubicada en Sevilla (España) y construida en 1930. José Luis Sert fue uno de los arquitectos españoles más importantes del siglo pasado. A pesar de su importancia, la obra de Sert en España es escasa. De entre sus pocas construcciones españolas, la Casa Duclós constituye, ciertamente, la obra más olvidada del arquitecto en el panorama internacional, por lo que se conocen pocas investigaciones relacionadas con la misma (López Rivera y Parra Bañón, 2012). Al igual que otras construcciones célebres de la época, como las de Frank Lloyd Wright (Beltrán-Fernández, García-Muñoz y Dufrasnes, 2017) o Le Corbusier (Iommi, 2019), la obra de Sert se caracteriza por poseer un gran componente bioclimático en sus proyectos.

En concreto, existe la certeza de que se llevaron a cabo modificaciones en la casa respecto a las especificaciones en proyecto, seguramente debido a una falta de dirección durante la ejecución de la obra:

Sobre la dirección de la obra los datos que tenemos son imprecisos. Sert nos dice que visitó el solar y la obra en algunas ocasiones, pero no recuerda detalles precisos de la dirección [...]. Los propietarios nos hablan de ciertas modificaciones, durante la construcción [...]. (Delgado Pérez, Pérez Escolano, Sebastián Bollaín y Ramón Sierra, 1968, p. 117).

Asimismo, el edificio fue situado en una de las zonas más alejadas del núcleo urbano en el momento de su construcción: una parcela trazada por el arquitecto Aníbal González en los terrenos del cortijo Maestrescuela, que pasó a conocerse popularmente como barrio de Nervión (Bono Ruiz de la Herrán, García Vásquez, Pérez Escolano, Pico Valimaña y Ortega, 1996). Se trataba de una zona de ensanche no consolidada, incluso una década después de su construcción, tal y como se puede apreciar en la Figura 1. No obstante, la expansión urbanística a lo largo del siglo XX envolvió a la Casa Duclós, la que quedó finalmente localizada en una calle estrecha y rodeada de edificios de gran tamaño (Figura 1).



1945



Actualidad

Figura 1. Planos de la zona de la Casa Duclós en 1945 (izquierda) y actual (derecha). Fuente: Elaboración de los autores a partir de los planos de la cartoteca y del Plan General de Ordenación Urbanística del Ayuntamiento de Sevilla.

Así pues, el caso de estudio seleccionado reuniría los condicionantes esperados para ser analizado. En primer lugar, se realiza una investigación del detalle constructivo que presenta diferencias entre lo ejecutado y lo proyectado: la cubierta. Posteriormente, se efectúa un análisis energético del impacto que ha supuesto las modificaciones generadas, tanto en la cubierta como en el entorno urbanístico del edificio, empleando datos climáticos de los últimos 20 años de Sevilla.

ANÁLISIS CONSTRUCTIVO DE LA CASA DUCLÓS

La Casa Duclós se encuentra localizada en Sevilla capital. Se trata de una vivienda unifamiliar ubicada en una parcela de 535 m² (Figura 2), que ocupa una superficie de 169 m². La distribución vertical de la casa está compuesta por los siguientes niveles: semisótano, planta baja, planta primera y ático. La conexión entre los diferentes niveles se concreta mediante escaleras de un solo tramo (Quesada, 2008).

La planta baja consta de un recibidor, una cocina, un garaje, un aseo y un amplio salón en L, en cuya distribución inicial conformaba el gabinete y antiguo salón. La planta primera se encuentra distribuida a partir de cuatro dormitorios, dos baños y dos terrazas. Tras una reforma, la distribución de la planta quedó en 3 dormitorios, dos baños, una sala de estar y dos terrazas (Lousame, 2011). El ático estaba compuesto por un lavadero, que terminó cerrándose para disponerse de un espacio para tender protegido de la lluvia. Además, cuenta con un trastero, un dormitorio, un baño y una terraza (Lousame, 2011).

DESCRIPCIÓN CONSTRUCTIVA

La cimentación de la casa está constituida por una losa de hormigón en masa de 50 cm de espesor, sobre la que se colocó directamente el material de acabado de la planta de sótano. Los muros de dicha planta son de hormigón en masa de 50 cm de espesor, sin ningún tipo de aislamiento ni drenaje, y los forjados son de hormigón armado de 25 cm de espesor (Bono Ruiz de la Herrán et al., 1996).

En cuanto a los cerramientos, Sert diseñó la vivienda teniendo en cuenta la interacción bioclimática de la misma con su entorno. Por este motivo, el edificio posee dos configuraciones diferentes de fachada, dependiendo de su orientación. La fachada norte está compuesta por una solución tradicional de muro macizo de 25 cm, mientras que el resto de fachadas están constituidas por dos hojas de ladrillo separadas por una cámara de aire no ventilada (Lousame, 2011). Las carpinterías presentes en el edificio se encuentran distribuidas por todas sus fachadas, con diferentes formas rectangulares. Uno de los aspectos que más influye en las estrategias pasivas de confort es el



Figura 2. Fotografía exterior de la Casa Duclós. Fuente: Quesada (2008, p. 194).



Figura 3. Vista aérea de la Casa Duclós y los edificios existentes alrededor. Fuente: Elaboración de los autores.

tratamiento de los huecos. En la Casa Duclós, los huecos se encuentran presentes en la mayoría de las fachadas, pero tienen mayor presencia en la fachada norte. El resto de los huecos disponen de elementos de sombreado como las ventanas retranqueadas de la primera planta de la fachada sur. Con estos sistemas se permite evitar la incidencia directa del sol en épocas de verano, cuando se encuentra a mayor altura, como también la incidencia directa en época invernal, cuando el sol se encuentra más bajo.

Como se ha indicado, la edificación se encuentra actualmente rodeada por construcciones de mayor altura y volumen (Figura 3), que limitan la incidencia de la radiación directa del sol sobre cada uno de sus elementos de cerramiento, por lo que las diferentes premisas

de sombreado consideradas en la elaboración del proyecto pueden haber quedado inoperativas, impidiendo en el período invernal la incidencia solar capaz de generar un mayor confort térmico en las diferentes estancias.

CUBIERTA

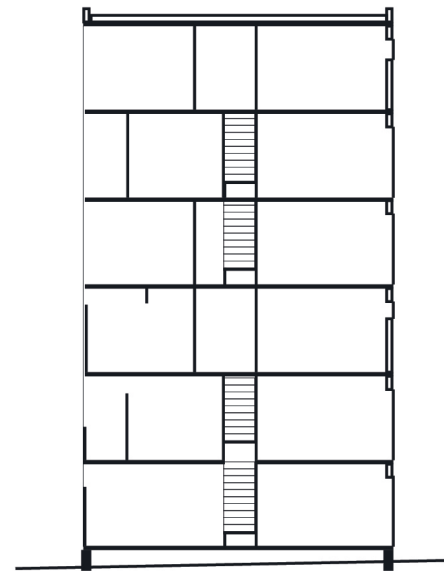
La cubierta es uno de los elementos más significativos de la Casa Duclós, al ser el elemento más expuesto a la radiación solar. La cubierta fue proyectada siguiendo la tipología constructiva de la cubierta catalana, pero la falta de dirección de la obra por parte del arquitecto dio lugar a que se ejecutara la cubierta siguiendo las técnicas constructivas de la región en aquella época (Paricio Casademunt, 1998). A pesar de ello, la cubierta sí presenta una radiación solar importante durante la mayor parte del año. Sert entendía que la terraza era una extensión más de la casa y, por tal motivo, quiso llevar a cabo tres estrategias claramente identificadas para la protección y búsqueda del confort interior: la creación de un jardín en altura, la disposición de un toldo manual colocado mediante un soporte metálico y una cubierta ventilada. En definitiva, ante diversas casuísticas, se optó por una cubierta andaluza (Lousame, 2011).

Analizando la documentación gráfica del proyecto, se puede apreciar, en el plano de la sección del edificio (Figura 4), el espacio destinado a una cámara de aire, lo que corresponde a la idea original del proyecto; aunque existen evidencias, como la falta de respiraderos o el embaldosado cerámico de 14x28 centímetros, que indican que la azotea se realizó siguiendo los cánones de las cubiertas tradicionales andaluzas (Lousame, 2011).

De este modo, existen indicios que muestran que la cubierta fue proyectada con una cámara de aire. Sin embargo, el hecho de que la Casa Duclós carezca de respiraderos es una de las razones por las que se supone que no se llegó a ejecutar la cubierta proyectada (Paricio Casademunt, 1998). En este sentido, cabe mencionar otra obra de José Luis Sert que se diseña prácticamente a la par que la Casa Duclós: el edificio de la calle Muntaner, en Barcelona (España). Esta edificación cuenta con una solución particular de la tradicional cubierta catalana de la época. Analizando la documentación gráfica de dicho proyecto, se puede apreciar el mismo tipo de representación evidenciada en el plano de la Casa Duclós (Figura 5). Según diversas investigaciones, la solución planteada por Sert utilizaría una propuesta mixta entre la cubierta tradicional catalana sobre tabiques conejeros y la solución empleada por Le Corbusier y Jeanneret en la Casa Doble en la Weissenhofsiedlung, con la solería colocada sobre arena y grava filtrante, bajo la cual se disponía de una capa impermeabilizante (Lousame, 2011; Paricio Casademunt, 1996).



Figura 4. Plano de sección de la Casa Duclós. Fuente: Elaboración de los autores.



Sección

Figura 5. Planos de sección del edificio de la calle Muntaner. Fuente: Elaboración de los autores.

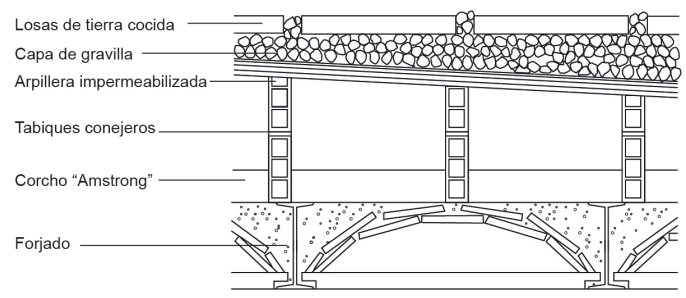


Figura 6. Planos de sección del edificio de la calle Muntaner. Fuente: Paricio Casademunt (1996, p. 421).

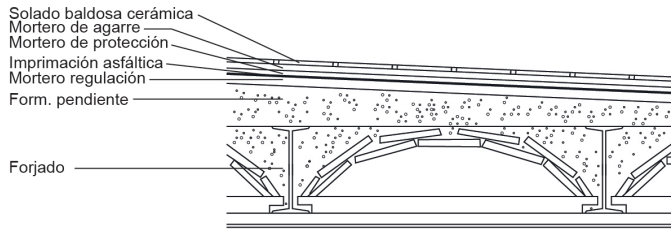


Figura 7. Detalle constructivo de la cubierta ejecutada en la Casa Duclós. Fuente: Elaboración de los autores.

La cubierta tradicional catalana de la época estaba constituida por dos tableros de forjado: uno horizontal y otro con una pendiente de entre el 6% y el 8%, apoyado sobre viguetas de madera o de perfilera metálica. Pero, desde principios del siglo XX, se pasó a un modelo constituido por un tablero de rasilla apuntalado sobre tabiques conejeros. La ventilación de aire en los dos casos se producía por la fachada y los patios interiores, creando una circulación de aire que desecaba cualquier filtración que se produjera por el tablero.

Por lo tanto, aunque se desconozca, por la inexistencia de bibliografía, qué tipo de cubierta se proyectó para la Casa Duclós, se conoce con exactitud el detalle constructivo de la cubierta de la calle Muntaner (Figura 6), que está constituida por una rasilla apoyada sobre tabiques conejeros, sobre la que se colocó una arpillera impermeabilizante, una capa de gravilla de regularización que actuaba como capa drenante y un acabado mediante losas de 43 x 43 cm, con junta entre piezas de 2,5 cm. En el interior de la cámara ventilada, entre los tabiques conejeros, se empleó, como material aislante, corcho comprimido de la empresa Armstrong Cork Company (Olona, 2015; Paricio Casademunt, 1996).

Ahora bien, la cubierta realmente ejecutada no fue la proyectada. Es preciso aclarar que no se disponen de datos acerca del detalle constructivo de la cubierta ejecutada. Ante la imposibilidad de determinar su composición a través de otro tipo de pruebas, tanto destructivas como no destructivas, se llevó a cabo una estimación de su composición a partir de la analogía con otras construcciones similares de la época (Ficco, Iannetta, Ianniello, D'Ambrosio Alfano y Dell'Isola, 2015). De esa forma, se acuerda que el tipo de cubierta construida está constituida por una formación de pendiente de hormigón aligerado de espesor variable, sobre la que se aplicó una capa de regulación de mortero para la posterior imprimación asfáltica (Figura 7). Sobre dicha imprimación, se aplicó, a su vez, una capa de mortero de protección y se colocó el acabado cerámico con su correspondiente mortero de agarre. En consecuencia, se puede afirmar que la cubierta no dispone de ningún elemento con una baja conductividad térmica que pueda servir de aislamiento.

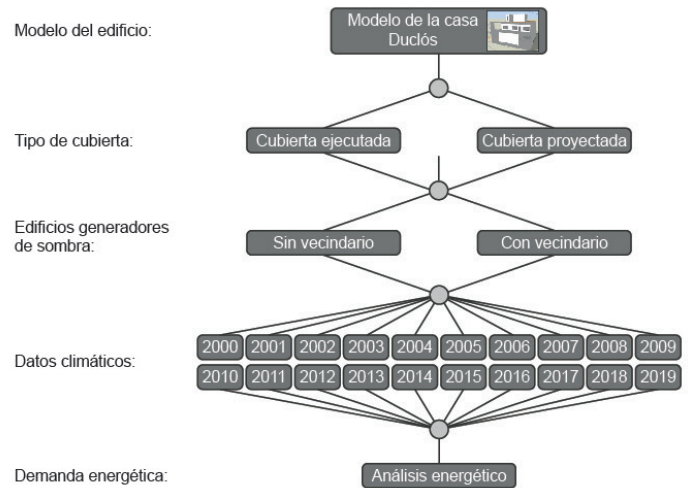


Figura 8. Flujo de trabajo seguido en la investigación. Fuente: Elaboración de los autores.

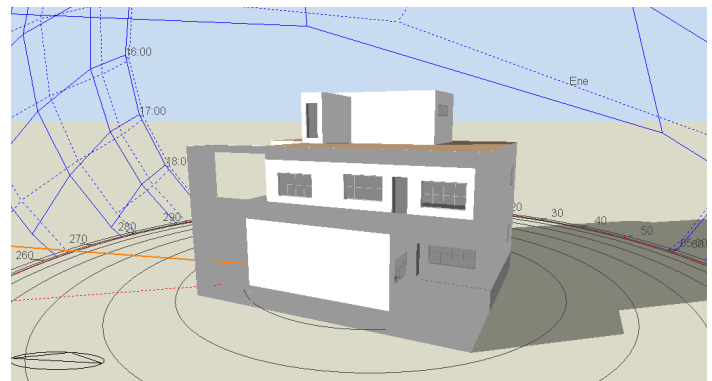


Figura 9. Modelo de la Casa Duclós en DesignBuilder. Fuente: Elaboración de los autores.

METODOLOGÍA

El flujo metodológico de la investigación consistió en un proceso de simulación energética realizado en DesignBuilder y cuyos principales pasos están resumidos en la Figura 8. Tal y como se puede apreciar, la Casa Duclós fue modelada en primer lugar (Figura 9). Para ello, se utilizaron los datos planimétricos disponibles del proyecto y se definieron los cerramientos con los detalles constructivos descritos en las secciones anteriores. En la Tabla 1, se indican los valores de conductividad térmica y espesores de las capas de los principales elementos de la envolvente. Los valores de conductividad térmica utilizados son los establecidos en el Catálogo de Elementos Constructivos y en las herramientas de certificación energética de España. Conviene destacar que se definieron dos modelos en función del tipo de cubierta: cubierta proyectada (con cámara) y cubierta ejecutada (plana andaluza). En la Tabla 2, se señalan las propiedades termofísicas establecidas para cada cubierta.

| Elemento | Capa | Espesor (m) | Conductividad térmica (W/(mK)) |
|--------------|---------------------------|-------------|--------------------------------|
| Fachada | Mortero de cemento | 0,020 | 1,80 |
| | Fábrica de ladrillo | 0,10 | 0,43 |
| | Mortero de cemento | 0,020 | 1,80 |
| | Cámara de aire | 0,05 | 0,025 |
| | Fábrica de ladrillo hueco | 0,05 | 0,313 |
| | Revoco de yeso | 0,015 | 0,57 |
| Muro sótano | Hormigón en masa | 0,50 | 1,65 |
| Suelo sótano | Hormigón en masa | 0,15 | 1,65 |
| | Mortero de cemento | 0,02 | 1,80 |
| | Baldosa de gres | 0,10 | 2,30 |

Tabla 1. Capas, espesores y conductividad térmica de la fachada y de los muros y suelo de sótano considerados en el proceso de simulación energética. Fuente: Elaboración de los autores.

| Elemento | Capa | Espesor (m) | Conductividad térmica (W/(mK)) |
|---------------------|-----------------------------|-------------|--------------------------------|
| Cubierta ejecutada | Acabado | 0,010 | 1,00 |
| | Mortero de agarre | 0,01 | 1,80 |
| | Mortero de protección | 0,015 | 1,80 |
| | Imprimación asfáltica | 0,004 | 0,23 |
| | Mortero de regulación | 0,015 | 1,80 |
| | Hormigón aligerado | 0,20 | 1,15 |
| | Forjado | 0,25 | 2,5 |
| | Revoco de yeso | 0,015 | 0,57 |
| Cubierta proyectada | Acabado | 0,010 | 1,00 |
| | Capa de grava | 0,050 | 1,00 |
| | Arpillera impermeabilizante | 0,013 | 0,23 |
| | Rasillón cerámico | 0,04 | 0,29 |
| | Cámara de aire | 0,02 | - |
| | Corcho comprimido | 0,04 | 0,10 |
| | Forjado | 0,25 | 2,5 |
| | Revoco de yeso | 0,015 | 0,57 |

Tabla 2. Capas, espesores y conductividad térmica de las cubiertas ejecutada y proyectada. Fuente: Elaboración de los autores.

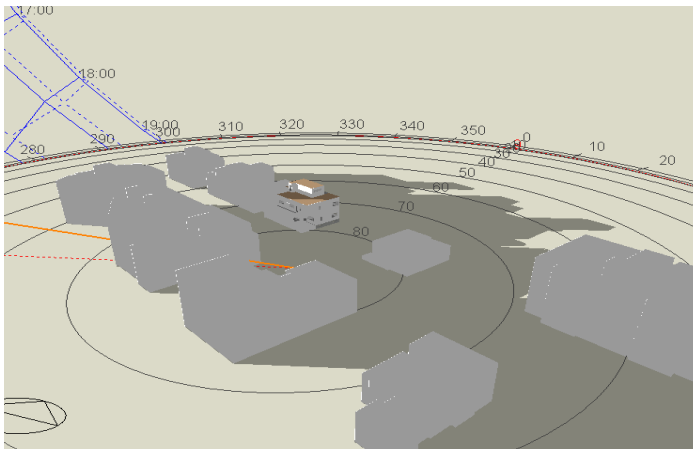


Figura 10. Modelo de la Casa Duclós con los edificios de contorno en DesignBuilder. Fuente: Elaboración de los autores.

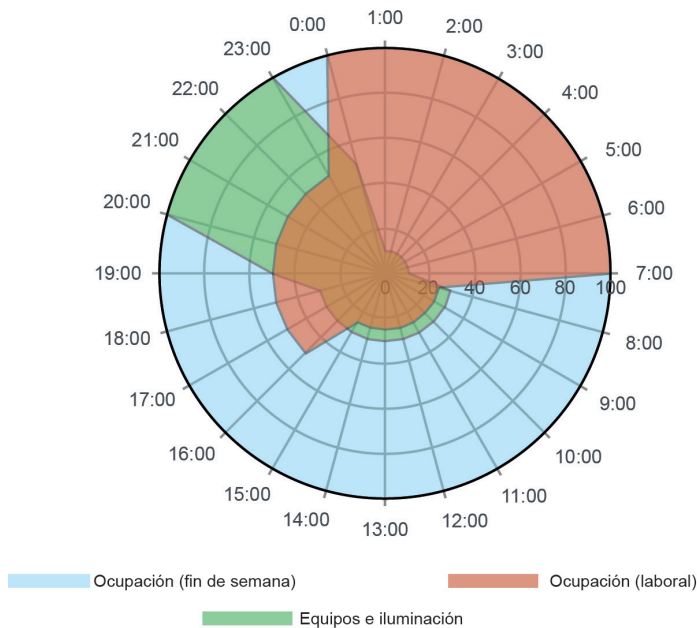


Figura 11. Distribución porcentual de las cargas del perfil residencial del Código Técnico de la Edificación. Fuente: Elaboración de los autores.

Asimismo, se diseñaron dos tipos de modelos para valorar la presencia o ausencia de edificios en el entorno. La carencia de edificios permitiría analizar el rendimiento energético del edificio en el caso de que no se hubieran desarrollado edificios de gran tamaño en los alrededores, mientras que el análisis con los edificios del entorno permite valorar el rendimiento energético actual. Con ese fin, se descarga la base cartográfica de catastro para modelar los edificios del vecindario, considerando una altura de 3 metros por planta (Figura 10).

En relación a los patrones operacionales de los sistemas de climatización y los perfiles de carga, se utilizó el perfil definido para edificios residenciales en el Código Técnico de la Edificación. Este considera tres tipos de cargas (ocupación,

| Sistema | Meses | Temperatura de consigna/ periodo del día | | | |
|-------------------------------|----------------|---|----------------|-----------------|-----------------|
| | | 0:00- 6:59 | 7:00- 14:59 | 15:00- 22:59 | 23:00- 23:59 |
| Sistema de calefacción | Octubre – mayo | 17 | 20 | 20 | 17 |
| Sistema de aire acondicionado | Junio – sept | 27 | - | 25 | 27 |

Tabla 3. Valores horario de las temperaturas de consigna definidas en el perfil residencial del Código Técnico de la Edificación. Fuente: Elaboración de los autores.

equipos e iluminación) y establece dos tipos de distribución diferentes en función del tipo de día (laboral y fin de semana). En la Figura 11, se advierten las distribuciones porcentuales de las cargas de dicho perfil. El valor máximo de la carga de los equipos y de los sistemas de iluminación es de 4,4 W/m²; mientras que, para la ocupación, se establece un valor máximo para la carga sensible y para la carga latente de 2,15 W/m² y de 1,36 W/m², respectivamente. Con respecto al patrón operacional de los sistemas de climatización, el Código Técnico de la Edificación distingue dos períodos de funcionamiento en función de la época del año. En la Tabla 3, se indican los valores de temperatura de consigna y horarios considerados en dicho perfil residencial. Es importante aclarar que incluir en las comparaciones el estado del edificio sin vecindario no responde al objetivo de determinar el rendimiento energético en 1930, dado que en esa fecha no existían sistemas activos para tales efectos; lo que se pretende es evaluar las consecuencias que ha tenido la expansión urbanística en el rendimiento energético del edificio, contemplando las exigencias de los usuarios del siglo XXI.

En referencia a los datos climáticos, se recopilaron los valores horarios de temperatura y de humedad relativa desde el año 2000 hasta el año 2019 en Sevilla, a través de la Agencia Estatal de Meteorología en España. Con estos datos horarios, se diseñaron archivos EnergyPlus Weather específicos para cada año, de tal manera que se pudieran realizar simulaciones energéticas que simularan el rendimiento energético del caso de estudio cada año. Cabe mencionar que no se simularon años anteriores al 2000 debido a la falta de datos horarios en Sevilla. Finalmente, dado que el caso de estudio fue analizado combinando las cubiertas y los entornos urbanos con datos climáticos de los últimos 20 años, los resultados de este análisis están basados en un proceso de simulación constituido por un total de 80 simulaciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de los resultados se basó en las modificaciones detectadas en la demanda energética anual del edificio.

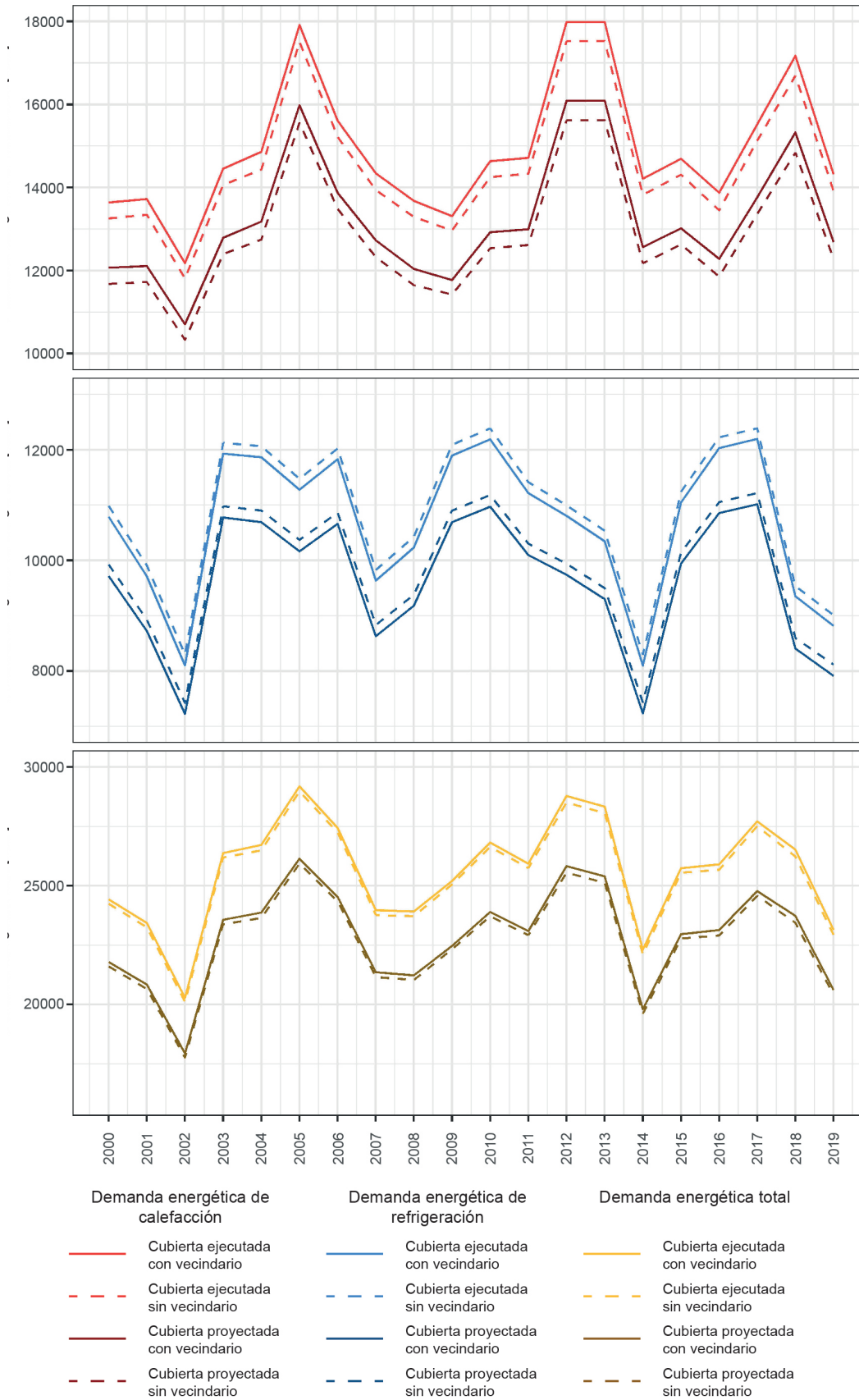


Figura 12. Valores de demanda energética anual obtenidos con los diferentes supuestos considerados. Fuente: Elaboración de los autores.

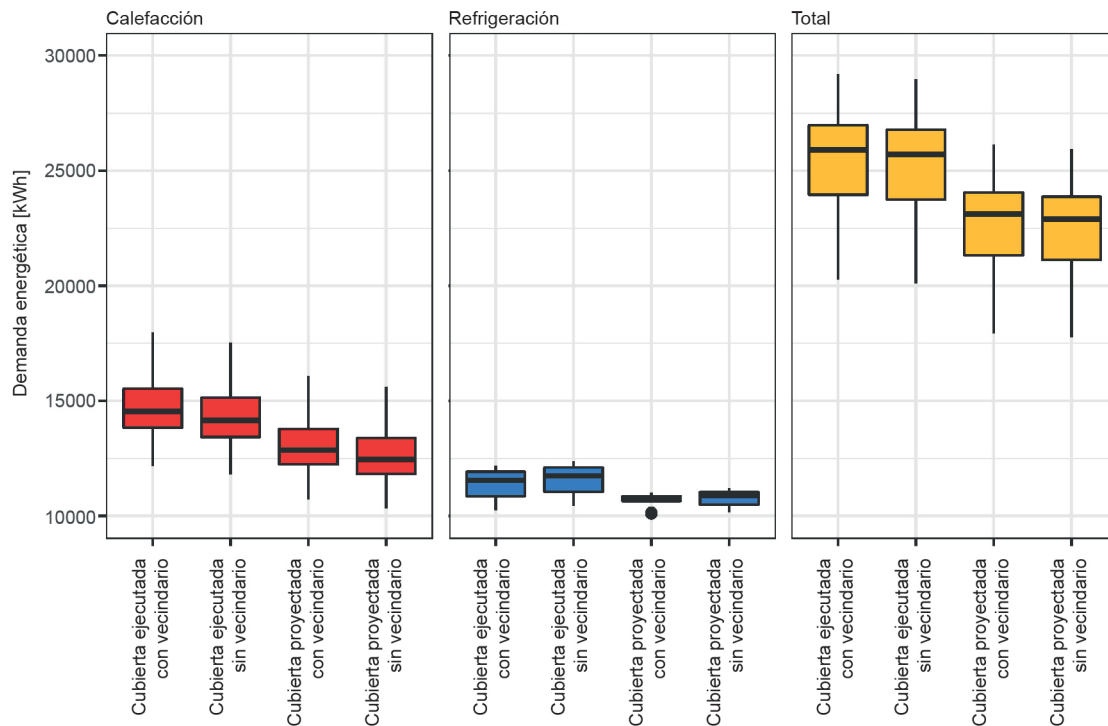


Figura 13. Diagramas de caja de las distribuciones de demanda energética anual de cada supuesto considerado para la Casa Duclós. Fuente: Elaboración de los autores.

Dichos datos se expresan, primero, en la Figura 12, donde se incluyen las series de tiempo obtenidas de las demandas energéticas con los diferentes supuestos de la Casa Duclós. Tal y como se puede apreciar, el estilo de cubierta proyectado por Sert constituye la tipología de cubierta con una menor demanda energética. Sin embargo, el fenómeno de expansión urbanística ha alterado el rendimiento energético del caso de estudio, aunque esta modificación depende del tipo de demanda energética: en cuanto a la demanda energética de calefacción, el caso de estudio proyectado, sin vecindario, obtuvo menores valores; mientras que, en cuanto a la demanda energética de refrigeración, obtuvo mayores valores. A pesar de esto, la mayor contribución porcentual de la demanda energética de calefacción en la demanda energética total (debido a que obtiene mayores valores a lo largo del año que la demanda energética de refrigeración) provoca que la combinación más adecuada sea el caso proyectado sin vecindario.

Para observar este aspecto con mayor detalle y de manera cuantificada, los valores de los cuartiles obtenidos en las distribuciones de la demanda energética anual de los últimos años (es decir, 2000-2019) son recogidos en la Figura 13. Así, el caso con vecindario es el que dispone de los valores de cuartiles más elevados en la demanda energética de calefacción. En concreto, resulta aquí un valor superior, de entre 386,5 y 412,38 kWh con respecto al caso actual sin vecindario, y de entre 1.597,83 y 2.149,35 kWh en los diferentes supuestos del caso de estudio proyectado. Esta misma tendencia se detecta en la demanda energética total, con valores superiores de

hasta 204,62 kWh con respecto al edificio ejecutado sin vecindario y de hasta 3.104,14 kWh en comparación con el edificio proyectado por Sert. Esto supone desviaciones porcentuales significativas (Figura 14) y constata el peor rendimiento energético que tiene la Casa Duclós actualmente.

En la Figura 14, se muestra el ahorro promedio obtenido entre los diferentes supuestos de la Casa Duclós en relación con el caso existente. De esta manera, se puede advertir que las modificaciones de diseño y del entorno del edificio han desembocado en un peor rendimiento energético. En este sentido, aunque el crecimiento urbanístico ha supuesto una mejora en la demanda energética de refrigeración (con un ahorro promedio de 193,70 kWh), el efecto en la demanda energética total es negativo (con un incremento promedio de la demanda energética de 207,68 kWh). Ahora bien, donde se detecta la mayor diferencia es entre las dos tipologías de cubiertas analizadas: la cubierta proyectada por Sert conlleva ahorros promedios significativos en todas las demandas energéticas (de 2.762,91 kWh, en el caso con vecindario y de 2.966 kWh, sin vecindario). Como era de esperar, los edificios circundantes tienen un efecto de ahorro diferente en función de la demanda energética, pero que, debido a los criterios operacionales establecidos por el Código Técnico de la Edificación, genera un mejor rendimiento, cuando se trata de un entorno sin edificaciones. En cualquier caso, este rendimiento podría cambiar en años venideros ante el progresivo incremento de la temperatura exterior derivada del cambio climático.

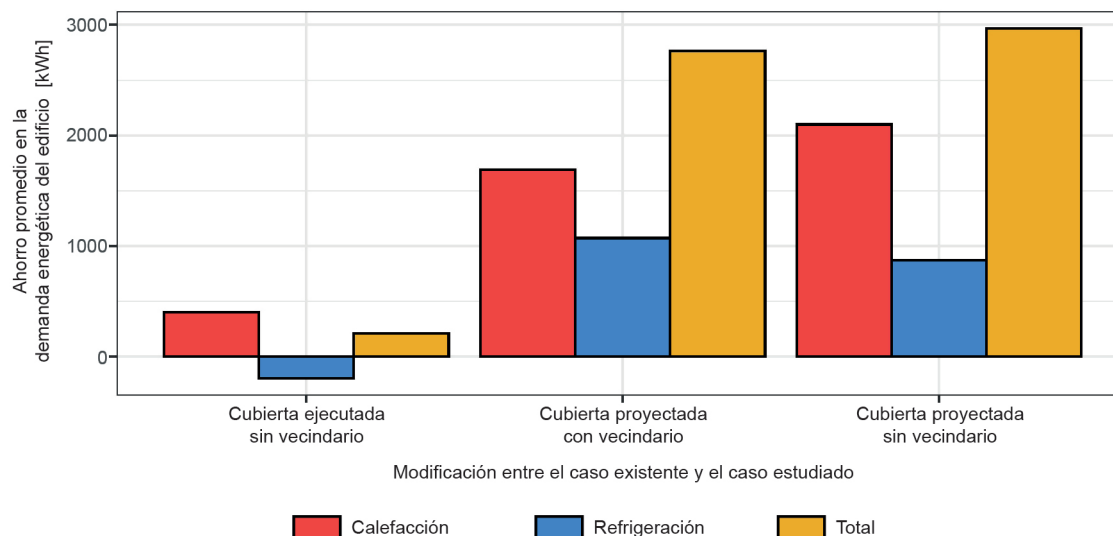


Figura 14. Ahorro promedio en la demanda energética entre el estado actual de la Casa Duclós (cubierta ejecutada y edificios alrededor) y los otros modelos considerados. Fuente: Elaboración de los autores.

CONCLUSIÓN

Los resultados de este estudio revelan la gran afección que puede tener el crecimiento urbanístico en el rendimiento energético de los edificios patrimoniales. Los resultados muestran cómo las estrategias bioclimáticas diseñadas por Sert para los huecos quedan anuladas con los edificios circundantes de mayor tamaño. Este aspecto, que puede resultar negativo *a priori*, conviene analizarlo en un contexto temporal mayor, ya que podría ser previsible que, a lo largo del siglo XXI, este mayor sombreado sea beneficioso para los usuarios de la casa, considerando el cambio climático. En cualquier caso, resulta fundamental examinar los elementos circundantes que existen actualmente y el estado existente en el momento de su construcción para conocer en detalle las transformaciones energéticas que ha sufrido el edificio a lo largo de su historia. Este factor podría explicar las posibles medidas adoptadas por los usuarios de la vivienda a lo largo de su vida útil. Por ejemplo, en el caso de la Casa Duclós, se desconoce los motivos que llevaron a sus residentes a no colocar el toldo proyectado por Sert, aunque una posibilidad, en ese sentido, es que se conseguía mayor sombreado con los edificios circundantes.

Asimismo, se constata la importancia que puede tener el estudio pormenorizado de las características constructivas y proyectadas de los edificios patrimoniales para el establecimiento de medidas de ahorro energético. Específicamente en esta investigación, el análisis de la documentación gráfica y el posterior análisis energético reflejaron que las características proyectadas para la Casa Duclós presentan un mejor rendimiento energético que las que finalmente fueron ejecutadas conforme a las técnicas

constructivas tradicionales del lugar. Esto puede servir de punto de partida para el diseño de medidas de mejoras en este tipo de edificios. Además, se ha constatado las repercusiones propias del crecimiento urbanístico en edificios históricos. Aunque resulta obvio que los patrones de diseño de los edificios históricos no buscaban una eficiencia energética, también es cierto que los arquitectos y diseñadores pudieron perseguir unas condiciones de confort térmico adecuadas. Mediante la utilización de técnicas de soleamiento a través de los huecos, ellos pudieron efectivamente haber buscado aumentar las cargas térmicas en las épocas frías y mejorar las condiciones térmicas en el interior. Pese a esto, se ha constatado que el crecimiento urbanístico, sin consideraciones de integración de los edificios históricos existentes, puede afectar a su rendimiento energético. En suma, los resultados de este trabajo evidencian las afectaciones que, a nivel energético, el crecimiento urbanístico puede representar para esta clase de edificios, así como la necesidad de realizar este tipo de evaluaciones ante las posibles limitaciones en el carácter de rehabilitación que presentan estos inmuebles, al estar protegidos por instituciones públicas.

Para finalizar, se debe añadir que, más allá de los resultados de esta investigación, queda pendiente el análisis del rendimiento energético de estos edificios ante la evolución climática esperada a lo largo del siglo XXI. La realización de estudios con datos climáticos diseñados conforme a los escenarios de cambio climático previstos por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, permitiría establecer de manera más adecuada las medidas de ahorro energético necesarias para alcanzar la categoría de edificios de consumo energético casi nulo en estas construcciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Akande, O. K., Odeleye, D., Coday, A. y JimenezBescos, C. (2016). Performance evaluation of operational energy use in refurbishment, reuse, and conservation of heritage buildings for optimum sustainability. *Frontiers of Architectural Research*, 5(3), 371–382. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2016.06.002>

Baño Nieva, A. y Vigil-Escalera del Pozo, A. (2005). *Guía de construcción sostenible*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente.

Beltrán-Fernández, M., García-Muñoz, J. y Dufrasnes, E. (2017). Análisis de las estrategias bioclimáticas empleadas por Frank Lloyd Wright en la Casa Jacobs I. *Informes de la Construcción*, 69(547). DOI: <https://doi.org/10.3989/ic.16.156>

Bono Ruiz de la Herrán, L., García Vásquez, C., Pérez Escolano, V., Pico Valimaña, R. y Ortega, C. (1996). Veinte obras del Movimiento Moderno en Andalucía. *Boletín Del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 15, 133-152.

De Rubeis, T., Nardi, I., Muttillio, M. y Paoletti, D. (2019). The restoration of severely damaged churches – Implications and opportunities on cultural heritage conservation, thermal comfort and energy efficiency. *Journal of Cultural Heritage*, 43, 186–203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.11.008>

Delgado Pérez, G., Pérez Escolano, V., Sebastián Bollaín, J. y Ramón Sierra, J. (1968). La obra olvidada: Casa Duclós en Sevilla, 1930. *Hogar y Arquitectura*, 76, 57–64.

Ficco, G., Iannetta, F., Ianniello, E., D'Ambrosio Alfano, F. R. y Dell'Isola, M. (2015). U-value in situ measurement for energy diagnosis of existing buildings. *Energy and Buildings*, 104, 108–121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.071>

Iommi, M. (2019). Daylighting performances and visual comfort in Le Corbusier's architecture. The daylighting analysis of seven unrealized residential buildings. *Energy and Buildings*, 184, 242–263. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.014>

Lidelöw, S., Örn, T., Luciani, A. y Rizzo, A. (2019). Energy-efficiency measures for heritage buildings: A literature review. *Sustainable Cities and Society*, 45(June), 231–242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.09.029>

Lobaccaro, G., Croce, S., Lindkvist, C., Munari Probst, M. C., Scognamiglio, A., Dahlberg, J., Lundgren, M. y Wall, M. (2019). A cross-country perspective on solar energy in urban planning: Lessons learned from international case studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 108(March), 209–237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.041>

López Rivera, F. J. y Parra Bañón, J. J. (2012). *El proyecto de construcción de la imagen de la arquitectura moderna 1925-1939 Andalucía, Margaret Michaelis*. Universidad de Sevilla. Recuperado de http://fama.us.es/record=b2497190~S5*spi

Lousame, M. (2011). La Casa Duclós de José Luis Sert en Sevilla en 1930. Dibujo y construcción. Dibujo y construcción. En *Actas del Séptimo Congreso Nacional de Historia de la Construcción: Santiago de Compostela, 26-29 octubre de 2011* (pp. 799-808). Instituto Juan de Herrera.

Olona, J. (2015). *Avaluació de l'envolupant dels edificis del moviment modern a Barcelona. Subirana i Casa Bloc : recerques i influències dels paradigmes d'una nova materialitat energètica*. Universitat Politècnica de Catalunya.

Paricio Casademunt, A. (1996). La innovación tecnológica de las cubiertas planas del GATCPAC. *Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción* (Madrid 19–21 septiembre) (pp. 419-422). Recuperado de http://www.sedhc.es/biblioteca/actas/CNHC1_058.pdf

Paricio Casademunt, A. (1998). La cámara ventilada como recurso constructivo durante el siglo XIX en Barcelona. En *II Congreso Nacional de Historia de la Construcción* (pp. 375–380). Recuperado de <https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/10595/HC%2048.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Quesada, S. (2008). Helion, Melion, Tetragrámmaton. La Casa Duclós. Sevilla, España, 1929-1930. En Cohen, M., *Seven Avant-Garde Houses* (pp. 192-219). Bruselas: CIVA.

Sert, J. L., Vázquez de Castro, A. e Íñiguez de Onzoño, J. L. (2009). *Edificio de viviendas en calle de Muntaner, Barcelona 1929-31*. GIVCO Collective Housing Research Group, Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de http://fama.us.es/record=b2148137~S5*spi

Sugár, V., Talamon, A., Horkai, A. y Kita, M. (2020). Energy saving retrofit in a heritage district: The case of the Budapest. *Journal of Building Engineering*, 27, 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100982>





EVALUACIÓN DEL BLOQUE DE TIERRA MEDIANTE UN ESTUDIO DE VIABILIDAD CONSTRUCTIVA (EVC)

Recibido 19/05/2020
Aceptado 02/11/2020

ASSESSMENT OF EARTH BLOCKS BY MEANS OF A CONSTRUCTION FEASIBILITY STUDY (CFS)

ANA ROMERO GIRÓN
Doctora en Arquitectura

Investigadora, Departamento de Construcciones Arquitectónicas I
Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Arquitectura
Sevilla, España
<https://orcid.org/0000-0002-0536-4458>
anaromerogiron@gmail.com

JACINTO CANIVELL
Doctor en Arquitectura

Profesor Contratado, Departamento de Construcciones Arquitectónicas II
Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de
Edificación, Sevilla, España
<https://orcid.org/0000-0001-7636-102X>
jacanivell@us.es

MARIA REYES RODRÍGUEZ GARCÍA
Doctora en Química

Profesor titular, Departamento de Construcciones Arquitectónicas I
Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Arquitectura
Sevilla, España
<https://orcid.org/0000-0002-8331-2303>
rgarcia@us.es

ANA GONZALEZ SERRANO
DOCTORA EN ARQUITECTURA

Profesora titular, Departamento de Construcciones Arquitectónicas I
Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Arquitectura
Sevilla, España
<https://orcid.org/0000-0001-5104-8555>
gserrano@us.es

RESUMEN

Aunque la construcción con bloques de tierra (BT) está avalada por numerosos trabajos científicos, existe una desconfianza sobre su viabilidad constructiva, agravada por la falta de formación técnica específica. Ante esta incertidumbre, muy presente en el ámbito español, es preciso dar respuestas técnicas fundamentadas. En esa dirección, este artículo expone el diseño y validación de una herramienta para la evaluación de la viabilidad constructiva del BT. Con ese fin, se seleccionan 29 casos de estudio en España, con los que se establecen las determinaciones constructivas y los indicadores para la evaluación de un grado de idoneidad técnica. Este parámetro, como resultado de la herramienta propuesta, sirve como apoyo a la toma de decisiones, la mejora del diseño y la eficiencia de las soluciones que emplean BT. Se concluye con la validación de la herramienta que demuestra su fiabilidad y adaptabilidad a cualquier situación. Finalmente, a partir del análisis de casos, se expone cómo la calidad del producto unida a condiciones externas adversas, aún con diseños constructivos correctos, define una situación común por la que el grado de idoneidad de la solución es reducida. Por lo tanto, es necesario exigir también productos con avales y prescripciones que garanticen y ofrezcan suficiente seguridad técnica.

Palabras clave

construcción sostenible, materiales tradicionales, bioconstrucción, cerramiento de la edificación

ABSTRACT

Although earth block construction (EB) is supported by numerous scientific works, there is a lack of confidence in its constructive viability, aggravated by the lack of specific technical training. In view of this uncertainty, which is widespread in Spain, it is necessary to provide well-founded technical responses. This article, considering these aspects, presents the design and validation of a tool to assess the constructive viability of EB. For this purpose, 29 case studies are chosen in Spain, which establish the constructive use determinations and indicators to assess a degree of technical suitability. This parameter, as a result of the proposed tool, acts as a support for decision-making, the improvement of the design and, the efficiency of the solutions that use EB. It concludes by validating the tool, demonstrating its reliability and adaptability to any situation. Finally, the case analysis shows how the quality of the product combined with adverse external conditions, even with correct construction designs, defines a common situation where the degree of suitability of the solution is reduced. Therefore, it is also necessary to demand products with guarantees and prescriptions that ensure and offer sufficient technical safety.

Keywords

Sustainable construction, traditional materials, bio-construction, building envelope.

NOMENCLATURA

| | |
|----------|--|
| EVC | Estudio de viabilidad constructiva |
| BT | Bloque de tierra |
| BTC | Bloque de tierra comprimido |
| BTE | Bloque de tierra extruido |
| C-CA | Referencia a la calidad del producto |
| C-RC | Referencia a los requisitos constructivos |
| C-AE | Referencia a las acciones externas |
| EVC | Estudio de viabilidad constructiva |
| G_i | Grado de idoneidad para los i ámbitos |
| NET_q | Nivel de evaluación técnica de los q indicadores |
| $NETP_i$ | Nivel de evaluación técnica ponderado para los i ámbitos |
| W_i | Coefficiente de ponderación para los i ámbitos |

INTRODUCCIÓN

Durante las dos últimas décadas la situación medioambiental y económica a nivel mundial está generando la necesidad y el interés por el desarrollo de soluciones constructivas adecuadas a las demandas ambientales, energéticas y sociales. En este contexto, el uso del adobe y el bloque de tierra (BT), que incluye fundamentalmente el bloque de tierra comprimida (BTC), como mampuestos de fábrica, pueden ser una alternativa más sostenible en la construcción.

Como sustento de esta afirmación, el marco actual de investigación del BT se ha centrado en estudios sobre sus propiedades mecánicas (Gandia, Gomes, Corrêa, Rodrigues y Mendes, 2019; Mahmood, Habeeb y Al-Jumaili, 2019), térmicas (Mosquera, Canas, Cid-Falceto y Marcos, 2014; Molar-Orozco, Velázquez-Lozano y Vázquez-Jiménez, 2020; Miloudi et al, 2019; Wati, Bidoung, Damfeu, y Meukam, 2020) y de durabilidad (Fernandes, Peixoto, Mateus y Gervásio, 2019; Lavie Arsène, Frédéric y Nathalie, 2020; Jové Sandoval, Muñoz de la Calle y Pahíno Rodríguez, 2011). Otros avalan la utilización del BT argumentando aspectos económicos, baja toxicidad e, incluso, como producto que favorece la calidad del aire interior (Fernandes et al., 2019). Además, emplea materiales locales naturales, lo que exime en gran medida el impacto ambiental atribuido al transporte (Deboucha y Hashim, 2011).

Desde el punto de vista de aplicación del producto, es necesario que el BT alcance un mejor nivel de aceptación, similar al de otros materiales de construcción, y que se superen ciertos factores que influyen negativamente en la toma de decisiones de los técnicos: el coste de producción, la baja disponibilidad de datos técnicos del producto para la justificación de las exigencias normativas, sumado a la mala praxis por desconocimiento de las condiciones de aplicación del material. En consecuencia, es necesario

establecer un marco que defina mejor las determinaciones constructivas, económicas o medioambientales del uso del BT. Éstas deben servir de sustento para que su elección sea viable y garantizada con datos técnicos y así crezca la confianza de todos los agentes que intervienen en la construcción, con el propósito de establecer directrices de uso correcto y acorde con las exigencias técnico-constructivas.

La viabilidad del uso de BTC y del adobe ha sido analizada por Maldonado Ramos, Castilla Pascual, Vela Cossío y Rivera Gómez (2001), demostrando que, para una obra de pequeña-mediana escala, supone una solución económica, así como una mejora respecto al aislamiento térmico frente a otros materiales como hormigón, ladrillo o acero. Asimismo, en el ámbito normativo internacional existen diversos documentos que regulan el uso y aplicación del BT, como por ejemplo las normas brasileñas (1986-1996), colombiana (2004), peruana (2000) o la española (2008), todos ellos tratados y analizados por Cid-Falceto, Mazarrón y Cañas (2011). No obstante, ninguna de las aportaciones comentadas ofrece una herramienta que permita analizar la viabilidad de aplicación del BT en edificación, por lo que su aplicabilidad es reducida al estar sometido a un criterio técnico sin suficiente ni adecuado conocimiento respecto de sus cualidades y prestaciones.

Respecto a las metodologías de evaluación, aquellas que emplean indicadores cuantitativos o cualitativos han sido extensamente desarrolladas en la literatura. En cuanto a las enfocadas en la construcción con tierra, destaca la aportación de Canivell para la evaluación de fábricas de tapia (Canivell, Rodríguez-García, González-Serrano y Romero Girón, 2020; López-Zambrano, Canivell y Calama, 2019). Aunque su cometido se centra en la evaluación del riesgo físico, ciertas operatividades de los indicadores han sido tomadas como referencia. Sin embargo, no se han desarrollado herramientas metodológicas que sirvan para evaluar la idoneidad de ciertos productos de la construcción como el BT.

Este trabajo se centra en los aspectos constructivos que repercuten en la idoneidad del BT como producto, para lo que se han definido sus características físicas, químicas y mecánicas, como también las fases de producción y las técnicas de construcción, en aras de adoptar soluciones adaptadas a diferentes contextos. En este caso, el marco de exigencias para analizar la viabilidad del BT es la norma española de edificación (España, 2008). Los objetivos de este artículo son (I) establecer las determinaciones constructivas del BT y sus indicadores asociados, (II) exponer y validar el procedimiento metodológico de una herramienta para evaluar los aspectos constructivos de un diseño arquitectónico a nivel de proyecto básico desarrollado mediante BT, (III) exponer los resultados de dicha herramienta en los casos de estudio considerados, y (IV) analizar la respuesta de los indicadores empleados. Se estima que esta labor, es decir, establecer claramente las exigencias y determinaciones de esta herramienta, ofreciendo un análisis de indicadores, facilitará la toma de decisiones en este ámbito y, consecuentemente, contribuirá a optimizar la aplicabilidad del BT como solución constructiva sostenible.

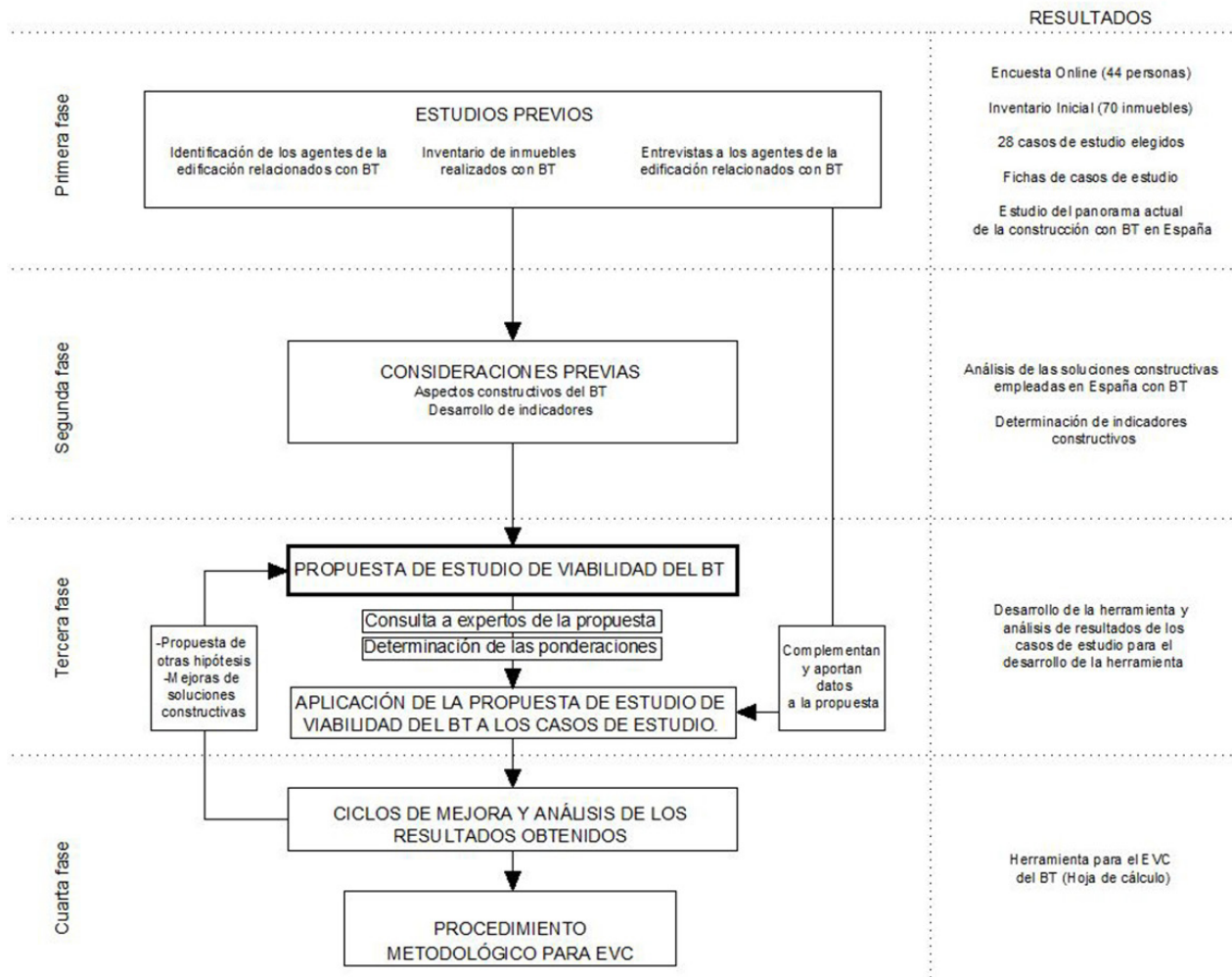


Figura 1. Procedimiento metodológico que se establece para establecer el EVC. Fuente: Elaboración de los autores.

PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN. INDICADORES

El proceso metodológico llevado a cabo para plantear la herramienta, que se denominará estudio de viabilidad constructiva (EVC), se ha compartimentado en las fases y contenidos que se detallan en la Figura 1.

A partir del inventario realizado sobre edificaciones que han empleado en su diseño BT en España, se establece, en una primera fase, un conjunto de 70 casos analizados que corresponden a 59 viviendas (uso residencial) y a otros 11 inmuebles de usos terciarios, docentes o industriales. Posteriormente, con en el trabajo de campo se seleccionan los casos más relevantes, quedando un total de 28 de los 70 estudiados, que se estructuran en 15 casos de uso residencial unifamiliar, 5 de uso plurifamiliar, 6 de uso terciario y 2 edificios docentes. En la segunda fase, se catalogan las determinaciones constructivas asociadas al BT (Tabla 1). En la tercera, se implementa la herramienta en los 28 casos citados y mediante ciclos de mejora, se adecúa su respuesta

óptima. En la última fase, se valida el funcionamiento del EVC en un caso de estudio no incluido en los 28 previos.

La primera clave del EVC consiste en plantear las determinaciones constructivas (segunda fase) que se organizan, atendiendo a las tres categorías desarrolladas en la Tabla 1: las características del producto (calidad), las exigencias constructivas (requisitos del propio sistema constructivo) y los condicionantes externos (acciones externas). Así, la calidad del producto contempla las características físicas, químicas y mecánicas del BT, definidas y/o declaradas por el fabricante y establecidas en el proyecto. En segundo lugar, los requisitos constructivos se asocian al producto para dar respuesta a ciertos aspectos del cumplimiento de la normativa vigente (Ministerio de Fomento, 1999), fundamentalmente la estabilidad estructural de la fábrica y la habitabilidad de los espacios. Y, respecto a la tercera categoría, habrá que considerar el análisis de las acciones externas que pueden afectar a la fábrica de BT a lo largo de su vida útil, las que dependen de la función que cumpla el muro (soporte de carga o cerramiento), de la localización y orientación de este, y de la agresividad del ambiente al que se expone (Soroni, 1992).

| INDICADORES: Calidad del producto (C-CA) | | | DETERMINACIONES: Calidad del producto | |
|---|--|--|---|--|
| C-CA-AF Aspectos físicos -002 -003 -004 -005 -006 -007 -008 -009 | -001 | Densidad | Densidad aparente y seca para exigencias acústicas | |
| | Resistencia mecánica | Resistencia a compresión simple declarada (UNE 41410) | | |
| | Resistencia a ciclos de humectación/secado | Resistencia a los ciclos en condiciones severas al exterior | | |
| | Resistencia a la erosión | Resistencia a los ciclos en condiciones severas al exterior | | |
| | Absorción de agua por capilaridad | Resistencia a los ciclos en condiciones severas al exterior | | |
| | Resistencia a ciclos de hielo/deshielo | Resistencia evaluada y/o declarada en zonas de riesgo | | |
| | Propiedades térmicas del producto | Caracterización de la conductividad térmica y del calor específico | | |
| | Permeabilidad al vapor de agua | Caracterización de la permeabilidad-resistencia al vapor de agua | | |
| | Adherencia a cortante | Resistencia a cortante (fábricas portantes) | | |
| C-CA-AQ Aspectos químicos -002 -003 | -001 | Caracterización química: tierra y adiciones | Estabilizantes químicos: cemento, cal, yesos, silicatos | |
| | El agua | Agua: composición, contenidos de sales y orgánicos | | |
| | Reacción al fuego | Reacción al fuego de la pieza | | |
| C-CA-AG Aspectos geométricos -002 | -001 | Dimensiones y tolerancias | Descripción del tipo, dimensiones, aparejos y tolerancias | |
| | Aspecto | Planeidad, defectos y alveolos | | |
| INDICADORES: Requisitos constructivos (C-RC) | | | DETERMINACIONES: Requisitos constructivos | |
| C-RC-S Seguridad | Estructural | -001.1 | Transmisión de las cargas | Tipo de muro, composición y espesor del mortero de rejuntado, tipo de fibra, esbeltez y distribución de cargas |
| | | -001.2 | Transmisión al terreno | |
| | | -001.3 | Capacidad portante | |
| | | -001.4 | Configuración espacial | Simetrías y rigideces del muro y encuentros |
| | | -001.5 | Configuración de los huecos | Distribución y tamaño de huecos |
| | Incendios | -002 | Seguridad en caso de incendios | Evaluación y/o declaración de la reacción al fuego |
| | Lesiones | -003 | Estado de las lesiones existentes | |
| C-RC-H Habitabilidad -002 -003 | -001 | Higiene y salubridad | Succión, absorción, porosidad abierta o difusividad del vapor de agua | |
| | Aislamiento acústico | Índice de reducción acústica o valor de aislamiento a ruido aéreo | | |
| | Comportamiento térmico | Evaluación de la resistencia térmica del muro | | |

| INDICADORES: Acciones externas (C-AE) | | | DETERMINACIONES: Acciones externas | |
|---------------------------------------|---|--------|------------------------------------|--|
| C-AE-F Físicas | Meteorología | -001.1 | Lluvia | Intensidad pluviométrica, vientos predominantes y protecciones diseñadas |
| | | -001.2 | Viento | |
| | | -001.3 | Temperatura | |
| | Terreno | -002 | Morfología del terreno | Capacidad de drenaje del terreno colindante |
| | Agentes naturales | -003 | Sismo | Riesgo sísmico local |
| C-AE-M Mecánicas | Agentes antrópicos | -001 | Uso del espacio | Impacto de las actividades humanas |
| C-AE-Q Físico-químicas | Organismos | -001 | Vegetación y animales. | Impacto de las actividades animales y vegetales |
| | Agentes antrópicos | -002 | Ambiente | Impacto de actividades humanas que contaminan el aire o agua |
| | Agentes naturales del entorno y del terreno | -003.1 | Humedad del terreno | Impacto del agua freática |
| | | -003.2 | Humedad del ambiente | Riesgo de condensaciones |
| | | -003.3 | Radiación solar | Degradación por radicación UV |

Tabla 1. Determinaciones consideradas e indicadores asociados. Fuente: Elaboración de los autores.

Las determinaciones presentadas en la Tabla 1 sirven para establecer un total de 35 indicadores asociados. Los indicadores se identifican mediante un código (C-CA: indicadores constructivos de calidad; C-RC: de requisitos constructivos; C-AE: de acciones externas) y se evalúan mediante valores numéricos basados en conceptos y apreciaciones. La valoración cuantitativa y/o cualitativa de cada indicador se denomina Nivel de Evaluación Técnica (NET) y requiere su definición básica según: (I) una descripción de sus tres posibles niveles (1, 2 o 3), y (II) las referencias y fuentes empleadas, como sugiere la UNE 21929-1:2010 (AENOR, 2009), para definir indicadores de sostenibilidad para edificios. Los tres niveles de los indicadores se expresan como: 1 (nivel de evaluación bajo, valoración negativa), 2 (nivel medio, valoración moderada) y 3 (nivel alto, valoración positiva) (Figura 2).

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL EVC

El EVC se diseña para ser aplicado en la primera etapa de elaboración del proyecto arquitectónico. En esta fase el objetivo es contemplar posibles estrategias en el diseño constructivo del muro no portante de cerramiento. El procedimiento de evaluación (Figura 3) consta de tres etapas diferenciadas: entrada de datos, establecimiento de niveles de los indicadores y evaluación que, a su vez, se desarrolla en dos etapas encadenadas.

En la primera etapa, consideradas las fuentes de información, se recopilan y clasifican las determinaciones

| Concepto: Resistencia a ciclos de humectación/secado | | Código: C-CA-AF-003 |
|---|-------|---|
| Raíz: Calidad del producto>Aspectos físicos | | |
| Descripción del parámetro: Conocer con antelación la resistencia a los ciclos de humectación y secado del BT aportará datos acerca de posibles soluciones constructivas que no supongan un deterioro del material ante exposiciones severas. | | |
| Consideraciones técnicas: ¿Qué nos interesa saber sobre la resistencia a ciclos de humectación y secado? | | |
| <ul style="list-style-type: none"> En el ensayo, al encontrarse en exposición severa, la fábrica debe ser capaz de soportar los seis ciclos de humectación y secado sin manifestar una serie de condiciones (ensayo específico de la UNE 41410:2008). El deterioro provocado por estos ciclos en la superficie hace que aumente la descomposición del material más rápidamente (Falceto, 2012). | | |
| Niveles: | | |
| Color | Nivel | Explicación |
| Bajo | 1 | En cuanto a la producción externa , el fabricante no declara ningún aspecto sobre la resistencia a ciclos de humectación y secado. En la producción in situ no será posible la declaración de la resistencia a ciclos de humectación y secado. |
| Medio | 2 | En cuanto a la producción externa , el fabricante declara acerca de la resistencia a ciclos de humectación y secado sin certificación. En la producción in situ , será posible la declaración de la resistencia a ciclos de humectación y secado pero no, su certificación. |
| Alto | 3 | En cuanto a la producción externa , el fabricante declara y certifica la resistencia a ciclos de humectación y secado. En la producción in situ , será posible la declaración y la certificación del producto. |
| Normativa: Página 14 - UNE 41410:2008 - (Aenor, 2008b) ASTM D559: 1989 - Ensayo de humectación y secado. | | |
| Referencias: (Guettala, Abibsi, & Houari, 2006) | | |

Figura 2. Definición básica del NET para el indicador de Resistencia a ciclos de humectación / secado. Fuente: Elaboración de los autores en base a normas UNE 41410 (2008) y ASTM D559 (1989).

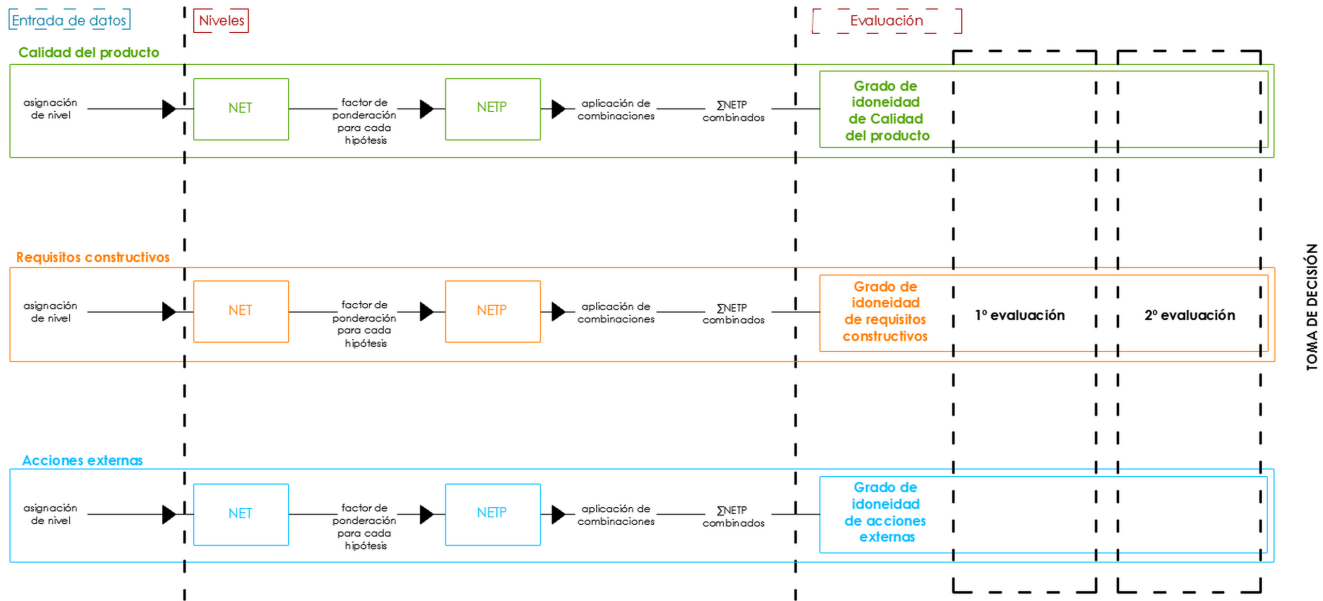


Figura 3. Etapas del procedimiento de la EVC. Fuente: Elaboración de los autores.

| Ámbitos de aplicación del BT en el muro | | | | | | | | | | |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|
| Cimentación | Base | Huecos | Dintel | Jambas | Alféizar | Acabados | Interior | Exterior | Instalación | Coronación |
| Ponderación por pesos (W _i) | | | | | | | | | | |
| | W ₁ | W ₂ | W ₃ | W ₄ | W ₅ | W ₆ | W ₇ | W ₈ | W ₉ | |
| C-CA Calidad del producto | | | | | | | | | | |
| C-CA-AF-001 Densidad | 10.00 | 6.90 | 4.35 | 4.35 | 4.55 | 4.55 | 4.76 | 8.00 | 10.53 | |
| C-CA-AF-002 Resistencia mecánica | 10.00 | 6.90 | 13.04 | 4.35 | 4.55 | 4.55 | 4.76 | 12.00 | 10.53 | |
| C-CA-AF-003 Resistencia a ciclos de humectación/secado | 5.00 | 6.90 | 4.35 | 8.70 | 9.09 | 9.09 | 9.52 | 4.00 | 5.26 | |
| C-CA-AF-004 Resistencia a la erosión | 5.00 | 10.30 | 4.35 | 4.35 | 4.55 | 9.09 | 4.76 | 8.00 | 5.26 | |
| C-CA-AF-005 Absorción de agua por capilaridad | 15.00 | 6.90 | 4.35 | 8.70 | 9.09 | 9.09 | 9.52 | 8.00 | 5.26 | |
| C-CA-AF-006 Resistencia a ciclos de hielo/deshielo | 10.00 | 6.90 | 4.35 | 4.35 | 4.55 | 4.55 | 9.52 | 4.00 | 5.26 | |
| C-CA-AF-007 Propiedades térmicas del producto | 5.00 | 6.90 | 8.70 | 8.70 | 9.09 | 4.55 | 4.76 | 4.00 | 5.26 | |
| C-CA-AF-008 Permeabilidad al vapor de agua | 5.00 | 6.90 | 8.70 | 8.70 | 9.09 | 13.64 | 14.29 | 4.00 | 5.26 | |
| C-CA-AF-009 Adherencia | 5.00 | 6.90 | 4.35 | 4.35 | 4.55 | 4.55 | 4.76 | 12.00 | 5.26 | |
| C-CA-AQ-001 Características de los constituyentes - Estabilizantes | 5.00 | 6.90 | 4.35 | 4.35 | 4.55 | 9.09 | 4.76 | 8.00 | 10.53 | |
| C-CA-AQ-002 El agua como constituyente | 5.00 | 6.90 | 4.35 | 4.35 | 4.55 | 4.55 | 4.76 | 8.00 | 5.26 | |
| C-CA-AQ-003 Reacción al fuego | 5.00 | 6.90 | 13.04 | 13.04 | 9.09 | 13.64 | 14.29 | 4.00 | 10.53 | |
| C-CA-AG-001 Dimensiones y tolerancias | 5.00 | 6.90 | 13.04 | 13.04 | 13.64 | 4.55 | 4.76 | 8.00 | 10.53 | |
| C-CA-AG-002 Aspecto | 10.00 | 6.90 | 8.70 | 8.70 | 9.09 | 4.55 | 4.76 | 8.00 | 5.26 | |
| TOTALES (%) | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| C-RC Requisitos constructivos | | | | | | | | | | |
| C-RC-S-001.1 Transmisión de las cargas | 17.65 | 15.00 | 11.11 | 7.69 | 7.14 | 5.88 | 6.67 | 15.00 | 10.53 | |
| C-RC-S-001.2 Transmisión al terreno | 17.65 | 5.00 | 11.11 | 7.69 | 7.14 | 5.88 | 6.67 | 15.00 | 10.53 | |
| C-RC-S-001.3 Capacidad portante | 17.65 | 15.00 | 16.67 | 7.69 | 7.14 | 5.88 | 6.67 | 10.00 | 15.79 | |
| C-RC-S-001.4 Configuración espacial | 5.88 | 10.00 | 11.11 | 15.38 | 14.29 | 11.76 | 20.00 | 5.00 | 10.53 | |
| C-RC-S-001.5 Huecos | 5.88 | 5.00 | 16.67 | 23.08 | 21.43 | 5.88 | 13.33 | 10.00 | 5.26 | |
| C-RC-S-002.1 Seguridad en caso de incendios | 5.88 | 10.00 | 11.11 | 7.69 | 7.14 | 17.65 | 6.67 | 10.00 | 10.53 | |
| C-RC-S-003.1 Estabilización de las lesiones existentes | 11.76 | 10.00 | 5.56 | 7.69 | 7.14 | 11.76 | 6.67 | 10.00 | 10.53 | |
| C-RC-H-001.1 Higiene, salud y protección del medio ambiente | 5.88 | 10.00 | 5.56 | 7.69 | 7.14 | 11.76 | 6.67 | 5.00 | 5.26 | |
| C-RC-H-001.2 Aislamiento acústico | 5.88 | 10.00 | 5.56 | 7.69 | 7.14 | 11.76 | 13.33 | 10.00 | 10.53 | |
| C-RC-H-001.3 Comportamiento térmico | 5.88 | 10.00 | 5.56 | 7.69 | 14.29 | 11.76 | 13.33 | 10.00 | 10.53 | |
| TOTALES (%) | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| C-AE Acciones externas | | | | | | | | | | |
| C-AE-F-001.1 Lluvia | 9.52 | 14.29 | 7.69 | 20.00 | 20.00 | 6.67 | 15.79 | 7.69 | 13.33 | |
| C-AE-F-001.2 Viento | 4.76 | 9.52 | 7.69 | 6.67 | 6.67 | 6.67 | 15.79 | 7.69 | 6.67 | |
| C-AE-F-001.3 Temperatura | 4.76 | 4.76 | 7.69 | 6.67 | 6.67 | 6.67 | 5.26 | 7.69 | 6.67 | |
| C-AE-F-002.1 Terreno | 14.29 | 9.52 | 7.69 | 6.67 | 6.67 | 6.67 | 5.26 | 7.69 | 6.67 | |
| C-AE-F-003.1 Sismo | 14.29 | 9.52 | 15.38 | 13.33 | 13.33 | 13.33 | 10.53 | 15.38 | 13.33 | |
| C-AE-M-001 Uso del espacio por animales, personas... | 9.52 | 9.52 | 7.69 | 6.67 | 6.67 | 13.33 | 10.53 | 7.69 | 6.67 | |
| C-AE-Q-001.1 Agentes biológicos | 9.52 | 9.52 | 7.69 | 6.67 | 6.67 | 6.67 | 5.26 | 7.69 | 6.67 | |
| C-AE-Q-002.1 Tipo de ambiente | 9.52 | 9.52 | 7.69 | 6.67 | 6.67 | 13.33 | 10.53 | 7.69 | 6.67 | |
| C-AE-Q-003.1 Humedad del terreno | 14.29 | 9.52 | 7.69 | 6.67 | 6.67 | 6.67 | 5.26 | 15.38 | 6.67 | |
| C-AE-Q-003.2 Humedad del ambiente | 4.76 | 9.52 | 15.38 | 13.33 | 13.33 | 13.33 | 10.53 | 7.69 | 13.33 | |
| C-AE-Q-003.3 Radiación solar | 4.76 | 4.76 | 7.69 | 6.67 | 6.67 | 6.67 | 5.26 | 7.69 | 13.33 | |
| TOTALES (%) | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |

Nota: Leve Moderado Decisivo

Figura 4. Resultado de la encuesta a expertos para establecer los promedios de pesos (W_i) en cada ámbito del muro de todos los indicadores. Fuente: Elaboración de los autores.

| Combinaciones (j) | Indicadores con minoración de valoración por combinación | | | Coeficiente K* para los ámbitos (i) | | | | | | | | |
|-------------------|--|---|---|-------------------------------------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------|------------|
| | | | | O-01A | O-01B | O-01C-01 | O-01C-02 | O-01C-03 | O-01D-01 | O-01D-02 | O-01E | O-01F |
| | | | | Cimentación | Base | Dintel | Jambas | Alféizar | Interior | Exterior | Instalación | Coronación |
| Nº 01 | | | C-AE-F-001.1/ C-AE-F-001.2 | 0 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| Nº 02 | | | C-AE-F-001.1/ C-AE-F-002.1/ C-AE-Q-003.1/ C-AE-M-001 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Nº 03 | | | C-AE-Q-001.1 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0.5 |
| Nº 04 | | C-RC-S-001.4 | C-AE-F-002.1/ C-AE-F-003.1 | 0 | 0 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.5 |
| Nº 05 | | C-RC-ES-001 | C-AE-Q-003.2 | 0 | 0 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 |
| Nº 06 | C-CA-AF-005/ C-CA-AF-008 | C-RC-ES-001 | C-AE-F-001.3/ C-AE-Q-003.2 | 0 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0.5 |
| Nº 07 | | C-RC-S-001.1/ C-RC-S-001.4/ C-RC-S-001.5 | | 0 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.5 |

(*) K=1 para el resto de indicadores no incluidos en las combinaciones

Figura 5. Combinaciones críticas según la encuesta a expertos y sus coeficientes de K_j de ponderación según los ámbitos establecidos. Fuente: Elaboración de los autores.

constructivas del caso de estudio conforme a las categorías de la Tabla 1, lo que sirve para valorar posteriormente los indicadores asociados, según el *NET* para cada uno de los 35 indicadores de las tres categorías. Cabe aclarar que al ser cada indicador de diferente naturaleza y distintos los ámbitos de aplicación dentro de un muro, no todos los indicadores van a tener el mismo grado de influencia en la evaluación, debido a lo cual sus valores no deben sumarse directamente. Por ello, se establecen métodos de ponderación, según la UNE-ISO/TS 21929 (AENOR, 2009), mediante la aplicación de pesos o coeficientes de corrección elaborados a partir de encuestas a expertos (ver Figura 1, fase 3), enfatizando en la valoración del grado de determinación de cada indicador, según nueve ámbitos de aplicación del BT definidos como elementos del cerramiento (se consideran: cimentación, base de muro, partes de un hueco -dintel, jambas, alféizar-, acabados -interior y exterior- instalaciones y coronación de muro) (Figura 4). En dichas encuestas también se incluyen tres tipos de indicadores, determinados según los pesos asociados: decisivo, moderado o leve. Los rangos del *NET* (1 a 3) se ponderan en función de la relación entre los indicadores propuestos y los nueve ámbitos definidos del muro. Así, los *NET* disminuirán o mantendrán su valor de forma proporcional mediante el producto con el coeficiente, obteniendo el nivel de evaluación técnica ponderada (*NETP*).

Por consiguiente, al existir nueve ámbitos, tal como refleja la Figura 4, se obtienen nueve conjuntos de *NETP*, luego de aplicar la siguiente ecuación [1]:

$$NETP_i = \frac{NET \times W_i}{100} \quad [1]$$

siendo W_i el peso para cada uno de los nueve ámbitos estudiados.

Las encuestas a expertos también sirven para considerar cuáles son las circunstancias más adversas cuando existan ciertas combinaciones críticas. A partir de ellas se establecen, entonces, siete combinaciones críticas de indicadores que minoran las valoraciones de los *NETP_i*. De esta forma, para cada uno de los nueve ámbitos se desarrollarían algunas de las siete combinaciones posibles que se detallan en la Figura 5. Al establecer la condición de que para $NET < 3$ de los indicadores asociados a las combinaciones, las valoraciones de sus correspondientes *NETP* se reducirán un 50% mediante el coeficiente K_j , quedando la ponderación de *NET* según la ecuación [2].

$$NETP_{i,j,q} = \frac{NET_q \times W_i}{100} \times K_j \quad [2]$$

A continuación, se suman todos los *NETP* en cada bloque (C-CA, C-RC, C-AE) y por combinación, dentro de cada uno de los nueve ámbitos del muro, tal como se detalla en el esquema de la Figura 6. El grado de idoneidad de cada ámbito (en adelante GI_i) correspondería al mínimo de las combinaciones realizadas, obteniéndose con el promedio de los nueve GI_i , el GI por cada bloque (C-CA, C-RC, C-AE), con el que se desarrollarán los dos niveles de evaluación.

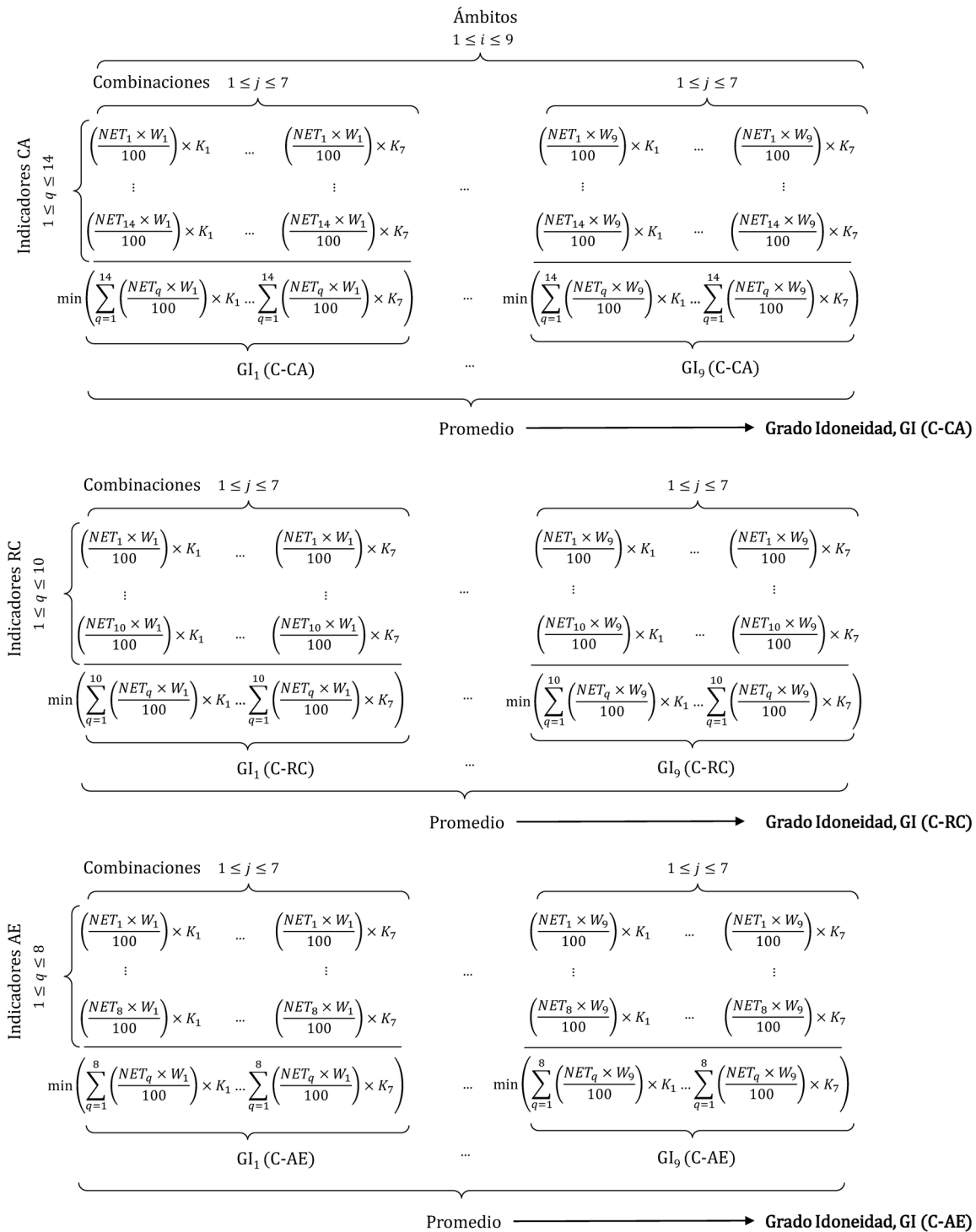


Figura 6. Secuencia de etapas en la evaluación del NET. Fuente: Elaboración de los autores.

El primer nivel de evaluación del *GI* permite obtener una respuesta afirmativa (“Adecuado”) o negativa (“No adecuado”) sobre la viabilidad constructiva del BT. Para ello, se establece un criterio final dependiente de los *GI*, evaluado como “Adecuado” siempre que los *GI* promedio de los tres bloques ($GI(C-CA) = 1.5$, $GI(C-RC) = 2.3$, $GI(C-AE) = 2.5$) sean mayores o iguales a unos umbrales de *GI* preestablecidos (consultar también en la Figura 11). La calificación de “Adecuado” implica que

las soluciones constructivas son viables desde un punto de vista constructivo y podrían ser implementadas en el proyecto de ejecución. Sin embargo, la respuesta negativa de “No adecuado” supondría desarrollar el segundo nivel de evaluación.

En aquel segundo nivel de evaluación, se estudian pormenorizadamente los indicadores en base a dos vías de análisis para identificar deficiencias y proponer

| Ámbito | Bloque(*) | GI bajo | | GI moderado | | GI elevado | |
|---------------------|-----------|---------|------|-------------|------|------------|-----|
| | | Min | Máx | Min | Máx | Min | Máx |
| Cimentación | RC | 0 | 2.32 | 2.33 | 2.69 | 2.7 | 3 |
| | AE | 0 | 2.32 | 2.33 | 2.69 | 2.7 | 3 |
| Base del muro | RC | 0 | 2.29 | 2.3 | 2.53 | 2.54 | 3 |
| | AE | 0 | 2.1 | 2.11 | 2.59 | 2.6 | 3 |
| Huecos - Dintel | RC | 0 | 2.18 | 2.19 | 2.59 | 2.6 | 3 |
| | AE | 0 | 1.99 | 2 | 2.59 | 2.6 | 3 |
| Huecos -Jambas | RC | 0 | 2.18 | 2.19 | 2.58 | 2.59 | 3 |
| | AE | 0 | 1.99 | 2 | 2.59 | 2.6 | 3 |
| Huecos -Alféizar | RC | 0 | 2.24 | 2.25 | 2.58 | 2.59 | 3 |
| | AE | 0 | 1.98 | 1.99 | 2.59 | 2.6 | 3 |
| Acabados - Interior | RC | 0 | 2.25 | 2.26 | 2.45 | 2.46 | 3 |
| | AE | 0 | 1.99 | 2 | 2.58 | 2.59 | 3 |
| Acabados- Exterior | RC | 0 | 2.32 | 2.33 | 2.58 | 2.59 | 3 |
| | AE | 0 | 2.19 | 2.2 | 2.58 | 2.59 | 3 |
| Recursos técnicos | RC | 0 | 2.29 | 2.3 | 2.7 | 2.71 | 3 |
| | AE | 0 | 2.29 | 2.3 | 2.7 | 2.71 | 3 |
| Coronación | RC | 0 | 2.39 | 2.4 | 2.59 | 2.6 | 3 |
| | AE | 0 | 2.18 | 2.19 | 2.58 | 2.59 | 3 |
| Partición | RC | 0 | 2.29 | 2.3 | 2.59 | 2.6 | 3 |
| | AE | 0 | 2.29 | 2.3 | 2.69 | 2.7 | 3 |

(*) RC: requisitos constructivos; AE: acciones externas

Figura 7. Clasificación de GI según intervalos establecidos para el segundo nivel de evaluación. Fuente: Elaboración de los autores.

mejoras. El primer análisis corresponde a los indicadores de calidad del producto, por lo que se cruzan los *NET* correspondientes con las exigencias de la normativa vigente de aplicación (fundamentalmente la UNE 41410:2008) y se detectan carencias en las especificaciones técnicas de las declaraciones del fabricante, que, a su vez, puedan subsanarse o al menos permitir propuestas de medidas alternativas. Para tal efecto, se han diseñado en el EVC unos algoritmos condicionales que vinculan estos indicadores con los valores de entrada de datos relacionados con la calidad del producto. El segundo análisis se centra en los *GI*, de los requisitos constructivos y en las acciones externas que afectan a todos los ámbitos del muro donde el BT es utilizado. En este caso, se han establecido tres clasificaciones de los rangos de los *GI*, según sean óptimos (verde), moderados (amarillo) o bajos (rojo). Esta clasificación se elabora a partir de los intervalos de *GI*, de los 28 casos de estudio implementados (Figura 7). Dependiendo de la clasificación de cada *GI*, se pueden establecer posibles soluciones para mejorar los aspectos considerados deficientes.

Una vez desarrollado el procedimiento metodológico del EVC, se efectúa una validación mediante la implementación del método en un caso de estudio no incluido en el listado de los 28 seleccionados como base para la elaboración de la herramienta.

VALIDACIÓN Y RESULTADOS

El objetivo de la validación de la herramienta propuesta es verificar que el procedimiento es apto para la evaluación

constructiva de muros de BT como parte de un proyecto arquitectónico. Con dicho propósito, se comprueba si los resultados del EVC de un caso de estudio cualquiera son los estimados en función de sus *GI*. Para realizar la validación del EVC se selecciona un edificio de tamaño suficiente (aproximadamente 700 m² construidos), con documentación técnica disponible, donde las soluciones constructivas son variadas y emplea BT con certificación técnica en los muros de cerramiento.

Con estas condiciones de partida, se selecciona la Escuela Infantil Municipal La Font del Rieral en Santa Eulàlia de Ronçana (Barcelona), designado como BAR-001. En un sector se emplean BTC, de dimensiones 29x14,5x9,5 cm, de un fabricante que aporta fichas técnicas del producto donde se justifican las exigencias normativas, aunque sin homologación oficial. Las principales características de las soluciones constructivas de los muros aparecen en la fachada del sector sur del edificio, compuesta por un muro portante de doble hoja con fábrica de BTC (cada hoja de un espesor de 14,5 cm) ancladas entre sí con llaves de acero galvanizado, con una capa de aislamiento de corcho natural (2 cm) y cámara de aire en su interior (5 cm). Hacia el interior, estos muros tienen el BTC a cara vista con un zócalo revestido de paneles contrachapados de madera hasta la altura de los alfeizares de ventanas; y hacia el exterior, se tratan con hidrofugante que se reviste con mortero de cal y cemento. Los huecos se diseñan con carpintería de madera adecuadamente impermeabilizados. El apoyo del muro portante a cimentación se lleva a cabo mediante hiladas de bloques de mortero de cemento, conectadas con barras corrugadas metálicas a la zapata corrida de hormigón armado; la lámina impermeabilizante se coloca

| Calidad del producto | | | Requisitos constructivos | | | |
|---|--|---|---|--|---|--|
| Producto | | BTC - Bioterre | Características generales del inmueble | Altura | 3 metros aprox. | |
| Producción | In situ / externa | Externa | | Nº de plantas | 1 | |
| Tipo de BT y composición del bloque previsto | Tipo de estabilizante | Cemento | | Composición espacial | No simétrica / Curva | |
| | Declaración de estabilizante | Sí | | Uso del edificio | Educación | |
| | Certificación de estabilizante | Sí | Características del muro | Localización del bloque en fachada | Exterior | |
| | Densidad prevista | Sí | | Tipo de revestimiento del muro o cara vista | Revestimiento | |
| | Utilización de fibras | No | | Tipo de mortero a utilizar | Mortero de cal | |
| | Indicación de composición del agua | No | | Composición del muro | Doble fábrica de BTC de 30 cm con cámara y aislamiento de corcho natural de 2 cm. | |
| Materia orgánica o sales | No | Previsión de altura del apoyo del muro | | 15 cm | | |
| | | Tipo de apoyo del muro en la cimentación | | Muro elevado por bloque de hormigón y anclado a la cimentación | | |
| Declaración de datos | Densidad | Sí | Previsión de cimentación | Zapata corrida de hormigón apoyada directamente sobre el firme | | |
| | Resistencia a compresión | Sí | Arriostamiento del muro | Viga de coronación | | |
| | Resistencia a ciclos de humectación/secado | Sí | Esbeltez | 2,5 metros de alto | | |
| | Resistencia a la erosión | Sí | Volumetría simétrica o irregular | Irregular | | |
| | Absorción de agua por capilaridad | Sí | Huecos | Con huecos | | |
| | Resistencia a ciclos de hielo /deshielo | Sí | Espesor previsto | 30 cms | | |
| | Propiedades térmicas del producto | Sí | Continuidad de los elementos | Sí | | |
| | Permeabilidad al vapor de agua | Sí | Previsión de juntas | Sí | | |
| | Reacción al fuego | Sí | Previsión de análisis del mortero utilizado de agarre | Sí | | |
| | Dimensiones | Sí | Elementos de protección | Utilización de zócalo | No | |
| | Tolerancias | Sí | | Utilización de cornisa | Sí | |
| | Planeidad | Sí | Características constructivas generales | Tipología estructural | Muros de carga | |
| Defectos | Sí | Sistema constructiva: portante o no portante | | Portante | | |
| Alveolos | Sí | Estructura: identificación de cargas y sobrecargas 1 | | Verticales | | |
| Certificación mediante ensayos normalizados | Densidad | Sí | Estructura: identificación de cargas y sobrecargas 2 | No procede | | |
| | Resistencia a compresión | Sí | Exigencias | ¿Exposición severa? | No | |
| | Resistencia a ciclos de humectación/secado | Sí | | ¿Cara vista? | No/Sí | |
| | Resistencia a la erosión | Sí | | ¿Exigencias de aislamiento térmico? | Sí | |
| | Absorción de agua por capilaridad | Sí | | ¿Parámetro exterior? | Sí | |
| | Resistencia a ciclos de hielo /deshielo | Sí | | Exigencias acústicas | Sí | |
| Propiedades térmicas del producto | Sí | Exigencias estructurales | | Sí | | |
| Permeabilidad al vapor de agua | Sí | Exigencias de resistencia al fuego | Sí | | | |
| Reacción al fuego | Sí | | | | | |
| Agentes externos | | | Nombre | Escuela Santa Eulalia de Ronçana BAR-001 | | |
| Aspectos ambientales | Zona pluviométrica de promedios (CTE) | III | Ámbitos | | | |
| | Viento dominante de la zona | Levante y poniente | Cimentación | No | | |
| | Viento (km/h) | - | Base del muro | Sí | | |
| | Zona eólica | C | Huecos en el muro | Dintel | Sí | |
| | Temperatura mínima | <0°C | | Jambas | Sí | |
| | Humedad del ambiente | >70% | Alféizar | Sí | | |
| Riesgo de microorganismos | Sí | Acabados | Interior | Sí | | |
| | | | Exterior | Sí | | |
| Aspectos del terreno | Descripción del perfil del terreno con respecto al lugar de intervención | Levemente inclinado | Instalación de recursos técnicos | | | |
| | Altura del nivel freático | Se desconoce | Sí | | | |
| | Coefficiente ag de la zona (Sismo) | 0,09 | Coronación del muro | | | |
| Aspectos patrimoniales | Catálogo | No | Sí | | | |
| | Normas específicas | No | | | | |
| | Grado de protección | - | | | | |
| | Estrategias de sostenibilidad | No | | | | |
| | Normas constructivas específicas | No | | | | |
| Otros | Tipo de vegetación colindante | De hoja caduca en la fachada sur que da sombra en verano y luz, en invierno | | | | |
| | Tipo de contaminación posible | Ninguno | | | | |
| | Uso del espacio colindante | Patio de juegos | | | | |

Figura 8. Entrada de datos inicial para el caso de estudio BAR-001. Fuente: Elaboración de los autores.

en el arranque del muro de BTC por encima del nivel del terreno. Una viga riostra de hormigón armado corona el muro donde apoya el envigado de madera aserrada de la cubierta. El proyecto contempla las exigencias del Código Técnico de la Edificación (España).

Al analizar la información disponible del proyecto, se realiza la entrada de datos (Figura 8), buscando obtener una respuesta óptima del EVC para el primer nivel de evaluación, dado que los parámetros de partida para los tres bloques considerados resultan favorables. Todos los

indicadores tienen un *NET* de tres, excepto C-RC-S-001.4 (Configuración espacial), C-RC-S-0021 (Seguridad en caso de incendio) y C-AE-F-001.3 (Temperatura), que se valoran con dos; y C-CA-AQ-002 (agua como constituyente), que toma valor de 1, al no tenerse constancia de las exigencias del agua de amasado, según UNE 41410.

El primer resultado del EVC (Figura 9) muestra los *NETP* y *GI_i* correspondientes a los diferentes ámbitos del muro estudiado, así como el *GI* promedio, que posibilita superar el primer nivel de evaluación. Se confirma así la hipótesis

| Indicador | Hipótesis inicial | | | | | | | | | Hipótesis 1 | Hipótesis 2 | |
|--|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| | Ámbitos de aplicación del BT en el muro | | | | | | | | | GI promedio | GI promedio | GI promedio |
| | Cimentación | Base | Dintel | Jambas | Alféizar | Interior | Exterior | Instalación | Coronación | | | |
| C-CA-AF-001 Densidad | 0.00 | 0.21 | 0.13 | 0.13 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.24 | 0.32 | | | |
| C-CA-AF-002 Resistencia mecánica | 0.00 | 0.21 | 0.39 | 0.13 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.36 | 0.32 | | | |
| C-CA-AF-003 Resistencia a ciclos de | 0.00 | 0.21 | 0.13 | 0.26 | 0.27 | 0.27 | 0.29 | 0.12 | 0.16 | | | |
| C-CA-AF-004 Resistencia a la erosión | 0.00 | 0.31 | 0.13 | 0.13 | 0.14 | 0.27 | 0.14 | 0.24 | 0.16 | | | |
| C-CA-AF-005 Absorción de agua por | 0.00 | 0.21 | 0.13 | 0.26 | 0.27 | 0.27 | 0.29 | 0.24 | 0.16 | | | |
| C-CA-AF-006 Resistencia a ciclos de | 0.00 | 0.21 | 0.13 | 0.13 | 0.14 | 0.14 | 0.29 | 0.12 | 0.16 | | | |
| C-CA-AF-007 Propiedades térmicas del | 0.00 | 0.21 | 0.26 | 0.26 | 0.27 | 0.14 | 0.14 | 0.12 | 0.16 | | | |
| C-CA-AF-008 Permeabilidad al vapor de | 0.00 | 0.21 | 0.26 | 0.26 | 0.27 | 0.41 | 0.43 | 0.12 | 0.16 | | | |
| C-CA-AF-009 Adherencia | 0.00 | 0.21 | 0.13 | 0.13 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.36 | 0.16 | | | |
| C-CA-AQ-001 Características de los | 0.00 | 0.21 | 0.13 | 0.13 | 0.14 | 0.27 | 0.14 | 0.24 | 0.32 | | | |
| C-CA-AQ-002 El agua como constituyente | 0.00 | 0.07 | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.08 | 0.05 | | | |
| C-CA-AQ-003 Reacción al fuego | 0.00 | 0.21 | 0.39 | 0.39 | 0.27 | 0.41 | 0.43 | 0.12 | 0.32 | | | |
| C-CA-AG-001 Dimensiones y tolerancias | 0.00 | 0.21 | 0.39 | 0.39 | 0.41 | 0.14 | 0.14 | 0.24 | 0.32 | | | |
| C-CA-AG-002 Aspecto | 0.00 | 0.21 | 0.26 | 0.26 | 0.27 | 0.14 | 0.14 | 0.24 | 0.16 | | | |
| GI_i (C-CA) | 0.00 | 2.86 | 2.91 | 2.91 | 2.91 | 2.91 | 2.90 | 2.84 | 2.89 | 2.89 | 2.52 | 2.89 |
| C-RC-S-001.1 Transmisión de las cargas | 0.00 | 0.45 | 0.33 | 0.23 | 0.21 | 0.18 | 0.20 | 0.45 | 0.32 | | | |
| C-RC-S-001.2 Transmisión al terreno | 0.00 | 0.15 | 0.33 | 0.23 | 0.21 | 0.18 | 0.20 | 0.45 | 0.32 | | | |
| C-RC-S-001.3 Capacidad portante | 0.00 | 0.45 | 0.50 | 0.23 | 0.21 | 0.18 | 0.20 | 0.30 | 0.47 | | | |
| C-RC-S-001.4 Configuración espacial | 0.00 | 0.20 | 0.22 | 0.31 | 0.29 | 0.24 | 0.40 | 0.10 | 0.21 | | | |
| C-RC-S-001.5 Configuración de los huecos | 0.00 | 0.15 | 0.50 | 0.69 | 0.64 | 0.18 | 0.40 | 0.30 | 0.16 | | | |
| C-RC-S-002.1 Seguridad en caso de | 0.00 | 0.20 | 0.22 | 0.15 | 0.14 | 0.35 | 0.13 | 0.20 | 0.21 | | | |
| C-RC-S-002.2 Estado de las lesiones | 0.00 | 0.30 | 0.17 | 0.23 | 0.21 | 0.35 | 0.20 | 0.30 | 0.32 | | | |
| C-RC-H-001.1 Higiene, salud y protección del | 0.00 | 0.30 | 0.17 | 0.23 | 0.21 | 0.35 | 0.20 | 0.15 | 0.16 | | | |
| C-RC-H-001.2 Aislamiento acústico | 0.00 | 0.30 | 0.17 | 0.23 | 0.21 | 0.35 | 0.40 | 0.30 | 0.32 | | | |
| C-RC-H-001.3 Aislamiento térmico | 0.00 | 0.30 | 0.17 | 0.23 | 0.43 | 0.35 | 0.40 | 0.30 | 0.32 | | | |
| GI_i (C-RC) | 0.00 | 2.80 | 2.78 | 2.77 | 2.79 | 2.71 | 2.73 | 2.85 | 2.79 | 2.78 | 2.70 | 2.20 |
| C-AE-F-001.1 Pluviosidad | 0.00 | 0.43 | 0.23 | 0.60 | 0.60 | 0.20 | 0.47 | 0.23 | 0.40 | | | |
| C-AE-F-001.2 Viento | 0.00 | 0.29 | 0.23 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.47 | 0.23 | 0.20 | | | |
| C-AE-F-001.3 Temperatura | 0.00 | 0.10 | 0.15 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.11 | 0.15 | 0.13 | | | |
| C-AE-F-002.1 Perfil del terreno | 0.00 | 0.29 | 0.23 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.16 | 0.23 | 0.20 | | | |
| C-AE-F-003.1 Sismo | 0.00 | 0.29 | 0.46 | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 0.32 | 0.46 | 0.40 | | | |
| C-AE-M-001 Uso del espacio por animales, | 0.00 | 0.29 | 0.23 | 0.20 | 0.20 | 0.40 | 0.32 | 0.23 | 0.20 | | | |
| C-AE-Q-001.1 Agentes biológicos | 0.00 | 0.29 | 0.23 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.16 | 0.23 | 0.20 | | | |
| C-AE-Q-002.1 Actividades del hombre | 0.00 | 0.29 | 0.23 | 0.20 | 0.20 | 0.40 | 0.32 | 0.23 | 0.20 | | | |
| C-AE-Q-003.1 Humedad del terreno | 0.00 | 0.29 | 0.23 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.16 | 0.46 | 0.20 | | | |
| C-AE-Q-003.2 Humedad del ambiente | 0.00 | 0.29 | 0.46 | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 0.32 | 0.23 | 0.40 | | | |
| C-AE-Q-003.3 Radiación solar | 0.00 | 0.14 | 0.23 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.16 | 0.23 | 0.40 | | | |
| GI_i (C-AE) | 0.00 | 2.95 | 2.92 | 2.93 | 2.93 | 2.93 | 2.95 | 2.92 | 2.93 | 2.93 | 2.93 | 2.93 |
| GI (Viabilidad) | | | | | | | | | | Aceptado | Aceptado | No aceptado |

Figura 9. Resultados de los NETP y GI (primer nivel de evaluación) del caso de estudio seleccionado. Fuente: Elaboración de los autores.

inicial, en la que se estimaba que el tipo de BT empleado era viable para las soluciones del proyecto.

En el segundo nivel de evaluación, todas las exigencias se cumplen (Figura 10) para el bloque de indicadores de calidad (C-CA). Respecto a los GI_i de los bloques C-RC y C-AE, se determinan unos valores cercanos a 3 y, por lo tanto, demuestran también una excelente viabilidad constructiva por las soluciones constructivas propuestas.

A continuación, en aras de conseguir diferentes respuestas de la herramienta, se asignan variaciones constructivas hipotéticas. Se establecen, entonces, variantes donde se analiza qué GI no es adecuado y se verifica cuáles son las soluciones que se proponen. La primera hipótesis se centra en alterar la calidad del producto suponiendo que no se dispone de ciertas declaraciones técnicas: resistencia a ciclos de humectación (indicador C-CA-AF-003, NET=1), resistencia a la erosión (indicador C-CA-

AF-004, NET=1) y resistencia a ciclos hielo-deshielo (indicador C-CA-AF-006, NET=1). Además, se asume que la hoja exterior del muro de BTC está sin revestir, cambiando los datos de entrada según estos mismos criterios. Consecuentemente, el resultado del segundo nivel de evaluación en cuanto a la calidad, refleja un incumplimiento en tres aspectos exigidos por UNE 41410, que garantizarían una calidad óptima al grado de exposición elevado: ensayos de absorción de agua por capilaridad, resistencia a ciclos de hielo/deshielo y permeabilidad al vapor de agua. Los GI_i (C-RC) se modifican levemente al haberse alterado el indicador C-RC-H-001 que controla la respuesta higroscópica del cerramiento, ahora expuesto; mientras que los GI_i (C-AE) quedan inalterados al no haberse modificado las condiciones (Figura 10). Se puede comprobar, además, que estos cambios no suponen un incumplimiento de la primera evaluación (Figura 9).

| IDONEIDAD SOBRE LA CALIDAD DEL PRODUCTO Y LAS EXIGENCIAS | | | | | | | | |
|--|---|--|--|-------------|-------------|--|--------|--|
| Indicadores de Calidad del producto | | Exigencias UNE 41410:2008 | Inicial | Hipótesis 1 | Hipótesis 2 | | | |
| C-CA-AF-001 | Densidad | Para exigencias acústicas | Cumple | Cumple | Cumple | | | |
| C-CA-AF-002 | Resistencia mecánica | C-CA-AF-009 Adherencia a cortante | Requisitos estructurales. Resistencia a compresión | Cumple | Cumple | | | |
| C-CA-AF-003 | Resistencia a ciclos de humectación/secado | Declaración/ensayo requerido con exposición severa | | Cumple | Cumple | | | |
| C-CA-AF-004 | Resistencia a la erosión | Declaración/ensayo requerido con exposición severa | | Cumple | Cumple | | | |
| C-CA-AF-005 | Absorción de agua por capilaridad | Declaración/ensayo requerido con fábricas vistas | | Cumple | No cumple | | Cumple | |
| C-CA-AF-006 | Resistencia a ciclos de hielo/deshielo | Declaración/ensayo requerido con fábricas vistas | | Cumple | No cumple | | Cumple | |
| C-CA-AF-007 | Propiedades térmicas del producto | Exigencias térmicas. Conductividad térmica (λ) | | Cumple | Cumple | | | |
| C-CA-AF-008 | Permeabilidad al vapor de agua | Declaración/ensayo requerido con fábrica exterior | | Cumple | No cumple | | Cumple | |
| C-CA-AQ-001 | Caracterización química: tierra y adiciones | Declaración/ensayo presencia de microorganismos | | Cumple | Cumple | | | |
| C-CA-AQ-002 | El agua | Declaración/ensayo contenidos orgánicos, sales y pH | | Cumple | Cumple | | | |
| C-CA-AQ-003 | Reacción al fuego | Declaración de clasificación de reacción al fuego | | Cumple | Cumple | | | |

| IDONEIDAD SOBRE LOS REQUISITOS CONSTRUCTIVOS Y LAS ACCIONES EXTERNAS | | | | | | | | |
|--|---------------------|-------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Ámbitos del muro | Grados de Idoneidad | | GI _i (C-RC) | GI _i (C-AE) | GI _i (C-RC) | GI _i (C-AE) | GI _i (C-RC) | GI _i (C-AE) |
| | | O-01A | Cimentación | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | O-01B | Base | 2.80 | 2.95 | 2.70 | 2.95 | 2.10 | 2.95 |
| | O-01C-01 | Dintel | 2.78 | 2.92 | 2.72 | 2.92 | 1.89 | 2.92 |
| | O-01C-02 | Jambas | 2.77 | 2.93 | 2.69 | 2.93 | 2.38 | 2.93 |
| | O-01C-03 | Alféizar | 2.79 | 2.93 | 2.71 | 2.93 | 2.43 | 2.93 |
| | O-01D-01 | Interior | 2.71 | 2.93 | 2.59 | 2.93 | 2.53 | 2.93 |
| | O-01D-02 | Exterior | 2.73 | 2.95 | 2.67 | 2.95 | 2.47 | 2.95 |
| | O-01E | Instalación | 2.85 | 2.92 | 2.80 | 2.92 | 2.50 | 2.92 |
| | O-01F | Coronación | 2.79 | 2.93 | 2.74 | 2.93 | 2.16 | 2.93 |

Figura 10. Resultados del segundo nivel de evaluación para el caso de estudio. Fuente: Elaboración de los autores.

En la segunda hipótesis, partiendo del estado inicial, se alteran algunas soluciones constructivas, que implican una transmisión excéntrica de las cargas sobre cimentación (C-RC-S-001.1, $NET=2$), una esbeltez del muro no adecuada ($>1:10$) y existencia de elementos que disminuyen la capacidad portante del muro (por ejemplo, mortero de relleno de juntas no adecuado) (C-RC-S-001.3, $NET=2$). Además, los huecos presentarían unas dimensiones mayores a las recomendadas para la construcción con tierra (Walker, 2001) (C-RC-S-001.5, $NET=1$). Respecto al primer nivel de evaluación (Figura 9), se observará un incumplimiento, debido a que GI_i (C-RC) es menor del medio establecido (2.3). Atendiendo al segundo nivel, se cumplen las exigencias de la UNE 41410, ya que la calidad del producto no se altera (Figura 10). Igualmente, como las circunstancias externas tampoco cambian, los GI_i (C-AE) siguen siendo favorables. No obstante, los GI_i (C-RC) muestran valoraciones bajas o medias, específicamente en los ámbitos más críticos: base, coronación y dinteles, por lo que sería necesario revisar las soluciones constructivas propuestas fundamentalmente en estos ámbitos.

Finalmente, como síntesis, en la Figura 11 se reflejan los resultados obtenidos para el primer nivel de evaluación de todos los casos de estudio empleados en el diseño de esta herramienta.

Se concluye que, de los 28 casos analizados, se obtienen diversos resultados que pueden reproducir, a

nivel general, ciertas pautas comunes en un proyecto de edificación. Por consiguiente, a pesar de que estos casos no son representativos estadísticamente, permiten generar una herramienta válida de retroalimentarse. El cumplimiento del primer nivel de evaluación se da en la mayoría de casos, aunque las causas de patologías son mucho más diversas y reflejan que el inconveniente reside ya sea en la calidad del producto suministrado o en las condiciones adversas del contexto (incluso en ambas simultáneamente).

CONCLUSIONES

El procedimiento metodológico de la investigación ha permitido validar el funcionamiento de la herramienta del EVC para evaluar las determinaciones de diseño de los muros de BT, ya que los resultados obtenidos son coherentes con la realidad constructiva del caso de estudio empleado. De este modo, el EVC podría ser implementado en cualquier diseño arquitectónico que use BT, lo que ayudaría a su utilización con un mejor respaldo técnico capaz de asegurar mejores resultados y favorecer el empleo de materiales de bajo impacto ambiental, como este producto.

Se insiste en que el empleo de indicadores, con una ponderación objetiva y ajustada a la realidad constructiva y al material, contribuye a que la toma de decisiones técnicas sea imparcial y objetiva, y

| | Grados de idoneidad (GI) | | | Resultado nivel 1 de evaluación |
|------------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| | C-CA Calidad del producto | C-RC Requisitos constructivos | C- AE Acciones externas | |
| Valor medio GI | 1.5 | 2.3 | 2.5 | |
| Casos de estudio | | | | |
| Andalucía | | | | |
| ALM-001 | 2.31 | 2.83 | 2.80 | Adecuado |
| ALM-002 | 2.52 | 2.40 | 2.49 | No Adecuado |
| GRA-001 | 1.27 | 2.56 | 2.52 | No Adecuado |
| MAL-001 | 1.28 | 2.11 | 1.81 | No Adecuado |
| SEV-001 | 2.52 | 2.83 | 2.87 | Adecuado |
| SEV-002 | 1.16 | 2.60 | 2.87 | No Adecuado |
| SEV-003 | 1.17 | 2.69 | 2.50 | No Adecuado |
| Aragón | | | | |
| ZAR-001 | 1.42 | 2.72 | 2.92 | No Adecuado |
| ZAR-002 | 2.52 | 2.72 | 2.72 | Adecuado |
| HUE-001 | 2.52 | 2.83 | 2.72 | Adecuado |
| Baleares | | | | |
| BAL-001 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | Adecuado |
| Castilla y León | | | | |
| PAL-001 | 1.41 | 2.82 | 2.52 | No Adecuado |
| PAL-002 | 1.43 | 2.73 | 2.93 | No Adecuado |
| PAL-003 | 1.43 | 3.00 | 2.84 | No Adecuado |
| SEG-001 | 2.70 | 2.81 | 2.66 | Adecuado |
| Cataluña | | | | |
| BAR-002 | 3.00 | 2.80 | 2.70 | Adecuado |
| GER-001 | 3.00 | 2.93 | 2.71 | Adecuado |
| GER-002 | 3.00 | 2.75 | 2.70 | Adecuado |
| Madrid | | | | |
| MAD-001 | 2.44 | 2.78 | 2.63 | Adecuado |
| MAD-002 | 2.45 | 2.70 | 2.55 | Adecuado |
| MAD-003 | 2.45 | 2.68 | 2.34 | No Adecuado |
| MAD-004 | 2.45 | 2.68 | 2.34 | No Adecuado |
| MAD-005 | 2.45 | 2.62 | 2.31 | No Adecuado |
| MAD-006 | 2.45 | 2.91 | 3.00 | Adecuado |
| MAD-007 | 2.45 | 2.68 | 2.79 | Adecuado |
| MAD-008 | 2.44 | 2.81 | 2.39 | No Adecuado |
| MAD-009 | 2.52 | 2.70 | 3.00 | Adecuado |
| C. Valenciana | | | | |
| ALI-001 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | Adecuado |

Figura 11. Resultados del primer nivel de evaluación del EVC para todos los casos de estudio. Fuente: Elaboración de los autores.

no se vea influenciada por prejuicios sociales o por desconocimiento con respecto al uso del BT.

La posibilidad que se ofrece de establecer una herramienta accesible para esta toma de decisiones permite que se incorporen al mercado productos con una consideración medioambiental más sostenible y respetuosa, los que, además, aportan variedad a soluciones habituales para la construcción de muros de cerramiento no portantes. Esta estrategia se podría implementar en el resto de soluciones constructivas y para el resto de productos que se están generando con criterios respetuosos con el medio ambiente, que pueden suponer elementos de desconfianza para los técnicos de la edificación.

De forma particular, de los resultados del EVC en los 28 casos de estudio, se puede extraer que:

- La calidad del BT, según las categorías establecidas para los indicadores, condiciona

estrechamente la viabilidad constructiva de una solución arquitectónica. Los resultados demuestran que, cuando el BT no dispone de exigencias de durabilidad certificadas/declaradas (en cuanto a resistencia a ciclos de humectación/secado, a la erosión, a ciclos de hielo/deshielo o absorción de agua por capilaridad) y está expuesto a condiciones desfavorables, los GI indican que el diseño debe ser revisado para la adecuada disposición constructiva.

- Los valores establecidos para los pesos y combinaciones son válidos para un amplio contexto geográfico, al haber sido diseñados por expertos internacionales, aunque podrían adaptarse para otras situaciones no consideradas.
- Al analizar las tres categorías de indicadores fijados, se destaca que el de requisitos constructivos aporta la mayor proporción de indicadores decisivos para el diseño de la estructura estable del muro.

- A partir de los indicadores empleados, se verifica que, como en cualquier diseño de fábrica, el arranque en la base o su unión a cimentación, el acabado de la cara exterior y el diseño de huecos son los puntos singulares donde se acumulan ponderaciones más decisivas y, por lo tanto, son aspectos a cuidar para obtener el mejor grado de idoneidad.

En síntesis, se concluye que este EVC puede servir como recurso básico para tomar decisiones en proyectos de obras nuevas o reformas de edificios donde se quiera emplear BT. Para desarrollar un conjunto de criterios de mayor aplicabilidad, se debe considerar indicadores económicos, medioambientales o sociales, que podrían ser incluidos en un procedimiento metodológico complementario al aquí presentado.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, se agradece a Daniel Maskell, Guillermo Rolón, Miguel Rocha, Rubén Salvador Roux Gutiérrez y Félix Jové su inestimable interés por aportar su visión crítica y técnica. Asimismo, a todos los técnicos, constructores, empresas y particulares, especialmente al arquitecto Gabriel Barbeta, por facilitar información crucial sobre todos los casos a nivel nacional que han posibilitado el desarrollo de esta herramienta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AENOR (2009). UNE-ISO/TS 21929-1. Sostenibilidad en construcción de edificios. Indicadores de sostenibilidad. Parte 1: Marco para el desarrollo de indicadores para edificios.

ASTM D559 (1989). *Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures*. ASTM International.

Canivell, J., Rodríguez-García, R., González-Serrano, A. M. y Romero Girón, A. (2020). Assessment of heritage rammed-earth buildings. The Alcázar of King Don Pedro I (Spain). *Journal of Architectural Engineering*, 6(2). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000400](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000400)

Cid-Falceto, J., Mazarrón, F. R. y Cañas, I. (2011). Las normativas de construcción con tierra en el mundo, 63(523), 159–169. *Informes de la construcción*. DOI: <https://doi.org/10.3989/ic.10.011>

Deboucha, S. y Hashim, R. (2011). A review on bricks and stabilized compressed earth blocks. *Scientific Research and Essays*, 6(3), 499–506.

Fernandes, J., Peixoto, M., Mateus, R. y Gervásio, H. (2019). Life cycle analysis of environmental impacts of earthen materials in the Portuguese context: Rammed earth and compressed earth blocks. *Journal of Cleaner Production*, 241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118286>

Gandia, R. M., Gomes, F. C., Corrêa, A. A. R., Rodrigues, M. C. y Mendes, R. F. (2019). Physical, mechanical and thermal behavior of adobe stabilized with glass fiber reinforced polymer waste. *Construction and Building Materials*, 222, 168–182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.107>

Guettala, A., Abibsi, A. y Houari, H. (2006). Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure. *Construction and Building Materials*, 20(3), 119–127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.001>

Jové Sandoval, F., Muñoz de la Calle, D. y Pahíno Rodríguez, L. (2011). Ensayos de erosión hídrica sobre muros de tierra (fábrica de BTC). Método, resultados y discusión. En *Construcción con tierra. Tecnología y Arquitectura. Congresos de Arquitectura de Tierra*. (pp. 193–204). Valladolid: Cátedra Juan de Villanueva. Universidad de Valladolid.

Lavie Arsène, M.-I., Frédéric, C. y Nathalie, F. (2020). Improvement of lifetime of compressed earth blocks by adding limestone, sandstone and porphyry aggregates. *Journal of Building Engineering*, 29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.101155>

López-Zambrano, M. J., Canivell, J. y Calama-González, C. (2019). Sistema de evaluación de soluciones de rehabilitación energética para edificios bien de interés cultural (SESREBIC). Su aplicación a monasterios BIC. *Informes de la Construcción*, 71(555), e300. DOI: <https://doi.org/10.3989/ic.63532>

Mahmood, O. I., Habeeb, A. A. y Al-Jumaili, H. T. (2019). Characteristic properties of CEB made of gypsum soil. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 28(12), 36–45.

Maldonado Ramos, L., Castilla Pascual, F., Vela Cossío, F. y Rivera Gómez, D. (2001). Rendimiento y coste energético en la construcción de cerramientos de fábrica de adobe y bloque de tierra comprimida. *Informes de la Construcción*, 53(473). DOI: <https://doi.org/10.3989/ic.2001.v53.i473.669>

Miloudi, Y., Fezzioui, N., Labbaci, B., Benidir, A., Roulet, C. A. y Oumeziane, Y. A. (2019). Hygrothermal characterization of compressed and cement stabilized earth blocks. *International Review of Civil Engineering*, 10(4), 177–187. DOI: <https://doi.org/10.15866/irece.v10i4.15975>

Ministerio de Fomento (1999). *Ley de Ordenación de la Edificación (Ley 38/1999)*. Madrid: Oficial del Estado. España. Recuperado de <https://www.boe.es/eli/es/l/1999/11/05/38/con>

Molar-Orozco, M., Velázquez-Lozano, J. y Vázquez-Jiménez, M. (2020). Comportamiento térmico de tres prototipos en Saltillo, Coahuila (bloques de tierra, concreto y tapa de huevo). *Hábitat Sustentable*, 10(1), 22 - 31. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2020.10.01.02>

Mosquera, P., Canas, I., Cid-Falceto, J. y Marcos, F. (2014). Determination of the thermal conductivity in adobe with several models. *Journal of Heat Transfer*, 136(3). DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4025560>

Soronis, G. (1992). The problem of durability in building design. *Construction and Building Materials*, 6(4), 205–211. DOI: [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(92\)90039-2](https://doi.org/10.1016/0950-0618(92)90039-2)

UNE 41410 (2008). *Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*. Madrid: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

Walker, P. (2001). *The Australian Earth building handbook*. Sydney, Australia: Standards Australia International.

Wati, E., Bidoung, J. C., Damfeu, J. C. y Meukam, P. (2020). Energy performance of earthen building walls in the equatorial and tropical climates: a case study of Cameroon. *Energy Efficiency*, 13, 735–750. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12053-020-09856-6>





Recibido 31/08/2020
Aceptado 12/12/2020

BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA (BTC) ESTABILIZADOS CON CAL Y CEMENTO. EVALUACIÓN DE SU IMPACTO AMBIENTAL Y SU RESISTENCIA A COMPRESIÓN

COMPRESSED EARTH BLOCKS (CEB) STABILIZED WITH LIME AND
CEMENT. EVALUATION OF BOTH THEIR ENVIRONMENTAL IMPACT
AND COMPRESSIVE STRENGTH

SANTIAGO PEDRO CABRERA
Ingeniero Civil
Becario Doctoral de la Facultad Regional Santa Fe
Universidad Tecnológica Nacional
Santa Fe, Argentina
<https://orcid.org/0000-0003-1300-4927>
spcabrera@outlook.com

YOLANDA GUADALUPE ARANDA JIMÉNEZ
Doctora en Arquitectura
Investigadora de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo
Universidad Autónoma de Tamaulipas
Ciudad Victoria, México
<https://orcid.org/0000-0002-5026-507X>
yoli212@yahoo.com.mx

EDGARDO JONATHAN SUÁREZ DOMÍNGUEZ
Doctor en Química
Investigador de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo
Universidad Autónoma de Tamaulipas
Ciudad Victoria, México
<https://orcid.org/0000-0002-1342-5732>
edgardo.suarez@docentes.uat.edu.mx

RODOLFO ROTONDARO
Doctor en Arquitectura
Investigador de la Facultad de Arquitectura,
Diseño y Urbanismo / CONICET
Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina
<https://orcid.org/0000-0001-9861-8340>
rodolforotondaro@gmail.com

RESUMEN

En este trabajo se presenta la evaluación del impacto ambiental y la resistencia a compresión de Bloques de Tierra Comprimida (BTC) estabilizados con cal aérea hidratada y cemento Portland. Para esa labor, se fabricaron 12 series de bloques estabilizados con diferentes proporciones de cal y cemento y se empleó la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Tras la realización de los ensayos y las simulaciones pudo concluirse que, usando suelos y arena característicos de la ciudad de Santa Fe (Argentina), estabilizados con determinados porcentajes de cemento Portland -comprendidos entre el 5 y el 10% en peso- pueden producirse BTC con niveles de resistencia suficientes para ser utilizados en muros de carga y, de esa forma, minimizar el impacto ambiental negativo asociado a su fabricación. Se concluye, además, que la estabilización con cal aérea no incrementa la resistencia a compresión de los BTC y aumenta, por el contrario, de manera significativa el impacto negativo de éstos sobre el medio ambiente.

Palabras clave

tierra, estabilización, resistencia de materiales, impacto ambiental

ABSTRACT

This work presents the evaluation of the environmental impact and compressive strength of Compressed Earth Blocks (CEB) stabilized with hydrated aerial lime and Portland cement. For this, 12 series of blocks stabilized with different proportions of lime and cement were manufactured and the Life Cycle Analysis (LCA) methodology was used. After conducting these assays and simulations, it could be concluded that, using earth and sand typical of the city of Santa Fe (Argentina), stabilized with certain percentages of Portland cement between 5 and 10% in weight, CEB can be produced with sufficient levels of strength for them to be used in load-bearing walls, in this way minimizing the negative environmental impact associated with their manufacturing. It is also concluded that the stabilization with aerial lime does not increase the CEB's compressive strength and, on the contrary, significantly increases their negative impact on the environment.

Keywords

earth, stabilization, material strength, environmental impact

INTRODUCCIÓN

El Bloque de Tierra comprimida o BTC es un mampuesto fabricado mediante la compresión o el prensado de suelo estabilizado que se encuentra contenido en el interior de una prensa mecánica o hidráulica (Neves y Borges Farías, 2011). Estas prensas pueden ser manuales, par bajas demandas de producción, o bien, automáticas, para sistemas industrializados (González y Cabrera, 2017). La tecnología del BTC inició su desarrollo en Colombia a comienzos de la década de los 50, de la mano del Centro Interamericano de Vivienda y Planeamiento -CINVA-, como una alternativa económica de elementos constructivos que, actualmente, se considera una de las tecnologías latinoamericanas más difundidas en el mundo (Angulo y Carreño, 2017).

La mampostería con BTC es, en efecto, una técnica de construcción económica que presenta mejores propiedades de resistencia y durabilidad que las construidas con adobe, y una gran potencialidad de industrialización de sus unidades (Herrera Villa, 2018). Además, estos bloques poseen varias ventajas que les permiten responder a los problemas energéticos y climáticos actuales, por ser elementos fabricados con materiales de baja energía incorporada (Bradley, Gohnert y Bulovic, 2018), en comparación con los ladrillos de arcilla cocida y arena-cemento, de modo que reducen el total de energía requerida para la construcción y el transporte, lo cual se debe, en gran medida, a que la tierra es un recurso natural abundante y reciclable (Ben Mansour, Ogam, Jelidi, Cherif y Ben Jabrallah, 2017; Hegyi, Dico y Catalan, 2016).

Al igual que las demás técnicas de construcción con tierra, los BTC presentan dos limitaciones principales:

- Si las características de la tierra empleada para su fabricación no son las adecuadas, su resistencia a compresión no será suficiente para cumplir funciones estructurales (Ouedraogo, Aubert, Tribout y Escadeilas, 2020);
- Independientemente del tipo de tierra empleada para su fabricación, exhiben algunos problemas de durabilidad: se degradan frente a ciertos fenómenos atmosféricos, en especial el agua (Laborel-Préneron, Aubert, Jean-Emmanuel Magniont, Maillard y Poirier, 2016).

Ambas limitaciones pueden minimizarse e, incluso, eliminarse empleando pequeños porcentajes de estabilizantes químicos durante su fabricación, los cuales mejoran sus propiedades físico-mecánicas, aumentando su resistencia y durabilidad (Guzmán y Iñiguez, 2016).

Diversos aditivos han sido empleados en la estabilización de los BTC: desde sustancias naturales como acíbar de sábila (Aranda Jiménez y Suárez-Domínguez, 2014), caseína y celulosa (Vissac, Bourges y Gandreau, 2017),

hasta derivados del petróleo como bitúmenes naturales y emulsiones asfálticas (Van Damme y Houben, 2018). Sin embargo, desde los orígenes de esta tecnología, el estabilizante más empleado ha sido el cemento Portland (Elahi, Shahriar, Alam y Abedin, 2020), tal es el caso que en numerosas regiones de Argentina y Latinoamérica suelen ser conocidos como "Bloques de Suelo Cemento", léxico muy influenciado por la ingeniería de caminos.

A pesar de las buenas prestaciones que poseen los BTC estabilizados con cemento, debe considerarse que, junto con el elevado costo económico de este aditivo, su fabricación requiere también de elevados procesos de transformación térmica –que alcanzan los 1.450°C- y libera enormes cantidades de CO₂ a la atmósfera. Se estima que por cada tonelada de cemento Portland producida son liberadas a la atmósfera 0.86 toneladas de CO₂ (Guilarducci, 2018).

Otro aditivo frecuentemente empleado en la estabilización de BTC es la cal, tanto aérea como hidráulica (Malkanthy, Balthazaar y Perera, 2020), cuyo impacto ambiental es significativamente menor al del cemento Portland por los siguientes motivos:

- La temperatura requerida para su fabricación es de aproximadamente 900°C (Maddalena, Roberts y Hamilton, 2018);
- Puede ser producida a pequeña escala y de manera artesanal (Guapi Cepeda y Yagual Flores, 2017);
- La cal aérea tiene la propiedad de absorber durante su proceso de endurecimiento (carbonatación) gran parte del CO₂ liberado a la atmósfera durante su proceso de fabricación (Qiu, 2020).

Numerosos países cuentan con normas técnicas específicas para la construcción con tierra, no obstante, son pocos los que poseen normas de ensayo específicas para BTC publicadas por Organismos Oficiales de Normalización, entre los que destacan Brasil, Colombia, Francia, España y México (Cabrera, González y Rotondaro, 2020).

En este contexto, el objetivo general de la investigación expuesta consistió en evaluar las propiedades mecánicas y ambientales de los BTC estabilizados con cal aérea hidratada y contrastarlas con las de sus homólogos estabilizados con cemento Portland. Para ello, se proponen los siguientes objetivos particulares:

- Determinar la resistencia media a compresión de BTC estabilizados con diferentes porcentajes de cal aérea hidratada y cemento Portland;
- Correlacionar la resistencia media a compresión de los BTC con el porcentaje y tipo de estabilizante empleado.
- Calcular el impacto ambiental de los BTC estabilizados con diferentes proporciones de cal y cemento.

| Tamiz | | 4.75 mm | 0.425 mm | 0.250 mm | 0.150 mm | 0.075 mm | 0.002 mm |
|-------------|--------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Pasante (%) | Tierra | 0.0 | 86.0 | - | - | 57.0 | 29.0 |
| | Arena | 100 | 96.2 | 89.3 | 48.7 | 0.6 | 0.0 |

Tabla 1. Granulometría de la materia prima. Fuente: Elaboración de los autores.

METODOLOGÍA

FABRICACIÓN DE LOS BTC

La tierra empleada en la fabricación de los BTC provino de una cantera emplazada en la comuna de Monte Vera (Santa Fe, Argentina) clasificada como un limo arcilloso de baja plasticidad "CL ML" con 29% de arcilla (caolinita e ilita) y un índice de contracción lineal del 4%. Con intenciones de mejorar la curva granulométrica de la tierra e incrementar así la resistencia a compresión de los BTC producidos (Sittón, Zeinali, Heidarian y Story, 2018), fue mezclada con arena proveniente del río Paraná y constituida principalmente por cuarzo (SiO₂). La distribución granulométrica de la tierra y la arena empleadas en la fabricación de los BTC puede apreciarse en la Tabla 1.

Para determinar la resistencia a compresión de los BTC estabilizados con diferentes proporciones de cal y cemento se fabricaron en laboratorio 12 series de 5 BTC cada una, manteniendo fija la relación tierra/arena. Se produjeron bloques de 25.0 x 12.5 x 6.25 cm con dos perforaciones verticales de 6.0 cm de diámetro cada una, empleando para ello una prensa hidráulica Eco Brava desarrollada por la compañía brasileña "Eco Máquinas". Todas las series fueron confeccionadas con una humedad del 12.5%, considerando el peso seco de los materiales. Los estabilizantes usados fueron cal aérea hidratada marca "Andina" y cemento Portland compuesto CPC 40 marca "Holcim". Finalmente, en la Tabla 2 se expresan las diferentes dosificaciones utilizadas.

Los BTC producidos fueron cortados en 2 mitades, generando así 2 probetas de 12.5 x 12.5 x 6.5 cm por BTC, de las que luego se seleccionaron, de manera aleatoria, 6 por serie, para someterlas al ensayo de resistencia a compresión estipulado por la norma mexicana NMX-C-508 (ONNCCE, 2015): ensayo sin encabezado y velocidad de carga variable (para que el ensayo dure entre 1 y 2 minutos). Todas las probetas se ensayaron secas con 28 días de edad y curadas por 7 días (con excepción de las series sin estabilizante) a una humedad relativa del 100%, permaneciendo luego

| Serie | | Tierra (%) | Arena (%) | Cal (%) | Cemento (%) |
|---------|-----------|------------|-----------|---------|-------------|
| Cemento | Cto. 0% | 50,0 | 50,0 | - | 0,0 |
| | Cto. 2,5% | 48,75 | 48,75 | - | 2,5 |
| | Cto. 5% | 47,5 | 47,5 | - | 5,0 |
| | Cto. 10% | 45,0 | 45,0 | - | 10,0 |
| | Cto. 15% | 42,5 | 42,5 | - | 15,0 |
| | Cto. 20% | 40,0 | 40,0 | - | 20,0 |
| Cal | Cal 0% | 70,0 | 30,0 | 0,0 | - |
| | Cal 2,5% | 68,25 | 29,25 | 2,5 | - |
| | Cal 5% | 66,5 | 28,5 | 5,0 | - |
| | Cal 10% | 63,0 | 27,0 | 10,0 | - |
| | Cal 15% | 59,5 | 25,5 | 15,0 | - |
| | Cal 20% | 56,0 | 24,0 | 20,0 | - |

Tabla 2. Dosificación en peso de las diferentes series de BTC. Fuente: Elaboración de los autores.

21 días en ambiente de laboratorio, a una humedad relativa del 55% y 24°C de temperatura.

Con el fin de evaluar los resultados obtenidos y determinar si las resistencias medias a compresión de cada serie eran estadísticamente diferentes entre sí, se realizó un análisis de varianzas ANOVA y un "análisis de parejas de Tukey", empleando el software estadístico MiniTab¹.

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Para determinar el impacto ambiental de los BTC estabilizados con diferentes contenidos de cal y cemento, se empleó la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) propuesta por la norma IRAM-ISO 14040 (IRAM, 2017), la cual permite caracterizar y cuantificar los diversos impactos ambientales potenciales asociados a cada una de las etapas de la vida útil de un producto o sistema (Carretero-Ayuso y García-Sanz-Calcedo, 2018). En la realización del análisis de inventario propuesto por la IRAM-ISO 14040, se utilizó el software SimaPro9 (Copyright Pré, 2019).

1 Minitab Statical Software. Véase: <https://www.minitab.com/es-mx/company/>

UNIDAD DE ANÁLISIS

En este marco, se adoptaron como unidades funcionales BTC individuales de 15 x 30 x 7.5 cm con dos agujeros de 6 cm de diámetro (geometría de los BTC producidos por la empresa Mobak en Santa Fe, Argentina) y una masa de 4 kg, cada uno de ellos con un contenido de cal o cemento diferente, coincidentes con la dosificación de los bloques ensayados a compresión (ver Tabla 2).

LÍMITES DEL SISTEMA

El alcance del estudio se limitó al enfoque denominado “de la cuna a la puerta”, mediante el cual se consideran únicamente los flujos de entrada y salida de las etapas comprendidas entre la extracción de las materias primas necesarias para la fabricación de los bloques hasta que éstos se encuentran terminados y listos para insertarse en el mercado, fuera de la planta de producción (Curadelli, López, Piastrellini, Arena y Civit, 2019). Para cuantificar el impacto asociado al transporte de las materias primas desde su punto de extracción o adquisición se consideró lo siguiente:

- Unidad productiva: El modelo de análisis se basó en la Fábrica de BTC Mobak, ubicada en la comuna de Arroyo Leyes (Santa Fe), cuya capacidad productiva es de 3.000 BTC diarios.
- Tierra: La cantera de extracción de la tierra se encuentra en la comuna de Monte Vera (Santa Fe), a 35 km de distancia de la fábrica.
- Arena: La adquisición de la arena empleada en la fabricación de los bloques se llevó a cabo en una arenera de la Ciudad de Santa Fe, a 19 km de distancia de la unidad productiva.
- Estabilizantes: Se consideró la utilización de cal aérea hidratada en bolsas de 25 kg y cemento Portland en bolsas de 50 kg, ambos adquiridos en un corralón localizado al norte de la ciudad de Santa Fe, a 35 km de la fábrica.
- Transporte: Para el transporte de la tierra y la arena se consideró la utilización de un camión tipo euro3 de 16-32 tn de capacidad; mientras que, para el transporte de los estabilizantes, un camión euro3 de 7.5-16 tn de capacidad. Estas categorías de vehículos se adoptaron siguiendo los requisitos estipulados por la Norma 5 de la Unión Europea (UE, 2007).

- Extracción y producción de materia prima: con el objetivo de cuantificar el impacto asociado a la extracción y comercialización de la tierra y la arena, y la producción de cal y cemento con su correspondiente distribución hacia los centros de comercialización, se empleó la base de datos Ecoinvent3 presente en el software SimaPro (Copyright Pré, 2019).

TRABAJO DE CAMPO

En aras de cuantificar el consumo de energía y recursos y los descartes residuales correspondientes a la etapa de fabricación de este tipo de bloques, se efectuaron visitas de campo a la empresa productora de BTC “Mobak”², en las que se registraron *in situ* los datos requeridos.

En cada visita efectuada se tomó nota de la cantidad, proporción y origen de las materias primas usadas para producir los BTC, así como el destino final del producto ya manufacturado, con el fin de determinar las distancias de traslado. Se documentó el proceso de producción, especificando las etapas, máquinas y tipo de energía utilizada en cada una de fase del proceso. Se registró además el nombre, marca y modelo de la maquinaria empleada, su capacidad productiva y la eficiencia energética de cada operación expresada en unidades de energía. Asimismo, se registraron los distintos medios de transporte empleados, su capacidad de carga y las distancias recorridas.

En la Figura 1 se resume el proceso productivo aplicado por la empresa Mobak en la fabricación de sus BTC, donde, a diferencia de las dosificaciones propuestas para esta investigación, se incorporan dos tipos de arena con diferentes granulometrías y se añaden, tanto cal como cemento para la estabilización.

RESULTADOS

RESISTENCIA A COMPRESIÓN

En la Tabla 3 se detallan los resultados de los ensayos de resistencia a compresión realizados sobre cada una de las series de probetas: número de probetas ensayadas (N), resistencia media a compresión (μ) y desviación estándar (σ) de cada serie, el valor del estadístico P resultante del análisis de varianzas y los factores de grupo del análisis de parejas de Tukey. En la Figura 2 se muestran las resistencias medias a compresión de cada serie de BTC producidos.

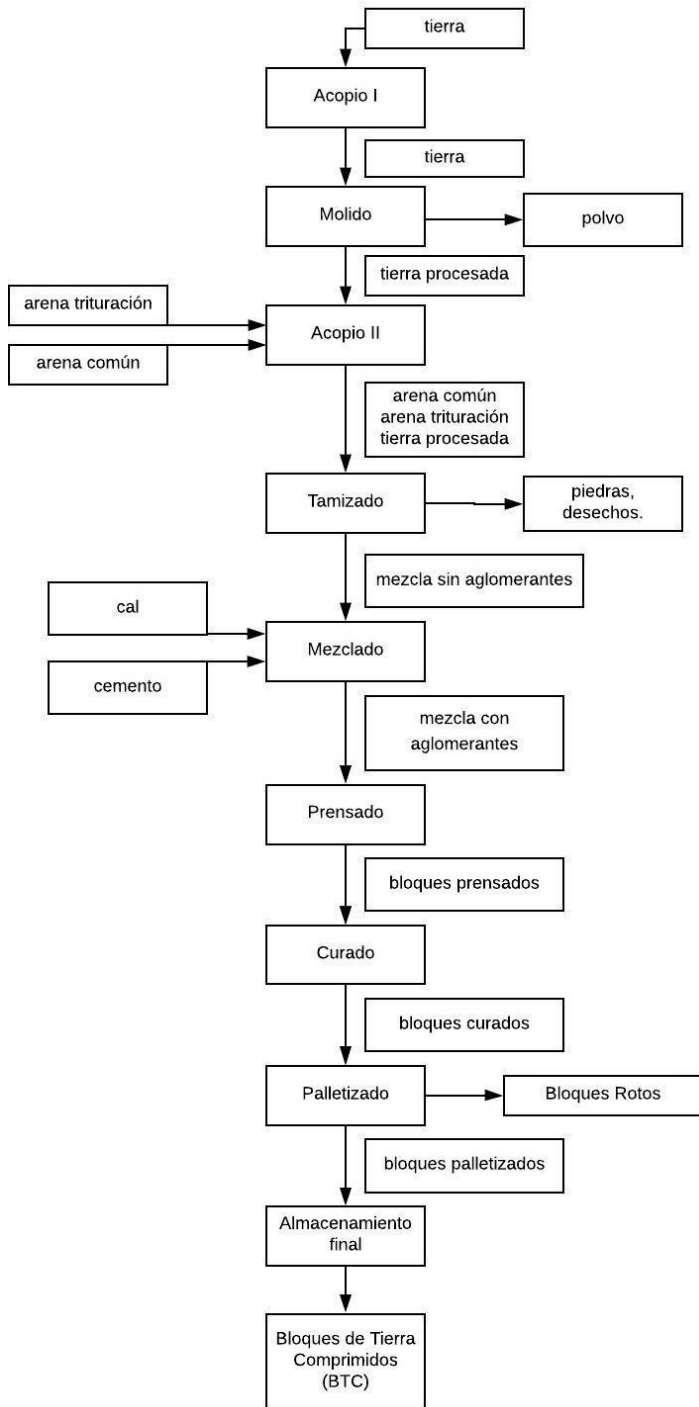


Figura 1. Diagrama de flujo de la producción de BTC. Fuente: Elaboración de los autores.

TRABAJO DE CAMPO

En la Tabla 4 se observa el consumo energético asociado a cada etapa del proceso productivo de los BTC. Estos consumos se obtuvieron tras relevar la planta de producción de la empresa Mobak: una producción media de 36 lotes por día, cada uno de ellos con 55 BTC. La asignación del consumo energético por unidad elemental (1 BTC) se realizó dividiendo el consumo eléctrico de todo el lote por 55.

| Series | N | μ (MPa) | σ (MPa) p | ANOVA | | |
|---------|----------|-------------|---------------------|-------|---------|---|
| | | | | Grupo | | |
| Cemento | Cto 0% | 6 | 0.76 | 0.26 | < 0.001 | A |
| | Cto 2.5% | 6 | 0.81 | 0.14 | | A |
| | Cto 5% | 6 | 1.39 | 0.16 | | A |
| | Cto 10% | 6 | 5.09 | 0.52 | | B |
| | Cto 15% | 6 | 6.08 | 0.77 | | B |
| | Cto 20% | 6 | 7.426 | 1.34 | | C |
| Cal | Cal 0% | 6 | 0.57 | 0.13 | 0.372 | D |
| | Cal 2.5% | 6 | 0.57 | 0.08 | | D |
| | Cal 5% | 6 | 0.57 | 0.03 | | D |
| | Cal 10% | 6 | 0.66 | 0.12 | | D |
| | Cal 15% | 6 | 0.60 | 0.10 | | D |
| | Cal 20% | 6 | 0.54 | 0.05 | | D |

Tabla 3. Estadísticos descriptivos, análisis de varianza ANOVA y agrupamiento según análisis de Tukey de las series de BTC. Fuente: Elaboración de los autores.

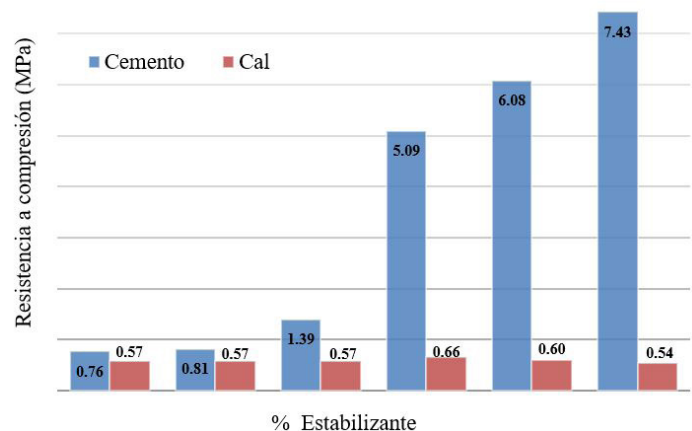


Figura 2. Resistencia a compresión de las diferentes series de BTC. Fuente: Elaboración de los autores.

| Consumo energético por operación | Potencia del equipo (KW) | Tiempo de uso por lote (min) | Energía consumida por lote (MJ) | Energía consumida por BTC (KJ) |
|----------------------------------|--------------------------|------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Desterronadora | 2.0 | 8.5 | 1.020 | 0.0185 |
| Tamizadora | 1.1 | 8.5 | 0.561 | 0.0102 |
| Mezcladora | 5.5 | 7.0 | 2.310 | 0.0420 |
| Cinta transportadora corta | 0.8 | 7.0 | 0.336 | 0.0061 |
| Cinta transportadora larga | 1.1 | 7.0 | 0.462 | 0.0084 |
| Prensa hidráulica | 3.0 | 8.5 | 1.530 | 0.0278 |
| Curado | 0.4 | - | - | 0.0024 |
| | | | TOTAL | 0.1155 |

Tabla 4. Energía consumida en cada etapa del proceso de fabricación de 1 BTC. Fuente: Elaboración de los autores.

| Serie | Acidificación del suelo y el agua | Eutrofización del agua | Calentamiento global | Oxidación fotoquímica | Consumo de minerales | Consumo de combustibles fósiles | Consumo de agua | Deterioro de la capa de ozono |
|----------|-----------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------------|---------------------|-------------------------------|
| | (kg SO ₂ eq) | (kg PO ₄ eq) | (kg CO ₂ eq) | (kg NMVOC) | (kg Sb eq) | (MJ) | (m ³ eq) | (kg CFC-11 eq) |
| Cal 0% | 2,270E-04 | 4,733E-05 | 0,0419 | 2,427E-04 | 1,110E-07 | 0,6137 | 0,1085 | 5,761E-09 |
| Cal 2,5% | 3,530E-04 | 6,798E-05 | 0,1350 | 3,624E-04 | 1,242E-07 | 1,0708 | 0,1104 | 1,130E-08 |
| Cal 5% | 4,790E-04 | 8,864E-05 | 0,2280 | 4,821E-04 | 1,374E-07 | 1,5278 | 0,1123 | 1,685E-08 |
| Cal 10% | 7,311E-04 | 1,299E-04 | 0,4150 | 7,216E-04 | 1,639E-07 | 2,4419 | 0,1161 | 2,793E-08 |
| Cal 15% | 9,831E-04 | 1,713E-04 | 0,6010 | 9,610E-04 | 1,903E-07 | 3,3559 | 0,1198 | 3,902E-08 |
| Cal 20% | 1,235E-03 | 2,126E-04 | 0,7870 | 1,200E-03 | 2,167E-07 | 4,2700 | 0,1236 | 5,010E-08 |
| Cto 0% | 2,489E-04 | 5,420E-05 | 0,0453 | 2,650E-04 | 1,296E-07 | 0,6532 | 0,1579 | 6,063E-09 |
| Cto 2,5% | 4,515E-04 | 1,019E-04 | 0,1380 | 4,443E-04 | 1,701E-07 | 1,0228 | 0,1609 | 8,701E-09 |
| Cto 5% | 6,541E-04 | 1,497E-04 | 0,2310 | 6,237E-04 | 2,105E-07 | 1,3924 | 0,1639 | 1,134E-08 |
| Cto 10% | 1,059E-03 | 2,451E-04 | 0,4160 | 9,825E-04 | 2,913E-07 | 2,1316 | 0,1699 | 1,661E-08 |
| Cto 15% | 1,038E-03 | 3,462E-04 | 0,4920 | 1,017E-03 | 2,575E-07 | 1,6293 | 0,1569 | 1,361E-08 |
| Cto 20% | 1,870E-03 | 4,360E-04 | 0,7870 | 1,700E-03 | 4,530E-07 | 3,6100 | 0,1820 | 2,717E-08 |

Tabla 5. Resultados del inventario de impactos de las diferentes series de BTC. Fuente: Elaboración de los autores.

IMPACTO AMBIENTAL

A la hora de expresar los resultados del análisis de ciclo de vida realizado sobre las 12 series de BTC mediante el software Simapro, se utilizó el método de la EPD 2018 (Environmental Product Declarations) que cuantifica el impacto ambiental en 8 niveles de impacto, los cuales pueden apreciarse en la Tabla 5.

DISCUSIÓN

SOBRE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN

El efecto del contenido de estabilizante en la resistencia a compresión de las diferentes series de BTC presentó comportamientos diferentes según el tipo de aditivo empleado. Puede afirmarse, con un 95% de confianza, que la resistencia media a compresión de todas las series estabilizadas con cal, independientemente del porcentaje utilizado, es estadísticamente igual a la resistencia media a compresión de la serie de BTC sin estabilizar.

Por el contrario, la resistencia de los BTC con cemento se vio sumamente influenciada por el porcentaje de estabilizante empleado: las series de bloques estabilizadas con 2.5 y 5% de cemento presentaron, desde el punto de vista estadístico, una resistencia media a compresión sin diferencia significativa entre sí, e igual a la de los BTC sin estabilizante alguno (factor de grupo A). Los bloques con 10 y 15% de cemento presentaron resistencias estadísticamente iguales entre sí y superiores a las de sus homólogos con bajos contenidos de cemento (factor de grupo B), mientras que la serie estabilizada con 20% de cemento presentó una resistencia media a compresión superior a la de las demás series (factor de grupo C). La relación entre el contenido de cal y cemento empleados para la estabilización y la resistencia media a compresión de los BTC puede apreciarse en la Figura 3.

Los resultados obtenidos coinciden con los de investigaciones previas realizadas por el Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe (UTN FRSF), en las cuales se ha demostrado que la resistencia a compresión de los BTC estabilizados con cal es significativamente menor que la de sus homólogos estabilizados con igual proporción de cemento (Cabrera, González y Rotondaro, 2019), lo que, a su vez, coincide y refuerza los resultados generados por diferentes investigadores (González López, Juárez Alvarado, Ayub Francis y Mendoza Rangel, 2018; Laguna, 2011; Quedraogo et al., 2020)

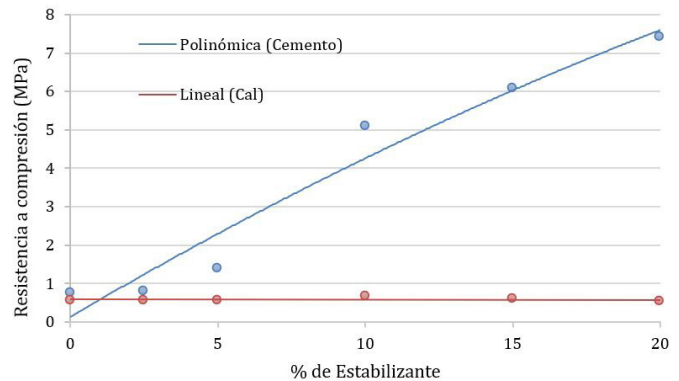


Figura 3. Curvas de interpolación resistencia a compresión vs. porcentaje de cal o cemento empleados en la estabilización de los BTC. Fuente: Elaboración de los autores.

SOBRE EL IMPACTO AMBIENTAL

En la Figura 4 se exponen de manera gráfica los resultados expresados en la Tabla 5 y obtenidos tras realizar el análisis de inventario de los BTC en estudio. En lo que respecta a la acidificación del suelo y el agua (1), la eutrofización del agua (2), la oxidación fotoquímica (4) y el consumo de minerales (5), el factor de impacto aumenta con el contenido de estabilizante, siendo en todos los casos mayor para los BTC estabilizados con cemento. Al contrario, el consumo de combustibles fósiles (6) y el deterioro de la capa de ozono (8) son significativamente mayores para los BTC estabilizados con cal que con cemento, lo cual no sucede con las emanaciones de CO₂ equivalente (3), las cuales, a pesar de aumentar significativamente con el contenido del estabilizante empleado, se mantienen prácticamente igual para ambos estabilizantes.

Es interesante remarcar cómo el consumo de agua (7) es superior en los BTC estabilizados con cemento que en aquellos estabilizados con cal. Sin embargo, como puede apreciarse en el primer cuadrante de la Figura 4, esto no se debe al tipo de estabilizante empleado sino, al mayor contenido de arena usado en la fabricación de estos bloques, ya que su extracción demanda grandes volúmenes de agua en relación con los requeridos para explotación de una cantera de tierra.

La comparación entre energías incorporadas por diferentes investigadores no es tarea sencilla ya que, además de las diferentes materias primas y procesos de fabricación analizados, cada investigación posee objetivos, alcances e inventarios diferentes. En la Tabla 6, puede verse cotejada la energía incorporada

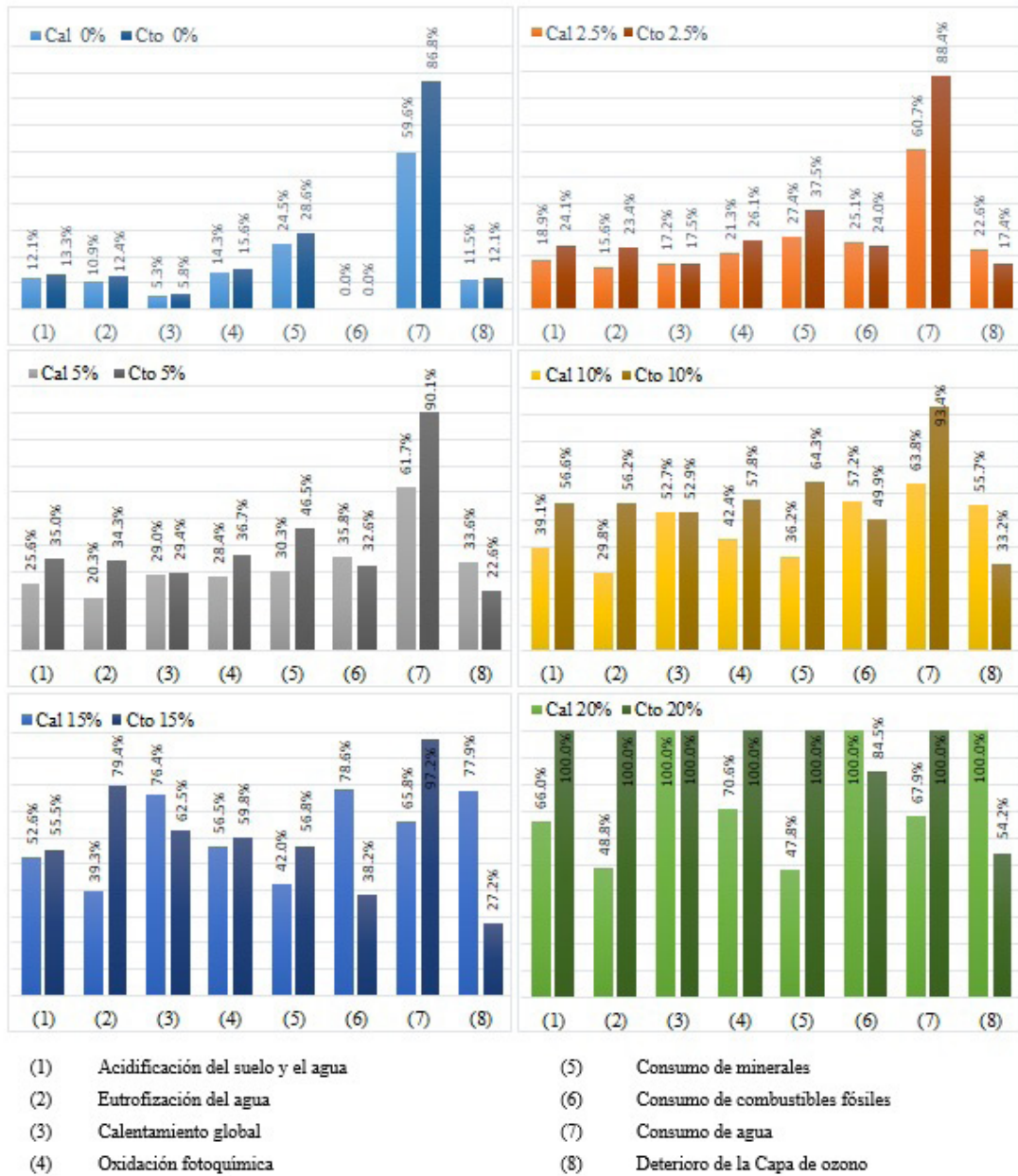


Figura 4. Comparación entre los diferentes factores de impacto de BTC estabilizados con cal y cemento, en diversas proporciones. Fuente: Elaboración de los autores.

| Autores | Energía Incorporada (MJ/BTC) | Estabilizante empelado |
|---|------------------------------|---|
| Vázquez Espi, 2001 | 0.18 - 5.76 | Diferentes proporciones de cemento Portland |
| Roux Gutiérrez y Espuna Mujica, 2016 | 7.62 | 7% de cal aérea hidratada |
| Fernandes, Peixoto, Mateus y Gervásio, 2019 the life cycle assessment of building materials is still in its infancy. So far, there is only a small number of Environmental Product Declarations (EPDs) | 3.94 | 6.5 % de cal hidráulica |
| Presente investigación | 0.65 - 4, 27 | Diferentes proporciones de cal y cemento Portland |

Tabla 6. Energía incorporada durante la fabricación de un BTC publicada por diferentes autores. Fuente: Elaboración de los autores.

por las diferentes series de BTC analizadas en este trabajo -entre 0.65 y 4, 27 MJ/ BTC-, según la cantidad y tipo de estabilizante empleado-, y en función de los resultados publicados por diversos autores, cuya similitud queda allí manifiesta.

CONCLUSIONES

Tras evaluar los resultados de los ensayos de resistencia a compresión de las diferentes series de BTC fabricados en el Laboratorio de Geotecnia de la UTN FRSF y el impacto ambiental asociado a su producción, es posible establecer las siguientes conclusiones:

- La incorporación de cal aérea hidratada en la estabilización de los BTC no mejora su resistencia a compresión simple.
- La estabilización con cemento Portland aumenta significativamente la resistencia a compresión de los bloques, advirtiéndose una mejora considerable para porcentajes superiores al 5% en peso.
- La estabilización de los BTC con cal o cemento, aun en pequeñas cantidades, es la mayor responsable del impacto ambiental negativo de estos bloques.
- El reemplazo de cal por cemento en la estabilización de los BTC no disminuye de manera significativa el impacto ambiental vinculado a su producción.

Finalmente, puede afirmarse que, empleando suelos y arena característicos de la ciudad de Santa Fe (Argentina), estabilizados entre el 5% y el 10% en peso de cemento Portland, se alcanzan niveles de resistencia a compresión suficientes para cumplir funciones estructurales, y se minimiza el impacto ambiental asociado a este tipo de mampuestos. Se concluye, además, que la estabilización con cal no incrementa la resistencia a compresión de los BTC y acrecienta de manera significativa el impacto negativo de éstos sobre el medio ambiente.

En continuidad con esta investigación, se proyecta elaborar el Análisis de Ciclo de Vida de otros mampuestos de la región -como el bloque de hormigón o el ladrillo cerámico- comparando su impacto ambiental con el de los BTC estabilizados con 5 y 10% de cemento, y su impacto económico en la construcción. Se podrá estudiar, asimismo, el efecto de la estabilización con cal aérea hidratada en la resistencia a compresión a largo plazo y la durabilidad de los BTC.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca en el Proyecto de Investigación y Desarrollo denominado "Análisis de las propiedades del Bloque de Tierra Comprimida (BTC) estabilizado con cal" (MSUTIFE0004877TC), financiado por la Universidad Tecnológica Nacional (Argentina). Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Técnica "CONACYT" (México) y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas "CONICET" (f) por financiar el trabajo de los autores, como también a la empresa "Mobak" por su colaboración.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Angulo, D. E. y Carreño, K. (2017). El Bloque de Tierra Comprimido o BTC. Una alternativa de construcción para la arquitectura contemporánea. *NODO*, 12(23), 31-37. <http://revistas.uan.edu.co/index.php/nodo/article/view/655>

Aranda Jiménez, Y. G. y Suárez-Domínguez, E. J. (2014). Efecto de la impermeabilidad del Mucílago de Nopal en bloques de tierra comprimidos. *Nova Scientia*, 6(11), 331-323.

Ben Mansour, M., Ogam, E., Jelidi, A., Cherif, A. S. y Ben Jabrallah, S. (2017). Influence of compaction pressure on the mechanical and acoustic properties of compacted earth blocks: An inverse multi-parameter acoustic problem. *Applied Acoustics*, 125, 128-135. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.04.017>

Bradley, R. A., Gohnert, M. y Bulovic, I. (2018). Construction considerations for low-cost earth brick shells. *Journal of Construction in Developing Countries*, 23(1), 43-60. Recuperado de http://web.usm.my/jcdc/vol23_1_2018/jcdc2018.23.1.3.pdf

Cabrera, S. y González, A. y Rotondaro, R. (2019). Bloques de tierra comprimida estabilizados con cal. Evaluación de dosificaciones y resistencia a la compresión. En Fundación Eco Urbano, *III Encuentro Latinoamericano y Europeo de Edificaciones y Comunidades Sostenibles (EUROelecs 2019)*, 22 a 25 de mayo de 2019, Santa Fe, Argentina (pp. 141-148). DOI: <https://doi.org/10.33414/ajea.3.633.2019>

Cabrera, S., González, A. y Rotondaro, R. (2020). Resistencia a compresión en Bloques de Tierra Comprimida. Comparación entre diferentes métodos de ensayo. *Informes de la Construcción*, 72(560). DOI: <https://doi.org/10.3989/ic.70462>

Carretero-Ayuso, M. y García-Sanz-Calcedo, J. (2018). Comparison between building roof construction systems based on the LCA. *Revista de la Construcción*, 18(1), 123-136. DOI: <https://doi.org/10.7764/RDLC.17.1.123>

Copyright Pré (2019). *SimaPro 9*. Recuperado de <https://simapro.com/>

Curadelli, S., López, M., Piastrellini, R., Arena, P. y Civit, B. (2019). Estudio socioambiental de la producción de ladrillos artesanales en Mendoza desde la perspectiva del análisis de ciclo de vida. Mendoza: edUTecNe. Recuperado de <http://190.114.221.84/handle/20.500.12272/3719>

Elahi, T. E., Shahriar, A. R., Alam, M. K. y Abedin, M. Z. (2020). Effectiveness of saw dust ash and cement for fabrication of compressed stabilized earth blocks. *Construction and Building Materials*, 259. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120568>

Fernandes, J., Peixoto, M., Mateus, R. y Gervásio, H. (2019). Life cycle analysis of Environmental impacts of earthen materials in the Portuguese context: Rammed earth and compressed earth blocks. *Journal of Cleaner Production*, 241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118286>

González, A. y Cabrera, S. (2017). Prensa electromecánica para BTC. En Neves, C, Salcedo, Z. y Borges, O. (Eds.), *XVII Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra (SIACOT)*, (pp. 91–100). La Paz: PROTERRA. Recuperado de <https://redproterra.org/wp-content/uploads/2020/06/17-SIACOT-Bolivia-2017.pdf>

González López, J., Juárez Alvarado, C., Ayub Francis, B. y Mendoza Rangel, J. (2018). Compaction effect on the compressive strength and durability of stabilized earth blocks. *Construction and Building Materials*, 163, 179–188. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.074>

Guapi Cepeda, G. M. y Yagual Flores, K. D. (2017). *Análisis de la producción de cal de la comuna San Antonio como oferta exportable a los mercados internacionales*. Tesis de pregrado. Universidad de Guayaquil. Recuperado de <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/47728>

Guilarducci, A. (2018). Generación de adiciones minerales para el cemento Portland a partir de residuos de centrales termoeléctricas de lecho fluidizado. Tesis doctoral. Universidad Nacional del Litoral. Recuperado de <https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8443/handle/11185/1103>

Guzmán, S. e Iñiguez, M. (2016). Election methodology of chemical stabilizers for earth blocks. *Estoa*, 5(9), 151–159. DOI: <https://doi.org/10.18537/est.v005.n009.12>

Hegyí, A., Dico, C. y Catalan, G. (2016). Construction sustainability with adobe bricks type elements. *Urbanism. Arhitectura. Constructii*, 7(2), 147-156. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/4296/f73ce17aad2539bda49d366ef7e2d08c93ed.pdf>

Herrera Villa, J. (2018). Modelamiento numérico del comportamiento sísmico de viviendas de mampostería con bloques de tierra comprimida. Tesis de magister. Pontificia Universidad Católica del Perú. Recuperado de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/12059>

IRAM (2017). *IRAM-ISO 14040. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia*. Buenos Aires.

Laborel-Préneron, A., Aubert, Jean-Emmanuel Magniont, C., Maillard, P. y Poirier, C. (2016). Effect of plant aggregates on mechanical properties of earth bricks. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(12), 719-734. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.119>

Laguna, M. (2011). *Ladrillo Ecológico Como Material Sostenible para las Construcción*. Trabajo final de Carrera. Universidad Pública de Navarra. Recuperado de <http://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/4504/577656.pdf?sequence=1>

Maddalena, R., Roberts, J. J. y Hamilton, A. (2018). Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements. *Journal of Cleaner Production*, 186, 933–942. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.138>

Malkanathi, S. N., Balthazaar, N. y Perera, A. A. D. A. J. (2020). Lime stabilization for compressed stabilized earth blocks with reduced clay and silt. *Case Studies in Construction Materials*, 12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00326>

Neves, C. y Borges Farías, O. (Orgs.) (2011). *Técnicas de Construcción con Tierra*. Bauru: FEB-UNESP / PROTERRA. Recuperado: https://redproterra.org/wp-content/uploads/2020/05/4a_PP-Tecnicas-de-construccion-con-tierra_2011.pdf

ONNCCCE (2015). *NMX-C-508 Industria de la Construcción. Bloques de tierra comprimida estabilizados con cal. Especificaciones y métodos de ensayo*. México D.F.

Ouedraogo, K. A. J., Aubert, J. E., Tribout, C. y Escadeillas, G. (2020). Is stabilization of earth bricks using low cement or lime contents relevant? *Construction and Building Materials*, 236. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117578>

Qiu, Q. (2020). A state-of-the-art review on the carbonation process in cementitious materials: Fundamentals and characterization techniques. *Construction and Building Materials*, 247. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118503>

Roux Gutiérrez, R. y Espuna Mujica, J. (2016). El Hidróxido de Calcio y los bloques de tierra comprimida, alternativa sostenible de construcción. *Nova Scientia*, 5(2), 176-202. DOI: <https://doi.org/10.21640/ns.v5i9.163>

Sitton, J. D., Zeinali, Y., Heidarian, W. H. y Story, B. A. (2018). Effect of mix design on compressed earth block strength. *Construction and Building Materials*, 158, 124–131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.005>

Unión Europea (UE). (2007). *Norma Euro 5*. Bruselas.

Van Damme, H. y Houben, H. (2018). Earth concrete. Stabilization revisited. *Cement and Concrete Research*, 114, 90–102. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.035>

Vázquez Espi, M. (2001). Construcción e impacto sobre el ambiente: el caso de la tierra y otros materiales. *Informes de la Construcción*, 52(471), 29–43. DOI: <https://doi.org/10.3989/ic>

Vissac, A., Bourges, A. y Gandreau, D. (2017). *Argiles & Biopolymères. Les stabilisants naturels pour la construction en terre*. Grenoble: CRATerre éditions. Recuperado de <https://craterre.hypotheses.org/1370>





DESEMPEÑO TÉRMICO DE FACHADAS VERDES TRADICIONALES DE ORIENTACIÓN ESTE EN VIVIENDAS SERIADAS EMPLAZADAS EN CLIMAS ÁRIDOS

Recibido 16/06/2020
Aceptado 27/10/2020

THERMAL PERFORMANCE OF TRADITIONAL EAST FACING GREEN FACADES IN TRACT HOUSING LOCATED IN ARID CLIMATES

PABLO ABEL SUAREZ

Arquitecto, Becario Doctoral
Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE - CCT CONICET),
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
(CONICET) Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-0032-3278>
suarezpablo91@gmail.com

MARÍA ALICIA CANTÓN

Diplomada en Estudios Avanzados en Arquitectura
Investigadora principal Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía
(INAHE - CCT CONICET), Consejo Nacional de Investigaciones
Científicas y Técnicas (CONICET) Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-8714-9697>
macanton@mendoza-conicet.gob.ar

ÉRICA CORREA

Doctora en Ciencias, Investigadora Independiente
Independiente, Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE -
CCT CONICET), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y
Técnicas (CONICET) Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0000-0003-1690-076X>
ecorrea@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN

La infraestructura verde constituye una estrategia de mitigación de las temperaturas urbanas y edilicias. El presente trabajo evalúa el impacto de un tipo de Sistema de Enverdecimiento Vertical (SEV), las Fachadas Verdes Tradicionales (FVT), en la condición térmica de viviendas localizadas en el Área Metropolitana de Mendoza, Argentina; cuyo clima es seco desértico (BWk - Köppen-Geiger). Con tal fin, se monitorearon, durante dos veranos consecutivos, dos casos de estudio: una vivienda con FVT, en orientación este, y una vivienda testigo de igual tipología y materialidad. Se registraron datos de temperatura ambiente exterior e interior; superficial exterior e interior y radiación horizontal. Se hallaron disminuciones de hasta 3.1°C en la temperatura ambiente interior de las viviendas con FVT, de hasta 27.4°C en muros exteriores y de 6.5°C en muros interiores. Las magnitudes de los resultados encontrados demuestran el potencial de la aplicación de esta estrategia en un clima árido.

Palabras clave

zonas áridas, arquitectura bioclimática, viviendas unifamiliares, Sistemas de Enverdecimiento Vertical.

ABSTRACT

Green infrastructure is a strategy for mitigating urban and building temperatures. This work assesses the impact of a type of Vertical Greenery System (VGS), the Traditional Green Façades (TGF), on the thermal condition of dwellings located in the Metropolitan Area of Mendoza, Argentina, whose climate is dry desert (BWk - Köppen-Geiger). To this end, two case studies were monitored for two consecutive summers: a dwelling with an east-facing TGF and a control dwelling of the same typology and materiality. Outdoor and indoor ambient temperature data were recorded: surface exterior and interior, and horizontal radiation. Decreases of up to 3.1°C in the indoor ambient temperature of FVT dwellings, of up to 27.4°C on exterior walls and 6.5°C on interior walls were found. The magnitudes of the results found show the potential of applying this strategy in an arid climate.

Keywords

arid zones, bioclimatic architecture, single dwellings, Vertical Greenery Systems

INTRODUCCIÓN

En áreas densamente pobladas existen impactos negativos propios del avance de la urbanidad sobre el medio ambiente, desde emisiones de carbono y el incremento de las temperaturas medias del aire, hasta la depredación de zonas productivas periféricas y la destrucción de los ecosistemas. De acuerdo a datos de la Agencia Internacional de Energía (OCED / IEA, 2017), las ciudades ocupan el 3% de la superficie del planeta y, además de provocar el aumento de las temperaturas medias del aire, son responsables del 67% del consumo energético global. A su vez, el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) indica que el 75% de la infraestructura que existirá en el 2030, aún no fue construida. Esto representa una oportunidad para crear "ciudades limpias y verdes", eficientes y resilientes. Una estrategia para alcanzar este objetivo es el enverdecimiento urbano.

La infraestructura verde genera beneficios energético-ambientales: a escala urbana, disminuye la isla de calor y aumenta el confort de los espacios públicos y, a escala edilicia, reduce el consumo de energía para acondicionamiento de los espacios interiores. Investigaciones recientes han determinado que en un clima templado el incremento de la infraestructura verde en un 10% podría reducir las temperaturas medias del aire urbano 2.5°C (Gill, Handley, Ennos y Pauleit, 2007) y que en un clima seco árido se puede disminuir 3.8°C la temperatura ambiente en un lugar arbolado (Salas y Herrera, 2017). Además, los espacios verdes generan beneficios para la salud y bienestar de los ciudadanos (Contesse, Van Vliet y Lenhart, 2018). Dado que el fenómeno de consolidación de las ciudades ha limitado el potencial de incorporación de estructuras verdes tradicionales -parques, plazas, arbolado de alineación-, han surgido nuevas tipologías de vegetación asociadas a cubiertas y muros verdes.

El desarrollo de conocimiento vinculado a los Sistemas de Enverdecimiento Vertical (SEV) ha crecido en función de su relevancia a nivel mundial en la última década (Bustami, Belusko, Ward y Beecham, 2018). Muestran probada eficiencia en la disminución de las temperaturas de los espacios habitables y sus consecuentes impactos en los consumos de energía. Los resultados varían en su magnitud según el tipo de clima donde se aplican los SEV, registrando máximas disminuciones de temperatura superficial exterior del orden de los 34°C (Suklje, Saso y Arkar, 2016) en climas del tipo Cfa/Cfb (templado cálidos húmedos, verano caliente), de temperatura ambiente interior del orden de los 5°C (Haggag, Hassan y Elmasry, 2014) en climas del tipo BWh (árido desértico, verano caliente) y de temperatura ambiente exterior del orden de los 3.3°C (Wong, Kwang Tan, Tan, Chiang y Wong, 2010) en climas del tipo Af (Ecuatorial húmedo).

Mayoritariamente, los estudios se han realizado en países europeos, asiáticos y norteamericanos; en climas del tipo templado cálido, tanto húmedo como seco -Csa, Cfa/Cfb-. Los resultados han mostrado similares o mejores rendimientos para los SEV, en cuanto a las reducciones de temperatura, en climas áridos respecto a climas húmedos.

El Área Metropolitana de Mendoza, Argentina (AMM), presenta un clima árido desértico (BWh - Köppen-Geiger). Desde el punto de vista de la presencia de espacios vegetados, cuenta en su estructura con una importante cantidad de espacios abiertos forestados. Sin embargo, el proceso de crecimiento y densificación urbana no ha ido acompañado por un proceso de densificación del verde urbano y, además, ha limitado la disponibilidad de vacíos urbanos que permiten la incorporación de espacios verdes tradicionales. En consecuencia, incrementar las áreas verdes implica implementar nuevas tecnologías de vegetación como lo son, entre otras, los SEV.

Los beneficios termo-energéticos de los SEV están asociados a diversos efectos. Primero, al *efecto de sombreado*, que ubica a los SEV como interceptores de la radiación solar incidente, directa o indirecta. Este efecto, dependiendo de la orientación del muro, es importante en climas con fuerte incidencia solar (Othman y Sahidin, 2016). En segundo lugar, al *efecto de enfriamiento* que reduce la temperatura del aire y aumenta la humedad liberando vapor de agua de las plantas a la atmósfera (Wong y Baldwin, 2016). Está comprobado que el alcance de este se extiende hasta 60 cm de su superficie (Wong et al., 2010). También hay que mencionar el *efecto de aislamiento*, producido por los estratos que componen el paquete constructivo de los SEV que interfieren en la transmisión de calor de las envolventes edilicias. Y, finalmente, el *efecto barrera contra el viento*, que provoca disminuciones en pérdidas y ganancias de calor por convección debido a la rugosidad del follaje que obstaculiza la circulación de aire. Respecto al impacto del SEV en el ahorro de energía, la literatura internacional registra valores del orden de 58.9% (Coma et al., 2017). En cuanto a los beneficios ambientales, se registraron valores de absorción de emisiones de carbono que oscilan entre 0.14 y 0.99 Kg/m³ (Marchi, Pulselli R., Marchettini, Pulselli F. y Bastianoni, 2015). Ello, además del impacto que genera en el grado de absorción acústica y el aporte a la preservación de la biodiversidad. Por último, las fachadas vegetadas aumentan la percepción de confort, relajación y mejoran el estado de ánimo (Elsadek, Liu y Lian, 2019).

Los SEV se agrupan en dos categorías: Pared Viva (PV) y Fachadas Verdes (FV) (Figura 1). Las FV son aquellos sistemas en los que hay plantas trepadoras y/o arbustos colgantes cubriendo un área determinada. Pueden dividirse en tres tipologías: Fachadas Verdes

| SEV | TIPOLOGÍA | | | | | |
|-----------------|-------------|--|------------|--|----------------------|--|
| Fachadas Verdes | | | | | | |
| | Tradicional | | Doble piel | | Macetas perimetrales | |

Figura 1. Tipologías de FV. Fuente: Elaboración de los autores.

Tradicionales (FVT), donde la planta se adosa al muro del edificio; Fachadas Verdes tipo Doble Piel (FVDP) o cortina verde, donde existe una estructura suplementaria que se separa una distancia variable de la pared del edificio; y Fachadas Verdes con Macetas Perimetrales (FVMP), donde pueden alojarse macetas con plantas trepadoras y/o arbustos colgantes para generar una cortina verde.

Las FVT son sistemas de aplicación simple, de bajo costo y reducido impacto en la construcción existente. En el caso de Mendoza, esta estrategia es de aplicación espontánea y ampliamente difundida en las áreas residenciales de baja densidad. Los beneficios se clasifican en dos categorías: termo-energéticos y ambientales.

Los beneficios termo-energéticos han sido analizados extensamente en la literatura internacional. Sin embargo, es acotado el desarrollo de conocimiento en relación con la incidencia de las FVT en el comportamiento térmico de los espacios interiores en climas del tipo desértico, como también respecto al análisis del impacto diferencial del uso de la estrategia, de acuerdo con la orientación de la fachada.

En ese contexto, Alexandri y Jones (2008) determinan que la radiación máxima recibida en verano en los planos verticales orientados al este y al oeste es 1.65 veces mayor a la recibida en los planos Norte y Sur, para el caso de Atenas, Grecia, cuya latitud (32° N) es equiparable con la de la ciudad de Mendoza (37° S). Susorova, Angulo, Bahrami y Stephens (2013), por su parte, miden el efecto de las FVT sobre muros de edificios en las cuatro orientaciones en Chicago, hallando magnitudes mayores, del orden de 4 y 5 veces más, para las orientaciones este y oeste. Coma *et al.* (2017) determinan que las fachadas tipo FVDP son más efectivas en orientaciones oeste y este que en orientación norte. Estudios recientes atribuyen mayores magnitudes de enfriamiento y ahorro de energía producida por una FV en orientaciones este

y oeste en condiciones de verano (Pérez, Coma, Sol y Cabeza, 2017) (Kontoleon y Eumorfopoulou, 2010). De lo descripto, se desprende que los SEV generan los mayores impactos en orientaciones este y oeste cuyos planos verticales son los más demandados por la radiación solar.

En consecuencia, el presente trabajo tiene por objetivo evaluar el impacto de las FVT con orientación este, sobre las temperaturas superficiales, interiores y exteriores, y la condición térmica de los espacios interiores en viviendas unifamiliares seriadas del AMM, Argentina.

HIPÓTESIS DE TRABAJO

En climas áridos, las nuevas tecnologías de vegetación, en particular las Fachadas Verdes Tradicionales, constituyen una estrategia de acondicionamiento bioclimático pasivo debido a su capacidad de atenuar las temperaturas superficiales de la envolvente edilicia y aproximar a las condiciones de confort a los espacios habitables en la estación cálida.

METODOLOGÍA

CASOS DE ESTUDIO

Para el desarrollo de este estudio se seleccionó dos viviendas localizadas en un barrio de tipología seriada en Guaymallén, Mendoza. Ambas son del tipo morfológico de casa compacta, ampliada, estructurada en dos niveles. La Figura 2 muestra la localización de las viviendas en el contexto del Área Metropolitana de Mendoza (AMM). Y, en la Figura 3, se observa el tipo morfológico de los edificios junto al estudio de asoleamiento hora a hora de la radiación solar incidente sobre fachada este.

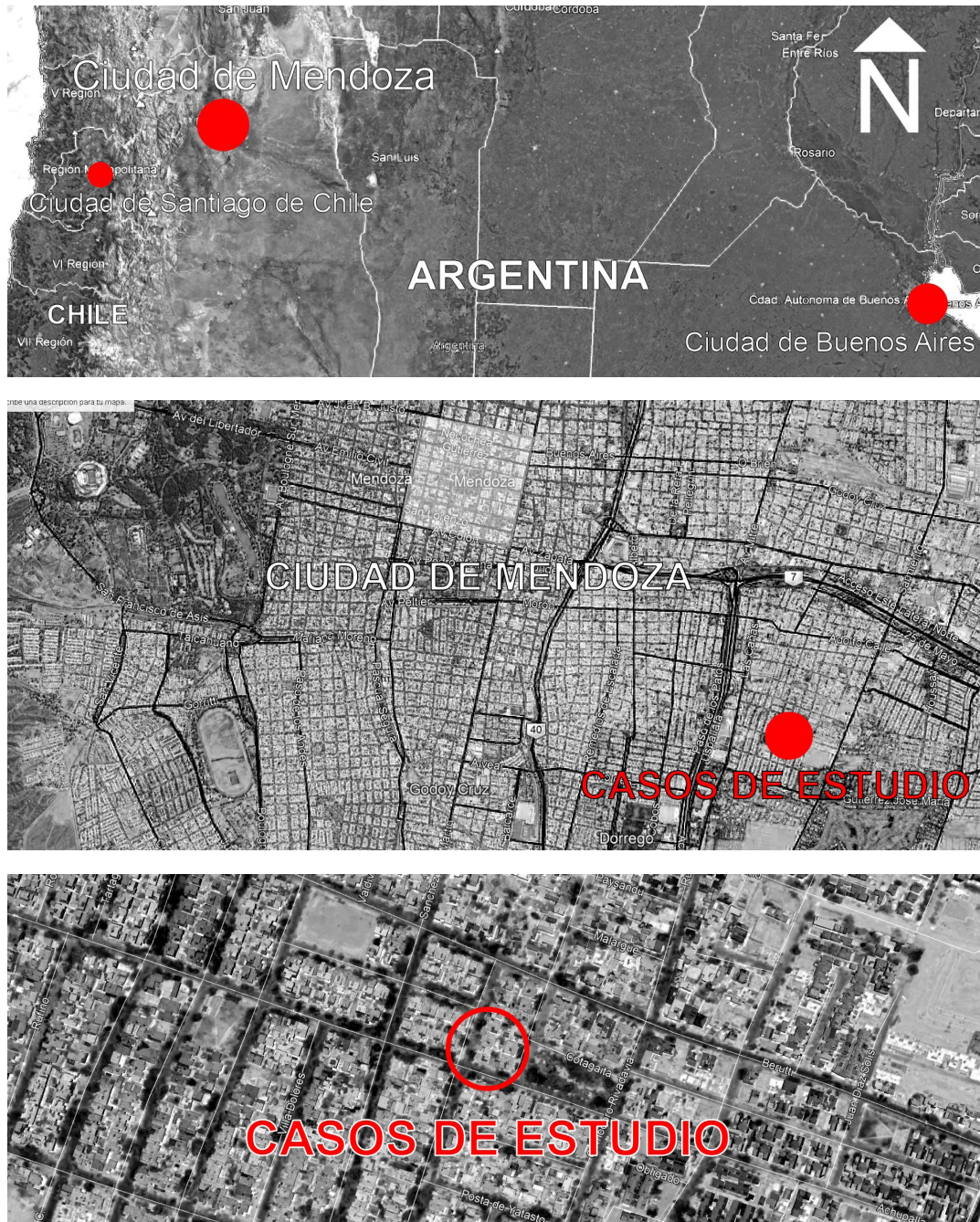


Figura 2. Localización de las viviendas en el contexto de AMM. Fuente: Elaboración de los autores.

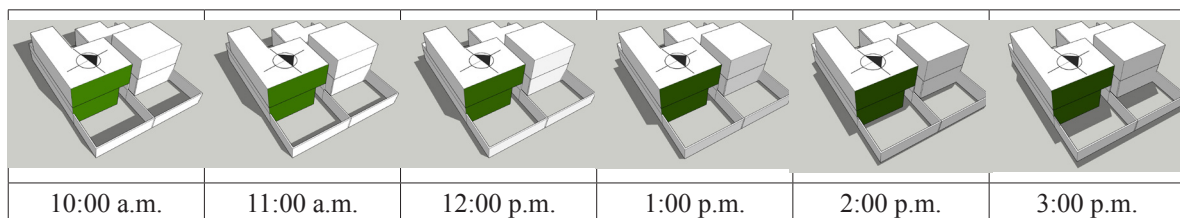


Figura 3. Estudio de aseoleamiento hora a hora de radiación solar incidente sobre fachada este. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 4. Casos de estudio. Fuente: Elaboración de los autores.

Tecnológicamente, los casos de análisis evidencian el tipo constructivo característico de áreas sísmicas: estructura de hormigón armado y mampostería de ladrillo visto. Las cubiertas son planas, conformadas por losas de hormigón alivianadas, aisladas térmica e hidráulicamente. Una de ellas presenta el sistema de FVT en la fachada interna de la vivienda orientada al este y en la fachada lateral orientada al norte. La FVT es un sistema simple conformado por una especie de planta trepadora del género *Parthenocissus Quinquefolia*, de la familia Vitaceae, localmente denominada Parra Virgen -especie originaria de América del Norte y Central; del tipo leñosa, caduca, resistente, crecimiento enérgico, alta densidad foliar y adaptabilidad (tolera la mayoría de los suelos y condiciones climáticas), baja permeabilidad solar y mantenimiento, ampliamente utilizada en la región-. La misma se desarrolla adosada al muro con un espesor promedio de 40 cm en toda su extensión y cubre el 100% del muro de mampostería que conforma la fachada este de la vivienda (Figura 4).

MONITOREO DE CASOS DE ESTUDIO

Para la evaluación de la incidencia de la FVT en el comportamiento térmico de las fachadas de orientación este de las viviendas, las variables medidas fueron: temperatura y humedad del aire exterior en los espacios abiertos públicos y privados colindantes con la vivienda, temperatura y humedad del aire interior y temperatura superficial interior y exterior en muros. Los sensores utilizados para medir la temperatura y humedad ambiente fueron del tipo termistor y termocupla -HOBO Onset, UX100-003, UX120-. La localización de los sensores y el equipamiento utilizado se presentan en la Figura 5.

La toma de datos se registró en dos períodos: verano 2019 -21/01 al 05/02- y 2020 -30/01 al 14/02-, durante 15 días, mediante el registro de datos llevado a cabo cada 15 minutos. Los sensores fueron calibrados previamente para garantizar la confiabilidad de los datos obtenidos.

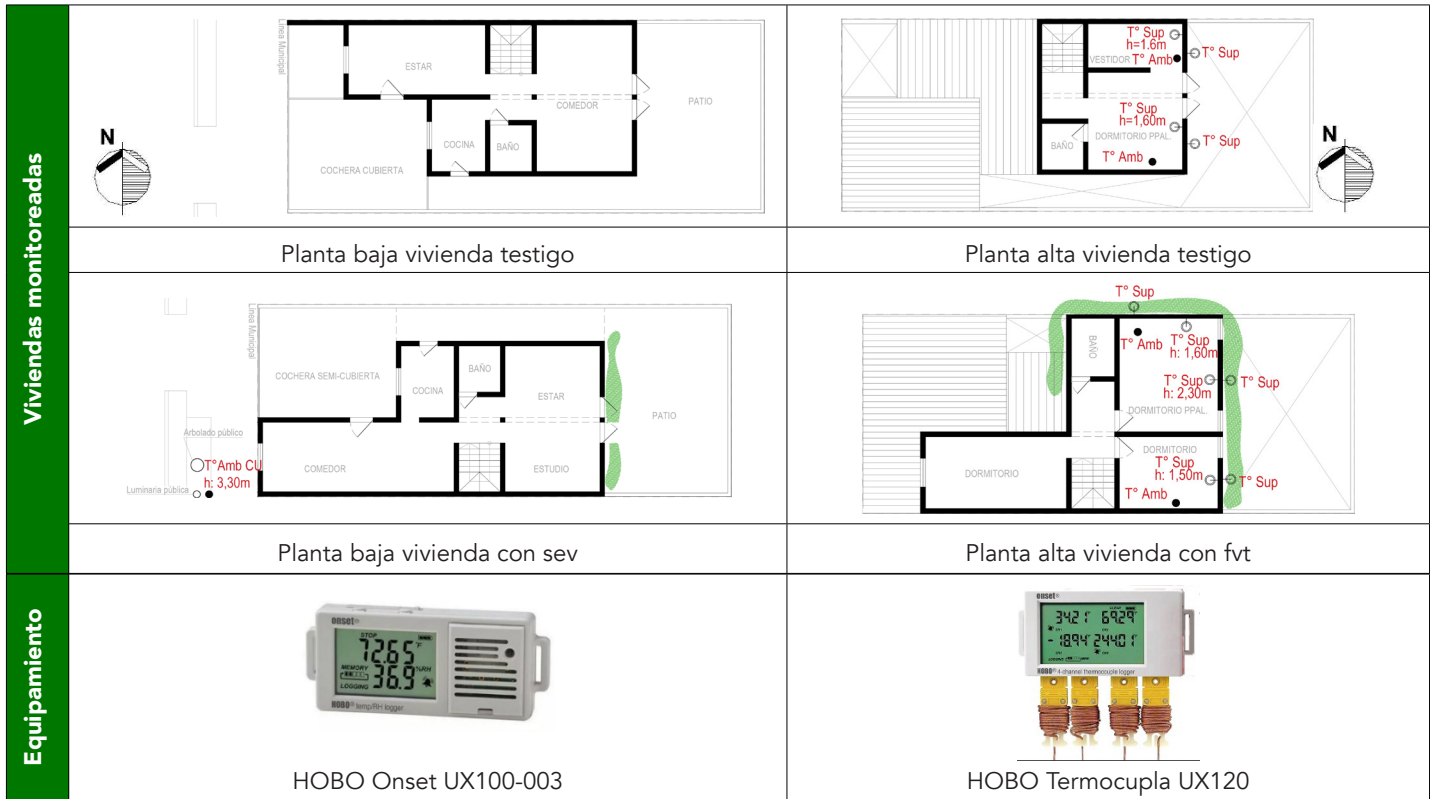


Figura 5. Casos de estudio: ubicación de sensores y equipamiento utilizado. Fuente: Elaboración de los autores

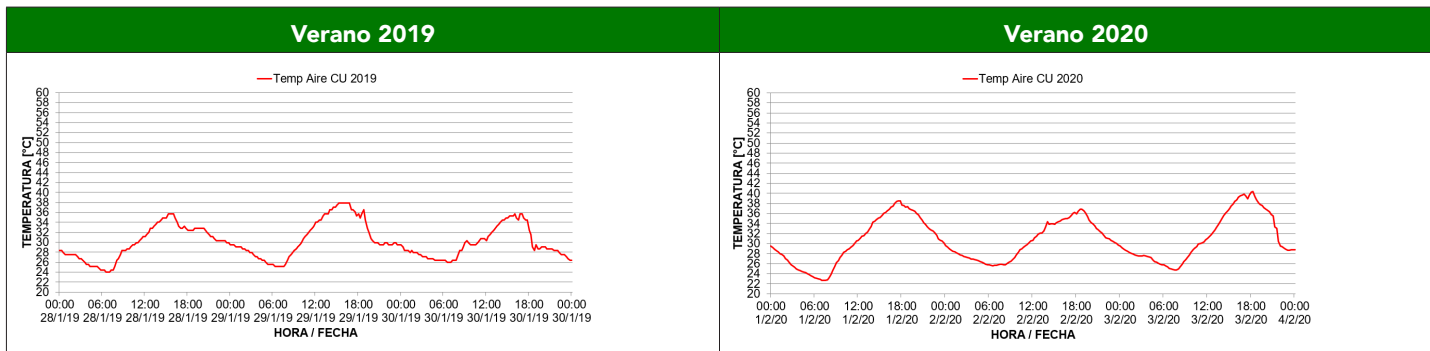


Figura 6. Temperatura del aire en el cañón urbano para los días seleccionados. Fuente: Elaboración de los autores.

SELECCIÓN DE DÍAS DE ANÁLISIS

A efecto de analizar comparativamente la respuesta térmica de los casos de estudio evaluados con y sin FVT, se eligieron aquellos días cuyas características fueran representativas de un día de verano propio del microclima local, dentro del período de 30 días en que se registraron las mediciones. En función de ello, los criterios de selección fueron: temperaturas máximas y mínimas más elevadas, alta heliofanía y baja velocidad de viento. Los días seleccionados en cada período fueron: del 28 al 30 enero de 2019, y del 1 al 3 de febrero de 2020. La Figura 6 expone el comportamiento de la temperatura del aire en el cañón urbano para los días de análisis. La forma de la curva refleja que los días analizados presentan un

comportamiento semejante tanto en cuanto a la curtosis de la curva de temperatura del aire exterior como a la amplitud de esta. Se verifica que los picos de máxima y mínima temperatura se corresponden en magnitud y ocurrencia horaria a lo largo del tiempo.

Considerando el comportamiento de las curvas y del análisis cuantitativo de los datos para el período 2019, se observan rangos de temperaturas diarias que varían desde 35.7°C a 37.9°C, para las máximas, y entre 24.0°C y 26.0°C, para las mínimas. En los días correspondientes al verano 2020, se registran valores de temperaturas diarias que oscilan entre los 36.8°C y los 40.4°C, para las máximas, y entre los 22.7°C y los 25.6°C, para las mínimas (Tabla 1).

| | Temp. máx. | Temp. mín. | Temp. prom. total. | Temp. prom. mín. | Temp. prom. máx. | Amplitud prom. |
|-----------------------------|------------|------------|--------------------|------------------|------------------|----------------|
| Período 2019: 28/01 - 30/01 | 37.9 | 24.0 | 30.4 | 25.0 | 36.4 | 11.4 |
| Período 2020: 01/02 - 03/02 | 40.4 | 22.7 | 30.9 | 24.3 | 38.6 | 14.2 |

Tabla 1. Temperaturas máximas, medias y mínimas promedio para los períodos analizados. Fuente: Elaboración de los autores.

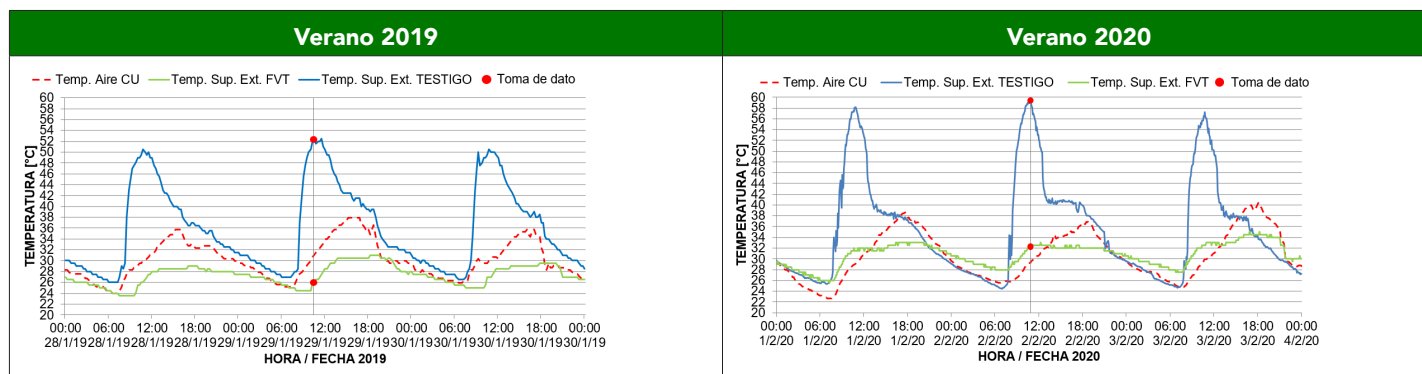


Figura 7. Temperatura superficial exterior: caso testigo y caso con FVT, orientación este. Fuente: Elaboración de los autores.

Tomando valores de temperaturas promedio, se advierten magnitudes de 36.4°C en las máximas y 25.0°C en las mínimas, para el período 2019, y valores de 38.5°C en las máximas y 24.3°C en las mínimas, para el período 2020. Se verifican diferencias del orden de los 2.1°C respecto a las temperaturas máximas promedio, y diferencias de 0.7°C respecto a las temperaturas mínimas promedio entre ambos períodos considerados. Finalmente, tomando valores de temperaturas medias promedio, se encontraron magnitudes de 30.4°C y 30.9°C para los lapsos temporales de 2019 y 2020, respectivamente. Se evidencia que ambos períodos registran diferencias del orden de 0.5°C (Tabla 1).

Considerando la variable de amplitud térmica diaria, el rango de temperaturas oscila entre 9.8°C y 12.7°C, para el primer período, y entre 11.2°C y 15.8°C, para el segundo. En promedio, la amplitud térmica registra magnitudes de 11.4°C y 14.2°C para los períodos 2019 y 2020, respectivamente (Tabla 1).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Prosiguiendo con el estudio, se seleccionaron tres variables -incidentes en el desempeño termo-energético de los casos a analizar- de la base de datos recopilada durante los días seleccionados del verano 2019 y 2020: temperatura superficial exterior, temperatura superficial interior y temperatura ambiente interior de espacios homólogos.

Dichas variables fueron analizadas en términos de la diferencia de temperatura entre ambos casos: caso con FVT y caso testigo. Ello se detalla a continuación.

TEMPERATURA SUPERFICIAL EXTERIOR: CASO CON FVT VS. CASO TESTIGO

A fin de reconocer potenciales impactos del uso de la vegetación en muros exteriores de mampostería con exposición al este, se compararon las temperaturas superficiales exteriores del caso con FVT (curva verde), el caso testigo (curva azul) y el comportamiento de la temperatura del aire exterior (curva roja) (Figura 7).

El caso con FVT presenta temperaturas superficiales exteriores menores respecto del caso testigo durante todas las horas diurnas. Las máximas reducciones de temperatura superficial exterior fueron de 26.5°C y 27.4°C, para el primer y segundo período, respectivamente. Los picos de diferencia de temperatura se advierten, en ambos períodos, entre las 10:30 am y 10:45 am, en días de cielo claro (Figura 8). Lo anterior pone de manifiesto que la temperatura superficial exterior es fundamentalmente comandada por el fenómeno radiativo, teniendo en cuenta la orientación del muro -este-. Los resultados son superiores a las magnitudes encontradas por Vox, Blanco y Schettini (2018) y Hoelscher, Nehls, Jänicke y Wessolek (2016), las cuales oscilan entre 9.0°C y 15.5°C (FVT en orientación Norte y en clima del tipo Csa, mediterráneo templado cálido, FVT en orientación noroeste y clima del tipo Dfb, templado cálido, respectivamente).

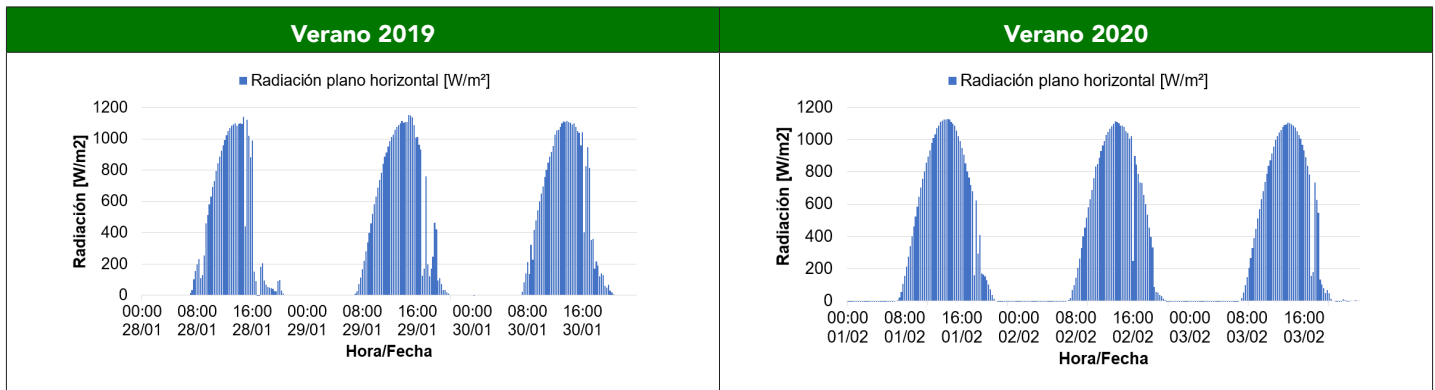


Figura 8. Irradiancia global en el plano horizontal para ambos períodos de estudio. Fuente: Elaboración de los autores.

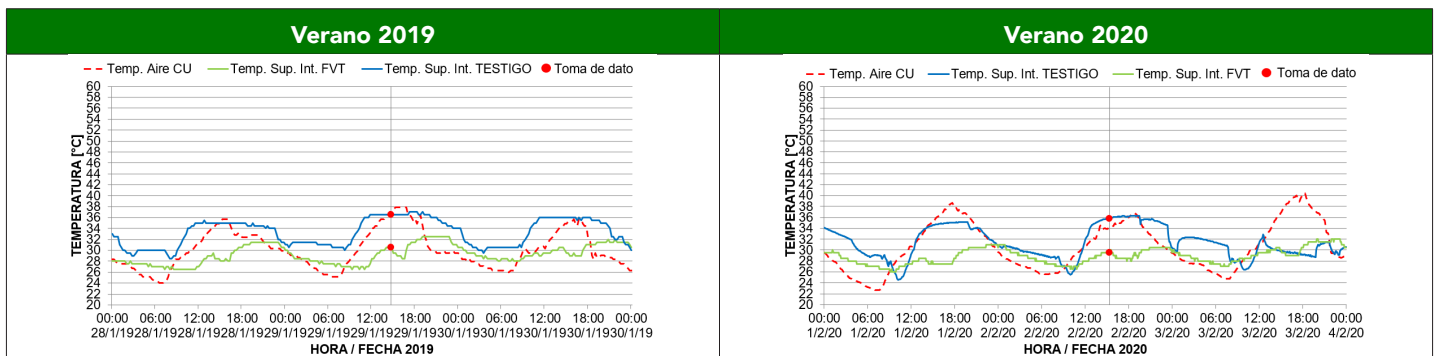


Figura 9. Temperatura superficial interior: caso testigo y caso con SEV, en orientación este. Fuente: Elaboración de los autores.

El análisis de las curvas de temperatura superficial del muro con FVT exhibe una amplitud térmica que oscila en torno los 6°C promedio en ambos períodos medidos. Por el contrario, la curva correspondiente al muro testigo registra una amplitud térmica de 24°C promedio en el primer período y de 31°C en el segundo período. Esto se debe a que el segundo período medido -2020- registró temperaturas más elevadas. El comportamiento del muro cubierto con vegetación muestra máximas y mínimas atenuadas que reflejan la capacidad conservativa del muro vegetado, comparable al comportamiento de un material aislante.

En el comportamiento de las curvas de la Figura 6, se aprecia que el efecto de enfriamiento producido por la FVT ocurre durante la totalidad de las horas diurnas en ambos períodos, donde las superficies exteriores de los muros están siempre más frías que las del caso testigo. Mientras que, por el contrario, el caso con FVT manifiesta temperaturas superficiales exteriores superiores respecto al caso testigo durante la noche del período 2020. Dicha magnitud registra un máximo de 4.1°C mayor en la superficie cubierta con vegetación, respecto del muro testigo. En consecuencia, la pared con FVT se encuentra más fresca durante el día y más caliente durante la noche, respecto al testigo en este período. Estos resultados se deben a la mayor amplitud térmica registrada en los días

del verano 2020, donde el efecto aislante del muro con FVT puede percibirse durante la noche. No obstante, se debe tener en cuenta que la máxima magnitud de enfriamiento en el muro con FVT es 6.7 veces mayor que la máxima magnitud de calentamiento en relación al caso testigo, y se produce en horarios donde la temperatura ambiente exterior registra sus máximos valores.

Con el objetivo de verificar la respuesta de la temperatura superficial exterior en muros testigo y con FVT ante diferentes condiciones climáticas exteriores, y considerando que el verano 2020 presenta temperaturas máximas y promedio más elevadas que el verano 2019, se estableció una comparativa entre promedios de las máximas magnitudes diarias de esta variable. Se compararon entre sí los promedios de máximas registradas en el muro testigo y con FVT en los dos períodos. El muro testigo presenta, durante todo el período 2020, un aumento en el promedio de las máximas temperaturas superficiales exteriores de 7.3°C respecto de 2019. Mientras que el muro con FVT presenta, durante todo el período 2020, un aumento en el promedio de las máximas temperaturas superficiales exteriores de 4.5°C respecto de 2019. Teniendo en cuenta que la temperatura del aire máxima promedio se incrementó entre ambos períodos en 2.2°C, puede inferirse que mientras más riguroso es el verano, mayor es el impacto del FVT.

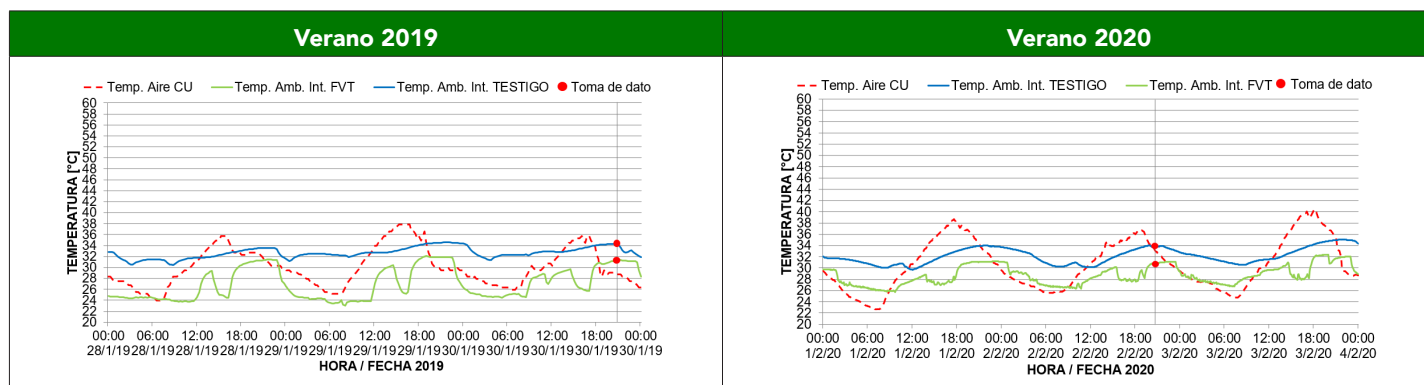


Figura 10. Temperatura ambiente interior: caso testigo y caso con SEV, en orientación este. Fuente: Elaboración de los autores.

TEMPERATURA SUPERFICIAL INTERIOR: CASO FVT VS. CASO TESTIGO

Para determinar el impacto térmico del uso de la vegetación en el interior de las viviendas evaluadas, se midieron las temperaturas superficiales interiores. La Figura 9 ilustra el comportamiento de la temperatura superficial interior del muro con FVT (curva verde), del caso testigo (curva azul) y la temperatura del aire exterior (curva roja).

El caso con FVT muestra temperaturas superficiales interiores menores, respecto del caso testigo durante la totalidad de las horas diurnas, con reducciones máximas de 6.0°C y 6.5°C para los ciclos 2019 y 2020, respectivamente. Estas diferencias de temperatura se observan en ambos períodos entre las 14:45 y las 15:45 h: una y dos horas después del mediodía solar. Este retardo hallado, respecto del horario de máxima radiación, se puede interpretar como la consecuencia de la inercia térmica del paquete constructivo de los muros, lo cual es coherente con el comportamiento propio de materiales mäsicos de la envolvente. Ello pone de manifiesto que, al igual que la temperatura superficial exterior, la temperatura superficial interior está fuertemente condicionada por el fenómeno radiativo para esta orientación de muro -este-. Los resultados son superiores a las magnitudes encontradas por Hoelscher *et al.* (2016) y Susorova *et al.* (2013), los cuales oscilan entre 1.7°C y 2.0°C (FVT en orientación oeste y en clima del tipo Dfb templado cálido, FVT en orientación norte y en clima del tipo Dfa, continental verano caliente, respectivamente).

A diferencia del análisis de la temperatura superficial exterior, las magnitudes de enfriamiento en las superficies interiores de los muros, producidas por la presencia de vegetación, ocurren durante horarios diurnos y nocturnos en ambos períodos. Es decir, los efectos de enfriamiento de las FVT tienen impacto en el interior de las viviendas también durante horarios sin radiación solar. Ahora bien, es importante mencionar que las temperaturas

superficiales interiores se ven afectadas por el uso del aire acondicionado en momentos que la temperatura ambiente exterior se aleja en mayor medida de la temperatura de confort. Esto es efecto del monitoreo de casos reales en condiciones de uso en la estación cálida. Es por ello que, en aras de atender al objetivo del trabajo, las diferencias de temperatura se tomaron en ausencia del uso del aire acondicionado.

TEMPERATURA AMBIENTE INTERIOR: CASO FVT VS. CASO TESTIGO

La Figura 10 grafica el comportamiento de la temperatura ambiente interior en dos espacios homólogos entre el caso con FVT (curva verde), el testigo (curva azul) y la temperatura del aire exterior (curva roja), para los dos períodos medidos.

El análisis de la temperatura ambiente interior permite identificar que la temperatura del caso con FVT es inferior a la del caso testigo, con máximas diferencias comprendidas entre 2.9°C y 3.1°C durante todas las horas del día en los dos ciclos de medición. Al igual que en lo observado en el análisis de las temperaturas superficiales, las diferencias son superiores a las encontradas por Kontoleon y Eumorfopoulou (2010), que fueron del orden de 0.5°C (FVT en orientación este y en clima del tipo tipo Cfb, oceánico templado verano suave). Mientras que Hoelscher *et al.*, (2016) y Perini, Ottelé, Fraaij, Haas y Raiteri (2011) no encontraron efectos del FVT sobre la temperatura del aire en espacios interiores.

La temperatura ambiente interior en la vivienda con FVT revela reducciones promedio respecto al caso testigo del orden de los 3°C. Este resultado se puede interpretar como la magnitud del impacto del uso de las FVT en el calor sensible de una vivienda. Al igual que en el caso de la temperatura superficial interior, se observa en el comportamiento de la curva de temperatura interior, el uso del aire acondicionado. Es por ello que, también en este análisis, los datos fueron tomados en períodos sin acondicionamiento artificial de los espacios.

CONCLUSIÓN

El trabajo expuesto evaluó el impacto de las FVT con orientación este, sobre las temperaturas superficiales exteriores e interiores, y la temperatura ambiente interior en viviendas de construcción de ladrillo cocido y estructura de hormigón armado. El estudio se desarrolló en el Área Metropolitana de Mendoza, en la estación verano, sobre un universo de análisis representativo, desde el punto de vista morfológico y tecnológico, de viviendas unifamiliares seriadas del área de estudio.

En términos cuantitativos, la investigación demuestra un potencial de disminución de las temperaturas superficiales exteriores en las envolventes de los edificios de hasta 27.4°C y de 6.5°C, en las temperaturas superficiales interiores. Estos beneficios se deben al efecto de la estructura verde sobre el muro respecto a la exposición plena del muro testigo. Considerando los resultados hallados en la literatura internacional para otros climas y la misma tecnología constructiva -ladrillo y hormigón armado-, se advierte que la aplicación de FVT, como estrategia para mejorar el comportamiento térmico de espacios interiores, es más eficiente en climas áridos.

Además, las variaciones de temperatura entre los dos períodos medidos expresan que, frente a condiciones externas más rigurosas, es mayor el impacto del FVT en la atenuación de las temperaturas superficiales interiores y exteriores.

La comparación del comportamiento de las curvas de temperatura superficial de muro con FVT respecto al muro testigo, demuestra la capacidad de atenuación de las temperaturas máximas y mínimas resultantes del carácter conservativo de la FVT, que es comparable con el de un material aislante. Sin embargo, las FVT ofrecen ventajas adicionales respecto a la aplicación de materiales sintéticos para la conservación térmica ligadas a beneficios ecosistémicos y aportes a la salud de las personas. De esta conclusión, se desprende la necesidad de que, en futuras investigaciones, se tengan en cuenta los beneficios adicionales de las estrategias verdes para mensurar su eficiencia en relación a las estrategias de aislación tradicionalmente empleadas.

En cuanto a las temperaturas ambiente, se registraron reducciones del orden de 2.9°C y 3.1°C, en los períodos 2020 y 2019, respectivamente, en la vivienda con FVT, respecto al caso testigo y, asimismo, se constató que la magnitud promedio del impacto en el calor sensible de la vivienda es del orden de los 3°C. Los valores de reducción de la temperatura interior alcanzados en este trabajo -al igual que los obtenidos respecto a la disminución de las temperaturas superficiales- son de mayor magnitud en comparación a los hallados en la literatura científica, en experiencias similares evaluadas en otros climas (0.5°C). Estos resultados ponen en valor el uso de la estrategia

para aminorar las temperaturas interiores y aproximar a las condiciones de confort a los espacios habitables dentro de los edificios en climas áridos.

Recapitulando, esta investigación representa un concreto aporte al desarrollo de conocimiento vinculado a la implementación de SEV en edificios emplazados en zonas climáticas del tipo árido desértico (BWk - Köppen-Geiger). En tal sentido, los resultados encontrados evidencian el potencial de una tecnología de enverdecimiento apropiada en relación con su eficiencia para disminuir las temperaturas y contribuir al ahorro energético resultante de una menor demanda de energía para el acondicionamiento térmico de los espacios interiores. Es decir, se presenta como una estrategia alternativa de aplicación simple en envolventes edilicias que tiende no sólo a garantizar la sustentabilidad del hábitat en contextos climáticos rigurosos, sino también a mejorar la calidad de vida del ambiente construido en el marco de un desarrollo sostenible.

En futuras etapas, se prevé incrementar el número de casos de estudio, evaluar el impacto asociado a otras tecnologías constructivas y al uso de diferentes especies para conformar FVT. El objetivo final es ampliar el alcance de esta investigación y generalizar resultados que contribuyan a potenciar el uso de la las FVT como herramienta de diseño para disminuir las temperaturas interiores en el ámbito construido y sus impactos asociados a escala edilicia, urbana y global.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICET) y a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCYT) la financiación recibida para el desarrollo de esta investigación. Así también, a los propietarios de las viviendas Miguel Martí y Rodrigo Benítez que permitieron el monitoreo de los casos de estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alexandri, E. y Jones, P. (2008). Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment*, 43(4), 480–493. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.055>

Bustami, R. A., Belusko, M., Ward, J. y Beecham, S. (2018). Vertical greenery systems : A systematic review of research trends. *Building and Environment*, 146(August), 226–237. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.045>

Coma, J., Pérez, G., De Gracia, A., Burés, S., Urrestarazu, M. y Cabeza, L. F. (2017). Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades. *Building and Environment*, 111, 228–237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.014>

- Contesse, M., Van Vliet, B. J. M. y Lenhart, J. (2018). Is urban agriculture urban green space? A comparison of policy arrangements for urban green space and urban agriculture in Santiago de Chile. *Land Use Policy*, 71(October), 566–577. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.11.006>
- Elsadek, M., Liu, B. y Lian, Z. (2019). Urban Forestry & Urban Greening Green façades : Their contribution to stress recovery and well-being in high- density cities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 46(September). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126446>
- Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R. y Pauleit, S. (2007). Adapting cities for climate change: The role of the green infrastructure. *Built Environment*, 33(1), 115–133. DOI: <https://doi.org/10.2148/benv.33.1.115>
- Haggag, M., Hassan, A. y Elmasry, S. (2014). Experimental study on reduced heat gain through green façades in a high heat load climate. *Energy and Buildings*, 82, 668–674. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.087>
- Hoelscher, M. T., Nehls, T., Jänicke, B. y Wessolek, G. (2016). Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation. *Energy and Buildings*, 114, 283–290. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.047>
- Kontoleon, K. J. y Eumorfopoulou, E. A. (2010). The effect of the orientation and proportion of a plant-covered wall layer on the thermal performance of a building zone. *Building and Environment*, 45(5), 1287–1303. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.11.013>
- Marchi, M., Pulselli, R. M., Marchettini, N., Pulselli, F. M. y Bastianoni, S. (2015). Carbon dioxide sequestration model of a vertical greenery system. *Ecological Modelling*, 306, 46–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.08.013>
- OCED / IEA. (2017). Energy Technology Perspectives 2017. *International Energy Agency (IEA) Publications*. Recuperado de <https://webstore.iea.org/download/summary/237?fileName=English-ETP-2017-ES.pdf>
- Othman, A. R. y Sahidin, N. (2016). Vertical Greening Façade as Passive Approach in Sustainable Design. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 222, 845–854. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.05.185>
- Pérez, G., Coma, J., Sol, S. y Cabeza, L. F. (2017). Green facade for energy savings in buildings: The influence of leaf area index and facade orientation on the shadow effect. *Applied Energy*, 187, 424–437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.055>
- Perini, K., Ottelé, M., Fraaij, A. L. A., Haas, E. M. y Raiteri, R. (2011). Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. *Building and Environment*, 46(11), 2287–2294. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.009>
- Salas-Esparza, M. G. y Herrera-Sosa, L. C. (2017). La vegetación como sistema de control para las Islas de Calor Urbano en Ciudad Juárez, Chihuahua. *Hábitat Sustentable*, 7(1), 14-23. Recuperado de <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/2737>
- Suklje, T., Saso, M. y Arkar, C. (2016). On detailed thermal response modeling of vertical greenery systems as cooling measure for buildings and cities in summer conditions. *Energy*, 115, 1055–1068. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.095>
- Susorova, I., Angulo, M., Bahrami, P. y Stephens, B. (2013). A model of vegetated exterior facades for evaluation of wall thermal performance. *Building and Environment*, 67, 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.027>
- Vox, G., Blanco, I. y Schettini, E. (2018). Green façades to control wall surface temperature in buildings. *Building and Environment*, 129(September 2017), 154–166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.002>
- Wong, I. y Baldwin, A. N. (2016). Investigating the potential of applying vertical green walls to high-rise residential buildings for energy-saving in sub-tropical region. *Building and Environment*, 97, 34–39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.11.028>
- Wong, N. H., Kwang Tan, A. Y., Tan, P. Y., Chiang, K. y Wong, N. C. (2010). Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment*, 45(2), 411–420. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.017>



PATIO on calle LINDERO, 24

Lozano