



Revista
Hábitat
Sustentable

ISSN 0719-0700
Vol. 12 N°. 1
Junio
2022



UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO



**Revista
Hábitat
Sustentable**

ISSN 0719-0700

Vol. 12 N°. 1

junio

2022



UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO

RECTOR:

MAURICIO CATALDO MONSALVES

DECANO FACULTAD DE ARQUITECTURA, CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO:

ROBERTO EDUARDO BURDILES ALLENDE

EDITORIA RESPONSABLE:

Dra. CLAUDIA MUÑOZ SANGUINETTI / Departamento Ciencias de la Construcción, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
clmunoz@ubiobio.cl

PRODUCTORA EDITORIAL:

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

ASISTENTE EDITORIAL:

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

CORRECCIÓN DE ESTILO:

Dra. OLGA OSTRIA REINOSO / Departamento Estudios Generales

GESTIÓN INFORMÁTICA:

KARINA LEIVA / Universidad del Bío-Bío, Chile

DIRECTOR DE ARTE Y DIAGRAMACIÓN:

IGNACIO A. SÁEZ ARANEDA

CONSEJO EDITORIAL:

Dra. MAUREEN TREBILCOCK KELLY / Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

TRADUCCIONES:

KEVIN WRIGHT

FOTOGRAFÍA PORTADA:

PILAR MERCADER MOYANO, DANIEL J. RUESGA DÍAZ
/ Vivienda Margarita

DIRECCIÓN:

Avda. Collao 1202
CP: 4081112. Concepción, Chile
TEL.(56-41)3111409

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

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

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

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



- 05 **VIVIENDA MARGARITA**
Pilar Mercader Moyano, Daniel J. Ruesga Díaz
- 07 **EDITORIAL**
Claudia Muñoz Sanguinetti
- 08 **DESARROLLO DE UN INDICADOR INTEGRADO DE SUSTENTABILIDAD Y SEGURIDAD ESTRUCTURAL PARA EL MERCADO DE VIVIENDAS DE MADERA APLICADO A CHILE CENTRAL**
Rosemarie Garay-Moena, Miguel Castillo-Soto, Consuelo Fritz-Fuentes , Carlos Hernández Ortega
- 24 **VALIDACIÓN DE PROPUESTAS DE OPTIMIZACIÓN AMBIENTAL DE UN JARDÍN DE INFANTES DE TIPOLOGÍA COMPACTA, EN CLIMA MUY CÁLIDO-HÚMEDO**
María Laura Boutet, Alejandro Luis Hernández
- 44 **ANÁLISIS CUALITATIVO DE SOSTENIBILIDAD SOCIAL DE SISTEMAS DE DRENAJE URBANO EN CHILE**
Gianina Hidalgo-Monroy, Sebastian Vasquez-Avila, Felipe Araya
- 58 **ABORDANDO LA SUSTENTABILIDAD. LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO COMO HERRAMIENTA PROYECTUAL DOCENTE**
Maria López de Asiain-Alberich, Miguel Hernández-Valencia, Jorge Roa-Fernández, Rafael Herrera Limones
- 74 **OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE AULAS: APROVECHAMIENTO DE LA LUZ NATURAL PARA CONFORT VISUAL EN VILLA MARÍA, ARGENTINA**
David Salomón, Sofía Avalos Ambroggio
- 90 **USO DE MATERIALES LIGEROS PARA LA PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN DE BAJA DENSIDAD: UNA REVISIÓN LITERARIA**
Liseth Díaz-Merino, Luis Fernando Altamirano-Tocto, Sócrates Pedro Muñoz-Pérez
- 102 **OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y EL CONFORT TÉRMICO EN EDIFICIOS DE OFICINA PÚBLICOS. PERIODO CRÍTICO DE VERANO EN LA CIUDAD DE SAN JUAN, ARGENTINA**
Bruno Damián Arballo, Ernesto Kuchen, Daniel Chuk
- 114 **CONSTRUCCIÓN CON BLOQUES DE SUELO CEMENTO COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE PARA ENVOLVENTE EDILICIA**
Adriana Belen Costantini-Romero, Franco M. Francisca

VIVIENDA MARGARITA

Ubicada en la localidad de La Herrería (Fuente Palmera. Córdoba. España) la vivienda, se caracteriza por una arquitectura comprometida con el medio ambiente, reflejada tanto en el diseño como en las soluciones constructivas "ecoeeficientes" adoptadas: fachada ventilada, forjado sanitario, ventilación e iluminación naturales, sistema de climatización hidrónico, placas solares fotovoltaicas para autoconsumo y un mortero fotocatalítico para el revestimiento interior y exterior que será capaz de descontaminar el aire que rodea a la vivienda y ofrecerá a su vez un acabado impecable, sin necesidad de mantenimiento periódicos. Se trata de un prototipo de vivienda NZEB *Nearly Zero Energy Building al amparo de un contrato art 68/86 L.O.U.* a través de la Fundación de Investigación de la Universidad de Sevilla. Este tipo de viviendas que apoyan la sostenibilidad regenerativa, minimizan el impacto ambiental derivado de un excesivo consumo energético y reducen las emisiones de CO₂ a la atmósfera, son hoy no solo una realidad, sino una tendencia general en el sector.

Estudio de Arquitectura R&M Arquitectos Asociados
Pilar Mercader Moyano,

Doctora Arquitecta. Profesora Titular Escuela Técnica Superior de Arquitectura Universidad de Sevilla (US). Directora del Master Propio Rehabilitación Ecoeficiente de Edificios y Barrios US. Presidenta del Congreso Internacional de Construcción Sostenible y Soluciones Ecoeficientes. Master en Patrimonio Histórico y Master en Peritación y Reparación de Edificios. Subdirectora de Calidad y Hábitat Sostenible E.T.S.A.
pmm@us.es
<https://orcid.org/0000-0003-2180-4887>



Daniel J. Ruesga Díaz,

Arquitecto Gerente R&M Arquitectos Asociados, Máster en Proyectos de Instalaciones en Arquitectura: Diseño, Cálculo y Eficiencia Energética, Técnico Superior en Prevención de Riesgos Laborales, Miembro de la Agrupación de Arquitectos y Peritos Forenses del Colegio Oficial de Arquitectos de Sevilla.
djruesga@gmail.com



EDITORIAL

AVANZAR HACIA UNA TRANSICIÓN SOCIO-ECOLÓGICA JUSTA.

En tiempos en que el planeta da muestras evidentes de la sobrecarga de nuestra huella ecológica, cuando la demanda y servicios de la naturaleza supera con creces su biocapacidad, se hace urgente generar un punto de inflexión, ya que existe suficiente evidencia científica para afirmar que nos acercamos al peligroso límite del punto de no retorno.

Las consecuencias ambientales y sociales de un modelo productivo de desarrollo lineal y extractivista, iniciado a mediados del siglo XVIII y aún vigente, siguen generando profundas brechas ecológicas y sociales a nivel global. Con miras a reducir tales brechas, en Chile se abre hoy una valiosa oportunidad en la medida en que, por primera vez, se declara en nuestro país, por parte de la actual administración gubernamental, específicamente desde el Ministerio del Medio Ambiente, el compromiso de avanzar hacia una transición socio-ecológica justa. En sintonía con ello, se han dado dos importantes señales. Una de ellas, la *adhesión al Acuerdo Escazú*, el cual será ratificado en los plazos legales oportunos y otorgará el marco para reducir la conflictividad ambiental y reafirmar el compromiso del país internacionalmente, en temas ambientales, entre otros aspectos relevantes. El segundo hito relevante se refiere al *cierre de la Fundición Ventanas* en zona de Quinteros – Puchuncaví, una zona de sacrificio ambiental que ha generado por demasiado tiempo una alta carga de contaminación y, por lo tanto, significativos efectos adversos sobre la salud de las personas y el medio ambiente. Sin duda, se trata de una decisión compleja, por los alcances económicos y laborales, pero muy necesaria y pendiente. Así, estas valiosas señales contribuyen a iluminar un camino para avanzar hacia esa *transición ecológica justa*, a la que profesionales, academia y sociedad en general, estamos llamados a aportar desde nuestras respectivas veredas.

En cuanto a los instrumentos reguladores y normativos necesarios para enfrentar los desafíos de la crisis climática del país, también existen noticias positivas para Chile, ya que durante el mes de junio del presente año se ha promulgado la *Ley marco del Cambio Climático* (Ley N° 21.455), la cual establece, precisamente, un marco jurídico para hacer frente a los desafíos que presenta el cambio climático, cuya meta para el país es volverse carbono neutrales y resilientes al clima, a más tardar al año 2050. La ley define, en suma, un norte por las próximas tres décadas, esperando modificar de manera estructural los modos en que funciona el Estado para lograr los objetivos de des-carbonización y disminución de brechas sociales. Es, a todas luces, una buena nueva para un país con altos niveles de degradación, pasivos ambientales y aún altos niveles de pobreza.

Quedan muchos desafíos ambientales, económicos y sociales aún por resolver, por eso es necesario contar con una política de Estado que resguarde este justo equilibrio y la añorada transición socio-ecológica.

El llamado es a repensar, elevar nuestro nivel de conciencia respecto del rol que jugamos en esta sociedad y este planeta, en su estado actual, a comprender nuestra responsabilidad en ello. Y, desde nuestras disciplinas, a generar un cambio de paradigma en la forma de planificar el territorio y el medio construido, para advertir e integrar oportunamente los criterios básicos de edificación sostenible, de todos los aspectos ambientales y sociales.

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



DESARROLLO DE UN INDICADOR INTEGRADO DE SUSTENTABILIDAD Y SEGURIDAD ESTRUCTURAL PARA EL MERCADO DE VIVIENDAS DE MADERA APLICADO A CHILE CENTRAL¹

DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED SUSTAINABILITY AND STRUCTURAL SAFETY INDICATOR, APPLIED TO CENTRAL CHILE FOR THE WOODEN HOUSING MARKET

Rosemarie Garay-Moena

Magister en Ciencias e Industrias de la madera, Académica, Departamento de Desarrollo en Productos Forestales, Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile. Santiago, Chile
<https://orcid.org/0000-0002-7662-9724>
rosemarie.garay@gmail.com

Miguel Castillo-Soto

Doctor en Recursos Naturales, Académico e Investigador, Laboratorio de Incendios Forestales, Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile. Santiago, Chile
<https://orcid.org/0000-0002-3880-9441>
migcasti@uchile.cl

Consuelo Fritz-Fuentes

Doctora en Biomateriales Forestales, Académica, Departamento de Desarrollo en Productos Forestales, Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile. Santiago, Chile
<https://orcid.org/0000-0002-1803-620X>
cfritz@uchile.cl

Carlos Hernández Ortega

Ingeniero Forestal, Titulado, Universidad de Chile. Santiago, Chile
<https://orcid.org/0000-0002-1620-0846>
carlos.hernandez.o@ug.uchile.

¹ Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) para el proyecto IT10003 " Propuesta de estándares en infraestructura crítica para viviendas localizadas en la interfaz urbano forestal"

RESUMEN

El mercado de viviendas en Chile, basado en madera, requiere una revisión complementaria en función de las ventajas competitivas que posee este material respecto a sus prestaciones técnicas y propiedades estructurales, para fortalecer el cumplimiento de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción [OGUC] chileno y los Códigos de Construcción Sustentables. En ese marco, el objetivo central de la presente investigación fue desarrollar un Indicador Integrado de Seguridad y Sustentabilidad (IISS) capaz de integrar aspectos normativos, sociales, territoriales y ambientales, conforme a las variables: (1) presentación, (2) sustentabilidad y (3) seguridad de una vivienda. Para esto, se recopiló información de 230 empresas constructoras en madera localizadas entre las regiones de Valparaíso y Los Ríos, en Chile Central; proceso en el que destacó la presentación del producto y la seguridad como insumos para aplicar la metodología de cálculo del IISS. Esta integración dio como resultado una clasificación de indicadores técnicos útiles para fomentar la utilización del material madera como opción constructiva que prevalezca o se complemente con otro tipo de materias primas.

Palabras clave

viviendas de madera, seguridad, sustentabilidad.

ABSTRACT

The wood-based housing market in Chile requires a complementary review that considers the competitive advantages of this material regarding its technical features and structural properties, to strengthen compliance with the Chilean General Urban Planning and Construction Ordinance (OGUC, in Spanish) and the Sustainable Building Codes. The purpose of this research was to develop an Integrated Sustainability and Safety Indicator (IISS, in Spanish), which integrates regulatory, social, territorial, and environmental aspects, considering (1) presentation, (2) sustainability, and (3) safety variables for wooden houses. For this, information was collected from 230 wood construction companies located between the regions of Valparaíso and Los Ríos, in Central Chile, where product presentation and safety were highlighted as inputs to calculate the IISS. This integration resulted in a classification of useful technical indicators to promote wood use as a construction option that prevails over or complements other building options.

Keywords

Wooden houses, Safety, Sustainability

INTRODUCCIÓN

Diversos estudios (Domljan y Janković 2022, Soust-Verdague, Moya y Llatas, 2022, Harju, 2022; Luhas et al., 2021; Andac, 2020; Toppinen, D'amato y Stern, 2020; Bugge, Hansen y Klitkou, 2016; Ollikainen, 2014; Cai y Aguilar, 2013; Cai y Aguilar, 2014) han enfatizado en que el consumo de productos forestales es fundamental para mejorar y fomentar la calidad de vida de las personas, el desarrollo sostenible y la transición hacia economías circulares de base biológica. En este contexto, la madera como material de construcción destaca por sus propiedades sostenibles (Viholainen et al., 2021; Brusselaers, Verbeke, Mettepenningen y Buyesse, 2020), longevidad en uso (Luo, Mineo, Matsushita y Kanzaki, 2018), impacto positivo en el entorno de vida (Harju, 2022; Rhee, 2018; De Moraes y Pereira, 2015), percepciones de estética (Lähtinen et al., 2021; Bhatta, Tiippana, Vahtikari, Hughes y Kytä, 2017) y propiedades de almacenamiento de carbono y reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Lippke et al., 2011; Petersen y Solberg, 2005).

Desde este enfoque, se hace necesario contar en Chile con instrumentos para evaluar de forma objetiva las viviendas en madera que se comercializan, de manera de identificar las ventajas y desventajas que implica construir con este material, bajo el cumplimiento de criterios técnicos obligatorios y voluntarios. El problema identificado en Chile es que la coherencia de organismos públicos y privados responsables de fiscalizar qué se vende y cómo se instalan las viviendas de madera ofrecidas no está resuelta ya que no existen herramientas para que los consumidores sepan en qué fijarse al momento de la compra. Esta situación se debe a factores como el déficit habitacional (Fundación Vivienda, 2019; Vergara y Reyes, 2019), la escasez de oferta, aplicabilidad de subsidios vinculados al alza de precios y también por el efecto migratorio; la decisión de compra se realiza principalmente por precios accesibles y atributos visuales estéticos. En efecto, existe un importante número de viviendas que no está siendo inscrito y revisado. A esto se suma la falta de información a la que acceden los consumidores en cuanto a las bondades técnicas de la madera antes de realizar la compra de viviendas.

En el ámbito normativo chileno, de acuerdo a la ley de urbanismo y construcción D.F.L. N°458 de 1976, las edificaciones en madera, al igual que en otras materialidades, están obligadas a construir con sistemas inscritos y reconocidos por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile. El cumplimiento de estas normas, así como de otras voluntarias contenidas en los códigos de construcción sustentables, entre las que destacan el análisis del ciclo de vida y la medición

de huella de carbono, resulta ser clave para acercar al sector productivo hacia estándares de habitabilidad más altos y, hasta ahora, no hay antecedentes que cuantifiquen cumplimiento de estas disposiciones en el mercado de construcción en madera (Castillo, Garay, Tapia, Garfias y Orell, 2020).

Asimismo, la falta de estandarización y disponibilidad de información técnica se corrobora en la escasez de productos comercializados bajo la Norma Chilena NCh1207 de clasificación visual para madera elaborada de pino radiata, situación que fue revisada y ratificada en el proyecto del Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDEF) de Chile (IT16i10003), referido a estándares en infraestructura crítica para viviendas localizadas en áreas de interfaz urbano forestal. Allí se formularon las bases técnicas para el primer diseño de un sistema integrado de indicadores de seguridad y calidad para infraestructuras basadas en madera, y se cotejaron los estándares chilenos con normas extranjeras con base en la premisa de establecer condiciones comparables entre un país y otro (Castillo et al., 2020). A partir de esta experiencia, Garay, Pfenniger, Castillo y Fritz (2021a) presentaron una propuesta de IISS a fin de destacar las ventajas competitivas de elementos y componentes en madera para la construcción, es decir, de resaltarlas ante las exigencias que tiene el mercado comprador, de modo que pudieran ser incluidas por el mercado de proveedores para posicionar a la madera como un producto confiable y estandarizado.

Específicamente, el indicador integrado de seguridad y sustentabilidad (IISS) constituye un valor que se obtiene mediante un modelo analítico de evaluación aplicado a un producto, considerando cuáles son los criterios que describen las ventajas competitivas de distintas tipologías constructivas. Como se mencionó anteriormente, el IISS ha sido creado para otros productos de madera y publicado en investigaciones previas, entre ellas el Congreso Latinoamericano de Estructuras de Madera (CLEM CIMAD 2019) y la Conferencia mundial sobre ingeniería de la madera (WCTE 2021). Asimismo, el IISS es un indicador integrado que permite evaluar aspectos técnicos, normativos, sociales y ambientales que condicionan la sustentabilidad y seguridad, además de la presentación de los productos. De esta forma, se da importancia a la calidad y las prestaciones de estos elementos para la vivienda y se contribuye a que las personas vivan en condiciones seguras.

El análisis actual del mercado de viviendas basadas en madera, indica que el sector productivo tiene las potencialidades necesarias para avanzar con una oferta ajustada a las normas constructivas, debido a ventajas tales como la baja huella de carbono (en comparación con otros materiales), la capacidad de

industrialización, la adopción de estándares nacionales e internacionales, la eficiencia sísmica, térmica y acústica. Medir y transparentar los atributos técnicos de la madera permite reforzar sus vulnerabilidades, por ejemplo, empleando maderas preservadas según riesgo de exposición, otorgando protección contra el fuego y la biodegradación, así como otras amenazas vinculadas al lugar de emplazamiento (Garay, Castillo y Tapia, 2021b), los que deben ser considerados desde el diseño, y evaluando anticipadamente cada situación de forma individual. Paralelamente, existen tareas pendientes relacionadas a instalación y puesta en servicio de viviendas de acuerdo al emplazamiento, condiciones de riesgo propias de la naturaleza y aumento de la demanda poblacional. En este sentido, muchas normas chilenas actualmente declaran estos aspectos, pero no poseen peso legal que permita su fiscalización en los planes de obras.

METODOLOGÍA

El material de estudio corresponde a un conjunto de viviendas de madera basadas en procesos de manufactura procedentes de 230 empresas del rubro localizadas en las regiones de Valparaíso, O'Higgins, Maule, Ñuble, Biobío, Araucanía, Los Ríos y Metropolitana. El método consistió en la identificación y catastro de empresas oferentes de viviendas en madera a través de sus páginas web, a lo cual le siguió la creación de registros sobre tipologías constructivas y sus caracterizaciones individuales (basada en la información relevante entregada por la empresa para su producto), clasificadas bajo tres criterios: (1) presentación (Pt); (2) sustentabilidad (St); y (3) seguridad (Sg), los que se explican y detallan en la Figura 1A. El atributo Pt involucra la presentación del producto y la empresa, pero además abarca los servicios y la postventa del producto. Este atributo es explicitado dado que las empresas deben entregar un servicio postventa que deje conforme al consumidor y que sea eficiente en la entrega de soluciones en caso de cualquier inconveniente. El atributo St está basado en los estándares y certificaciones constructivos que debiesen adoptarse, tales como, hermeticidad, huella de carbono, análisis de ciclo de vida, en la calidad de los procesos y su eficiencia e innovación, y en las características acústicas y térmicas de las viviendas de madera ofrecidas. Finalmente, el atributo Sg contempla aquellos aspectos relacionados a la durabilidad de las viviendas y especialmente su comportamiento frente al fuego, incluidos en la OGUC. El registro de información incorpora y describe la presencia o ausencia de esta información para las viviendas ofrecidas, así como su detalle y explicaciones pertinentes.

Tras completar el registro, correspondió la determinación de los valores de IISS para las distintas

viviendas ofrecidas en las regiones de estudio. Así, se procedió a delimitar el planteamiento para el indicador integrado denominado IISS, fundado en los antecedentes normativos disponibles y la información procedente desde el registro. Para su desarrollo, se utilizó el método analítico de Saaty (2001), quien plantea una secuencia de cálculos basados en una combinación de criterios que caracterizan la asociatividad matemática entre variables y sus relaciones cruzadas, lo que da como resultado una matriz de consistencia que en su conjunto aporta a la descripción de la variable dependiente, en este caso IISS. Esta metodología se utiliza a partir de las investigaciones publicadas por Garay, Tapia, Castillo, Fernández y Vergara (2018); Garay et al. (2021a); Garay et al. (2021b); Garay, Pfenniger y Castillo (2021c).

La determinación del IISS se inició con la aplicación de una Evaluación Multicriterio (EMC) o Método Analítico Jerárquico (AHP) propuesto por Saaty (2001), el cual es empleado en la toma de decisiones de múltiples criterios y variables de estudio para la selección de un conjunto de criterios basados en distintas alternativas (Figura 1B). Esta metodología permite: (1) identificar las partes del sistema; (2) reconocer el peso de las partes del sistema; (3) identificar los vínculos entre las partes; y (4) proponer una solución racional. Igualmente, se fundamenta en tres principios: en la construcción de las jerarquías, el establecimiento de prioridades y la consistencia lógica. Todo ello se vuelve necesario a fin de evitar una evaluación arbitraria sustentada en prejuicios.

DEFINICIÓN DE CRITERIOS Y VARIABLES

La definición oportuna de criterios y variables permitió identificar los atributos y sus interacciones de acuerdo con el esquema de la Figura 1B. Estos atributos fueron determinados como resultado de análisis y observaciones en terreno, como también de páginas web de empresas constructoras de viviendas en madera, y aluden al tipo de materiales utilizados, al mercado que abarcan y al contexto económico, social y ambiental en el que se desenvuelven dichas empresas.

Estos criterios se estructuran en tres ejes principales que se detallan en la Figura 1A: (1) Presentación; (2) Seguridad y (3) Sustentabilidad. Dado que el IISS tiene por objetivo fomentar el uso de la madera y resaltar el valor de las ventajas estructurales y técnicas de la misma, resulta de interés valorar las estrategias de marketing de la empresa y sus servicios postventa, por lo tanto, la Presentación (Pt) busca identificar los componentes informados más relevantes que resaltan la percepción positiva de la madera para una exitosa captación de clientes; la Seguridad (Sg) y Sustentabilidad (St) se evalúan por la presencia de los componentes técnicos declarados, observados o verificados a partir de las normas de construcción de la OGUC y códigos de construcción sustentables del Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile.

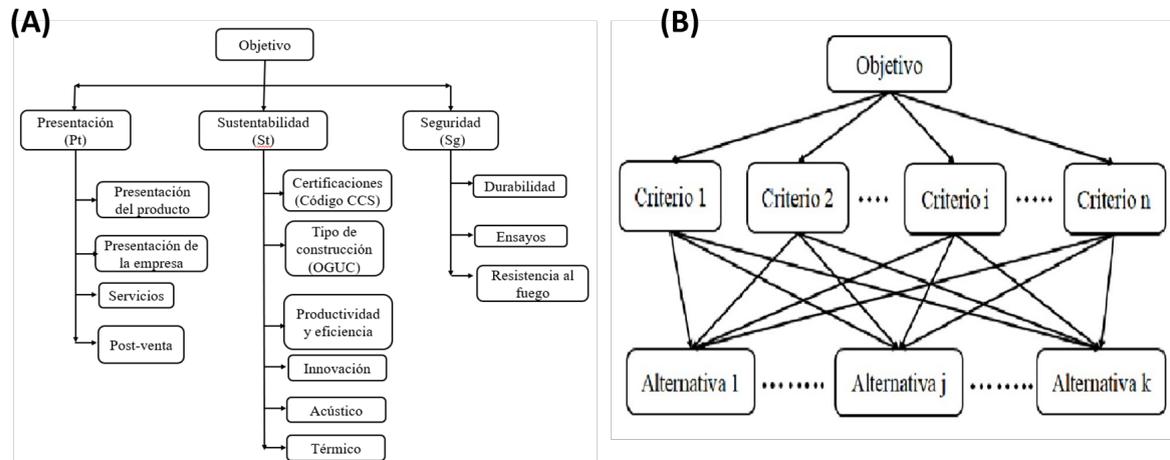


Figura 1. (A) Esquema planteado del Indicador Integrado de Seguridad y Sustentabilidad. (B) Estructura de modelación tipo en la metodología EMC. Fuente: Elaboración de los autores a partir de Saaty (2001).

1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Extrema	Fuerte		Moderado			Igual	Moderado			Fuerte		Extrema				
Menos importante								Más importante								

Tabla 1. Escala de establecimiento de prioridades. Fuente: Fuente: Elaboración de los autores en base a Saaty (2001).

n=3	Presentación (Pt)	Sustentabilidad (St)	Seguridad (Sg)
Presentación (Pt)	1	1/A ₂₁	1/A ₃₁
Sustentabilidad (St)	A ₂₁	1	1/A ₃₂
Seguridad (Sg)	A ₃₁	A ₃₂	1

Tabla 2. Ejemplo de matriz de comparación por pares, donde A₂₁, A₃₁ y A₃₂ son los posibles puntajes asignados y "n" es la cantidad de variables. Fuente: Fuente: Elaboración de los autores en base a Saaty (2001).

ASIGNACIÓN DE PUNTAJE

Siguiendo con el segundo principio del método, a cada elemento se le asigna un valor a partir de una escala propuesta por Saaty (Tabla 1), que refleja su peso, importancia relativa o magnitud de preferencia. La asignación se efectúa mediante un consenso a valor promedio designado por un panel de expertos del área de la construcción (en este caso 2 académicos, 2 empresarios y un representante de gobierno, anónimos todos), quienes respaldan la normativa e ingeniería pertinentes al tema, apoyan con bibliografía *ad hoc*, así como revisan el análisis derivado de páginas web de 230 empresas del rubro.

La designación de estos pesos sigue la metodología de comparación por pares del mismo autor, es decir, en el que se establece una relación de importancia de un factor respecto a otro. Estos fueron presentados en

una matriz cuadrada, con un número de filas y columnas determinados por la cantidad de factores a ponderar, tal como se observa en la Tabla 2.

Luego se determina el *eigen vector* o *vector propio* de la matriz, que representa el orden de prioridad de los factores. Para ello, se normalizan los valores de los puntajes o pesos establecidos anteriormente, mediante la división de cada valor de la matriz de comparación con la suma total de los valores de la columna que es correspondiente al valor, como muestra la ecuación 1, lo cual da como resultado lo expresado en la Tabla 3.

$$N(A_{ij}) = \frac{A_{ij}}{\sum_{i=1}^n A_{ij}} \quad (1)$$

Donde:
 N(A_{ij}) = Valor normalizado del juicio en matriz de criterios de la fila "i" en la columna "j".

n=3	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Peso Final
Factor 1	N(1)	N(1/A21)	N(1/A31)	$\sum N(A1i)/n = \beta_1$
Factor 2	N(A21)	N(1)	N(1/A32)	$\sum N(A2i)/n = \beta_2$
Factor 3	N(A31)	N(A32)	N(1)	$\sum N(A3i)/n = \beta_3$

Tabla 3. Matriz normalizada. Fuente: Elaboración de los autores

Tamaño de la matriz (N)	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice aleatorio (Ri)	0	0,6	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,5

Tabla 4. Valor índice de consistencia aleatorio. Fuente: Elaboración de los autores en base a Saaty (2001).

A_{ij} = Valor del juicio en la matriz de criterios de la fila "i" en la columna "j".

Al sumar las filas de los valores normalizados, se obtiene el *eigen vector* principal

$$\text{Eigenvector principal} = \sum_{i=1}^n N(A_{ij}) \quad (2)$$

Se normaliza el *eigen vector* principal dividiendo el resultado en la cantidad de criterios en la matriz, de lo que resulta la matriz de la ecuación 2 (Saaty, 2001). Este último resultado es un valor porcentual que representa el valor del peso de cada factor de las variables.

Para confirmar la validez en la asignación de puntajes o importancia relativa de estos pesos finales se procede al cálculo de Razón de consistencia (Rc), haciendo uso de la ecuación 3.

$$(Rc = Ic/Ri) \quad (3)$$

Donde:

Rc: Razón de consistencia (Rc),

Ic: Índice de consistencia (Ic),

Ri: Índice aleatorio, un valor contenido en una tabla creada en el Oak Ridge National Laboratory el cual es característico para matrices desde 1 hasta 15 (Tabla 4).

Mientras que el Ic, es un valor obtenido a partir de la ecuación 4:

$$Ic = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1) \quad (4)$$

Donde:

n = número de factores de la matriz

λ_{\max} = calculado a partir de la sumatoria de los valores resultantes del producto del eigenvector principal (β_1, β_2 y β_3) con la matriz de asignación de puntajes.

Es así como a partir de la metodología planteada por Saaty (2001), para valores mayores o iguales a 0,10 los juicios de valor deben ser revisados, ya que no son lo suficientemente consistentes para establecer los pesos.

Para asegurar la correcta aplicación del método AHP es que esta combinación debe hacerse tanto a nivel de criterios como de variables dentro del criterio (nivel 1 y 2, respectivamente).

CÁLCULO DE IISS

El cálculo del IISS consiste en la sumatoria del producto de los valores porcentuales (pesos o importancia relativa) entre los criterios (nivel 1) y sus respectivas variables (nivel 2), y un puntaje adicional asignado de 1 a 5, en el que 1 representa la peor situación para el producto evaluado y 5, la mejor. Cada nivel es detallado y descrito en una planilla de evaluación.

$$\text{IISS} = C_1 * V_1 * P_1 + C_1 * V_2 * P_2 + \dots + C_2 * V_1 * P_1 + C_2 * V_2 * P_2 + \dots + C_3 * V_1 * P_1 + C_3 * V_2 * P_2 + \dots \quad (5)$$

Donde:

C_i : valor decimal o porcentual de los criterios generales (Pt, St y Sg)

V_i : Valor decimal o porcentual de la variable incluida en el criterio general.

P_i : Puntaje asignado a la variable de estudio, siendo 1 menor cumplimiento a 5 el de mayor cumplimiento.

De este modelo se puede definir como un "peso local" (V_i en el modelo) al valor porcentual o importancia relativa de la variable por sí sola dentro de su criterio respectivo, y como un "peso global" al producto $C_i \times V_i$, el cual da cuenta de su importancia en todo el modelo.



Figura 2. Secuencia metodológica para ponderación y evaluación de consistencia IISS. Fuente: Elaboración de los autores.

Descripción	Intervalos		
Bajo	1	-	2,33
Medio	2,33	-	3,67
Alto	3,67	-	5,00

Tabla 5. Intervalo de caracterización para el IISS. Fuente: Elaboración de los autores.

	Presentación	Seguridad	Sustentabilidad
Presentación	1	2	3
Seguridad	0,5	1	2
Sustentabilidad	0,33	0,5	1

Tabla 6. Matriz de pares cruzados para los niveles de los tres criterios (Pt; Sg; St). Fuente: Elaboración de los autores.

PONDERACIÓN Y EVALUACIÓN DE CONSISTENCIA IISS

En esta etapa, se estableció la siguiente jerarquía, basada en la información recopilada y analizada de las 230 empresas consultadas:

Presentación (Pt); Seguridad (Sg); Sustentabilidad (St)

La clasificación de la información entregada por cada empresa para su producto es clasificada en función de esos tres criterios, según la importancia con la que se exponen y describen a través de internet como medio de difusión y adquisición de bienes y servicios, con poder de sugestión a partir de estímulos visuales, así como poder de aprendizaje (de Lourdes, 2006). Para ello es que la página web debe cumplir con distintos parámetros de accesibilidad (Varas, Agüero, Guzmán y Martínez, 2015), cuyo énfasis debe estar puesto en la identificación de los componentes más relevantes, entre ellos los tecnológicos, cumplimientos técnicos y de sustentabilidad, que forman parte de la cadena de producción. Se utilizó este método debido a las dificultades de acceso directo originadas por la pandemia del COVID 19.

En cuanto al criterio asociado a seguridad, se consideran las propiedades estructurales, frente a sismos y fuego

como más relevantes, dada la importancia que los usuarios le otorgan a ellas, sobre todo en el contexto nacional, propenso a presentar sismos e incendios (Castillo, *et al.*, 2020, Garay *et al.*, 2021a). A esto se suma que las empresas, especialmente las pequeñas (Pymes), aún consideran que la construcción sustentable implica un sobrecosto, que el cliente no puede pagar (Fajardo, 2014; Hatt, Saelzer, Hempel y Gerber, 2012).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

APLICACIÓN DEL INDICADOR INTEGRADO DE SEGURIDAD Y SUSTENTABILIDAD (IISS)

Modelación, ponderación y evaluación de consistencia IISS

La modelación del problema está representada en la Figura 1, jerarquizada desde el primer nivel de criterios generales hacia el segundo nivel de variables que se han considerado para determinar el nivel de cumplimiento de los productos ofrecidos por las empresas.

La secuencia de pasos para el cálculo del IISS se expone en la Figura 2.

	Presentación del producto	Presentación de la empresa	Servicios	Servicio post venta
Presentación del producto	1	0,5	2	3
Presentación de la empresa	2	1	3	5
Servicios	0,5	0,33	1	2
Post venta	0,33	0,2	0,5	1

Tabla 7. Matriz de pares cruzados para los niveles de variables del criterio Pt. Fuente: Elaboración de los autores.

	Certificaciones *(CCS, CEV)	Tipo de construcción (OGUC, 5.3.1)	Productividad/ eficiencia	Innovación (construcción sustentable)	Confort acústico	Acondic. térmico
Certificaciones *(CCS, CEV)	1	0,20	0,25	0,33	0,5	0,5
Tipo de construcción (OGUC, 5.3.1)	5	1	2	3	4	3
Productividad/ eficiencia	4	0,50	1	2	3	2
Innovación (construcción sustentable)	3	0,33	0,5	1	0,5	0,5
Confort acústico	2	0,25	0,33	2	1	0,5
Acondic. térmico	2	0,33	0,5	2	2	1

Tabla 8. Matriz de pares cruzados para los niveles de variables del criterio St. Fuente: Elaboración de los autores.
 *CCS: Códigos de Construcción Sustentable y/o CEV: Certificación energética viviendas.

Se presenta el intervalo de caracterización para el IISS en tres niveles (Tabla 5) y se elabora la matriz de comparación de criterios generales (Tabla 6).

Como se indicó en la metodología, el procedimiento requiere de la determinación de la Razón de consistencia, la cual arroja un valor de 0,9%, es decir, alta consistencia en la valoración de los criterios, por lo que el modelo se considera como aceptado.

El IISS resultante se compara en tres matrices de pares cruzados (una por cada criterio Pt, Sg y St, explicadas en las Tablas 7, 8 y 9, de acuerdo con el valor mínimo a máximo posible de obtener, el valor IISS resultante es clasificado como Bajo, Medio o Alto (según rangos de Tabla 5), dependiendo del cumplimiento de los criterios, respectivamente (ejemplos de cálculo en Figura 4).

La matriz de comparación para Pt arroja una Rc del 0,65%, esto es, alta consistencia en la valoración de los datos, por lo que el modelo es aceptado.

El criterio de Sustentabilidad (St) evalúa cumplimientos de mayor compromiso ambiental, donde es importante que la información esté disponible, aunque los clientes potenciales no siempre pueden asumir los costos asociados (Hatt *et al.*, 2012). Existe interés por criterios de sustentabilidad, sin embargo, frecuentemente, terminan dando mayor preferencia de compra en función de costos bajos, de modo que se define la jerarquía de selección siguiente: Tipo de construcción > Productividad y eficiencia > Eficiencia > Acond. Térmico > Acústico > Certificación.

La matriz de comparación para St arroja una Rc 4,2%, o sea, alta consistencia en la valoración de los datos, de manera que el modelo se estima aceptado.

Respecto al criterio de Seguridad (Sg), y debido a la recurrencia de incendios y a la presunción de cumplimiento de resistencia sísmica, se privilegian parámetros normativos de protección contra el fuego por sobre las demás, lo que se relaciona con un tema social arraigado en la población de temor a

Seguridad	Durabilidad y tratamiento (OGUC, 5.6.8)	Ensayos (OGUC)	Resistencia al fuego (OGUC, MINVU)
Durabilidad y tratamiento (OGUC, 5.6.8)	1	2	0,50
Ensayos (OGUC)	0,50	1	0,33
Resistencia al fuego (OGUC, MINVU)	2	3	1

Tabla 9. Matriz de pares cruzados para los niveles de variables del criterio Sg. Fuente: Elaboración de los autores.

Criterio	Peso	Variables	Local	Global	Puntaje
Presentación	0,539	Presentación del producto	0,2718	0,1465	1 a 5
		Presentación de la empresa	0,4824	0,2600	1 a 5
		Servicios	0,1575	0,0849	1 a 5
		Servicio post venta	0,0883	0,0476	1 a 5
Sustentabilidad	0,164	Certificaciones (transparencia)	0,0667	0,0198	1 a 5
		Tipo de construcción (OGUC, 5.3.1)	0,4000	0,1189	1 a 5
		Productividad/ eficiencia proceso	0,2667	0,0793	1 a 5
		Innovación (construcción sustentable)	0,0667	0,0198	1 a 5
		Acústico	0,0667	0,0198	1 a 5
		Acondicionamiento térmico	0,1333	0,0396	1 a 5
Seguridad	0,297	Durabilidad y tratamiento (OGUC, 5.6.8)	0,2973	0,0487	1 a 5
		Ensayos (transparencia)	0,1638	0,0268	1 a 5
		Resistencia al fuego	0,5390	0,0883	1 a 5

Tabla 10. Pesos o ponderaciones locales y globales de los criterios y variables. Fuente: Elaboración de los autores.

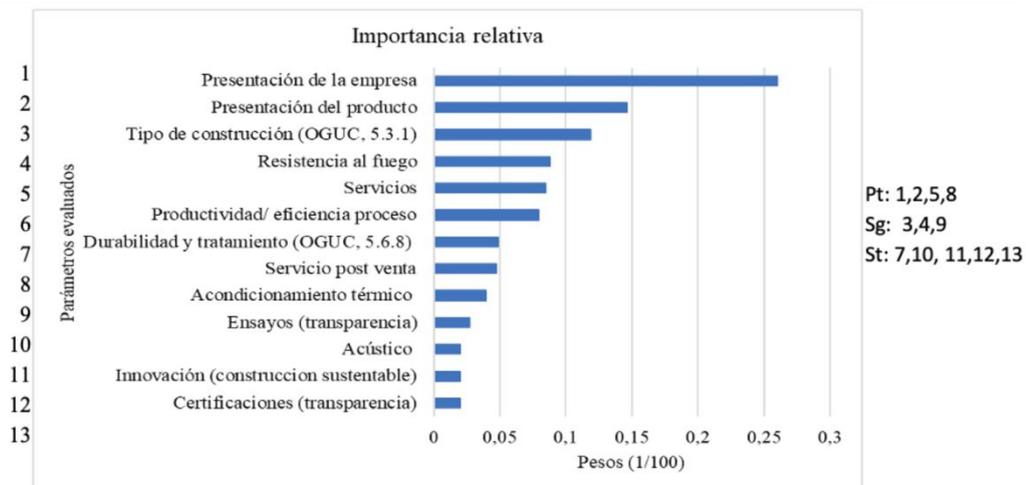


Figura 3. Evaluación de importancia relativa de parámetros. Fuente: Elaboración de los autores.

A) Ejemplo de cálculo IISS, valorización "ALTA"					B) Ejemplo de cálculo IISS, valorización "MEDIA"				
Empresa	Imagen producto	Descripción	Otras Observaciones		Empresa	Imagen producto	Descripción	Otras Observaciones	
Construkit		Casa Base, modalidad prefabricado	Se destaca por la publicidad de los tratamientos e innovación del proceso: eficiencia		Construkit		Modalidad industrializada, panel SIP	Empresa se destaca los tratamientos empleados a las piezas que utiliza	
Variable	Criterio	Ptaje	Peso global	Producto	Variable	Criterio	Ptaje	Peso global	Producto
Presentacion	Presentación del producto	3	0,146	0,44	Presentacion	Presentación del producto	4	0,146	0,586
	Presentación de la empresa	4	0,260	1,04		Presentación de la empresa	3	0,260	0,780
	Servicios	3	0,085	0,25		Servicios	2	0,085	0,170
	Servicio post venta	2	0,048	0,10		Servicio post venta	2	0,048	0,095
Sustentabilidad	Certificaciones (Código CCS)	3	0,020	0,06	Sustentabilidad	Certificaciones (Código CCS)	2	0,020	0,020
	Tipo de construcción (OGUC, 5.3.1)	5	0,119	0,59		Tipo de construcción (OGUC, 5.3.1)	1	0,119	0,119
	Productividad/ eficiencia proceso	5	0,079	0,40		Productividad/ eficiencia proceso	5	0,079	0,079
	Innovación (construccion sustentable)	5	0,020	0,10		Innovación (construccion sustentable)	2	0,020	0,020
	Acústico	4	0,020	0,08		Acústico	2	0,020	0,020
Acondicionamiento termico	4	0,040	0,16	Acondicionamiento termico	2	0,040	0,040		
Seguridad	Durabilidad y tratamiento (OGUC, 5.6.8)	4	0,049	0,19	Seguridad	Durabilidad y tratamiento (OGUC, 5.6.8)	4	0,049	0,049
	Ensayos (transparencia)	4	0,027	0,11		Ensayos (transparencia)	2	0,027	0,027
	Resistencia al fuego	3	0,088	0,26		Resistencia al fuego	3	0,088	0,088
SUMA		49	1	3,78	SUMA		34	1	2,09

C) Ejemplo de cálculo IISS, valorización "BAJA"

Empresa	Imagen producto	Descripción	Otras Observaciones	
Casas Entrelagos		Vivienda prefabricada, formato kit completo	Sin observación	
Variable	Criterio	Ptaje	Peso global	Producto
Presentacion	Presentación del producto	2	0,146	0,29
	Presentación de la empresa	2	0,260	0,52
	Servicios	3	0,085	0,25
	Servicio post venta	2	0,048	0,10
Sustentabilidad	Certificaciones (Código CCS)	1	0,020	0,02
	Tipo de construcción (OGUC, 5.3.1)	3	0,119	0,36
	Productividad/ eficiencia proceso	3	0,079	0,24
	Innovación (construccion sustentable)	4	0,020	0,08
	Acústico	1	0,020	0,02
Acondicionamiento termico	3	0,040	0,12	
Seguridad	Durabilidad y tratamiento (OGUC, 5.6.8)	3	0,049	0,15
	Ensayos (transparencia)	1	0,027	0,03
	Resistencia al fuego	1	0,088	0,09
SUMA		29	1,000	2,26

Figura 4. Ejemplos de cálculo de IISS según el tipo de valorización: (A) nivel "alto"; (B) nivel "medio", y (C) nivel "bajo". Fuente: Elaboración de los autores.

los sismos y a los incendios, por ello se establece la siguiente jerarquía de selección: Resistencia al fuego > Durabilidad y tratamiento > Ensayos

La matriz de comparación para Sg arroja una Rc del 1%, alta consistencia en la valoración de los datos, por lo tanto, el modelo es aceptado.

Finalmente, los pesos locales y globales son presentados en la Tabla 10.

La importancia relativa de los parámetros evaluados refleja el orden de prioridades bajo el cual las distintas acciones correctivas deben estar enfocadas. Es así como, desde la asignación de pesos hasta la obtención de los pesos globales y locales, se obtuvo que los parámetros de "presentación del proyecto", el "tipo de construcción" y las acciones respecto a la Resistencia al fuego tuvieron mayor importancia relativa en el estudio (Figura 3).

Empresa	Imagen producto	Descripción	Pt	St	Sg	Otras Observaciones	IISS	valor
Construkt		Casa Base, modalidad prefabricado	1,829	1,387	0,567	Se destaca por la publicidad de los tratamientos e innovación del proceso: eficiencia.	3,78	Alto
Casas Calera de Tango		Vivienda llave en mano, modalidad prefabricada	2,175	1,030	0,465	Se destaca por un proceso de escala, ofreciendo desde un kit básico y ascendiendo a modalidad de llave en mano.	3,67	Alto

Tabla 11. Aplicación IISS, ejemplo de indicador de valor "Alto". Fuente: Elaboración de los autores a partir de la información entregada por las empresas evaluadas.

Empresa	Imagen	Descripción	Pt	St	Sg	Otras Observaciones	IISS	valor
Constructora ROKAR		Vivienda tradicional	1,886	0,971	0,340	Buena presentación. Falta descripción más detallada sobre materialidades de la vivienda. Falta detallar innovaciones o tipos de certificado.	3,20	Medio
		Construcción modular	1,886	1,09	0,340		3,32	Medio
Easywood		Modalidad industrializada, panel SIP	1,716	1,209	0,513	Empresa se destaca por los tratamientos empleados a las piezas que utiliza.	3,44	Medio
Fundación vivienda		Mediagua, vivienda prefabricada	1,796	0,595	0,164	Se destaca por la presentación de la empresa, pero no por la de sus productos.	2,55	Medio
Decocasas		No especifica	1,210	1,030	0,164	Destaca por su sustentabilidad y diseño o uso de sus materiales para generar confort acústico y térmico.	2,40	Medio

Tabla 12. Aplicación IISS, ejemplo de indicador de valor "Medio". Fuente: Elaboración de los autores a partir de la información entregada por las empresas evaluadas.

Empresa	Imagen	Descripción	Pt	Sg	St	Otras Observaciones	IISS	valor
Constructora ARQOS		Modelo rústico	1,51	0,54	0,16	Riesgo de incendio por sobrecarga de combustible.	2,21	Bajo
Casas Entrelagos		Vivienda prefabricada, formato kit completo	1,16	0,83	0,26	Sin observación.	2,26	Bajo
Constructora Rinconada Ltda.		Vivienda prefabricada, SIP y SmartPanel	0,90	0,97	0,16	No presenta página web propia; se encuentra asociada a una página ministerial (SERVIU).	2,04	Bajo
Constructora ROA	Sin imagen de muestra	Asociado a página comercial	0,76	0,63	0,16	Asociado a página comercial.	1,55	Bajo
Casas Rucaray		Constructora	1,33	0,71	0,26	Solo página de Facebook.	2,31	Bajo

Tabla 13. Aplicación IISS, ejemplo de indicador de valor "Bajo". Fuente: Elaboración de los autores a partir de la información entregada por las empresas evaluadas.

GENERACIÓN DEL INDICADOR INTEGRADO DE SEGURIDAD Y SUSTENTABILIDAD (IISS)

Una vez finalizados los pasos metodológicos expuestos, es posible exponer el modelo resultante, el cual puede ser aplicado en la evaluación de viviendas publicadas en páginas web de empresas constructoras en madera, y luego en observaciones en terreno. La Figura 4 muestra ejemplos de cómo se aplicó la metodología para el cálculo de IISS a partir de una valoración clasificada como "alta", "media" y "baja", según corresponda.

APLICACIÓN IISS

Para la aplicación del modelo se consideraron las situaciones más representativas inspeccionadas (230 empresas desde sus páginas web), las cuales se resumen en las Tablas 11, 12 y 13.

En las tablas previas se exponen ejemplos de tipologías de viviendas y se describen aquellas con indicador de evaluación "Alto" (Tabla 11), lo cual se explica mayormente porque estas presentaron puntajes altos

en el criterio Pt, superiores en esta categoría a empresas con indicador "Medio", y se destacaron en Sustentabilidad (St), gracias a determinados aspectos informados como materiales de ahorro energético (ventanas termopanel) y uso de ciertas innovaciones (estabilizadores de madera de origen orgánico).

Con indicador "Medio" se clasificaron aquellas tipologías que obtuvieron un alto valor en el criterio Pt (Tabla 12); evaluación en la que resaltaron atributos significativos de la empresa (por sobre la descripción de los productos), como: trayectoria, sistema de ventas, memorias anuales con detalles de producción, entre otras. A lo anterior, se contraponen una menor claridad en sustentabilidad y seguridad, ya que se vieron declaradas las virtudes ambientales de sus maderas, pero no la participación de algún tipo de certificación que las avalara. Mientras algunas empresas son más fuertes en declarar sustentabilidad, otras lo son en declarar seguridad, al trabajar con madera tratada o diseñando estructuras reforzadas de alto cumplimiento normativo.

Las razones por las cuales algunas empresas, responsables de la información que entregan de sus productos, resultaron con un indicador "Bajo" (Tabla 13), se pueden resumir en los siguientes tres puntos: 1) No poseen página web propia y son referenciadas por otras fuentes; solo entregan datos de identificación y contacto: teléfono o mail. 2) Están asociadas a una página institucional o hacen uso sólo de medios sociales como Facebook, sobresaliendo por dar información de precios, especificaciones técnicas mínimas e imagen de productos. 3) Tienen página web básica, equivalente a un blog en línea, con galería de imágenes de sus proyectos, sin verificación de condiciones técnicas o de diseño; solo exponen datos de contacto.

La aplicación del IISS reviste gran importancia, porque puede implementarse para cubrir necesidades que están siendo incorporadas en otros países, como los impactos por catástrofes y seguridad de las viviendas y sus usuarios (Castillo et al., 2020), para lo cual se requiere encontrar acuerdos y mejorar las coberturas desde las compañías aseguradoras.

Además, al asegurar una vivienda podría llevar a desarrollar una cultura de mantenimiento, con cargo a ese seguro para que las instalaciones estén funcionando correctamente, de manera que aumente la durabilidad y la resiliencia de las viviendas ante eventos naturales. Asimismo, si las condiciones de habitabilidad son las

adecuadas, se reducirían los riesgos de salud de los presentes y futuros usuarios. Desde el punto de vista económico, se puede mencionar que las inspecciones adecuadamente realizadas pueden incrementar el valor de compra hasta en un 40%, por lo que los bancos estarían más inclinados a participar en la entrega de préstamos (Dolan, 2018).

Por último, las viviendas bien aseguradas también constituyen una estrategia de marketing que puede ir complementada con una apropiada promoción de los atributos de una vivienda de madera, lo cual persuadiría al público a optar por este tipo de estructuras.

El sector constructivo en madera se encamina a grandes avances. Medidas rápidas y certeras permitirán su inclusión en el mercado de construcción sustentable, es decir, mediante la adopción progresiva de los códigos de construcción sustentables.

El análisis aquí planteado tiene implicancias sobre los requisitos a implementar para instalar viviendas en zonas de incendios forestales, similares a las estrategias de Australia, Canadá y Estados Unidos, donde la normativa contempla exigencias acordes con la ubicación, exposición y riesgo. En Chile, falta avanzar en fiscalización para la instalación y el aseguramiento de viviendas, aunque se debe reconocer ciertos progresos en el área hospitalaria y edificación en altura, donde la inclusión de certificaciones LEED o *Passive house* ha posibilitado la incorporación de exigencias superiores. Lamentablemente estos avances no llegan a las viviendas más comunes, como las de todos los chilenos.

Ante situaciones de catástrofe, los expertos proponen que el código de construcción debería estar a la par de las acciones de inspección dentro de la obra, como ocurre en países como Estados Unidos, Japón Nueva Zelanda, donde las leyes apoyan las inspecciones al inicio, durante y al final de la obra y cuyos costos asociados son parte de los permisos de construcción, los cuales representan un 0,5% o menos de la obra total (Dolan, 2018).

Vincular el IISS a estas inspecciones puede ser un beneficio más, ya que al asegurarse de que las instalaciones estén apropiadamente efectuadas, aumenta la durabilidad y la resiliencia de las viviendas ante eventos que desencadenen desastres y facilita las relaciones de compraventa y compañías aseguradoras. En la misma línea, si las condiciones de habitabilidad son las adecuadas, se reducen los riesgos a la salud de los usuarios.

Por todas estas razones y más, se puede sostener que el sector constructivo en madera se encamina hacia grandes adelantos, por lo que las medidas deben adoptarse rápida y certeramente para que este material y todos quienes trabajan con él sean incluidos en dichos procesos. Se cuenta con materiales y profesionales capacitados; se requiere colaboración, inclusión y asesoramiento tecnológico para ello.

CONCLUSIÓN

La integración de criterios de presentación, sustentabilidad y seguridad para la generación de un indicador combinado de IISS para las viviendas de madera fabricadas en la zona central de Chile, permite valorar las prestaciones técnicas, estructurales y de aplicabilidad de la vivienda de madera, como producto altamente competitivo en la oferta constructiva en un contexto de mercado creciente y cada vez más diverso.

El grado de importancia de las distintas variables y sus coeficientes técnicos (expresados en escalas de ranking y priorización entre opciones constructivas basadas en madera) posibilitó, en consecuencia, obtener un orden jerárquico o ranking de opciones de utilización del material madera bajo las actuales restricciones normativas, de instalación y procesos post venta, en las condiciones de operación habituales para los territorios habitables en Chile Central.

El IISS constituye un aporte a la evaluación de viviendas y tendría mayor significancia si se complementara con una evaluación *in situ* para verificar otros factores y aportar al mejoramiento del encadenamiento productivo mediante acuerdo de estrategias.

Los resultados permiten jerarquizar a los productos de empresas que fabrican las viviendas en madera de acuerdo a tres atributos necesarios para que los consumidores compren de manera informada, sin dejarse llevar solo por las características estéticas de las viviendas. Debido a la falta de calidad técnica y a la escasa claridad de información en cuanto a cumplimientos de la OGUC, códigos sustentables y/o certificaciones de vivienda sustentables (CVS) no adoptadas aún por el mercado chileno, la aplicación de este indicador puede contribuir a la categorización de las viviendas disponibles, a partir de la cual los consumidores pueden enfrentarse a decisiones de compra donde temas como tratamientos de preservación, aislamiento térmico y protección contra el fuego, sistemas constructivos estandarizados, sustentabilidad de

procesos, sean valorados y cuantificados, tanto por el cliente como por el fabricante .

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andac, T. (2020). Consumer attitudes toward preference and use of wood, woodenware, and furniture: A sample from Kayseri, Turkey. *BioResources*, 15(1), 28–37. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.15.1.28-37>

Bhatta, S. R., Tiippana, K., Vahtikari, K., Hughes, M. y Kytä, M. (2017). Sensory and emotional perception of wooden surfaces through fingertip touch. *Frontiers in Psychology*, 8. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00367>

Brusselsaers, J., Verbeke, W., Mettepenningen, E. y Buyesse, J. (2020). Unravelling the true drivers for eco-certified wood consumption by introducing scarcity. *Forest Policy and Economics*, 111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.1020>

Bugge, M. M., Hansen, T. y Klitkou, A. (2016). What is the bioeconomy – A review of the literature. *Sustainability*, 8(7), 1–22. DOI: <https://doi.org/10.3390/su8070691>

Cai, Z. y Aguilar, F. X. (2013). Meta-analysis of consumer's willingness-to-pay premiums for certified wood products. *Journal of Forest Economics*, 19, 15–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2012.06.007>

Cai, Z. y Aguilar, F. X. (2014). Corporate social responsibility in the wood products industry: US and Chinese consumers' perceptions. *Forest Products Journal*, 64(3/4), 97–106. DOI: <https://doi.org/10.13073/fpj-d-13-00059>

Castillo, M., Garay, R., Tapia, R., Garfias, R. y Orell, M. (2020). *Metodología de evaluación de infraestructuras críticas en zonas de riesgo de incendios forestales*. Repositorio Académico. Universidad de Chile. Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/173421>

De Lourdes, M. (2006). *Desarrollo de páginas web como recurso para facilitar el aprendizaje*. Universidad Rafael Belloso Chacín, Venezuela. Recuperado de <file:///C:/Users/Charlos/Downloads/Dialnet-DesarrolloDePaginasWebComoRecursoParaFacilitarElAp-2719448.pdf>.

De Morais, I. C. y Pereira, A. F. (2015). Perceived sensory characteristics of wood by consumers and trained evaluators. *Journal of Sensory Studies*, 30, 472–483. DOI: <https://doi.org/10.1111/joss.12181>

Dolan, J. (2018). La construcción en madera en Chile desde una perspectiva internacional. En *Feria Construcción en Madera (COMAD)*, organizada por Corporación Chilena de la Madera (CORMA). Coronel, Chile. Recuperado de https://www.youtube.com/watch?v=Stlzhnarc_Q.

Domljan, D. y Janković, L. (2022). Design of Sustainable Modular Wooden Booths Inspired by Revitalization of Croatian Traditional Construction and New User Needs Due to COVID-19 Pandemic. *Sustainability*, 14(2).

Fajardo, D. (2014). *Los atributos sustentables llegan al mercado inmobiliario*. Santiago, Chile. Recuperado de <http://www.hubsustentabilidad.com/los-atributos-sustentables-llegan-al-mercado-inmobiliario/>

Fundación Vivienda (2019). *Informe 4 Déficit Habitacional y Censo*. Recuperado de <https://www.fundacionvivienda.cl/wp-content/uploads/2019/01/Informe-4-D%C3%A9ficit-Habitacional-y-Censo.pdf>

Garay, R., Castillo, M. y Tapia, R. (2021b). Viviendas ubicadas en áreas de riesgo de incendios forestales de interfaz. Un análisis territorial y normativo desde Chile. *ACE: Architecture, City and Environment*, 16(46). DOI: <http://dx.doi.org/10.5821/ace.16.46.9523>

Garay, R., Pfenniger, F., Castillo, M. y Fritz, C. (2021a). Quality and Sustainability Indicators of the Prefabricated Wood Housing Industry—A Chilean Case Study. *Sustainability*, 13(15). DOI: <https://doi.org/10.3390/su13158523>

Garay, R., Pfenniger, F. y Castillo M. (2021c). Prefabricated wood housing industry. Quality and sustainability indicators. En *World Conference on Timber Engineering (WCTE)*, Santiago, Chile (9 al 13 de agosto 2021).

Garay, R. M., Tapia, R., Castillo, M., Fernández, O. y Vergara, J. (2018). Habitabilidad de edificaciones y ranking de discriminación basado en seguridad y sustentabilidad frente a eventuales desastres. Estudio de caso: Viviendas de madera. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 2(2), 28-45.

Harju, C. (2022). The perceived quality of wooden building materials—A systematic literature review and future research agenda. *International Journal of Consumer Studies*, 46, 29– 55. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijcs.12764>

Hatt, T., Saelzer, G., Hempel, R. y Gerber, A. (2012). Alto confort interior con mínimo consumo energético a partir de la implementación del estándar “Passivhaus” en Chile. *Revista de la construcción*, 11(2), 123-134. DOI: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2012000200011>.

Lähtinen, K., Häyrinen, L., Roos, A., Toppinen, A., Aguilar Cabezas, F. X., Thorsen, B. J., Hujala, T., Nyruud, A. Q. y Hoen, H. F. (2021). Consumer housing values and prejudices against living in wooden homes in the Nordic region. *Silva Fennica*, 55(2), 1–27. DOI: <http://dx.doi.org/10.14214/sf.10503>

Lippke, B., Oneil, E., Harrison, R., Skog, K., Gustavsson, L. y Sathre, R. (2011). Life cycle impacts of forest management and wood utilization on carbon mitigation: Knowns and unknowns. *Carbon Management*, 2(3), 303–333. DOI: <https://doi.org/10.4155/cmt.11.24>

Luhás, J., Mikkilä, M., Kylkilahti, E., Miettinen, J., Malkamäki, A., Pätäri, S., Korhonen, J., Pekkanen, T.-L., Tuppur, A., Lähtinen, K., Autio, M., Linnanen, L., Ollikainen, M., y Toppinen, A. (2021). Pathways to a forest-based bioeconomy in 2060 within policy targets on climate change mitigation and biodiversity protection. *Forest Policy and Economics*, 131, e102551. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.1025>

Luo, W., Mineo, K., Matsushita, K. y Kanzaki, M. (2018). Consumer willingness to pay for modern wooden structures: A comparison between China and Japan. *Forest Policy and Economics*, 91, 84–93. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.12.00>

Ministerio de Vivienda y Urbanismo [MINVU] (2018). *Estándares de construcción sustentable para viviendas en Chile*. Santiago: División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional - DITEC. Recuperado de <https://csustentable.minvu.gob.cl/estandares-cs/>.

Ollikainen, M. (2014). Forestry in bioeconomy—Smart green growth for the humankind. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 29(4), 360–366. DOI: <https://doi.org/10.1080/02827581.2014.92>

Ordenanza General de Urbanismo y Construcción [OGUC] (2017). *Resumen de modificaciones y rectificaciones de la ordenanza general de urbanismo y construcciones*. Santiago, Chile.

Petersen, A. K. y Solberg, B. (2005). Environmental and economic impacts of substitution between wood products and alternative materials: A review of micro-level analyses from Norway and Sweden. *Forest Policy and Economics*, 7, 249–259. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1389-9341\(03\)00063-7](https://doi.org/10.1016/s1389-9341(03)00063-7)

Rhee, P. (2018). Beyond green: Environmental building technologies for social and economic equity. *Architectural Design*, 88, 94–101. DOI: <https://doi.org/10.1002/ad.2326>

Saaty, T. L. (2001). Fundamentals of the Analytical Hierarchy Process. En D. L. Schmoldt, J. Kangas, G. A. Mendoza y M. Pesonen (Eds.), *The Analytic Hierarchy Process in natural resource and Environmental Decision Making* (Vol. 3, pp. 15-35). Países Bajos: Springer.

Soust-Verdaguer, B., Moya, L. y Llatas, C. (2022). Evaluación de impactos ambientales de viviendas en madera: El caso de “La Casa Uruguaya”. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 24. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-221x2022000100410>

Toppinen, A., D’amato, D. y Stern, T. (2020). Forest-based circular bioeconomy: Matching sustainability challenges and novel business opportunities? *Forest Policy and Economics*, 110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.1020>

Varas, V., Agüero, A., Guzmán, A. y Martínez, M. (2015). *Importancia y beneficios de la accesibilidad web para todos*. Corrientes, Argentina. Recuperado de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/49061/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Vergara, F. y Reyes, M. (2019). El acceso a la vivienda y la política habitacional en Chile: ¿estancados en la inequidad? *Revista CIS*, 16(26), 7-10.

Viholainen, N., Franzini, F., Lähtinen, K., Nyrud, A., Widmark, C., Roos, A., Hoen, H.F. y Toppinen, A. (2021). To build with wood or not to build? Citizen views on wood as a construction material. *Canadian Journal of Forest Research*, 51, 647–659. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0274>

VALIDACIÓN DE PROPUESTAS DE OPTIMIZACIÓN AMBIENTAL DE UN JARDÍN DE INFANTES DE TIPOLOGÍA COMPACTA, EN CLIMA MUY CÁLIDO-HÚMEDO¹

VALIDATION OF PROPOSALS FOR THE ENVIRONMENTAL OPTIMIZATION OF A COMPACT-TYPE KINDERGARTEN, IN A VERY HOT-HUMID CLIMATE

María Laura Boutet

Doctora en Ciencias Área Energías Renovables, Investigadora Asistente, Docente-Investigadora Categoría III (SPU), Instituto de Investigación para el Desarrollo Territorial y del Hábitat Humano (IIDTHH) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Nacional del Nordeste (UNNE). Resistencia, Argentina
<https://orcid.org/0000-0001-6313-9577>
arq.mlboutet@gmail.com

Alejandro Luis Hernández

Doctor en Ciencias Área Energías Renovables, Profesor Asociado e Investigador Independiente, Docente-Investigador Categoría I (SPU), Director del Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional de Salta (UNSa). Salta, Argentina
<https://orcid.org/0000-0001-9808-3972>
alejoher65@gmail.com

1 El presente trabajo forma parte del Proyecto "Validación de herramienta de estimación de áreas vidriadas óptimas para el aprovechamiento pasivo de la Energía Solar en Edificios Escolares de Zonas Urbanas de la Región N.E.A.". Se enmarca además, en el Acuerdo de Trabajo suscripto s/ Res. N° 134/21 C.D. FAU entre la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional del Nordeste y el Ministerio de Educación, Cultura, Ciencia y Tecnología de la Provincia del Chaco

RESUMEN

El siguiente artículo presenta el procedimiento de validación de propuestas de optimización de un prototipo de jardín de infantes de tipología compacta, según pautas de diseño bioclimáticas pasivas, mediante modelos físicos de simulación dinámica calibrados con mediciones *in situ*. El objetivo es verificar los parámetros de área vidriada (A_v), absorptancia solar promedio ponderada ($\bar{\alpha}$) y área de envolvente total ($A_{\text{envolvente}}$) utilizados como datos de entrada para la obtención de correlaciones de Factores de vidriado (F_v), en una herramienta de estimación de áreas vidriadas óptimas orientada a integrar el confort térmico y visual en el diseño de espacios educativos, en el clima Muy Cálido Húmedo de la Región Nordeste Argentina. Como resultado, se obtuvo una reducción de los requerimientos de refrigeración de hasta el 72% en el mes de noviembre, más desfavorable para la actividad escolar, al bajar la absorptancia solar de las superficies exteriores a 0.25, con una relación de área vidriada por área de piso de 17% que permitió notables mejoras en la distribución espacial de la luz natural, recurso fundamental para el desarrollo integral de los niños del Nivel Inicial.

Palabras clave

energía solar, arquitectura escolar, confort térmico, confort lumínico.

ABSTRACT

This article presents the validation procedure of optimization proposals for a compact-typology kindergarten prototype, following passive bioclimatic design guidelines, using dynamic simulation physical models calibrated with onsite measurements. The objective is to verify the parameters for the glazed area (gA), weighted average solar absorptance (α), and total envelope area (envelopeA), using them as input data to obtain correlations of glazing Factors (gF) into a tool to estimate optimal glazed areas, aiming at integrating thermal and visual comfort in the design of educational spaces, in the Very Hot-Humid climate of the Argentine Northeast. As a result, a reduction of up to 72% was obtained in November, the most unfavorable month for school activities, for cooling requirements, by lowering the solar absorptance of exterior surfaces to 0.25, with a glazed area per floor area ratio of 17%, which made noteworthy improvements possible in the spatial daylight distribution, a key resource for the comprehensive development of children from Initial Schooling Levels.

Keywords

Solar energy, School architecture, Thermal comfort, Light comfort

INTRODUCCIÓN

Diversos estudios a nivel mundial muestran la relación directa entre la calidad del ambiente interior en un aula y el aprendizaje de los alumnos. En efecto, la temperatura desempeña un papel primordial en el rendimiento académico (Muñoz, 2018), así como la iluminación natural, que es especialmente importante para el desarrollo físico, cognitivo y emocional de los niños, ya que ellos son aún más sensibles a sus efectos dinámicos (Montessori, 1998, Agencia Chilena Eficiencia Energética [Achee], 2012; Yacan, 2014; Monteoliva, Korzeniowski, Ison, Santillán y Pattini, 2016, Pagliero Caro y Piderit Moreno, 2017, Agencia Extremeña de la Energía [AGENEX], 2020).

Sin embargo, hallar el equilibrio entre las condiciones de habitabilidad higrotérmica y lumínica en regiones de clima riguroso no es una meta fácil de alcanzar mediante estrategias de diseño pasivas, más aún en el contexto de cambio climático global, cuyos fenómenos meteorológicos extremos son cada vez más frecuentes (IPCC, 2019). En dichas zonas, garantizar óptimas condiciones interiores tiene un impacto ambiental directo a niveles de consumo energético y sus consecuentes emisiones de CO₂ a la atmósfera (Baserga, 2020). A ello se suma la situación epidemiológica generada por la pandemia del Covid-19, a raíz de la cual, el asoleamiento, la ventilación e iluminación natural y el distanciamiento social (Cisterna y Abate, 2021) han cobrado fundamental relevancia en las posibilidades de uso de la infraestructura educativa, poniéndose de manifiesto la necesidad de nuevos enfoques, modelos y soluciones desde un abordaje integral.

En esta dirección, numerosas investigaciones (Trebilcock, Soto, Figueroa y Piderit, 2016; Souza, Nogueira, Lima y Leder, 2020; Coronado, Stevenson-Rodríguez y Medina, 2021; Lamberti, Salvadori, Leccese, Fantozzi y Bluysen, 2021; Rupp, Vásquez y Lamberts, 2015) han cuestionado el uso de estándares convencionales de comodidad en las escuelas, ya que fueron desarrollados en base a sujetos adultos cuyas percepciones y preferencias de comodidad pueden diferir de las de los niños en diversas etapas de desarrollo, demostrando la necesidad de una mirada local en el ámbito latinoamericano, no sólo desde los aspectos de ahorro energético y de costos operacionales sino fundamentalmente en relación a variables fisiológicas, psicológicas, sociales y culturales. No obstante, la evaluación del confort térmico en jardines de infantes es un tema reciente y sólo unos pocos trabajos se pueden encontrar en la literatura especializada (Lamberti *et al.*, 2021; Yun *et al.*, 2014; Fabbri, 2013; Nam, Yang, Lee, Park y Sohn, 2015; Zomorodian, Tahsildoost y Hafezi, 2016). Tampoco existen métricas para la evaluación de la iluminación natural destinadas exclusivamente a jardines o espacios infantiles.

Una de las variables de diseño pasivo de edificios educativos, que ha sido y es extensamente estudiada por su impacto tanto en el rendimiento energético como en el confort ambiental integral, es la configuración óptima de las áreas vidriadas en relación al área de envolvente expuesta a la radiación solar, la cual contempla, además, los efectos de la variación aleatoria en la ocupación (Ochoa, Aries, van Loenen y Hensen, 2012; Lartigue, Lasternas y Loftness, 2014; San Juan, 2014; Futrell, Ozelkan y Brentrup, 2015; Mangkuto, Rohmah y Asri, 2016; Capeluto, 2019; Chiesa *et al.*, 2019; Filippín, Flores Larsen y Marek, 2020; Ré y Bianchi, 2020).

En el trabajo de Ochoa *et al.* (2012), se estudiaron variaciones discretas de la relación ventana-muro, y se concluyó que la mayoría de las expectativas del proyecto se pueden cumplir dentro de una variedad de tamaños, siempre que cuenten con dispositivos de control adicionales. Lartigue *et al.* (2014), así como Futrell *et al.* (2015), consideraron, asimismo, el tipo de ventana caracterizado por sus propiedades visuales y térmicas, observando que, dependiendo de la orientación, los objetivos térmicos y de iluminación natural pueden estar en fuerte conflicto. Alwetaishi (2019) analizó el impacto de modificar la proporción de ventana - muro en varias zonas climáticas de Arabia Saudita, recomendando un 10 % en climas cálidos y secos, así como cálidos y húmedos, y un 20% en clima moderado. Pérez y Capeluto (2009), por su parte, testearon un caso base en la zona climática cálida - húmeda, mediante simulación computacional, y recomendaron, para ventanas orientadas al norte y al sur, el 12% de la superficie de piso del aula. Para las orientaciones oeste y este es preferible reducir el tamaño de la ventana al 10% del área del piso, con dispositivos de sombreado dinámico para evitar el deslumbramiento debido a los ángulos solares más bajos. No sólo el tamaño de la ventana, sino también la orientación tiene un gran efecto en la condición interna, siendo la principal responsable en la determinación del grado de exposición solar y, por lo tanto, de ganancia directa de calor (Gasparella, Pernigotto, Cappelletti, Romagnoni y Baggio, 2011, cit. en Alwetaishi, Alzaed, Sonetti, Shrahily y Jalil, 2018).

Atendiendo a la problemática, se presenta el análisis de un caso particular de la ciudad de Resistencia provincia del Chaco, en la Región Nordeste Argentina (NEA), caracterizada por su clima Muy Cálido - Húmedo, a fin de verificar mediante simulación, la pertinencia de las áreas vidriadas propuestas como óptimas, en relación a distintas variables de diseño de su envolvente constructiva. El aporte original de este trabajo radica en el procedimiento de evaluación de cuestiones térmicas y lumínicas simultáneamente, cuyo objetivo consiste en validar una herramienta de estimación de áreas vidriadas por orientación, desarrollada para tipologías escolares de la región NEA y que pueda transferirse a otras regiones geográficas de clima cálido - húmedo.

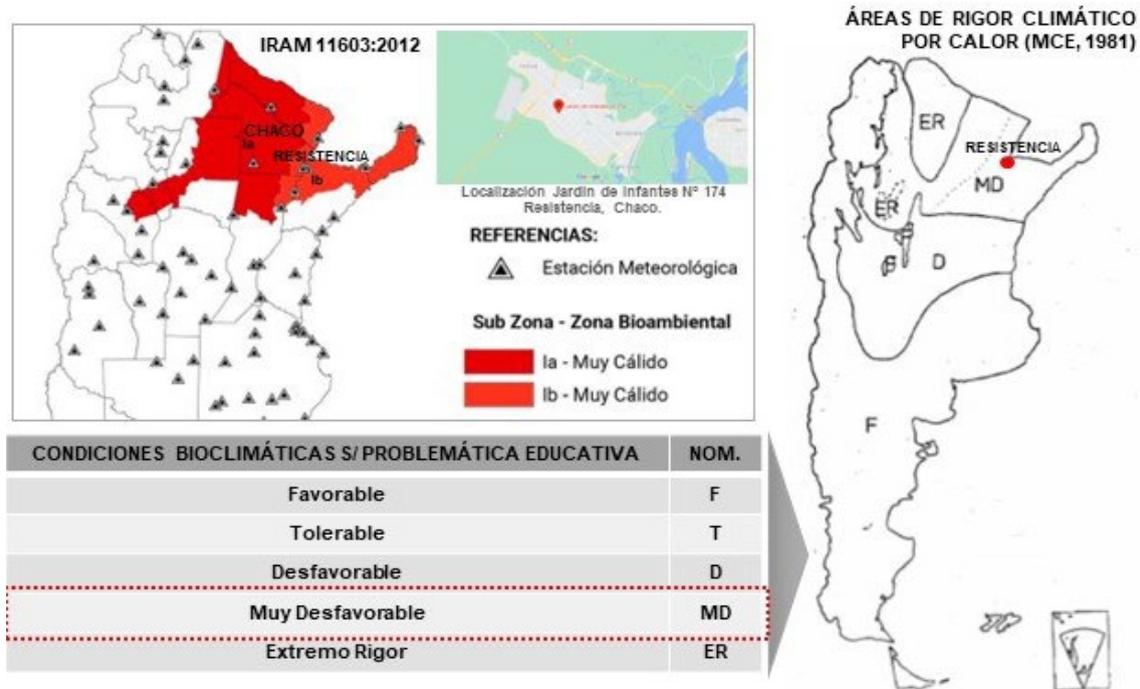


Figura 1. Localización del área de estudio. Fuente: Elaboración de los autores en base a mapas de clasificación bioambiental s/ IRAM 11603:2012 y MCE (1981).

METODOLOGÍA

ANTECEDENTES

De acuerdo a la zonificación bioclimática argentina (Figura 1), según la influencia del clima en la problemática educativa (Ministerio de Cultura y Educación [MCE], 1981), Resistencia (27.45° Lat. Sur; 59.05° Long. Oeste; Alt. 52 msnm) se sitúa en la zona bioclimática “Muy Desfavorable por Calor”, presentando 6 a 8 meses, que abarcan gran parte del período escolar, con temperatura media máxima igual o superior a 28°C y con la influencia de la humedad que agudiza la sensación de malestar por calor. Dicha región corresponde a la Zona bioambiental Ib de clima “Muy Cálido y Húmedo”, según IRAM 11603 (2012), y se caracteriza por amplitudes térmicas menores a 14°C, temperaturas máximas mayores a 34°C y un promedio de irradiación solar global diaria de 5,5 KWh/m² en noviembre (último mes completo del período escolar común), con una heliofanía efectiva promedio de 8 horas (Grossi Gallegos y Righini, 2007).

Asociado a ello, la trama urbana de Resistencia se encuentra a media orientación (45° respecto al Norte verdadero), por lo que las áreas vidriadas de los edificios reciben radiación solar en todas las estaciones del año; áreas que, por cierto, son bloqueadas con cortinas u otros dispositivos que impiden un óptimo aprovechamiento de la luz natural. La normativa vigente (Reglamento General de Construcciones, 1990; Ministerio de Cultura y Educación de la Nación

[MCEN], 1996) no contempla las particularidades del clima y emplazamiento de Resistencia de manera integral, por lo que las decisiones de diseño, en lo que respecta a la determinación de vanos de iluminación y ventilación, quedan supeditadas a valores porcentuales por área de piso, uniformes para cada orientación y sin consideración de la morfología, grado de exposición y materialización de la envolvente de los edificios, ni régimen de ocupación de los mismos.

En respuesta a la problemática planteada, en un estudio previo (Boutet y Hernández, 2020), se formuló una herramienta de Estimación del Factor de Vidriado (Fv) mediante Regresión Lineal Multivariada (RLM) para el cálculo de áreas vidriadas óptimas de edificios escolares de tipología abierta (con dos frentes de iluminación y ventilación; mayor superficie de envolvente expuesta) y compacta (con un solo frente) de los distintos niveles educativos (inicial, primario, secundario y terciario). El Factor de vidriado – Fv (variable dependiente) es un nuevo parámetro definido por los autores que permitió relacionar las variables (independientes) consideradas más significativas por orientación, dada su incidencia en el balance térmico: absortancia solar promedio ponderada (\bar{A}_s) de las superficies opacas exteriores, según su color de terminación (implica la fracción de radiación solar incidente que es absorbida por los materiales de la envolvente); área vidriada de puertas y ventanas (A_v); y área total de envolvente opaca y vidriada ($A_{envolvente}$). Dicha relación se expresa en la siguiente ecuación [Eq. (1)]:

$$F_v = \frac{\bar{\alpha} \cdot A_v}{A_{exp}} \quad (1)$$

Donde, F_v : Factor de Vidriado de cada local por orientación; $\bar{\alpha}$: absorptancia solar promedio ponderada de todas las superficies exteriores; A_v : área total de vidrio en ventanas y puertas expuestas al exterior; A_{exp} : área de fachadas y techos expuestos al exterior descontando A_v . Entonces $A_{exp} = A_{envolvente} - A_v$.

De este factor, se despeja la ecuación para el cálculo del área vidriada óptima, en la que se verifica una relación inversamente proporcional con la absorptancia solar [Eq. (2)]. Cuanto mayor sea el valor de la absorptancia (superficie más oscura), menor será el área de vidrio admisible.

$$A_v = \left(\frac{F_v}{F_v + \bar{\alpha}} \right) A_{envolvente} \quad (2)$$

A partir de este nuevo factor y su determinación en una Propuesta Genérica de optimización, fue posible formular la herramienta propuesta, misma que es resultado del análisis estadístico de simulaciones dinámicas calibradas con mediciones anuales del comportamiento higrotérmico y lumínico de 8 edificios escolares de los distintos niveles educativos, seleccionados por su elevada exposición solar. La Propuesta Genérica verificó las condiciones de habitabilidad necesarias, con la consiguiente reducción de las cargas de climatización entre un 40 y un 60% en promedio (Boutet y Hernández, 2021).

Partiendo de dichos antecedentes, en este trabajo, se planteó realizar una revisión de los datos de entrada utilizados para la obtención de correlaciones de Factores de vidriado (F_v) de la tipología compacta de nivel inicial

(Jardín de Infantes N° 174), seleccionada entre los 8 edificios monitoreados en su oportunidad. Para ello, se verificó mediante simulación, la pertinencia de las áreas vidriadas propuestas para distintos valores de absorptancia solar, en un período del mes de noviembre, por ser esta la época escolar más desfavorable (atmósfera cálida, ganancia solar por ventanas y mayor nivel de actividad), que conlleva situaciones de sobrecalentamiento. La citada revisión permite llevar a cabo una validación preliminar de la metodología de estimación del Factor de Vidriado (F_v), que suscita nuevas situaciones de análisis, lo cual, en definitiva, refuerza estadísticamente su formulación.

PROCEDIMIENTO DE VALIDACIÓN

El procedimiento de validación mediante simulación dinámica consistió en los siguientes pasos metodológicos que se presentan en el diagrama de flujos de la Figura 2:

- Revisión de auditorías energéticas**, efectuadas durante el período del 12 al 19 de noviembre de 2012 en el Jardín de Infantes N° 174 mediante adquisidores de datos HOBO MOD. U12-012 (T°C/%HR/Lx) y una Micro Estación ONSET (USA) H21-002 que se instaló en el área urbana donde se localiza el edificio, a fin de recabar condiciones microclimáticas precisas. Esta actividad implicó observaciones objetivas complementarias, encuestas a docentes y autoridades y registro diario de los patrones de comportamiento de los usuarios.
- Validación de modelos físicos**. Con las mediciones, se validaron los datos de temperatura horaria conseguidos mediante SIMEDIF V2.0 (Flores Larsen, 2019) y los datos de iluminancia obtenidos mediante

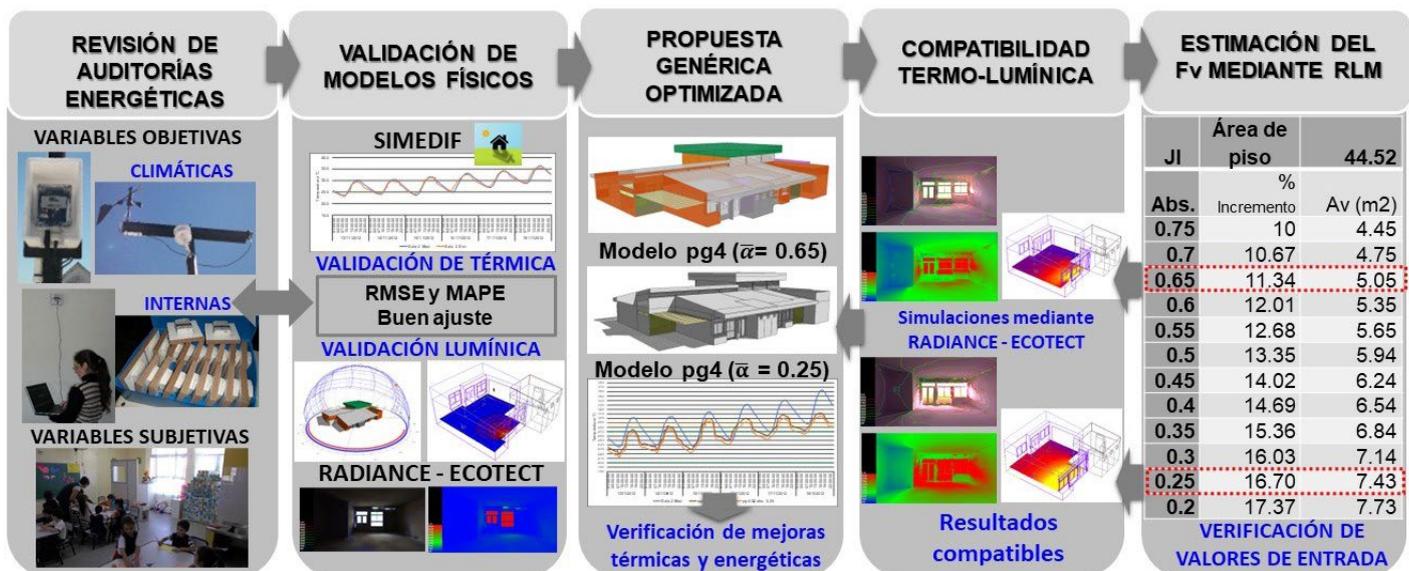


Figura 2. Pasos metodológicos. Fuente: Elaboración de los autores.

la exportación a la interfaz RADIANCE de Autodesk Ecotect Analysis. Se utilizaron dos índices: la Raíz del Error Cuadrático Medio o RMSE (*Root Mean Squared Error*, [Eq. (3)]) que cuantifica la magnitud de desviación entre los valores medidos y simulados en términos de unidades de variables mediante la raíz cuadrada del error cuadrático medio, y el Error Porcentual Absoluto Medio o MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*, [Eq. (4)]) indicador de rendimiento que mide el tamaño del error relativo en términos porcentuales (%).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(x_{med})_i - (x_{sim})_i]^2}{N}} \quad (3)$$

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{|x_{med} - x_{sim}|}{|x_{med}|}}{N} \quad (4)$$

Donde, X_{med} : valores medidos; X_{sim} : valores simulados; y N: número de mediciones.

c. **Propuesta Genérica Optimizada.** Se utilizaron los modelos obtenidos para simular el comportamiento térmico y lumínico del prototipo, en el mismo período de noviembre, aplicando la Propuesta Genérica Optimizada (Boutet y Hernández, 2021) para distintos valores de absorptancia solar de las superficies exteriores ($\alpha = 0.65$ y 0.25). Se verificó, además, el porcentaje de reducción de las cargas de refrigeración, mediante simulaciones con termostatación en Simedif, estableciendo una temperatura de 25°C . Dicho valor corresponde a la temperatura de confort registrada a partir de los monitoreos y a la que usualmente se regulan los equipos de aire acondicionado en las escuelas.

d. **Compatibilidad termo-lumínica.** Se relacionaron los promedios totales de iluminancia (lx) calculados mediante Radiance - Ecotect, con su correspondiente temperatura obtenida mediante Simedif, en tres

horarios ($9:00$, $13:00$ y $16:00$ h) del día más soleado, a fin de verificar si el bienestar térmico es compatible con una adecuada iluminación natural, según los rangos de confort local establecidos. Como valores de referencia a nivel regional se considera una zona de confort térmico de invierno de 20 a 25°C y una zona de confort de verano de 25 a 29°C . Pero para el análisis estadístico, en base a los valores límites regionales y a la representatividad de las variables medidas durante todo el año de monitoreo, se definió un rango promedio de temperatura de 20 a 27°C y de 35 a 65% de HR; valores que, asimismo, son consistentes con los estándares internacionales (Boutet, Hernández y Jacobo 2020). Para el análisis de iluminancias se consideró el rango de 300 a 500 lx (hasta un máximo de 750 lx), recomendado por las Normas IRAM AADL J-2004 (1974) y MCEN (1996).

- e. **Estimación del Fv mediante Regresión Lineal Multivariada.** Se concluye con la verificación de la pertinencia de los datos de entrada de la herramienta de estimación del Factor de vidriado (Fv) para la Tipología Compacta de Jardín de Infantes, resaltando sus implicancias y la importancia de los hallazgos obtenidos.

DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

El Jardín de Infantes N° 174 es un prototipo representativo de la producción oficial de arquitectura escolar ejecutado en la provincia del Chaco, a través del Programa Nacional Más Escuelas. Se localiza en el Barrio San Miguel de Resistencia, en una zona residencial de baja densidad edilicia. Fue puesto en servicio en el año 2010, con una superficie cubierta total de 573 m². Es una tipología compacta con 4 módulos simétricos de aulas de 49 m² integradas de a dos por paneles corredizos, incluyendo SUM semicerrado. Posee superficies expuestas hacia las 4 orientaciones medias, sin barreras solares externas (Figura 3). Se caracteriza por su tecnología tradicional que se describe en la Tabla 1.



Figura 3. Localización del Jardín de Infantes N° 174 y foto de su acceso principal. Fuente: Elaboración de los autores.

Muros	Mampostería portante de ladrillos comunes armados de 0,20 de espesor, vistos al exterior y revocados al interior.	
Techos	De chapa autoportante ventilados (aireadores cada 2 m) sobre estructura metálica con aislación de lana de vidrio con foil de aluminio.	
Cielorrasos	De placas de yeso en locales interiores o aplicado bajo losa en galerías y dependencias de servicios.	
Pisos	Mosaicos graníticos de 30 x 30 cm en interiores y en galerías y de 15 x 15 cm en locales húmedos.	
Aberturas	Cada aula posee 3 aberturas de 1.60 x 1.90 m de marcos de chapa doblada N° 16 y hojas de aluminio con vidrios laminados 3+3 mm, ubicadas una hacia el exterior y dos hacia el interior no expuestas, constituidas por paños corredizos y fijos. Las puertas poseen un paño superior fijo y dos hojas de abrir a batiente, con vidrios laminados 3+3 mm.	
Protecciones	Rejas de seguridad y aleros del techo. Cortinas internas en puertas y ventanas. Parasoles de diferentes dimensiones de chapa doblada N° 16 fijos, de tablillas tipo celosías en el SUM y las galerías.	
Artefactos	Aulas: 5 artefactos fluorescentes de 2 tubos x 36 W y 2 ventiladores industriales de pared. SUM: 9 colgantes industriales para lámpara mezcladora 250 W y 5 ventiladores de pared tipo industrial 30".	

Tabla 1. Características constructivas del JI N° 174. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 4. Esquema de ventilación natural. Fotos interior y exterior del SUM. JI 174. Fuente: Elaboración de los autores.

Si bien la tipología edilicia estudiada es compacta, los espacios semicerrados (SUM y pasillos) posibilitan la iluminación natural difusa y ventilación cruzada permanente a través de las ventanas interiores y exteriores de las salas. Ello, a su vez, acarrea inconvenientes, como el ingreso de polvo, ventilación e iluminación en horarios de clima desfavorable, problemas acústicos y filtraciones de agua en días de lluvia (Figura 4).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

AUDITORÍAS ENERGÉTICAS

El período de monitoreo abarcó ocho días, desde el 12/11/2012 a las 13:00 h hasta el 19/11/2012 a las 13:00 h. Se analizaron dos salas de orientaciones opuestas e iguales características constructivas (Figura 5). La Sala 2 (H18) presentaba dos fachadas expuestas y áreas

vidriadas al Noroeste y la Sala 3 (H19), una fachada expuesta y áreas vidriadas al Sureste. La Sala 2 se ocupaba en el turno mañana (de 8 a 12:45 h), con 24 niños de 3 y 4 años, y la Sala 3, en el turno tarde (de 13:30 a 17:45 h), con 22 niños de 4 y 5 años. También se monitoreó el SUM (H20). Durante la semana hábil se desarrollaron las clases normalmente, excepto los días 15, 16 y 19, en que no hubo clases. Datos proporcionados por la Empresa Facturadora Provincial (SECHEEP) indicaron que el Jardín presentó en el mes de noviembre, un consumo de 909 kWh, siendo éste el más alto del período de primavera.

En las Figuras 6, 7 y 8 se comparan las variables internas y externas medidas en relación a los rangos de confort regional.

La tendencia de la curva de temperatura de la sala 2, responde morfológicamente a los cambios de temperatura exterior, con crestas y valles muy pronunciados, encontrándose la mayor parte del tiempo, fuera del



Figura 5. Izq.: Esquema de monitoreo JI 174. Período 12/11/12 – 19/11/12. Der.: Interiores Sala 2 (Violeta), con ventanas hacia el NO, y Sala 3 (Celeste), con ventanas hacia el SE.

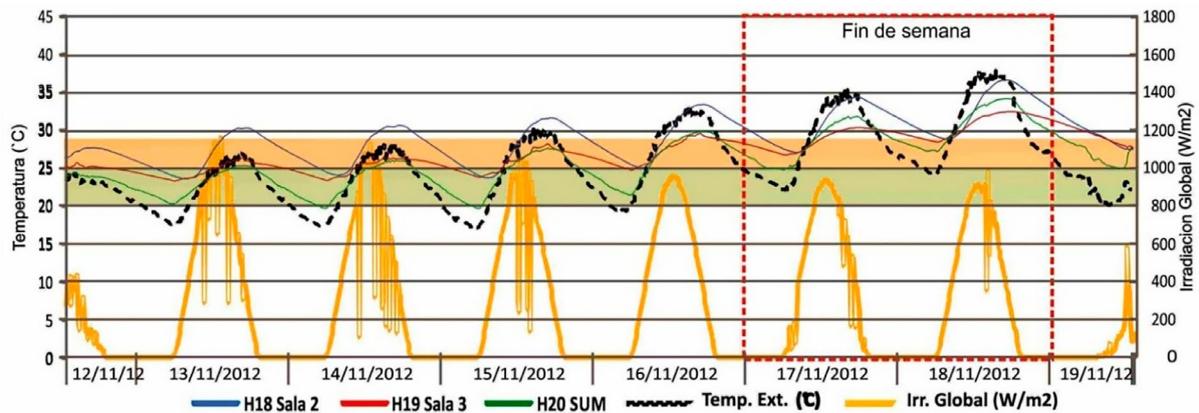


Figura 6. Evolución de temperaturas internas. Aulas JI 174. Período 12/11/12 – 19/11/12. Fuente: Registro de los autores.

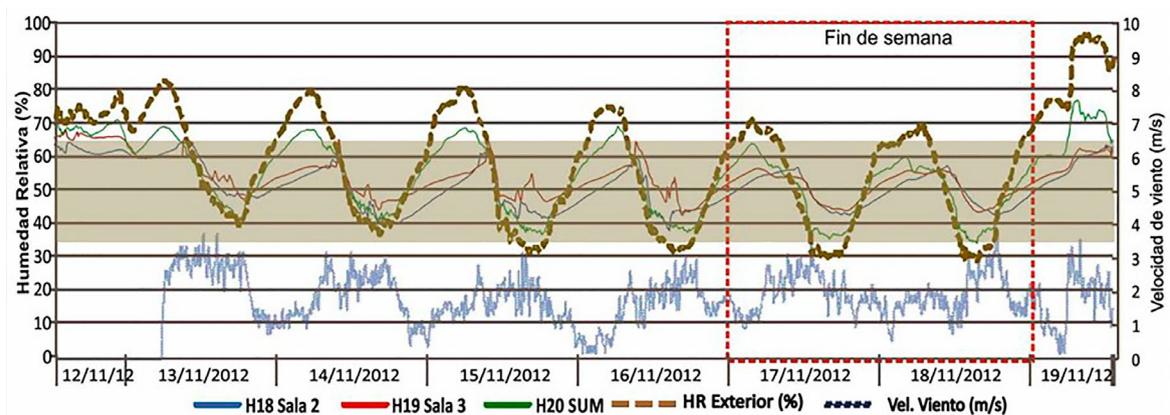


Figura 7. Evolución de humedad relativa. Aulas JI 174. Período 12/11/12 – 19/11/12. Fuente: Registro de los autores.

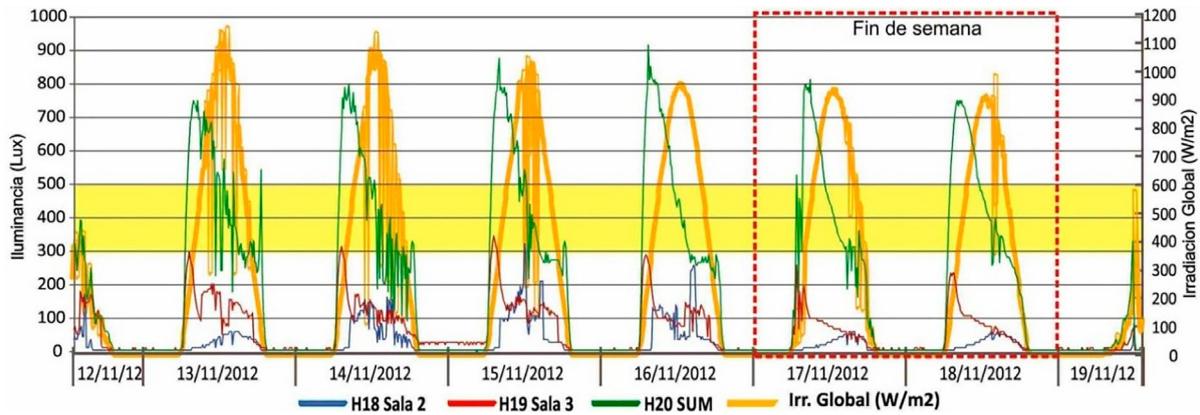


Figura 8. Evolución de iluminancias. Aulas JI 174. Período 12/11/12 – 19/11/12. Fuente: Registro de los autores.

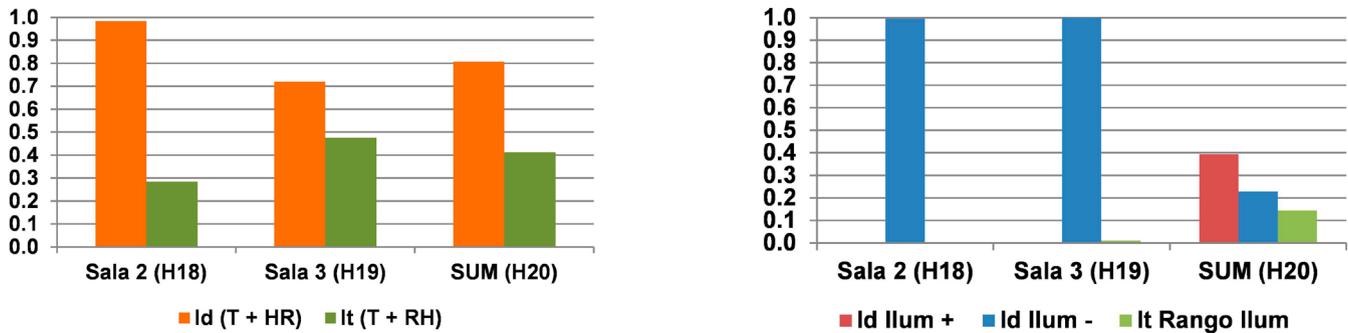


Figura 9. Comparación de índices higrotérmicos combinados (Izq.) e índices lumínicos (Der.) de locales monitoreados JI 174. Período 12/11/2012 – 19/11/2012. Fuente: Elaboración de los autores.

límite superior de confort. A pesar de que el horario de ocupación es de 8 a 12:45 h, dicho desconfort se verifica a partir del mediodía y permanece hasta últimas horas de la noche en los primeros días, y durante las 24 horas, en los tres últimos días de monitoreo. Sus valores promedio fueron 29°C – 50 % HR, 7.4°C de amplitud térmica y 3.3°C de diferencia interior – exterior y una máxima promedio de 32.7°C. Las máximas temperaturas internas se produjeron entre las 16:00 y las 18:00 h, mientras que las máximas iluminancias, entre las 14:00 y las 15:00, por lo que el sobrecalentamiento producido no se debe a ganancias solares directas. Se infiere que el mismo se produce por el efecto combinado de la radiación solar incidente sobre toda la envolvente opaca y vidriada y la temperatura exterior. La curva de la sala 3 tiene un comportamiento más constante, pues recibe luz solar a la mañana, pero es ocupada por la tarde, observándose pequeños aumentos en las horas de ocupación (13:30 a 17:45 h) que perduran hasta la noche. El SUM fluctúa casi acompañando la temperatura exterior, dentro de la banda de confort, excepto en los días más cálidos. La humedad relativa de las salas se mantiene dentro de la zona de confort, pero el SUM excede el límite superior.

Por consiguiente, en el período evaluado, la sala 2 de mayor área de envolvente expuesta, presentó el mayor

índice de desconfort higrotérmico [Id (T+HR)], producto de sobrecalentamiento, pues tiene áreas vidriadas al Noroeste y su fachada Noreste totalmente expuesta a la radiación solar. Por otra parte, ambas salas presentaron los máximos índices de desconfort visual por falta de aprovechamiento de la luz natural [Id Ilum -] (Figura 9). El Id (T+HR), índice de desconfort combinado por temperatura y HR, es un índice relativo entre la situación de desconfort interior y exterior, calculado como el cociente entre dos frecuencias de observables. Su complementario es el It (T+HR), índice temporal de confort. Los índices lumínicos Id Ilum-, índice de desconfort por baja iluminancia, Id Ilum+, índice de desconfort por exceso de iluminancia e It (Rango Ilum), índice temporal de confort visual, se calcularon considerando los rangos de confort visual establecidos, cuando la irradiación solar fuera mayor a 500 W/m² (valor promedio de días soleados). Su desarrollo teórico puede consultarse en el trabajo de Boutet, Hernández y Jacobo (2020).

RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN DE MODELOS

En ambos programas de simulación (Simedif V 2.0 y Radiance – Ecotect) se ingresaron los datos meteorológicos medidos en el período considerado y se definieron 17 zonas térmicas (Figura 10), incluyendo

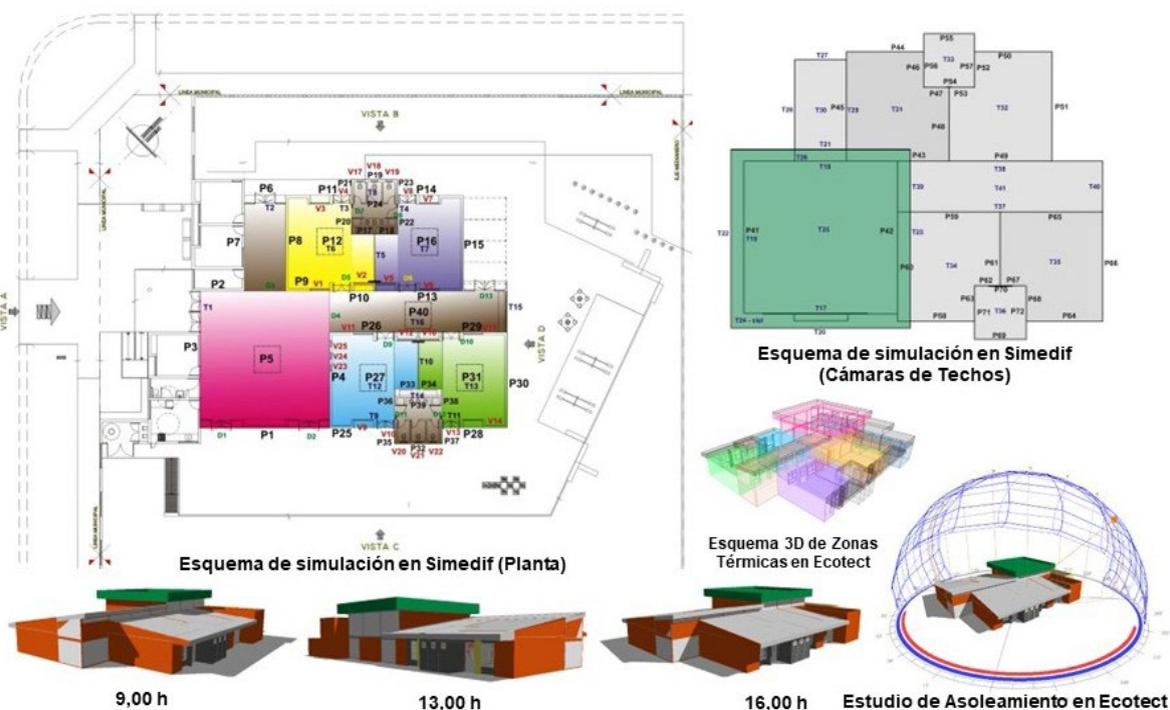


Figura 10. Modelos de Simulación en Simedif y Ecotect. JI 174. Fuente: Elaboración de los autores.

cámaras de aire de techos, con parámetros homogéneos en cuanto a características y propiedades físicas de los componentes opacos y vidriados del edificio.

Modelo Térmico. En el modelo configurado en Simedif, se determinaron 15 días de cálculo previo para alcanzar el estado estable y se especificaron los siguientes parámetros:

Ganancias/pérdidas provenientes de personas con un nivel de actividad moderado y artefactos de climatización, que entregan/extraen calor, estableciendo su potencia, cantidad y período de uso u ocupación.

Renovaciones de aire (horarias; unidad: 1/h): Se diferenciaron para cada día y para cada zona, considerando el ingreso de aire voluntario a través de ventanas, cuyo registro fue de entre 0.5 y 4 durante la noche (sin ocupación) y entre 4 y 10 durante el día (con ocupación).

Materiales y propiedades de los elementos con masa y tabiques livianos: Se establecieron a partir de la lista de materiales disponibles en el programa (basados en las normas IRAM de Argentina). Para otros no disponibles, se utilizaron las propiedades físicas obtenidas a partir de tablas (Incropera y de Witt, 1999) contrastadas con las Normas técnicas IRAM.

Coefficientes globales de transferencia de calor convectivo/radiativo h (W/m² °C): Los coeficientes de transferencia por convección-radiación externos se

definieron considerando la velocidad media de viento y en relación a su impacto en el edificio en estudio. Estos variaron entre 8 y 12 W/m² °C. Los valores internos se obtuvieron de Duffie y Beckman (1991), estableciéndose 6 W/m²°C para superficies no asoleadas; 8 W/m²°C, para superficies asoleadas; y 3 W/m²°C, para la superficie inferior de los cielorrasos (aire estratificado). Para las ventanas se aplicó una transmitancia térmica de 5.8 W/m² °C, en los análisis sin protección solar, y de 2.8 W/m² °C, en los análisis con protección (cortinas internas).

Absortancia solar (valor entre 0 y 1): Se seleccionó en base a las tablas de Incropera y de Witt (1999) y a la ventana de colores proveída por el software, determinándose para los muros de ladrillos vistos un valor de 0.65 y para las superficies de color claro, 0.3.

Áreas asoleadas: En su definición contribuyó el uso del modelo BIM configurado en Ecotect (Figura 10), que permitió obtener los porcentajes de sombra y superficies expuestas a la radiación solar. Las áreas internas irradiadas se establecieron como equivalentes al área del vidriado del local analizado que atraviesa la radiación solar.

Modelo lumínico. Para el análisis de iluminación natural mediante la interfaz Radiance de Ecotect, se definió el tipo de cielo más representativo en relación al momento de la medición *in situ*, utilizando el modelo de CIE (Comisión Internacional de Iluminación). El cálculo de los niveles de iluminación natural (lx) se desplegó en tres horarios, 9:00 h, 13:00 h y 16:00 h del día más soleado (14/11/2012), en una grilla de análisis que se configuró

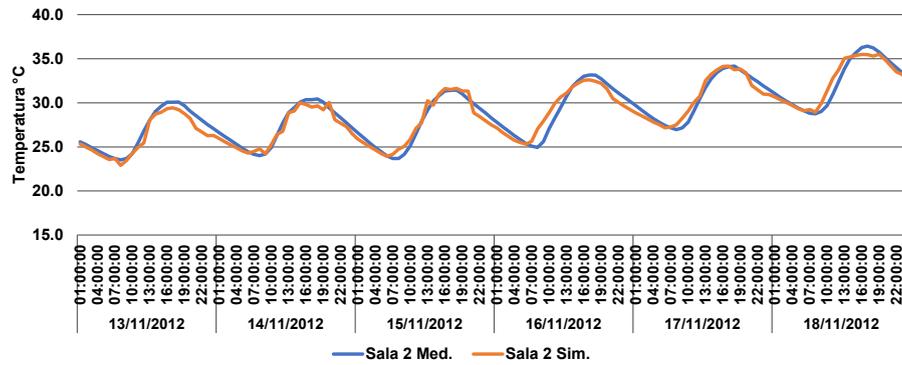


Figura 11. Contrastación de temperaturas medidas y simuladas. Sala 2 JI 174, período 13/11/2012 – 18/11/2012. Fuente: Elaboración de los autores.

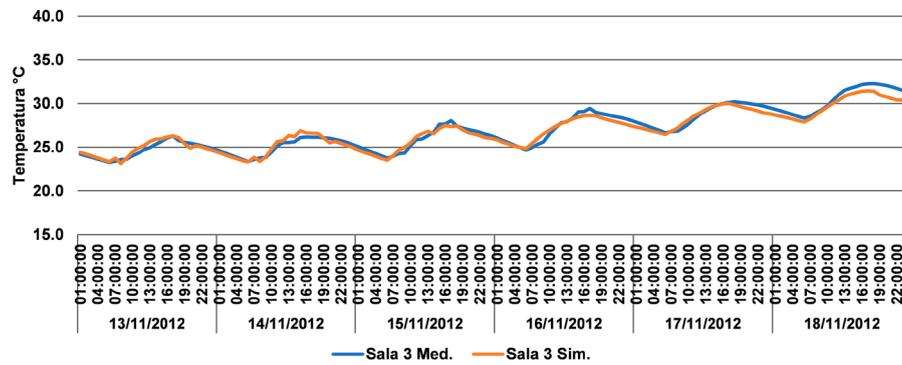


Figura 12. Contrastación de temperaturas medidas y simuladas. Sala 3 JI 174, período 13/11/2012 – 18/11/2012. Fuente: Elaboración de los autores.

JI 174 - NOV.	RMSE (T °c)			MAPE (T %)			
	LOCAL	Per. Completo	Días de clase	Días sin ocup.	Per. Completo	Días de clase	Días sin ocup.
Sala 2 (H18)		0.7	0.7	0.8	2.1	2	2.1
Sala 3 (H19)		0.5	0.4	0.5	1.5	1.2	1.6
SUM (H20)		0.7	0.5	0.8	2.2	1.8	2.4
PROM. TOTALES		0.6	0.5	0.7	1.9	1.7	2.0

Día 14/11/2012		Ilum. Med. (Lx)	Ilum. Sim. (Lx)	RMSE (Lx)	MAPE (%)
Sala 2 (H18)	1 09:00	114	111	17	30
	2 13:00	83	79		
	3 16:00	35	65		
Sala 3 (H19)	1 09:00	99	108	8	6
	2 13:00	130	141		
	3 16:00	99	108		
SUM (H20)	1 09:00	777	931	114	18
	2 13:00	430	552		
	3 16:00	201	211		
PROMEDIOS TOTALES				46	18

Tabla 2. Ajuste entre valores medidos y valores simulados con SIMEDIF. Fuente: Elaboración de los autores.

Tabla 3. Ajuste de iluminancias día 14/11/2012. Fuente: Elaboración de los autores.

para cada aula a la altura del plano de trabajo (0.60 m para los niños). Se establecieron las visualizaciones que representaban la cantidad de luz incidente sobre cada superficie interior, con los valores de iluminancia en "líneas de contorno" y en "falso color". Con el fin de configurar el uso de cortinas internas, se reguló la transmitancia visible de las áreas vidriadas según las distintas situaciones observadas durante el monitoreo. Si bien esto constituye una simplificación, resultó pertinente para el análisis conceptual requerido; aunque se prevé un análisis más minucioso en próximos estudios, para lo cual es recomendable la aplicación de métricas dinámicas anuales, que permitan una mejor caracterización del medio ambiente visual.

Como promedios globales de los locales evaluados, los valores de la Raíz del Error Cuadrático Medio – RMSE (°C) de temperatura de los locales simulados con Simedif muestran desviaciones medias de 0.6 en el período completo de noviembre, 0.5 en los días de clase y 0.7°C en los días sin ocupación. Los promedios totales del Error Porcentual Absoluto Medio – MAPE (%) son de 1.9% en el período completo, de 1.7%, en los días de clase y de 2.0%, en los días sin ocupación. Se verificó en ambos casos un mayor ajuste durante los días de clase (Figuras 11 y 12; Tabla 2).

Las diferencias de los promedios de iluminancias medidos y simulados mediante la interfaz Radiance de Ecotect en el día considerado resultaron en un valor de RMSE de 46 Lx y un valor de MAPE de 18% en promedio (Tabla 3).

Los órdenes de ajuste térmico y lumínico globales hallados demuestran la validez de los modelos físicos realizados en Simedif, empleando como apoyo el programa Ecotect para el análisis solar y de iluminación, lo que permitió proseguir con el testeado de la propuesta genérica optimizada para el caso de estudio.

PROPUESTA GENÉRICA OPTIMIZADA

En el trabajo de Boutet y Hernández (2021), luego del testeado de múltiples propuestas de mejora para los casos auditados y que fueron verificadas para las distintas estaciones del año, se definió una Propuesta Genérica con cinco alternativas y en dos series (terminaciones de colores claros y oscuros), entre las cuales se seleccionó la denominada "pg4", como la más óptima desde el punto de vista técnico-económico y de su comportamiento termo-lumínico, para ser aplicada a los casos de estudio. Los nuevos valores de A_v , y $A_{\text{envolvente}}$ obtenidos en dicha investigación, se utilizaron como datos de entrada de la herramienta de estimación del Factor de Vidriado (Fv) por Regresión Lineal Multivariada (RLM). En esta segunda instancia de la investigación se profundizó el estudio de la propuesta aplicada al Jardín de Infantes N° 174 para verificar su pertinencia, detectando los recursos bioclimáticos potenciales del edificio y especificando las siguientes pautas de diseño:

- **Modificación de las proporciones de áreas vidriadas en ventanas y puertas para dos valores de absorción solar promedio ponderada:** pg4 (= 0.65) con un área vidriada de 5.05 m² y pg4 (= 0.25) con un área vidriada de 7.43 m², extraídos de los datos de entrada correspondientes a la metodología de estimación del Fv (Boutet y Hernández, 2020). De esta manera, la relación de AV/AP (Área vidriada / Área de piso) mejoró de 7.4%, cuando no cumplía el valor de 10% recomendado por el Reglamento de construcciones, a 11.3% en la pg4 (= 0.65) y a 16.7 % en la pg4 (= 0.25) y, por consiguiente, aumentaron los valores de AV/AF (Área vidriada / Área de Fachada) del 20% original a 31 y 46%, respectivamente.
- **Diseño integrado de sus dispositivos de protección solar en diferentes configuraciones geométricas apropiadas para media orientación.** Dado que la geometría edilicia del JI N° 174, con rehundidos y salientes, genera cierto grado de protección solar a los vanos, resultó factible la solución de estantes de luz exteriores (0.50 m de ancho) con terminación reflectiva a lo largo de los paños vidriados superiores (a 2.10 m de altura) y un estante de luz interior (0.40 m de ancho) para mejorar la distribución de la luz natural y disminuir la incidencia directa, sin perder las vistas al exterior. Sólo en casos de incidencia solar directa, se proponen cortinas roller dobles, con la posibilidad de atenuar la luz mediante un paño textil de transmitancia visible media. En la Sala 2 se incorporó un pergolado sobre una estructura existente adosada a la fachada Noreste.
- **Mayor hermeticidad de los espacios de SUM y pasillos mediante un cerramiento translúcido con el sistema de perfiles autoportantes de vidrio Profilit – U glass doble complementado con rejillas de ventilación superior, cerrando así el sistema de vanos con parasoles horizontales fijos que originalmente eran permeables a los agentes climáticos.** Se incorporaron, además, ventanas superiores de proyección con vidrios laminados 3+3 a lo largo del pasillo hacia el Noroeste, aumentando la luz difusa hacia las salas, y ventanas DVH con ruptor de puente térmico en los vanos hacia el exterior.
- **Regulación de las renovaciones de aire (reducción o aumento), según los requerimientos de cada aula, considerando que el tipo de aventanamiento propuesto tiene mayor grado de hermeticidad y posibilita un mejor manejo de la ventilación natural.**

En la Tabla 4 se muestran las variables dimensionales del modelo original de la Sala 2, con áreas vidriadas expuestas al Noroeste, y de las propuestas de mejora desarrolladas para los dos valores de absorción solar.

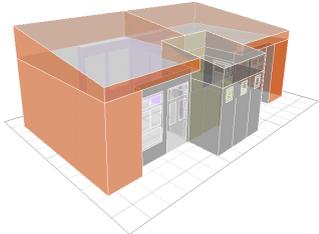
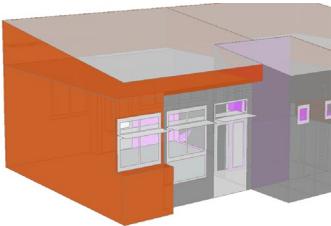
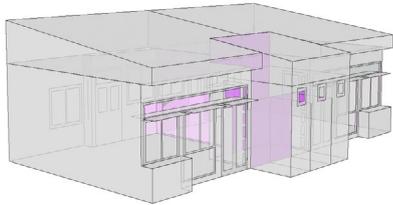
Sala 2 - JI 174	ORIGINAL	pg4 abs. 0.65	pg4 abs. 0.25
DIMENSIONES: Ancho: 7.20 m Largo: 7.20 m Altura: 3.00 m			
SISTEMA DE ABERTURAS FACHADA NOROESTE	Ventana de un paño superior y central de 2 hojas corredizas c/u y un paño inferior fijo. Puerta con un paño vidriado superior fijo y 2 hojas de abrir a batiente con paños vidriados.	Ventana de un paño superior y central de 2 hojas corredizas c/u y un paño inferior fijo. Ventana rehundida de un paño superior y central de 2 hojas corredizas c/u Puerta con un paño superior fijo y 2 hojas de abrir a batiente con vidrios fijos que totalizan 1.53 m ² de Av.	Ventana de 2 hojas corredizas y un paño inferior fijo. Ventana rehundida de 2 hojas corredizas. Paño superior de ventanas a proyección corridas; Puerta con 2 hojas de abrir a batiente con vidrios fijos que totalizan 1.80 m ² de Av.
DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN	Aleros y salientes	Estantes de luz exteriores a lo largo de las aberturas superiores de 0.50 m de ancho e interior de 0.40 de ancho; proyecciones de aleros y pergolado lateral.	Estantes de luz exteriores a lo largo de las aberturas superiores de 0.50 m de ancho e interior de 0.40 de ancho; proyecciones de aleros y pergolado lateral.
PROPORCIÓN VANOS (m)	Ventana: Ancho: 1.60; Alto: 1.90 Puerta: Ancho: 1.4; Alto: 2.5	Ventana: Ancho: 1.60; Alto: 1.90 Ventana rehundida Ancho: 1.60; Alto: 1.30 Puerta: Ancho: 1.4; Alto: 2.5	Ventana: Ancho: 1.60; Alto: 1.90 Ventana rehundida Ancho: 1.60; Alto: 1.60 Ventana corrida: Ancho: 5.10; Alto: 0.45 Puerta: Ancho: 1.4; Alto: 2.00
ÁREA EF. DE VIDRIO sin marcos (m ²)	3,29	5,05	7,43
ABSORTANCIA SOLAR PROMEDIO PONDERADA (α)	0,57	0,65	0,25
ÁREA DE ENVOLVENTE TOTAL (Aenvolvente)	124,81	124,81	124,81
ÁREA DE PISO (m ²)	44,52	44,52	44,52
ÁREA DE FACH. (m ²)	16,2	16,2	16,2
AV/AP (%)	7,4	11,3	16,7
AV/AF (%)	20,3	31,2	45,9

Tabla 4. Variables dimensionales del modelo original y de las propuestas de mejora con distintos valores de absorción solar. Fuente: Elaboración de los autores.

DETALLES ILUSTRATIVOS	PROPUESTA GENÉRICA (pg4)	Esp. (m)	Coef. Global de Pérdidas U (W/m ² °C)	U (W/m ² °C) IRAM Nivel Medio
	TECHO Placa autoportante de chapa con aislamiento interior Coeficiente de transmitancia térmica (k) = 0.44 W/m ² °C *Terminación exterior reflectiva.	0.081	0.4	0,45 (IRAM 11605: 1996)
	MURO DOBLE: hoja de ladrillos comunes vistos de 0.12 m de espesor; aislamiento de poliestireno expandido (15 kg/m ³) de 0.03 m de espesor; hoja de ladrillos de 0.12 m de espesor terminado con revoque grueso y fino al interior.	0.30	0.8	1,1 (IRAM 11605: 1996)
	VENTANAS DVH laminado (6+12+6) perfilería de aluminio con RPT (U = 2.85 W/m ² °C). Coeficiente de sombra = 0.72; Transmitancia visible = 0.81; índice de refracción 1.526. * Dispositivos de control y distribución de la luz natural (aleros – estantes de luz)	0.024	2.8	de 2,01 a 3,00 (Nivel Medio K4 IRAM 11507 4: 2010)
	CERRAMIENTOS TRANSLÚCIDOS Profilit / U-Glass doble de 0.40 x 2.60 m y 4 mm de esp. perfilería de aluminio con RPT. Coeficiente de sombra = 0.7; Transmitancia visible = 0.65; índice de refracción 1.526.	0.082	2.8 (día y noche)	

Tabla 5. Propiedades de la Propuesta Genérica del JI 174 ingresadas a Simedif. Fuente: Elaboración de los autores.

- Tratamiento de la envolvente opaca y vidriada mediante soluciones de inercia térmica media de uso conocido en el NEA, siguiendo valores del coeficiente global de pérdidas (U) recomendados por las Normas IRAM 11605: 1996 para verano (situación más desfavorable) en el nivel Medio (B), y las recomendaciones de diseño para la Zona Ib, s/ IRAM 11603: 2012. De esta forma, se calculó para muros, U = 0.8 W/m²°C; para techos, U = 0.4 W/m²°C; y para ventanas, U = 2.8 W/m²°C s/ el nivel medio K4 (de 2.01 a 3.00 W/m²°C) (IRAM 11507 4: 2010). En la Tabla 5 se detalla la propuesta genérica del edificio con sus características ingresadas a Simedif.

medido (Figuras 14 y 15). Con línea punteada verde se indican los límites de confort establecidos para el análisis estadístico (20 - 27 °C) y con línea punteada amarilla, el límite máximo de confort regional (29 °C).

Se observa que las temperaturas de las propuestas se mantienen la mayor parte del tiempo dentro de la zona de confort, estando en mejores condiciones la Sala 3 (Sureste). La Sala 2 (Noroeste), sale de la zona de confort regional entre las 13:00 y las 19:00 h, pero disminuye considerablemente la temperatura con respecto a la situación original medida que, por tener la fachada Noreste totalmente expuesta a la radiación solar, presentaba mayores ganancias.

RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES TERMO-ENERGÉTICAS

Para cada aula analizada se graficó la evolución de temperaturas de las respectivas propuestas simuladas mediante Simedif, obtenidas en el período de monitoreo de noviembre, comparándolas con las del edificio original

Comparando la situación original con los resultados de la propuesta de mejora pg4 (= 0.25) que se considera como óptima, se obtuvieron las siguientes mejoras térmicas en el período de noviembre analizado: partiendo de una temperatura máxima absoluta medida de 36.4°C y una temperatura promedio de 29.0°C en la Sala 2, se consiguió una reducción de 5.9°C y de 3.0°C, respectivamente.

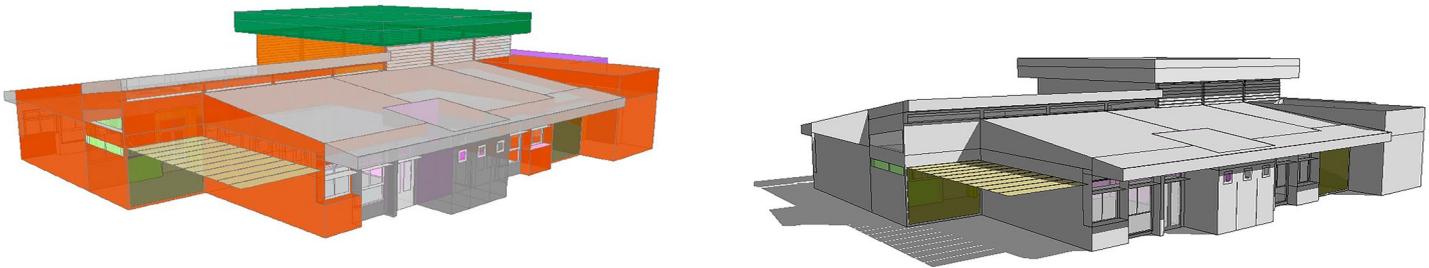


Figura 13. Izq. Modelo pg4 (= 0.65) - Der. Modelo pg4 (= 0.25). Fuente: Elaboración de los autores.

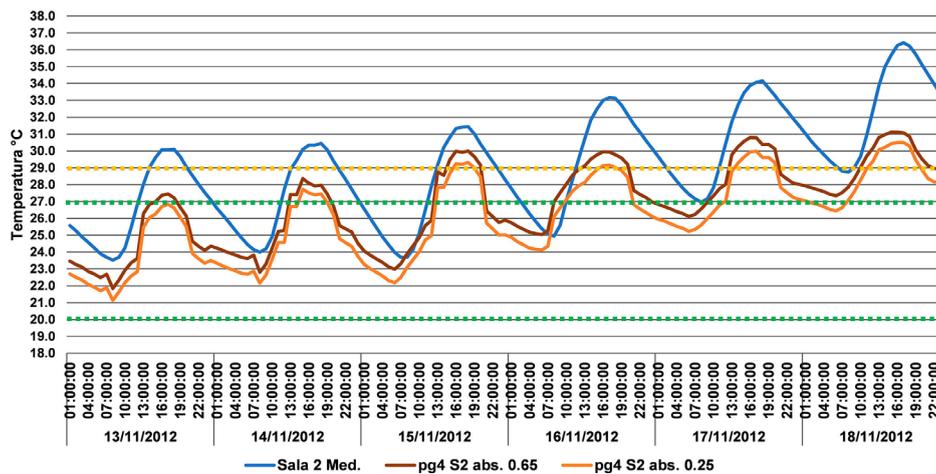


Figura 14. Evolución de temperaturas simuladas con las propuestas genéricas (pg4) en contraste con la temperatura medida (Sala 2). Fuente: Elaboración de los autores.

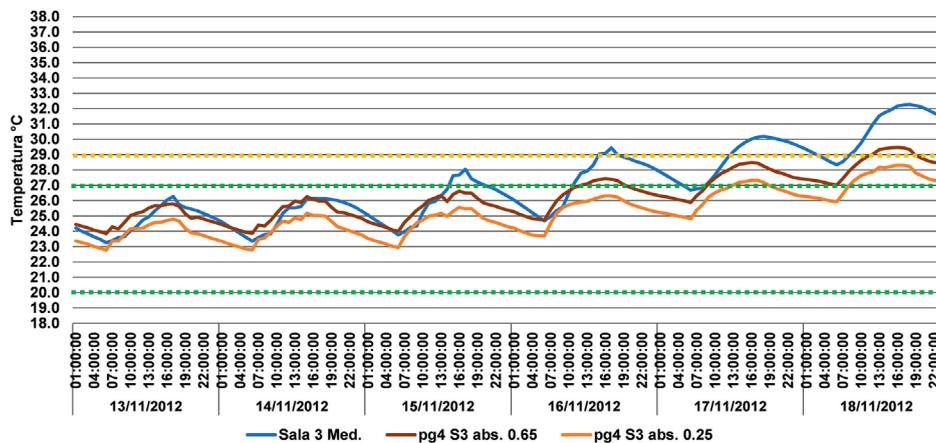


Figura 15. Evolución de temperaturas simuladas con las propuestas genéricas (pg4) en contraste con la temperatura medida (Sala 3). Fuente: Elaboración de los autores.

Partiendo de una temperatura máxima absoluta medida 32.3°C y una temperatura promedio de 27.0°C en la Sala 3, se consiguió una reducción de 4.0°C y 1.8°C, respectivamente (Tabla 6).

Dichas mejoras de las temperaturas interiores se reflejaron en una drástica disminución de las cargas de refrigeración en ambas propuestas, verificadas mediante

simulaciones con termostatación (25°C) en Simedif, como así también de las horas de desconfort en que se requiere acondicionamiento. En la Tabla 7 se comparan los requerimientos máximos para refrigeración de ambas propuestas con respecto al modelo original simulado, apreciándose una reducción de 72% para la sala 2 y de 51% para la sala 3 con la propuesta pg4 (= 0.25). Se comprueba la notable mejoría obtenida en Sala 2,

		Temp. Medida (°C)	pg4 S2 - 0.65 (°C)	pg4 S2 - 0.25 (°C)	Dif. pg4 - 0.65 (°C)	Dif. pg4 - 0.25 (°C)
SALA 2	MÁXIMA	36.4	31.1	30.5	5.3	5.9
	PROMEDIO	29.0	26.9	26.1	2.2	3.0
SALA 3	MÁXIMA	32.3	29.5	28.3	2.8	4.0
	PROMEDIO	27.0	26.2	25.2	0.7	1.8

Tabla 6. Comparación de temperaturas máximas y promedio medidas y de propuestas simuladas. Fuente: Elaboración de los autores.

LOCALES	Orientac. de Av	Original (W)	pg4 0.65 (W)	pg4 0.25 (W)	Diferencia (Original - pg4 0.65)	Diferencia (Original - pg4 0.25)	% de Reducción pg4 0.65	% de Reducción pg4 0.25
SALA 2	NO	10600	3084	2985	7516	7614	71	72
SALA 3	SE	2740	1455	1331	1285	1410	47	51

Tabla 7. Reducción de cargas de refrigeración, período noviembre. Fuente: Elaboración de los autores.

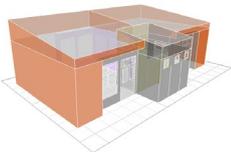
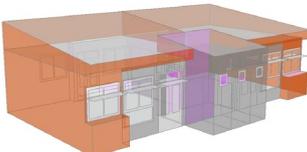
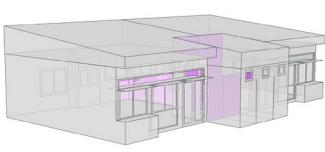
JI 174 NOVIEMBRE						
	MEDIDA		pg4 abs. 0.65		pg4 abs. 0.25	
PROMEDIOS	Ilum. (Lux)	Temp. (°C)	Ilum. (Lux)	Temp. (°C)	Ilum. (Lux)	Temp. (°C)
Sala 2	77	27,8	487	26,3	599	25,6
Sala 3	109	25,2	557	25,6	572	24,6
RANGOS	Ilum. (Lux)	Temp. (°C)	Ilum. (Lux)	Temp. (°C)	Ilum. (Lux)	Temp. (°C)
Sala 2, 9:00 h.	114	24,2	476	23,3	563	22,6
Sala 2, 13:00 h.	201	28,9	551	27,4	648	26,7
Sala 2, 16:00 h.	319	30,3	433	28,1	585	27,5
Sala 3, 9:00 h.	99	23,8	610	24,7	564	23,9
Sala 3, 13:00 h.	130	25,5	596	26,0	630	24,9
Sala 3, 16:00 h.	99	26,2	466	26,1	523	25,0

Tabla 8. Resultados comparativos de simulaciones termo-lumínicas (14/11/2012) en promedio y por rangos horarios. Fuente: Elaboración de los autores.

al reducirse el área de envolvente opaca expuesta y la absorción solar de las superficies exteriores.

COMPATIBILIDAD TERMO-LUMÍNICA DE RESULTADOS

Al analizar la compatibilidad termo-lumínica en los tres horarios evaluados (9:00, 13:00 y 16:00) en el día más soleado, 14/11/2012 (Tabla 8), se advierte que mediante las propuestas de mejora se verificó el incremento de los promedios de iluminancia con respecto al modelo

original que no alcanzaba los valores mínimos. La pg4 (= 0.65) ingresa a la zona de confort termo-lumínico (entre 20°C y 27°C y de 300 a 500 lux), mientras que la pg4 (= 0.25) excede levemente el límite de confort visual dado el mayor porcentaje de AV/AP, aunque sin salir de la zona de confort térmico. Si bien ello no generaría problemas de deslumbramiento, ya que se admite un máximo de iluminancia de 750 lx, los valores podrían corregirse a través del uso de cortinas internas translúcidas en los horarios de mayor incidencia solar. A modo de ejemplo, en la Tabla 9 se exponen las visualizaciones obtenidas

MODELO ORIGINAL	MEJORADO pg4 abs. 0.65	MEJORADO pg4 abs. 0.25
Ilum. = 114 lx	Ilum. = 476 lx	Ilum. = 585 lx

Tabla 9. Resultados comparativos de simulaciones termo-lumínicas en promedio – Sala 2 (Día 14/11/2012 – 16:00 h). Fuente: Elaboración de los autores.

para el modelo de la Sala 2 original y los mejorados, en el día más soleado, 14/11/2012 a las 16:00 h, momento en que el sol incide en la fachada Noroeste.

CONCLUSIONES

La verificación realizada mediante modelos de simulación dinámica calibrados con mediciones *in situ* permitió demostrar la pertinencia de las áreas vidriadas propuestas para distintos valores de absorción solar de las superficies expuestas al exterior del caso de estudio, y validar en forma preliminar, la metodología de estimación del Factor de Vidriado (Fv) para la Tipología Compacta de Jardín de Infantes. La misma relaciona las variables más importantes en juego (A_v , α y $A_{envolvente}$) y posibilita la determinación de áreas vidriadas que conducirían a un comportamiento térmico y lumínico óptimo.

En concreto, se obtuvo una reducción de los requerimientos de refrigeración de hasta el 72%, en el mes de noviembre, más desfavorable para la actividad escolar, al bajar la absorción solar de las superficies exteriores a 0.25 (colores claros), con una relación de área vidriada por área de piso de 17 % (al Noroeste y Sureste)

que posibilitó notables mejoras en la distribución espacial de la luz natural, recurso fundamental para el desarrollo integral de los niños del Nivel Inicial.

Este hallazgo amplía lo establecido por el Reglamento de Construcciones de Resistencia vigente, que determina sólo Av mínima como 10 % de la superficie de piso, sin considerar la orientación intermedia de la ciudad, ni las otras variables de proyecto (área de envolvente total y absorción solar exterior). De esta manera, la herramienta de estimación Fv, puede constituirse en un recurso valioso para los profesionales del sector educativo, así como para la actualización de las reglamentaciones municipales o provinciales en la Región NEA.

Ahora bien, el proceso de iteración para el cálculo de otras tipologías distintas a la de referencia, podría resultar laborioso dado que las correlaciones Fv se obtuvieron con escasos datos de entrada, por lo que será necesario proseguir con el testeo de otras tipologías de nivel inicial y en otras orientaciones posibles, para ampliar la base de datos y mejorar el funcionamiento de la correlación correspondiente, en la medida en que constituye una metodología factible de modificación con nuevos aportes.

Al constatarse la compatibilidad de las propuestas de mejoras térmicas y lumínicas, se resalta la importancia del diseño optimizado de los dispositivos de protección solar de los aventanamientos, como sistemas de regulación ambiental integrados, que conjuntamente con el tratamiento de la envolvente opaca y la configuración morfológica del edificio, permiten su adaptación a un amplio rango de condiciones climáticas y son responsables del aprovechamiento de una fuente de energía renovable tan potente en la Región NEA, como la solar.

Contribuyó en la precisión de los resultados, el grado de ajuste obtenido respecto a los datos tomados en el sitio, a partir de los modelos de simulación dinámica efectuados mediante el software Simedif, en condiciones reales de ocupación, con desviaciones medias de 0.6°C (RMSE) y errores (MAPE) que no superan el 2%. Igualmente, contribuyó la interfaz Radiance de Ecotect, con errores promedio de 46 Lx (RMSE) y 18% (MAPE), admisibles en términos de iluminancias. Esto vuelve factible el testeo de otros períodos no medidos de manera confiable, en base a los datos meteorológicos colectados en el microclima urbano de Resistencia.

Ante los próximos escenarios de calentamiento global y la evidente necesidad de actualizar los estándares de confort en el ámbito local y latinoamericano, pero además teniendo en cuenta las particularidades de los distintos niveles educativos, en este caso, del Nivel Inicial, los resultados de esta investigación representan un antecedente de nivel científico, a disposición de su principal beneficiario, el Ministerio de Educación, Cultura, Ciencia y Tecnología de la Provincia del Chaco, que bien pueden hacerse extensivos a otras regiones de clima subtropical Muy Cálido Húmedo, en pos del diseño sustentable de espacios escolares.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo forma parte del Proyecto "Validación de herramienta de estimación de áreas vidriadas óptimas para el aprovechamiento pasivo de la Energía Solar en Edificios Escolares de Zonas Urbanas de la Región N.E.A." de la Dra. Arq. María Laura Boutet, Investigadora Asistente de la Carrera de Investigador Científico (CIC) del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), bajo la Dirección del Dr. Alejandro Luis Hernández y la Codirección del Dr. Arq. Miguel Ángel Barreto. Se enmarca, además, en el Acuerdo de Trabajo suscripto s/ Res. N° 134/21 C.D. FAU entre la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional del Nordeste y el Ministerio de Educación, Cultura, Ciencia y Tecnología de la Provincia del Chaco, a cuyas autoridades expresamos nuestro más sincero agradecimiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agencia Chilena Eficiencia Energética [Achee] (2012). *Guía de Eficiencia Energética para Establecimientos Educativos*. Santiago, Chile.

Agencia Extremeña de la Energía [AGENEX] (2020). *Guía técnica para la mejora de la eficiencia energética, la adecuación y la rehabilitación ambiental bioclimática y el uso de energías renovables de los centros educativos públicos extremeños*. Junta de Extremadura. Consejería de Educación y Empleo. Servicio Regional de Obras y Proyectos. España.

Alwetaishi, M. (2019). Impact of glazing to wall ratio in various climatic regions: A case study. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 31, 6–18. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jksues.2017.03.001>

Alwetaishi, M., Alzaed, A., Sonetti, G., Shrahily, R. y Jalil, L. (2018). Investigation of school building microclimate using advanced energy equipment: Case study. *Environmental Engineering Research*, 23(1), 10-20. DOI: 10.4491/eer.2017.010.

Baserga, M. F. (2020). *Relación entre los parámetros de la forma edificatoria y el comportamiento energético en las escuelas de clima extremo de Argentina*. Trabajo de fin de Máster Universitario en Estudios Avanzados en Arquitectura. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona.

Boutet, M. L. y Hernández, A. L. (2020). Herramienta de estimación de áreas vidriadas óptimas para el diseño solar pasivo de edificios escolares en el clima cálido-húmedo de la Región N.E.A. *Energías Renovables y Medio Ambiente (ERMA)*, 46, 49 - 60.

Boutet, M. L. y Hernández, A. L. (2021). Generic Proposal for the determination of optimal glazed areas for school buildings in the Northeast Region of Argentina. *Energy and Buildings*, 243(1). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110988>

Boutet M. L., Hernández y Jacobo G.J. (2020). Methodology of quantitative analysis and diagnosis of higro-thermal and lighting monitoring for school buildings in a hot-humid mid-latitude climate. *Renewable Energy*, 145, 2463-2476. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.009>

Capeluto, G. (2019). Adaptability in envelope energy retrofits through addition of intelligence features. *Architectural Science Review*, 62(3), 216-229. DOI: 10.1080/00038628.2019.1574707

Cisterna, M. S. y Abate, S. T. (2021). Iluminación natural en aulas prototípicas y adaptación a nuevas formas de enseñanza, con distancia social. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 25, 60-71.

Chiesa, G., Acquaviva, A., Grosso, M., Bottaccioli, L., Florida, M., Pristeri, E. y Sanna E. (2019). Parametric Optimization of Window-to-Wall Ratio for Passive Buildings Adopting a Scripting Methodology to Dynamic-Energy Simulation. *Sustainability*, 11(11). DOI: 10.3390/su11113078.

- Coronado, M. C., Stevenson-Rodriguez, C. y Medina, J.M. (2021). Thermal comfort in educational buildings: The Classroom-Comfort-Data method applied to schools in Bogotá, Colombia. *Building and Environment*, 194. DOI:10.1016/j.buildenv.2021.107682.
- Duffie J. y Beckman W. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*. New York: Wiley Interscience.
- Fabbri, K. (2013). Thermal comfort evaluation in kindergarten: PMV and PPD measurement through datalogger and questionnaire. *Building and Environment*, 68, 202-214. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.07.002,
- Filippín, C., Flores Larsen, S. y Marek, L. (2020). Performance térmica energética de un edificio bioclimático en una zona de alta radiación de argentina. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 45, 21-31.
- Flores Larsen, S. (2019). SIMEDIF 2.0 (Versión Beta). Software para el cálculo del comportamiento térmico transitorio de edificios. Manual del Usuario. Salta: INENCO – U.N.Sa.-CONICET.
- Futrell, B. J., Ozelkan, E. C. y Brentrup, D. (2015). Bi-objective optimization of building enclosure design for thermal and lighting performance. *Build Environ*, 92, 561–602. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.039>
- Grossi Gallegos, H. y Righini, R. (2007). *Atlas de energía solar de la República Argentina*. Buenos Aires: APF Suma.
- Incropera P. y de Witt D. (1999). *Fundamentals of heat and mass transfer*. México: John Wiley & Sons.
- IPCC (2019). *Calentamiento global de 1,5°C. Resumen para responsables de políticas*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Recuperado de www.ipcc.ch
- IRAM 11507 4 (2010). *Carpintería de obra y fachadas integrales livianas. Ventanas exteriores. Parte 4. Requisitos complementarios. Aislación térmica*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. <https://www.iram.org.ar/>
- IRAM 11603 (2012). *Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. <https://www.iram.org.ar/>
- IRAM 11605 (1996). *Acondicionamiento térmico de edificios. Método de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. <https://www.iram.org.ar/>
- IRAM AADL J-2004 (1974). *Iluminación Natural de Escuelas*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación y Asociación Argentina de Luminotecnia.
- Lamberti, G., Salvadori, G., Leccese, F., Fantozzi, F. y Bluysen, P. M. (2021). Advancement on Thermal Comfort in Educational Buildings: Current Issues and Way Forward. *Sustainability*, 13. DOI: <https://doi.org/10.3390/su131810315>
- Lartigue, B., Lasternas, B. y Loftness, V. (2014). Multi-objective optimization of building envelope for energy consumption and daylight. *Indoor Built Env*; 23, 70–80. DOI: 10.1177/1420326X13480224
- Mangkuto, R., Rohmah M. y Asri, A. D. (2016). Design optimisation for window size, orientation, and wall reflectance with regard to various daylight metrics and lighting energy demand: A case study of buildings in the tropics. *Applied Energy*, 164, 211-219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.046>
- Ministerio de Cultura y Educación de la Nación [MCEN] (1996). *Criterios y Normativa Básica de Arquitectura Escolar, Cap. IV. Condiciones de habitabilidad*.
- Ministerio de Cultura y Educación [MCE] (1981). *Zonificación bioclimática de la República Argentina según la influencia del clima en la problemática educativa. Nueva Serie Estudios y Documentos N° 5*. Dirección Nacional de Investigación, Experimentación y Perfeccionamiento Educativo. Centro Nacional de Documentación e Información Educativa. Buenos Aires, Rep. Arg.
- Muñoz, C. A. (2018). Confort térmico, desde una perspectiva para el cambio climático. *Arquitecturas del sur*, 36(54). DOI: <https://doi.org/10.22320/07196466.2018.36.054>
- Monteoliva, J. M., Korzeniowski, C. G., Ison, M.S., Santillán, J. y Pattini, A.E. (2016). Estudio del desempeño atencional en niños en aulas con diferentes acondicionamientos lumínicos. *Rev. CES Psicol.*, 9(2), 68-79. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/309687953>
- Montessori, M. (1998). *La mente absorbente del niño*. México, D.F.: Editorial Diana.
- Nam, I., Yang, J., Lee, D., Park, E. y Sohn, J. R. (2015). A Study on the Thermal Comfort and Clothing Insulation Characteristics of Preschool Children in Korea. *Build. Environ.*, 92, 724–733. DOI:10.1016/j.buildenv.2015.05.041
- Ochoa, C. E., Aries, M.B.C., van Loenen, E.J., Hensen, J.L.M. (2012). Considerations on design optimization criteria for windows providing low energy consumption and high visual comfort. *Appl Energy*, 95, 238–45. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.042>
- Pagliero Caro, M. J. y Piderit Moreno, M. B. (2017). Evaluación y percepción de la iluminación natural en aulas de preescolar, Región de los Lagos, Chile. *Arquitectura y Urbanismo*, XXXVIII(3), 41-59.
- Pérez Y. y Capeluto, G. (2009). Climatic considerations in school building design in the hot-humid climate for reducing energy consumption. *Applied Energy*, 86(3), 340-348. DOI:10.1016/j.apenergy.2008.05.007.
- Ré, M. G. y Bianchi, M. F. (2020). Metodología de evaluación y calificación de la sustentabilidad ambiental y la eficiencia energética en edificios escolares existentes. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 45, 39 - 49.
- Reglamento General de Construcciones (1990). *Ordenanza N° 1681*. Municipalidad de Resistencia, Provincia del Chaco.

Rupp, R.F., Vásquez, N.G. y Lamberts, R. (2015). A Review of Human Thermal Comfort in the Built Environment. *Energy Build.*, 105, 178–205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.047>

San Juan, G. (2014). Aprendizaje en las escuelas del siglo XXI. Nota 5. En *Auditoría ambiental y condiciones de confort en establecimientos escolares*. Banco Interamericano de Desarrollo. Recuperado de <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Aprendizaje-en-las-escuelas-del-siglo-XXI-Nota-5-Auditor%C3%ADa-ambiental-y-condiciones-de-confort-en-establecimientos-escolares.pdf>

Souza, J., Nogueira B., Lima A. y Leder S. (2020). Thermal Comfort Analysis in Both Naturally Ventilated and Air-Conditioned Classrooms in a Warm and Humid Climate. En *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 503, SBE19. Temuco: Urban Planning, Global Problems and Local Policies (16-18 October 2019)*, Temuco, Chile. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/342315517>.

Trebilcock, M., Soto Muñoz, J., Figueroa, R. y Piderit, M. B. (2016). Metodología para el diseño de edificios educacionales confortables y resilientes. *AUS* 11, (20), 70-76, DOI:10.4206/aus.2016.n20-11

Yacan, S. D. (2014). Impacts of Daylighting on Preschool students' social and cognitive skills. Master Tesis. Science, Faculty of the Graduate College at the University of Nebraska. Recuperado de http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1010&context=arch_id_theses.

Yun, H., Nam, I., Kim, J., Yang, J., Lee, K. y Sohn, J. (2014). A Field Study of Thermal Comfort for Kindergarten Children in Korea: An Assessment of Existing Models and Preferences of Children. *Build. Environ.*, 75, 182–189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.02.003>

Zomorodian, Z. S., Tahsildoost, M. y Hafezi, M. (2016). Thermal comfort in educational buildings: A review article, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 59, 895–906. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.033>

ANÁLISIS CUALITATIVO DE SOSTENIBILIDAD SOCIAL DE SISTEMAS DE DRENAJE URBANO EN CHILE

Recibido 28/02/2022
Aceptado 17/06/2022

QUALITATIVE ANALYSIS OF THE SOCIAL SUSTAINABILITY OF URBAN DRAINAGE SYSTEMS IN CHILE

Gianina Hidalgo-Monroy

Estudiante de Ingeniería Civil, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María
Santiago, Chile
<https://orcid.org/0000-0001-9776-3191>
gianina.hidalgo.14@sansano.usm.cl

Sebastian Vasquez-Avila

Estudiante de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico
Santa María, Valparaíso, Chile
<https://orcid.org/0000-0002-5906-3490>
sebastian.vasqueza@usm.cl

Felipe Araya

Doctor en Ingeniería Civil, Académico, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María
Valparaíso, Chile
<https://orcid.org/0000-0001-9814-5184>
felipe.araya@usm.cl



RESUMEN

Avanzar hacia un desarrollo urbano sostenible conduce a aplicar nuevas formas de drenaje, las que entregan múltiples beneficios técnicos y sociales a la comunidad. No obstante, en países como Chile aún existe una gran brecha respecto de metodologías de evaluación de sostenibilidad social de proyectos de drenaje urbano. A través del análisis cualitativo de contenido aplicado a entrevistas a expertos ($n = 11$), este estudio busca (1) identificar métricas para la medición de la sostenibilidad social de sistemas de drenaje urbano; (2) identificar desafíos para la implementación de dichas métricas y (3) proponer modificaciones al método actual de evaluación de sistemas de drenaje para mejorar la inclusión de la sostenibilidad social en el primero. Dentro de los resultados se advirtió que expertos proponen métricas que capturan la sostenibilidad social, pero que, en la práctica, son complicadas de cuantificar. En términos de los desafíos, la fragmentación de responsabilidades de las organizaciones que participan de la gestión de sistemas de drenaje dificulta el uso de nuevas métricas de sostenibilidad social. Por último, se sugiere el desarrollo de una institución que pueda gestionar los sistemas de drenaje urbano de forma global e integral a fin de valorar los beneficios de la sostenibilidad social de sistemas de drenaje urbano. Estos resultados pueden ser utilizados por autoridades y tomadores de decisiones relacionados a sistemas de drenaje urbano para desarrollar nuevas metodologías que tomen en cuenta los beneficios de la sostenibilidad social.

Palabras clave

análisis cualitativo, desarrollo urbano, desarrollo sostenible.

ABSTRACT

Moving towards sustainable urban development leads to applying new forms of drainage, which provide multiple technical and social benefits to the community. However, in countries like Chile, there is still a large gap regarding methodologies to assess the social sustainability of projects in this area. Using a qualitative content analysis applied to experts' interviews ($n = 11$), this study aims at (1) identifying metrics to assess the social sustainability of urban drainage systems; (2) identifying challenges for the implementation of such metrics, and (3) proposing changes to the current system, to assess urban drainage systems that enhance the integration of social sustainability within these systems. The results show that experts proposed metrics that may assess social sustainability, but in practice, these metrics are difficult to quantify. In terms of challenges, the fragmentation of responsibilities from organizations that are involved in managing urban drainage systems may complicate the use of new social sustainability metrics. Ultimately, it is suggested that an institution is created that can manage urban drainage systems using an integrative approach, to account for the benefits of social sustainability of urban drainage systems. These results can be used by authorities and decision-makers who work with urban drainage systems, to move towards methodologies that consider the benefits of social sustainability.

Keywords

Qualitative Analysis, Urban Development, Sustainable Development, Chile.

INTRODUCCIÓN

La urbanización es un proceso de desarrollo histórico natural y constituye el mayor impacto del hombre sobre las cuencas naturales, pues conlleva a la pérdida de la capacidad natural de infiltración, almacenamiento subsuperficial y evapotranspiración de los suelos; procesos que son reemplazados por una mayor generación de escorrentía directa superficial, la que afecta significativamente las dinámicas del ciclo hidrológico y la calidad de aguas (Ministerio de Obras Públicas [MOP], 2013). En Chile, la superficie urbanizada ha aumentado en un 39.5% entre 2002 y 2017, crecimiento que es equivalente a la superficie del Gran Santiago (Instituto Nacional de Estadísticas [INE], 2019). Asimismo, se estima que para el año 2050, la población urbana del país será del 94.2% (MOP, 2013).

Es por lo anterior que surge la necesidad de generar un cambio en la gestión del drenaje urbano, integrando la sostenibilidad en la planificación urbana como una herramienta para incorporar sistemas de drenaje que brinden beneficios complementarios a los tradicionales y, así, a las comunidades que sirven (Jato-Espino, Toro-Huertas y Güereca, 2022). El concepto de sostenibilidad apunta a satisfacer las necesidades de las generaciones actuales sin poner en riesgo la capacidad de futuras generaciones de responder a sus necesidades (Brundtland, 1987; Olawumi y Chan, 2018). En ese sentido, la sostenibilidad posee tres dimensiones que la definen: económica, ambiental y social (Sierra, Pellicer y Yepes, 2017; Valdes-Vasquez y Klotz, 2013). Para lograr un desarrollo sostenible, estas tres dimensiones deben abordarse de forma integrada (Olawumi y Chan, 2018), sin embargo, en general esto no ocurre, principalmente, por la complejidad de definir qué es la sostenibilidad social, lo cual dificulta su proceso de medición (Atanda, 2019). Por consiguiente, se requiere de esfuerzos para desarrollar una mejor comprensión acerca de cómo capturar y medir el concepto de sostenibilidad social. Dado este contexto, en este estudio se busca analizar cómo se puede medir la sostenibilidad social en el contexto de los sistemas de drenaje urbanos en Chile. Como punto de partida, se desarrolla una revisión de la literatura especializada en sistemas de drenaje urbano sostenibles, como también en el concepto de sostenibilidad social y el contexto chileno de drenajes urbanos.

REVISIÓN DE LA LITERATURA

SISTEMAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE

Replicar al máximo posible los distintos componentes del balance hídrico natural existente previo a urbanizar, genera soluciones de drenaje urbano que permiten no solo proveer el control de la calidad y cantidad

de escorrentía, sino también entregar un servicio más completo a la comunidad, orientado a mejorar la calidad de vida de los habitantes de las ciudades (MOP, 2013). Este es el principal objetivo de los Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible, cuyas siglas en inglés son SUDS (i.e., Sustainable Urban Drainage Systems), los cuales se plantean gestionar la escorrentía urbana y, al mismo tiempo, brindar mejoras en áreas verdes y calidad ambiental. Según la guía oficial en Reino Unido (i.e., The SUD Manual), los 4 pilares de diseño, en este marco, son: (1) controlar la cantidad de agua, gestionando el riesgo de inundación, y mantener y proteger el ciclo agua; (2) gestionar la calidad de la escorrentía; (3) crear y mantener mejores espacios para las personas; y (4) crear y mantener mejores espacios para la naturaleza (Woods-Ballard et al., 2007).

El modo de operar de los sistemas de drenaje sostenible implica gestionar las aguas pluviales lo más cerca posible de su fuente, reduciendo la escorrentía, en primer lugar, mediante la infiltración y, cuando eso no es posible, mediante la retención, almacenando dichas aguas temporalmente para posteriormente, descargarlas de forma controlada (Woods-Ballard et al., 2007). Sus elementos buscan representar los distintos componentes del ciclo hidrológico, basándose en los procesos de infiltración, evapotranspiración y almacenamiento de aguas. Algunos ejemplos de ellos son: estanques de retención, zanjas de infiltración, pavimentos permeables, techos verdes. Estos pueden ser utilizados de manera individual o agrupados en sistemas, cuya configuración definirá su efectividad (Johnson y Geisendorf, 2019).

Los beneficios técnicos de estos métodos apuntan a reducir la presencia de contaminantes en cuerpos de agua superficiales, mejorar la calidad de la escorrentía pluvial y promover la recarga de acuíferos, además de, controlar inundaciones (Gogate, Kalbar y Raval, 2017). También se producen beneficios económicos al aminorar tanto los costos de tratamiento de contaminantes en aguas, como el consumo de energía (Jiang, J. Li, H. Li, Y. Li y Zhang, 2020).

Dentro de los beneficios sociales y ambientales figura el embellecimiento de paisajes y la generación de hábitats para flora y fauna nativa (Fajardo, Valdelamar y Mouthon, 2019; Jiang et al., 2020). Encuestas realizadas en Reino Unido (Jose, Wade y Jefferies, 2015) evidencian que lo más valorado por ciudadanos es la biodiversidad, la salud y la estética que proporciona esta infraestructura, pues el acceso a áreas verdes provee de espacios recreativos agradables, donde se puede pasear o jugar, lo que proporciona una sensación de bienestar mental y físico. Por los beneficios antes mencionados, es necesario que los SUDS tengan cabida en el desarrollo de las ciudades, dado que implican un importante avance hacia el bienestar ambiental y, sobre todo, social.

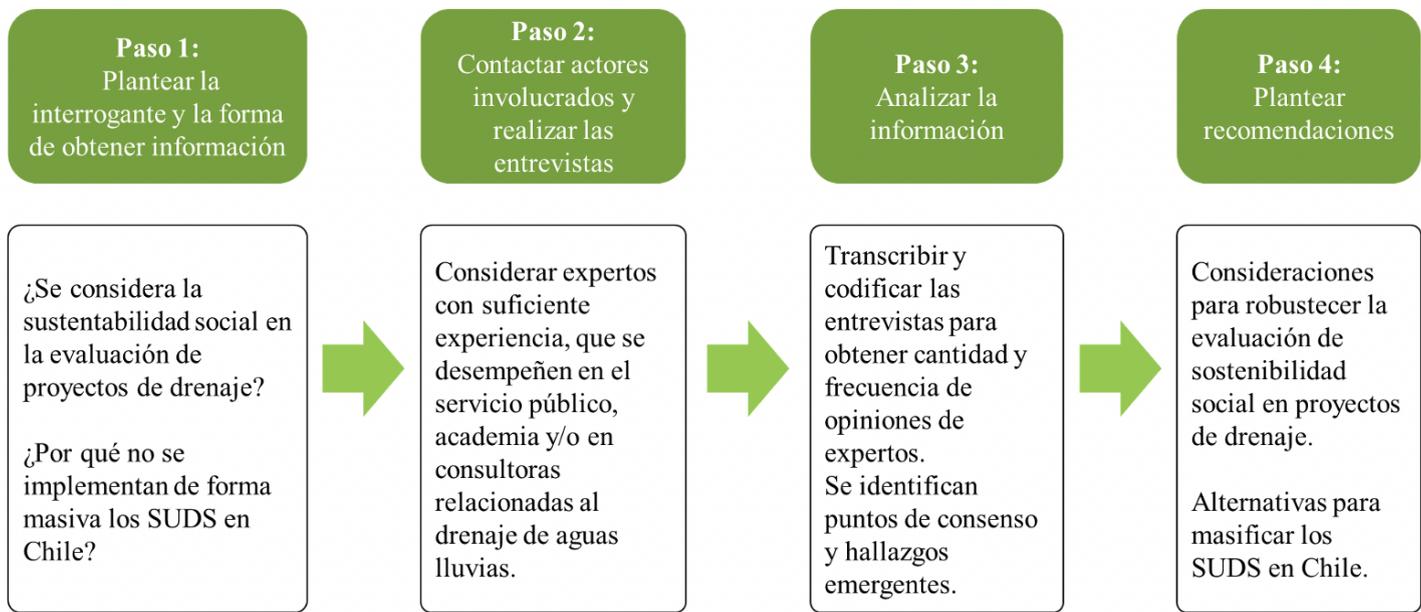


Figura 1. Resumen de pasos de investigación desarrollados en este estudio. Fuente: Elaboración de los autores.

SOSTENIBILIDAD SOCIAL

La sostenibilidad social es un concepto que subyace a múltiples áreas del conocimiento y que asume el desarrollo social como el camino hacia lograr mayor equidad, seguridad y responsabilidad social, poniendo especial énfasis en el desarrollo de las ciudades (Eizenberg y Jabareen, 2017). Para el logro de la sostenibilidad social se debe contemplar acciones y políticas específicas que protejan a las personas, independiente de su origen, cultura o creencia, para generar una mayor comunidad y sentido de pertenencia de la ciudadanía en el lugar que habitan (Vallance, Perkins y Dixon, 2011).

La sostenibilidad social se evalúa mediante métodos de evaluación multicriterio, ya que se busca representar la multidimensionalidad de la realidad a través de una diversidad de perspectivas, que determinan su estado de desarrollo (Jiménez et al., 2019; Sierra, Yepes y Pellicer, 2018). Los criterios sociales son el resultado de la agrupación de indicadores o principios que valoran un aspecto social, sin embargo, su definición no está totalmente especificada, pues no existen criterios sociales preestablecidos que sean válidos para todos los contextos. Los criterios básicos de la sostenibilidad social suelen ser: equidad, economía, desarrollo local, movilidad y accesibilidad, salud, reducción de la pobreza y seguridad ambiental. A ellos se han integrado nuevos conceptos como la felicidad, la calidad de vida, el sentido de pertenencia y el bienestar (Chini, Canning, Schreiber, Peschel y Stillwell, 2017; Shen, Ochoa, Shah y Zhang, 2011), los cuales, a su vez, son más difíciles de medir debido a su subjetividad intrínseca (Atanda, 2019; Lami y Mecca, 2021). La evaluación debe analizar el ciclo de vida completo de la estructura, teniendo en cuenta

las necesidades futuras, de lo contrario, el alcance de la sostenibilidad social será limitado (Sierra et al., 2018). Sin embargo, también existen estudios que se han enfocado en la sostenibilidad social de etapas específicas del ciclo de vida de sistemas de drenaje urbano, tales como el mantenimiento (Gogate et al., 2019) y sus alternativas más sostenibles.

Otro aspecto fundamental para el desarrollo de métricas capaces de medir la sostenibilidad social es la participación de los distintos *stakeholders* (Axelsson et al., 2013; Sierra et al., 2018), personas u organizaciones que pueden afectar o ser afectados por el desarrollo de un proyecto (Chinyio y Olomolaiye, 2009). *Stakeholders* a considerar en proyectos de infraestructura pueden incluir comunidades locales, ONGs, representantes políticos, agencias de infraestructura y expertos en los sistemas de infraestructura en estudio (Araya, Faust y Kaminsky, 2020; Chinyio y Olomolaiye, 2009; Valdes-Vasquez y Klotz, 2013). Por lo tanto, es de vital importancia poder entender cómo cada uno de los *stakeholders* asociados a proyectos de infraestructura entienden la sostenibilidad social. En el contexto de los sistemas urbanos de drenaje, la literatura especializada ha incluido escasamente el rol de los distintos *stakeholders*. En efecto, en la revisión bibliográfica evaluada por Ferrans, Torres, Temprano y Sánchez, (2022), se identificó que la amplia mayoría de los estudios en este ámbito no incluía el rol de *stakeholders* (86% de los textos analizados), y del 14% que sí lo hacía, la mayor parte consideró el rol de los expertos en sistemas de drenaje urbano o autoridades. Ello, evidentemente, enfatiza el rol de los expertos en el desarrollo de un mejor entendimiento del desarrollo sostenible de sistemas de drenaje urbano.

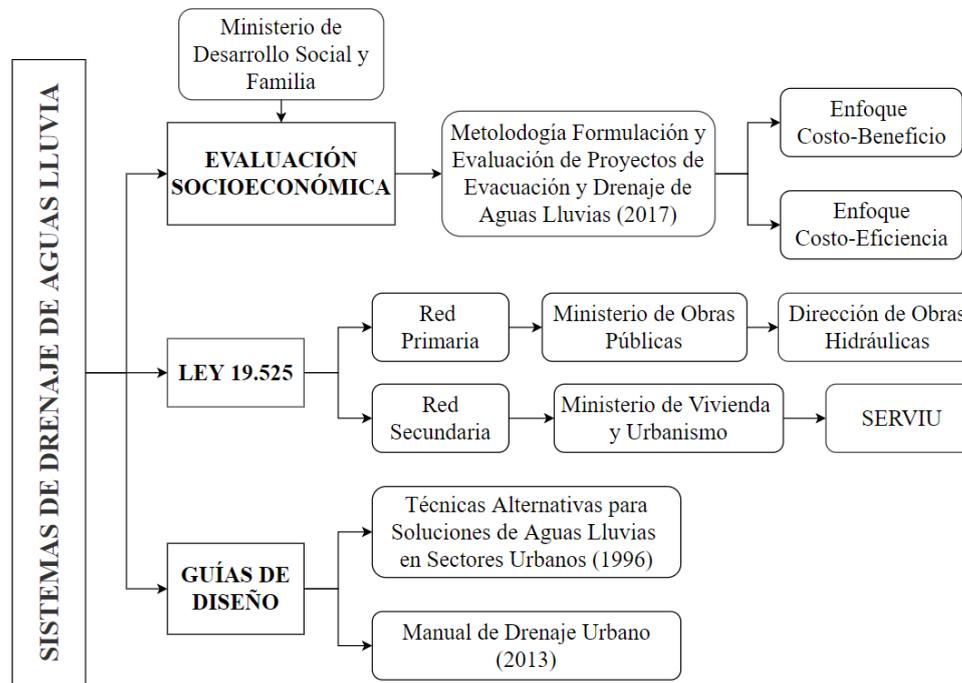


Figura 2. Contexto nacional del drenaje urbano. Fuente: Elaboración de los autores.

Contar con métricas adecuadas es fundamental para una mejor evaluación de la sostenibilidad social, pues permite especificar y ampliar el rango de beneficios, respaldarlos con datos objetivos y disminuir el sesgo que podrían tener las encuestas a usuarios (Jarvie, Arthur y Beevers, 2017). Es por esto que es necesario realizar estudios en diversos contextos, como el chileno, con el fin de aportar en la evaluación de la sostenibilidad social. La Figura 1 muestra un resumen de los pasos seguidos para desarrollar el presente estudio.

CONTEXTO CHILENO DE DRENAJE URBANO

En el año 1997 es promulgada la ley chilena que regula los Sistemas de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias que pone acento en la disminución del daño por inundaciones en las ciudades, por medio de la construcción y operación de infraestructura de drenaje de aguas lluvias, la cual es independiente de la red de aguas servidas (Ley N° 19.525, 1997).

Así también, divide la red de aguas lluvias en red primaria y secundaria. La primera es definida en los planes maestros y corresponde a cauces naturales y tuberías de gran diámetro, siendo construida y operada por el MOP, a través de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). Por otro lado, el resto de la red es considerada como secundaria, y su construcción y operación depende del Servicio de

Vivienda y Urbanización (SERVIU) (Ley N° 19.525, 1997).

El Ministerio de Desarrollo Social y Familia (MIDESO) realiza la evaluación técnico-económica mediante la metodología de evaluación de proyectos públicos de drenaje urbano (MIDESO, 2017). El enfoque de evaluación es el de costo-beneficio para proyectos de inversión mayores a 30.000 UF; en caso contrario, el enfoque es el de costo-eficiencia. Se evalúan beneficios sociales, como liberación de recursos y beneficios por menor daño por inundación, valorizados a través de la metodología de daño evitado y precios hedónicos. La relación entre instituciones responsables del drenaje urbano se ilustra en la Figura 2.

Los beneficios evaluados dificultan el financiamiento de proyectos que contemplen beneficios sociales ajenos a los daños evitados por inundación, generalmente provistos por el drenaje sostenible, tales como la recarga de acuíferos, la depuración de aguas y aspectos estéticos y recreacionales que aportan al bienestar de la población, los cuales, por su contraparte, son difíciles de valorizar.

Por todo lo expuesto, este estudio tiene la intención de abordar las limitaciones de la existente metodología de evaluación de beneficios sociales para proyectos de drenaje de aguas lluvias, analizando el estado actual de la práctica y explorando el nivel de conciencia de los expertos como actores involucrados. A partir del caso de estudio

1 UF: La Unidad de Fomento es una unidad de cuenta indexada a la inflación, calculada y publicada por el Banco Central de Chile (BCCh).

	Campo de ocupación	Cargo o posición	Años de experiencia
1	Academia	Jefe Departamento Académico	18
2	Academia	Profesor	25
3	Academia	Investigador	1
4	Institución pública	Analista Evaluación Social	16
5	Institución pública	Jefe de Departamento Evaluación Social	10
6	Institución pública	Encargado Nacional Infraestructura	25
7	Institución pública	Encargado Nacional Infraestructura	15
8	Institución pública	Jefe de División Técnica	26
9	Institución pública	Jefe de Unidad Técnica	15
10	Institución pública	Jefe de Unidad Interacción con comunidad	17
11	Ingeniería/Consultoría	Ingeniero consultor	1.5

Tabla 1. Caracterización del panel de expertos. Fuente: Elaboración de los autores.

chileno, se espera determinar las principales falencias de la metodología actual, como asimismo qué mejoras se podrían considerar para su fortalecimiento.

METODOLOGÍA

RECOLECCIÓN DE DATOS CON ENTREVISTAS

Dada la importancia de tomar en cuenta a los distintos *stakeholders* en el desarrollo de sistemas de drenaje urbano sostenible, en este estudio se decidió enfocarse en un *stakeholder* en particular: los expertos en sistemas de infraestructura de drenaje urbano.

Los expertos fueron contactados vía correo electrónico y las entrevistas, en su mayoría fueron realizadas de manera remota, con una duración de entre 30 y 45 minutos. Las entrevistas fueron grabadas y luego transcritas, contando con el permiso del entrevistado para hacerlo. El criterio de selección de entrevistados fue que en su ejercicio se encontraran vinculados ya fuera, con drenaje urbano, evaluación social de proyectos o desarrollo de infraestructura urbana sostenible, a través de la academia, consultoría u organismos institucionales. Estos últimos son muy importantes, pues aportan conocimiento desde la perspectiva operacional del sistema. Así, se obtuvo un total de 11 entrevistas completadas exitosamente.

Se escogió el método de muestreo de entrevistas semiestructuradas porque permite una interacción dinámica y flexible entre entrevistador y entrevistado.

Las entrevistas buscaron responder las siguientes 3 preguntas:

1. ¿Qué métricas podrían utilizarse para evaluar la sostenibilidad, en general, y la sostenibilidad social

de los sistemas de drenaje urbano sostenible?

2. ¿Qué barreras existen en la implementación de dichas métricas?
3. ¿Qué modificaciones haría usted a los sistemas de medición actuales?

El panel de expertos se clasificó según campo de ocupación y años de experiencia, la que en promedio fue de 15.4 años (Tabla 1).

ANÁLISIS CUALITATIVO DE ENTREVISTAS

Las entrevistas se transcribieron y analizaron cualitativamente con el programa Weft QDA. Las respuestas fueron codificadas según los temas más recurrentes en ellas, usando el método de codificación en vivo (Saldaña, 2013). La codificación se desarrolló hasta llegar al punto de saturación, en donde nuevas entrevistas entregaron solamente información marginal respecto del tema en estudio. Esta situación se ve alineada con lo que sugiere la literatura respecto a que este punto de saturación se alcanza en torno a 12 entrevistas (Galvin, 2015). Para determinar la frecuencia, se consideraron ideas explícitas, mediante un análisis de contenido (Namey, Guest, Thairu y Johnson, 2008). Por último, los códigos fueron agrupados según el enfoque basado en los datos (Namey et al., 2008), es decir, en torno a la relación que se observa entre ellos mismos, evidenciada en las respuestas de los entrevistados. Cada código utilizado aparece en la Tabla 2, la cual considera cinco categorías: beneficio ambiental, beneficio social, equidad social, dificultades y aspectos a mejorar. Es importante subrayar que las cinco categorías que se observan en la Tabla 2 emergieron del análisis de las respuestas de los entrevistados. De igual modo, se debe destacar que, si bien una de las categorías incluidas en la Tabla 2 (i.e., beneficios ambientales) no pertenece al concepto de

		Criterio	Definición	Ejemplo de respuesta
MÉTRICAS DE EVALUACIÓN	BENEFICIOS AMBIENTALES	Calidad de agua	Calidad del agua lluvia escurrida hacia cuerpos de agua.	"...depuración de las aguas para evitar la contaminación de cuerpos de agua producto del arrastre de contaminación..."
		Cantidad de agua	Agua precipitada que genera escorrentía pluvial.	"...aportar a la mantención del agua que se acumula y no generar un peak mayor..."
		Efecto isla de calor	Aumento de temperatura que sufren núcleos urbanos.	"...disminución del efecto isla de calor, ya que mejora la ventilación de la ciudad..."
		Recarga acuífero	Infiltrar agua hacia las napas subterráneas.	"...la infiltración de aguas lluvia genera un beneficio en el recurso hídrico, en periodo de sequía, el valor del agua almacenada es bastante importante..."
		Reutilización recurso hídrico	Evitar uso de otras fuentes de agua mediante utilización de aguas lluvias.	"...aumentan la retención de agua en el suelo, puede ser aprovechada en disminuir el uso de otras fuentes de agua para riego..."
	BENEFICIOS SOCIALES	Amenidad, estética, y beneficios comunitarios	Mejor integración de infraestructura en las comunidades.	"...calidad de vida, elementos estéticos, recreaciones, incluso espirituales, que significan convivir de una manera más armoniosa con el agua dentro de la ciudad..."
		Información pública, educación y sensibilización	Educar a la comunidad sobre la función del drenaje urbano	"...ahora se ve que la sociedad está demandando esto, ya que tienen más conciencia..."
	EQUIDAD SOCIAL	Acceso a áreas verdes	Homogeneizar el acceso a áreas verdes.	"...hay un déficit grande de áreas verdes, no distribuido de forma homogénea tanto a nivel de país, regional, como entre regiones..."
		Acceso al agua	Homogeneizar el acceso al agua.	"...si no hay agua, no habrá comida, es así de simple, no puede haber lugares que no tengan acceso o deficitario a algunos de estos temas..."
	BARRERAS O DIFICULTADES EN LA IMPLEMENTACIÓN	Disponibilidad de información	Bases de datos para la toma de decisiones.	"...disponibilidad y riqueza de datos que se cuenta para poder dirigir las metodologías en esa dirección (sostenibilidad)..."
Disponibilidad de recursos		Recursos para gestionar la infraestructura.	"...es difícil por la disponibilidad de información, calibración y mediciones, es complicado tener los recursos para obtener esos datos..."	
Fragmentación de responsabilidades		División de responsabilidades poco claras entre organismos, y no obedecen a un mismo objetivo.	"...se requiere el reconocimiento de la integridad del ciclo hidrológico, que la gota que se produce allá llegue acá..."	
Metodologías de evaluación		Limitada gama de beneficios evaluados.	"...metodología para proyectos integrales y que capten otros beneficios que no sean de aguas lluvias de daño evitado por inundación..."	
Paradigma aguas lluvias		Forma de concebir soluciones al drenaje de aguas lluvias.	"...cambiar el paradigma del agua que cae dentro de la ciudad, no sacarla rápidamente, sino que integrarla al ciclo urbano del agua..."	
Preparación profesional		Insuficiente capacitación a profesionales	"...hay falta de interés o conocimiento, hay un poco de inercia siempre, se hace lo mismo porque todos hacen lo mismo..."	

	Criterio	Definición	Ejemplo de respuesta
MODIFICACIONES O ASPECTOS POR MEJORAR	Entidad global de aguas	Organismo integral que planifique infraestructura para aguas lluvias.	"...las aguas lluvias no saben de red primaria o secundaria, sería ideal tener un ente que se dedicara a una planificación integral..."
	Normas secundarias	Normas cuyo objetivo es mantener y proteger la calidad de las aguas.	"...cada vez que haya más normas secundarias nos vamos a preocupar no solo de las industrias, sino que también de las ciudades..."
	Planificación a escala domiciliaria	Diseño de viviendas con drenaje sostenible.	"...esa escorrentía se podría evitar si cada vez que urbanizamos nos preocupamos de controlar localmente la escorrentía que se produce..."
	Valorización integral de beneficios	Ampliar la gama de beneficios que son evaluados.	"...para que se transfieran los principios aplicados (de sostenibilidad) es importante tener metodologías que los consideren..."

Tabla 2. Diccionario de códigos. Fuente: Elaboración de los autores.

sostenibilidad social, se incorporó de todas maneras pues fue integrada a la primera pregunta efectuada (ver sección anterior) a los entrevistados. Cabe reforzar que, a pesar de que esta categoría sea expuesta aquí (Tabla 2), ya que emergió de las entrevistas, el foco de este estudio siempre estuvo en la sostenibilidad social.

LIMITACIONES

Dentro de las limitaciones de este estudio se contempla, en primer lugar, que los resultados pueden presentar un sesgo, debido a la cantidad y origen de los entrevistados, como también debido al método de análisis, que varía de un investigador a otro (Hernández, Fernández y Batipsta, 2014). Este análisis se enfoca en la opinión de expertos en sistemas de drenaje urbano y no incluye a otros *stakeholders* que también participan en el desarrollo de estos sistemas. Sin embargo, la riqueza de información obtenida por medio de entrevistas entrega resultados que ayudan a la reflexión y a orientar futuras investigaciones motivadas por las respuestas de expertos en el área. Además, la experiencia da lugar a la comparación de estas opiniones las de otros *stakeholders* relacionados a los sistemas de drenaje urbano que futuros estudios podrían realizar. Otra limitación de esta investigación radica en el tamaño de la muestra, que consta de un total de 11 entrevistados, la cual podría ser considerada pequeña, no obstante, estudios que han analizado la opinión de expertos para el desarrollo de sistemas de infraestructura han utilizado muestras comparables a las de este (e.g., n=7 [El Hattab, Theodoropoulos, Rong y Mijic, 2020]; n=6 [Hacker, Kaminsky, Faust y Rauch, 2020]; n=12 [Uribe, Faust y Charnitski, 2019]; n=15 [Araya y Vásquez, 2022]).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se discuten los resultados que dan respuestas a las tres preguntas planteadas en la metodología: (1) ¿Qué métricas se podrían utilizar para evaluar la sostenibilidad social de sistemas de drenaje urbano?, (2) ¿qué barreras enfrenta la implementación de las métricas identificadas? y (3) ¿qué modificaciones se proponen para el sistema existente?

El resumen de los resultados del análisis cualitativo respecto de las métricas que se podrían utilizar para medir la sostenibilidad social en sistemas de drenaje urbano se exhibe en la Tabla 3. En ella se presentan las cinco categorías que emergieron en el proceso de análisis cualitativo de la información, con sus respectivas subcategorías.

Se indica la cantidad de veces que cada subcategoría se menciona en las respuestas de las entrevistas (i.e., frecuencia), así como también la cantidad de entrevistados que refiere dicha subcategoría en sus respuestas, que se muestra entre paréntesis. Estos resultados reflejan qué tan conscientes son los entrevistados en cuanto a las posibles métricas para evaluar la sostenibilidad social en sistemas de drenaje urbano. Para mayor claridad, la frecuencia de cada subcategoría se muestra igualmente en forma de porcentajes, los cuales se expresan respecto de cada categoría, y el total de cada categoría lo hace respecto del total general. Nuevamente, los valores entre paréntesis están referidos al número total de entrevistados; así, un 100% indica que todos los entrevistados mencionaron la subcategoría.

Categoría	Subcategoría	Frecuencia respuestas (Entrevistados)		Valor porcentual	
BENEFICIO AMBIENTAL	Calidad de agua	7	(4)	23%	(36%)
	Cantidad de agua	5	(5)	17%	(45%)
	Efecto isla de calor	3	(3)	10%	(27%)
	Recarga acuífero	10	(8)	33%	(73%)
	Reutilización recurso hídrico	5	(4)	17%	(36%)
	Total	30	(11)	22%	(100%)
BENEFICIO SOCIAL	Amenidad, estética y beneficios comunitarios	12	(7)	67%	(64%)
	Información pública, educación y sensibilización	6	(4)	33%	(36%)
	Total	18	(7)	13%	(64%)
EQUIDAD SOCIAL	Acceso a áreas verdes	5	(4)	71%	(36%)
	Acceso al agua	2	(2)	29%	(18%)
	Total	7	(5)	5%	(45%)
BARRERAS	Disponibilidad de información	9	(6)	17%	(55%)
	Disponibilidad de recursos	8	(6)	15%	(55%)
	Fragmentación de responsabilidades	13	(5)	24%	(45%)
	Metodologías de evaluación	14	(6)	26%	(55%)
	Paradigma aguas lluvias	6	(3)	11%	(27%)
	Preparación profesional	4	(3)	7%	(27%)
	Total	54	(11)	40%	(100%)
MODIFICACIONES	Entidad global de aguas	6	(4)	24%	(27%)
	Normas secundarias	3	(1)	12%	(9%)
	Planificación escala domiciliaria	8	(5)	32%	(45%)
	Valorización integral de beneficios	8	(6)	32%	(55%)
	Total	25	(8)	19%	(73%)

Tabla 3. Frecuencia de respuestas categorías emergentes. Fuente: Elaboración de los autores.

BENEFICIOS SOCIALES EVALUADOS EN METODOLOGÍA MIDESO	BENEFICIOS SOCIALES IDENTIFICADOS
<ul style="list-style-type: none"> • Menor daño en propiedades residenciales • Recuperación en terrenos baldíos anegadizos • Menor daño en propiedades comerciales e industriales • Menor daño en establecimientos públicos • Menor daño en vehículos • Menor deterioro de la infraestructura vial • Disminución de los costos generalizados de viaje • Menores gastos de emergencia y limpieza de vías y sumideros • Menor ausentismo laboral • Menor ausentismo escolar • Liberación de recursos públicos de salud • Liberación de recursos públicos en ONEMI • Beneficios no valorados 	<ul style="list-style-type: none"> • Calidad de agua • Cantidad de agua • Efecto isla de calor • Recarga acuífero • Reutilización recurso hídrico • Amenidad, estética, y beneficios comunitarios • Información pública, educación y sensibilización • Acceso a áreas verdes • Acceso al agua

Figura 3. Comparación entre los beneficios sociales considerados actualmente y los obtenidos a partir de las entrevistas realizadas. Fuente: Elaboración de los autores.

MÉTRICAS DE EVALUACIÓN

Al consultar a los entrevistados por los beneficios del drenaje sostenible, el 100% mencionó el aspecto ambiental, mientras que un 64% hizo referencia al aspecto social. Lo anterior indica que, dentro del grupo de expertos, existe una menor conciencia de los beneficios sociales en comparación con los ambientales (Tabla 3). Similares resultados fueron obtenidos en Ferrans *et al.* (2022), donde esta menor conciencia de beneficios sociales se ve explicada en la falta de investigaciones abocadas a analizar beneficios sociales de los sistemas urbanos de drenaje sostenible.

Por otra parte, el principal beneficio ambiental declarado por el 73% de los entrevistados es el aporte de la recarga de acuíferos, el cual se entiende como un beneficio en posibles escenarios de escasez hídrica. En cuanto al beneficio social, el 64% destaca el aporte estético de áreas verdes en zonas urbanas, definidos como: "elementos estéticos, recreaciones, incluso espirituales, que significan convivir de una manera más armoniosa con el agua dentro de la ciudad". Estos beneficios están alineados con dos puntos de la filosofía de diseño de los SUDS establecidos en su manual (Woods-Ballard *et al.*, 2007), que son: proteger el ciclo del agua y crear mejores espacios para las personas.

En relación a la sostenibilidad social, los expertos subrayan el rol de la equidad social en términos del acceso a áreas verdes y al agua. Por ejemplo, uno de los entrevistados señaló que: "Hay un déficit muy grande de áreas verdes en general en Chile, el cual tampoco está distribuido de forma homogénea a lo largo del país, tanto a nivel regional, como entre las regiones". Al analizar cifras de indicadores de área verde por habitante (i.e., m²/hab.) publicados en el catastro de áreas verdes del INE (2018), se advierten los siguientes valores: Arica (3.75), La Serena (11.01), Valparaíso (1.25), Talca (7.15), Valdivia (11.18). Dentro de la Región Metropolitana, existen grandes diferencias entre comunas, por ejemplo, San Miguel (1.97) y Vitacura (18.67). El estándar establecido por el Consejo Nacional de Desarrollo Urbano es de 10 (m²/hab.) y, según sus cifras solo el 15% de las comunas cumplen con dicho estándar y el 51% de las comunas se encuentra bajo 5 m²/hab. (INE, 2018). No debe olvidarse que tanto la equidad en el acceso a áreas verdes, como el estado de estas son fundamentales para que la comunidad haga uso de ellas y sea beneficiada por ellas, a fin de promover la salud mental y la vida en comunidad (Anthun *et al.*, 2019).

La amenidad, la estética y los beneficios comunitarios sugieren que las soluciones de drenaje no solo tienen un componente sociocultural, sino que además

ofrecen ventajas muchas veces desapercibidas por las instituciones que no se hallan asociadas con su función hidráulica, tal como el aumento de estatus y plusvalía de los barrios. Se trata de un aspecto evidenciado también por Ashley *et al.* (2018) en Reino Unido, donde personas encuestadas mencionaron estar dispuestas a pagar más por una vivienda cercana a un área verde generada para un drenaje sostenible.

Por último, dado que se está analizando el contexto chileno, en la Figura 3 es posible apreciar, a la izquierda, los beneficios que hasta hoy se contemplan en la evaluación social de proyectos de drenaje de aguas lluvias y, a la derecha, aquellos identificados a través de las entrevistas. La comparación muestra una brecha entre los beneficios actuales y los comentados por los expertos. Se puede observar que la lista de beneficios existentes en la metodología MIDESO se enfoca en elementos que son actualmente cuantificables, mientras que los beneficios obtenidos en este estudio pueden ser difíciles de cuantificar, por ejemplo, la amenidad. Sin embargo, se estima relevante destacar que los beneficios identificados en este trabajo no son vistos como beneficios que deberían reemplazar a los existentes en la metodología actual, sino como beneficios que se deben adicionar a los existentes. De esta forma, se podría robustecer la importancia de la sostenibilidad social en el desarrollo de sistemas de drenaje urbano sostenibles.

BARRERAS

En cuanto a las dificultades detectadas por los expertos para aplicar métricas de sostenibilidad social, un 45% de los entrevistados resaltó la fragmentación de responsabilidades entre instituciones, tal como indica uno de ellos: "MOP (DOH) solo tiene competencia en la red primaria, por tanto, no tiene facultad para actuar a nivel local; lo ideal sería comenzar a almacenar aguas lluvias en las casas, o en veredas, antes de que lleguen a las calles". Esta barrera ya había sido identificada en estudios anteriores realizados en Chile (Patagua, Fundación Legado Chile y Pontificia Universidad Católica de Chile, 2021).

A un nivel nacional, se produce una situación equivalente, pues existen cuencas que se ubican en más de una región, lo que implica que se requiere un proceso de coordinación entre DOH de las regiones involucradas, y también entre los SERVIU, el cual surge solo por buena voluntad de los encargados, pero suele perderse cuando cambian las jefaturas, ya que "no hay un sistema orgánico para hacer esta coordinación". Finalmente, las responsabilidades divididas dificultan la entrega de soluciones o la propuesta de espacios públicos de uso integral o

multipropósito, entendiendo que un proyecto público puede responder a múltiples necesidades y no únicamente a la función que le compete al organismo que lo presenta, tal como sostiene un entrevistado: “tienes un organismo que se preocupa de un tema específico, eso dificulta bastante el trabajo del sector público en general, la mirada más integral no existe, está esparcida en destinos organismos”. Algo similar ocurre en Europa, donde se ha investigado los distintos niveles de acción, ya sea nacional, regional y local, y donde se pueden aplicar políticas y medidas con el propósito de garantizar el camino hacia el drenaje sostenible (Gimenez, Breuste y Hof, 2020), las que tendrían mayor eficiencia de ser implementadas por un único organismo.

En la misma línea, el 55% menciona las metodologías de evaluación específicas, evidenciando que estas dificultan la realización de proyectos multisectoriales. La metodología entiende que un proyecto de drenaje urbano solo puede solucionar problemas de inundación, los que son abordados ampliamente por sistemas tradicionales, pero deja de lado el beneficio que una solución basada en la naturaleza podría otorgar en el ámbito social y ambiental. Al respecto, un entrevistado comenta que “justamente hay una falta de metodologías de valoración que consideren esos aspectos y que quizás no se han internalizado, es super importante para dar la aprobación a los proyectos y esos números tienen que considerar dimensiones distintas a la económica, como lo asociado a lo ambiental”. La falta de metodologías no constituye una característica particular de la realidad chilena, sino que es constatada en diversos diagnósticos internacionales (e.g., Ashley et al., 2018; Jimenez et al., 2019).

Por otro lado, la metodología actual no contempla las múltiples necesidades que podría cubrir un proyecto, encasillándolo tan solo en una función. Así, por ejemplo, para la realización de un parque inundable (i.e., Parque Inundable Victor Jara en Santiago de Chile), se debió evaluar la dimensión hidráulica involucrada por medio de la metodología de aguas lluvias y la paisajística, por medio del enfoque de costo-eficiencia, puesto que no existe una metodología para este tipo de obras, es decir, el proyecto se dividió en dos y no fue evaluado de manera integral. Finalmente, el proceso de evaluación se dificulta debido a que las métricas de sostenibilidad social son difíciles de monetizar: “es difícil evaluar los beneficios, es un desafío a nivel mundial, en el ámbito de parques es posible reconocer esos beneficios, pero muy difícil cuantificarlos, llevarlos a números”.

MODIFICACIONES

Como forma de vincular y contextualizar los resultados de esta sección, las modificaciones propuestas por los entrevistados son emparejadas con las barreras a las que podrían impactar (ver Figura 3).

La planificación a escala domiciliaria y la evaluación integral de los beneficios fueron las modificaciones más referidas por los entrevistados (Tabla 3). La planificación a escala domiciliaria propone elaborar técnicas junto a las comunidades para evitar la excesiva escorrentía en redes primarias. Estas iniciativas se han aplicado en otros países: por ejemplo, en una localidad argentina, se resolvió un problema de inundación puntual por medio del drenaje sostenible a escala de barrio (Villalba, Curto, Malegni y Linfante, 2019). Esto apunta a proyectar obras de menor costo e impacto en el medioambiente, con un consiguiente cambio de paradigma en los profesionales, quienes podrían considerar el desarrollo de proyectos de manejo local de aguas lluvias, en lugar de llevar a cabo obras para lidiar con grandes tormentas de diseño.

El presente trabajo intenta, precisamente, promover una valoración integral de beneficios, la que, entre otras aristas, propone la creación de métodos integrales de evaluación, que no solo cuantifiquen los daños evitados por inundación, sino también los innumerables beneficios sociales de los SUDS; lo que podría influir en que los proyectos reciban mayor financiamiento producto de una mayor cuantificación de sus beneficios.

La eventual creación de una entidad global para la gestión de los sistemas de drenaje urbano sostenible ayudaría principalmente a reducir la fragmentación de responsabilidades en la gestión de sistemas de aguas lluvias. Con ello, podrían mejorar las condiciones de monitoreo, se dispondría de más información para la toma de decisiones, existiría un uso más eficiente de los recursos y, por ende, se vería aumentada la disponibilidad de fondos para otros proyectos.

CONCLUSIÓN

En el estudio aquí expuesto se realizaron entrevistas a expertos vinculados al desarrollo de sistemas de drenaje urbano sostenible en Chile. A partir de sus respuestas, se obtuvo (1) un grupo de métricas para la medición de la sostenibilidad social de sistemas de drenaje urbano; (2) información sobre las barreras para la implementación de dichas métricas; y (3)

sugerencias de modificaciones al sistema actual de evaluación de la sostenibilidad para sistemas de drenaje urbano.

Los principales beneficios identificados por los expertos fueron el aporte a la recarga de acuíferos a través de la infiltración de aguas lluvias y el hermoseamiento de los espacios con áreas verdes. Estos beneficios tienen, asimismo, un impacto directo en la equidad social, una de las aristas de la sostenibilidad social, puesto que empalman directamente con el acceso universal al agua y con el acceso a áreas verdes. Respecto de las barreras para nuevas métricas de evaluación de la sostenibilidad social de sistemas de drenaje urbano, se destaca la fragmentación de las responsabilidades de las instituciones asociadas a la gestión de los sistemas de drenaje urbanos, junto con la limitada capacidad de la metodología actual para valorar alternativas integrales de drenaje urbano. En términos de las sugerencias de los expertos para modificar el presente contexto, se sugiere considerar una valorización integral de los beneficios de sistemas de drenaje urbano, una entidad que aborde la gestión del recurso hídrico de forma global e integral, así como expandir la planificación de la reutilización del agua a una escala domiciliaria.

Por último, para fortalecer las metodologías de evaluación, se recomienda que estudios posteriores profundicen en la valorización integral de beneficios sociales y ambientales, y se enfoquen en nutrir dichos métodos con bases de datos más completas y extensas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anthun, K. S., Maass, R. E. K., Hope, S., Espnes, G. A., Bell, R., Khan, M. y Lillefjell, M. (2019). Addressing inequity: Evaluation of an intervention to improve accessibility and quality of a green space. *International journal of environmental research and public health*, 16(24). DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph16245015>

Araya, F., Faust, K. M. y Kaminsky, J. A. (2020). A decision-making framework for participatory planning: Providing water infrastructure services to displaced persons. En *Construction Research Congress 2020: Infrastructure Systems and Sustainability* (pp. 654-664). Reston, VA: American Society of Civil Engineers. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784482858.071>

Araya, F. y Vásquez, S. (2022). Challenges, drivers, and benefits to integrated infrastructure management of water, wastewater, stormwater and transportation systems. *Sustainable Cities and Society*, 82. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103913>

Ashley, R. M., Gersonius, B., Digman, C., Horton, B., Bacchin, T., Smith, B., Shaffer, P. y Baylis, A. (2018). Demonstrating and Monetizing the Multiple Benefits from Using SuDS. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 4(2). DOI: <https://doi.org/10.1061/JSWBAY.0000848>

Atanda, J. O. (2019). Developing a social sustainability assessment framework. *Sustainable Cities and Society*, 44, 237-252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.09.023>

Axelsson, R., Angelstam, P., Degerman, E., Teitelbaum, S., Andersson, K., Elbakidze, M. y Drotz, M. K. (2013). Social and cultural sustainability: Criteria, indicators, verifier variables for measurement and maps for visualization to support planning. *Ambio*, 42(2), 215-228. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-012-0376-0>

Brundtland, G. H. (1987). Our common future—Call for action. *Environmental Conservation*, 14(4), 291-294. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0376892900016805>

Chini, C., Canning, J., Schreiber, K., Peschel, J. y Stillwell, A. (2017). The Green Experiment: Cities, Green Stormwater Infrastructure, and Sustainability. *Sustainability*, 9(1). DOI: <https://doi.org/10.3390/su9010105>

Chinyio, E. y Olomolaiye, P. (2009). *Construction stakeholder management*. Oxford: John Wiley & Sons.

Eizenberg, E. y Jabareen, Y. (2017). Social sustainability: A new conceptual framework. *Sustainability*, 9(1). DOI: <https://doi.org/10.3390/su9010068>

El Hattab, M. H., Theodoropoulos, G., Rong, X. y Mijic, A. (2020). Applying the systems approach to decompose the SuDS decision-making process for appropriate hydrologic model selection. *Water*, 12(3). DOI: <https://doi.org/10.3390/w12030632>

Fajardo, R. J., Valdelamar, J. C. y Mouthon, J. (2019). A rain garden for nitrogen removal from storm runoff in tropical cities. *Revista de Ciencias Ambientales*, 53(2), 132-146. DOI: <http://dx.doi.org/10.15359/rca.53-2.7>

Ferrans, P., Torres, M. N., Temprano, J. y Sánchez, J. P. R. (2022). Sustainable urban drainage system (SUDS) modeling supporting decision-making: a systematic quantitative review. *Science of the Total Environment*, 806. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150447>

Galvin, R. (2015). How many interviews are enough? Do qualitative interviews in building energy consumption research produce reliable knowledge? *Journal of Building Engineering*, 1, 2-12. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2014.12.001>

Gimenez, M., Breuste, J. y Hof, A. (2020). Sustainable Drainage Systems for transitioning to sustainable urban flood management in the European Union: A review. *Journal of Cleaner Production*, 255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120191>

Gogate, N. G., Kalbar, P. P. y Raval, P. M. (2017). Assessment of stormwater management options in urban contexts using Multiple Attribute Decision-Making. *Journal of cleaner production*, 142, 2046-2059. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.079>

Hacker, M. E., Kaminsky, J., Faust, K. M. y Rauch, S. (2020). Regulatory Enforcement Approaches for Mass Population Displacement. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(5). Recuperado de [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001820](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001820)

Hernández, R., Fernández, C. y Batipsta, P. (2014). *Metodología de la Investigación* (6th ed.). México, DF: McGraw-Hill Interamericana.

Instituto Nacional de Estadísticas [INE] (2018). *Mejor acceso a servicios y equipamientos públicos básicos*. Recuperado de <https://insights.arcgis.com/#/embed/017b497bed394412a8def49f7a95a808>

Instituto Nacional de Estadísticas [INE] (27 de agosto de 2019). *Entre 2002 y 2017 las áreas urbanas del país crecieron un tamaño equivalente al Gran Santiago*. Recuperado de <https://www.ine.cl/prensa/2019/09/16/entre-2002-y-2017-las-%C3%A1reas-urbanas-del-pa%C3%ADs-crecieron-un-tama%C3%B1o-equivalente-al-gran-santiago>

Jarvie, J., Arthur, S. y Beevers, L. (2017). Valuing Multiple Benefits and the Public Perception of SUDS Ponds. *Water*, 9(2), 128. DOI: <https://doi.org/10.3390/w9020128>

Jato-Espino, D., Toro-Huertas, E. I. y Güereca, L. P. (2022). Lifecycle sustainability assessment for the comparison of traditional and sustainable drainage systems. *Science of The Total Environment*, 817. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.152959>

Jiang, C., Li, J., Li, H., Li, Y. y Zhang, Z. (2020). Low-impact development facilities for stormwater runoff treatment: Field monitoring and assessment in Xi'an area, China. *Journal of Hydrology*, 585. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124803>

Jiménez Ariza, S. L., Martínez, J. A., Muñoz, A. F., Quijano, J. P., Rodríguez, J. P., Camacho, L. A. y Díaz-Granados, M. (2019). A multicriteria planning framework to locate and select sustainable urban drainage systems (SUDS) in consolidated urban areas. *Sustainability*, 11(8). DOI: <https://doi.org/10.3390/su11082312>

Johnson, D. y Geisendorf, S. (2019). Are Neighborhood-level SUDS Worth it? An Assessment of the Economic Value of Sustainable Urban Drainage System Scenarios Using Cost-Benefit Analyses. *Ecological Economics*, 158, 194-205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.12.024>

Jose, R., Wade, R. y Jefferies, C. (2015). Smart SUDS: Recognising the multiple-benefit potential of sustainable surface water management systems. *Water Science and Technology*, 71(2), 245-251. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2014.484>

Lami, I. M. y Mecca, B. (2021). Assessing social sustainability for achieving sustainable architecture. *Sustainability*, 13(1). DOI: <https://doi.org/10.3390/su13010142>

Ley N° 19.525 (1997). *Regula sistemas de evacuación y drenaje de aguas lluvias*. D.O. 24.10.1997. Recuperado de <http://bcn.cl/2et48>

Namey, E., Guest, G., Thairu, L. y Johnson, L. (2008). Data reduction techniques for large qualitative data sets. *Handbook for team-based qualitative research*, 2(1), 137-161.

Ministerio de Desarrollo Social y Familia [MIDESO] (2017). *Metodología Formulación y Evaluación de Proyectos de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias*. Recuperado de <http://sni.gob.cl/storage/docs/metodolog%C3%ADa%20aguas%20lluvias%20%2029-11-2017%20final.pdf>

Ministerio de Obras Públicas [MOP] (2013). *Manual de Drenaje Urbano*. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12140/25907>

Olawumi, T. O. y Chan, D. W. (2018). A scientometric review of global research on sustainability and sustainable development. *Journal of cleaner production*, 183, 231-250. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.162>

Patagua, Fundación Legado Chile y Pontificia Universidad Católica de Chile (2021). *Ciudades sensibles al agua. Guía de drenaje Urbano Sostenible para la Macrozona Sur de Chile*. Santiago: Patagua, Fundación Legado Chile y Pontificia Universidad Católica de Chile. Recuperado de https://www.cedeus.cl/wp-content/uploads/2021/05/Guia-DUS_VOL-II-2.pdf

Saldaña, J. (2013). *The Coding Manual for Qualitative Researchers*. London: SAGE Publications Ltd.

Shen, L.Y., Ochoa, J., Shah, M. N. y Zhang, X. (2011). The application of urban sustainability indicators – A comparison between various practices. *Habitat International*, 35(1), 17-29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2010.03.006>

Sierra, L. A., Pellicer, E. y Yepes, V. (2017). Method for estimating the social sustainability of infrastructure projects. *Environmental Impact Assessment Review*, 65, 41-53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2017.02.004>

Sierra, L. A., Yepes, V. y Pellicer, E. (2018). A review of multi-criteria assessment of the social sustainability of infrastructures. *Journal of Cleaner Production*, 187, 496-513. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.022>

Uribe, M. G., Faust, K. M. y Charnitski, J. (2019). Policy driven water sector and energy dependencies in Texas border colonias. *Sustainable Cities and Society*, 48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101568>

Valdes-Vasquez, R. y Klotz, L. E. (2013). Social sustainability considerations during planning and design: Framework of processes for construction projects. *Journal of construction engineering and management*, 139(1), 80-89. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000566](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000566)

Vallance, S., Perkins, H. C. y Dixon, J. E. (2011). What is social sustainability? A clarification of concepts. *Geoforum*, 42(3), 342-348. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2011.01.002>

Villalba, G. A., Curto, F. A., Malegni, N. J. y Linfante, A. F. (2019). Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible como herramienta para resolver problemas de inundaciones urbanas. Experiencias en Costa Esmeralda. *Aqua-LAC*, 11(2), 39-49. DOI: <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2019-v11-2-04>

Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R. y Shaffer, P. (2007). *The SUDS manual* (Vol. 697). London: Ciria.

ABORDANDO LA SUSTENTABILIDAD. LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO COMO HERRAMIENTA PROYECTUAL DOCENTE

ADDRESSING SUSTAINABILITY. CONSTRUCTION OF A PROTOTYPE AS A TEACHING DESIGN TOOL

María López de Asiaín-Alberich

Doctora en Arquitectura, Profesora Asociada, Grupo de Investigación Transhumancias: Arquitectura, Tecnología, Ciencia y Arte, HUM 965, Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla, Sevilla, España
<https://orcid.org/0000-0001-9422-394X>
mlasiain@us.es

Miguel Hernández-Valencia

Doctor en Arquitectura, Profesor Contratado Doctor, Grupo de Investigación Transhumancias: Arquitectura, Tecnología, Ciencia y Arte, HUM 965, Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla, Sevilla, España
<https://orcid.org/0000-0002-3382-1097>
mhvalencia@us.es

Jorge Roa-Fernández

Doctor en Arquitectura, Profesor Contratado Doctor, Grupo de Investigación Sath Sostenibilidad en Arquitectura, Tecnología y Patrimonio: Materialidad y Sistemas Constructivos, TEP206, Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla, Sevilla, España
<https://orcid.org/0000-0003-1254-3443>
jroa@us.es

Rafael Herrera Limones

Doctor en Arquitectura, Profesor Contratado Doctor, Grupo de Investigación Transhumancias: Arquitectura, Tecnología, Ciencia y Arte, HUM 965, Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla, Sevilla, España
<https://orcid.org/0000-0001-9948-2019>
herrera@us.es

RESUMEN

Utilizar la construcción física de un prototipo como herramienta educativa no es una propuesta nueva, aunque puede ser innovadora en el contexto actual de renovación conceptual vinculado al desarrollo sustentable. En la Escuela de Arquitectura de Sevilla existe una gran tradición investigadora en materia de sustentabilidad, pero poco extrapolada a la enseñanza. También es necesaria una mejora significativa de la educación desde el ámbito metodológico. En este sentido, los concursos proporcionan una oportunidad que define una situación potencialmente afortunada para la innovación educativa. Partiendo de esta base, la presente investigación tiene como objetivo comprobar cómo la construcción de un prototipo a escala real, como estrategia metodológica educativa activa, de la mano de una metodología de diseño bioclimático consolidada en dicha escuela de arquitectura, permite lograr grandes resultados tanto en términos educativos como bioclimáticos. La metodología educativa empleada aún las siguientes directrices: el taller como ámbito integrador para el aprendizaje arquitectónico; la construcción de un prototipo como situación educativa que trasciende lo arquitectónico; la conceptualización de los nuevos retos marcados por la sustentabilidad y su aplicación práctica y efectiva al proyecto, diseño y construcción arquitectónicos. Todas herramientas puestas en valor dan respuesta efectiva a las carencias actualmente detectadas e interiorizadas del aprendizaje-enseñanza y, por tanto, del quehacer arquitectónico.

Palabras clave

prototipos, aprendizaje activo, diseño arquitectónico, concurso.

ABSTRACT

Using the physical construction of a prototype as an educational tool is not new, although it can be innovative in the current context of conceptual renewal linked to sustainable development. At the School of Architecture of Seville, there is a great research tradition on sustainability, but little is extrapolated into teaching. There is also a need for a significant improvement in education from the methodological point of view. In this sense, competitions provide an opportunity that defines a potentially rewarding situation for educational innovation. From this starting point, this research aims at verifying how the construction of a full-scale prototype, as an active educational methodological strategy and following a bioclimatic design methodology consolidated in said School of Architecture, allows achieving great results both in educational and bioclimatic terms. The educational methodology brings together the following guidelines: the workshop as an integrating environment for architectural learning; the construction of a prototype as an educational situation that transcends the architectural; the conceptualization of new challenges marked by sustainability and their practical and effective application to the architectural project, design, and architectural construction. All the tools are valuable and effectively respond to shortcomings detected and internalized in teaching-learning, and, consequently, architectural activities.

Keywords

prototypes, active learning, architectural design, competition

INTRODUCCIÓN

DISEÑO ARQUITECTÓNICO Y SUSTENTABILIDAD

La tradición educativa de la arquitectura desde la modernidad ha venido acompañada de múltiples herramientas de diseño proyectual. La mayoría no son nuevas, aunque sí son reinterpretaciones o reinventaciones de experimentos pasados, que intentan poner en valor, de nuevo, enfoques que permiten dar respuesta a los actuales retos y necesidades de la docencia arquitectónica. El comienzo de siglo ha hecho patente la crisis en la que se encuentra el planteamiento y la profesión arquitectónica. Como profesionales, no estamos respondiendo adecuadamente a los nuevos retos, no damos a la sociedad el servicio que necesita, y la educación y enseñanza arquitectónica debe responder a esta realidad con esfuerzo, cambio, reinventión, rigurosidad y, sobre todo, mucha ilusión.

Los requerimientos actualmente necesarios de abordar y afrontar son de dos tipos: conceptuales y metodológicos. En efecto, es fundamental, por un lado, una revisión conceptual del enfoque arquitectónico (M. López de Asiaín, 2010), que implica la reflexión sobre las actuales necesidades de la sociedad vinculadas al concepto de desarrollo sustentable (ONU, 2015). Por otro lado, es también esencial revisar y reincorporar metodologías docentes adaptadas a los nuevos perfiles educativos y a la conceptualización de los nuevos enfoques (Granero y García Alvarado, 2014).

Disponemos de multitud de herramientas diseñadas y experimentadas durante el pasado siglo, sin embargo, resulta necesario, y en ello reside la innovación del proceso, la reinterpretación y la adaptación actualizadas. El propio proceso de diseño y construcción arquitectónico (Fernández Saiz, 2016) puede ser entendido como uno de investigación en sí mismo, cuyos resultados y valoraciones nos permiten avanzar a través del ensayo, entendiendo la arquitectura como una ciencia experimental a pesar de los múltiples enfoques metodológicos potencialmente abordables (M. López de Asiaín, Echave y Fentanes, 2005). Existen numerosas experiencias de innovación docente realizadas durante la última década en la Escuela de Arquitectura de Sevilla (ETSAS) (Ramos Carranza, 2018). Todas ellas, implican un esfuerzo paulatino y continuado de mejora de las metodologías y herramientas docentes con las que se aborda la enseñanza desde la conciencia de la necesidad de revisión de la estrategia educativa que motiva y genera la transmisión de conocimiento.

La sustentabilidad en arquitectura, la adecuación bioclimática o la eficiencia energética constituyen temáticas y conceptos ineludibles en este abordaje. Sin embargo, el acercamiento a los mismos desde diferentes asignaturas y saberes arquitectónicos, catalogados ordenadamente y, en ocasiones, escasamente



Figura 1. Portada publicación Educate Prize. Fuente: Proyecto Europeo Educate (EDUCATE Project Partners, 2012a).

relacionados en el ámbito académico, aunque absolutamente interconectados en la realidad, resulta metodológicamente diverso y enriquecedor, por lo que es cardinal la integración de ellos en el ámbito del proyecto arquitectónico (Alba Dorado, 2019). En este sentido, ciertas estrategias de investigación han fomentado la colaboración y el debate entre áreas de conocimiento, asignaturas y enfoques, generando un clima de necesidad de cambio y mejora que numerosos docentes han aprovechado realizando interesantes aportaciones (Herrera-Limones, 2013; Martínez Osorio, 2013). Como referencia de interés, durante la fase experimental del proyecto Europeo Educate (Altomonte, 2009), se realizaron talleres en los que participaron numerosos profesores de la ETSAS (Blandón González, 2018; Blandón González y Vallés Sisamón, 2019; Galán Marín, 2018; García Sáez, 2018; Pedreño Rojas, 2018; Rivera Gómez, 2018; Roa Fernández, 2018). Allí, se trabajaron los proyectos docentes de diferentes asignaturas para incorporar competencias medioambientales específicas, a fin de asegurar que los alumnos adquirieran las capacidades necesarias para trabajar desde un enfoque basado en el desarrollo sustentable. De igual forma, y desde el mismo proyecto europeo de investigación, se efectuó una experiencia vinculada a un concurso europeo de arquitectura para estudiantes.

El Educate Prize (M. López de Asiaín y Escobar, 2013) (Figuras 1 y 2) proponía como reto, una intervención y propuesta arquitectónica de hábitat más sustentable, diseñada en la localización elegida previamente y definida por los estudiantes. Éstos debían ser tutorizados por aquellos profesores que hubieran incluido en su proyecto docente las competencias medioambientales, y utilizarían como herramienta docente potencial el portal Educate (Cangelli et al., 2012). Dicho portal incluía información y contenido específico en la materia, desde explicaciones

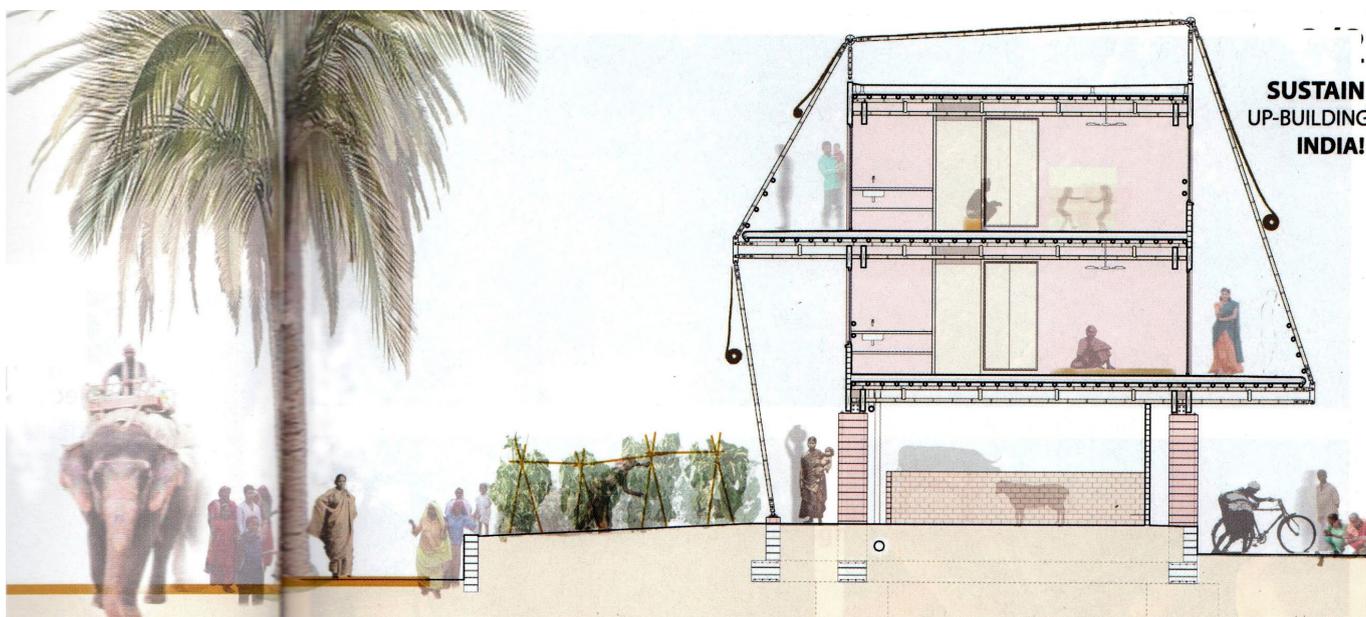


Figura 2. Proyecto presentado al Educate Prize. Fuente: Proyecto europeo Educate (EDUCATE Project Partners, 2012a).

conceptuales y bases de cálculo, hasta ejemplos de diseño e, incluso, ejemplos prácticos desarrollados profesionalmente y construidos. También contemplaba herramientas de comunicación, información y debate entre estudiantes, docentes de todas las escuelas de arquitectura participantes, investigadores (Altomonte *et al.*, 2012) (más de 30), especialistas en la materia y participantes en el proyecto de investigación.

Esta experiencia resultó concluyente en varios aspectos. Primero, demostró que el interés en incorporar las cuestiones medioambientales y de sustentabilidad en la docencia de la arquitectura, por parte de los educadores, era una realidad y, a la vez, una necesidad perentoria (EDUCATE Project Partners, 2012b). Asimismo, se corroboró que el corpus doctrinal riguroso sobre la materia estaba totalmente definido, completado y accesible a educadores y educandos. Y, finalmente, evidenció que existía una gran necesidad de desarrollar estrategias y metodologías docentes nuevas o reinterpretaciones adecuadas a los nuevos enfoques y conceptos transversales que debían incorporarse a la docencia (Masseck, 2017).

Cabe mencionar que la Escuela de Arquitectura de Sevilla cuenta con docentes cuyas trayectorias personales investigadoras llevan décadas dedicadas al medioambiente y la sustentabilidad en arquitectura y urbanismo. El caso de mayor antigüedad y relevancia es el de Jaime López de Asiaín, quien desde los años 80 incorporó el análisis medioambiental y bioclimático de edificios y espacios urbanos (González Sandino y J. López de Asiaín, 1994) en las clases de composición arquitectónica en el marco del Seminario de Arquitectura Bioclimática (Herrera-Limones, 2013). La metodología

de análisis que emplea, posteriormente definida y ampliada (M. López de Asiaín, 2010) (Figuras 3 y 4), constituye la base fundamental de experimentación arquitectónica profesional e investigadora y, sobre todo, la base metodológica y conceptual en la que se apoyan los casos de estudio experimentales desarrollados durante diversas investigaciones (González Sandino y J. López de Asiaín, 1994; J. López de Asiaín, 1997; J. López de Asiaín, 2001), como también la presente experiencia. Es de destacar que el enfoque que este autor desarrolla, combina la praxis arquitectónica con la docencia y la investigación, lo que permite la integración de las tres dinámicas y la retroalimentación de las mismas. Resulta difícil determinar qué dinámica incorpora con anterioridad el enfoque bioclimático y de sustentabilidad: la metodología de análisis de las clases de composición arquitectónica, las investigaciones sobre comportamiento higratérmico de un prototipo para clima cálido seco andaluz, la experimentación sobre un caso construido o las mediciones realizadas y extrapolación a otros proyectos arquitectónico de mayor índole. Por ello, estas se analizan en su conjunto para definir la estrategia metodológica que nutre la presente investigación.

La investigación y la experimentación proyectual física, que no únicamente simulada, alimenta y perfecciona la docencia a través de la reformulación de metodologías de análisis y toma de decisiones. A su vez, dicha docencia mejora la práctica profesional, no sólo personal del arquitecto, sino plural, al promover el desarrollo de capacidades de trabajo en equipo, fundamentales en la actualidad, para el conjunto de los alumnos, de grado, máster y/o doctorado, quienes posteriormente ponen en práctica su capacidad bioclimática en numerosos proyectos (Figura 5).

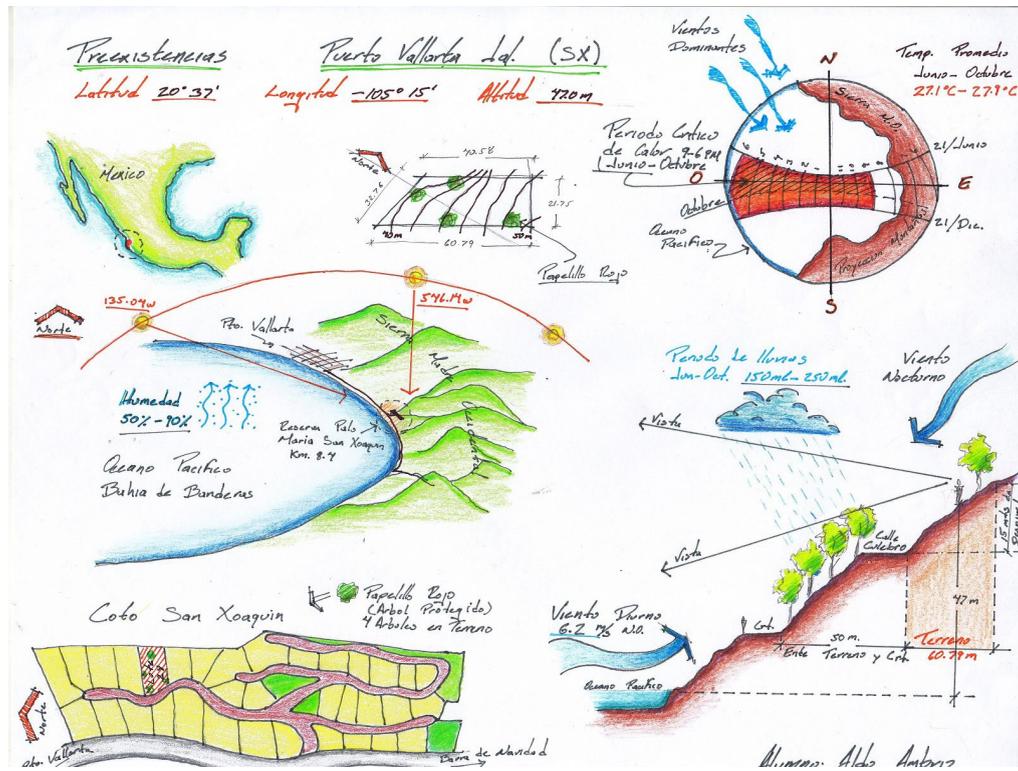


Figura 3. Ejercicio metodológico de análisis bioclimático. Correcciones del entorno. Fuente: Alumno Aldo Ambriz.

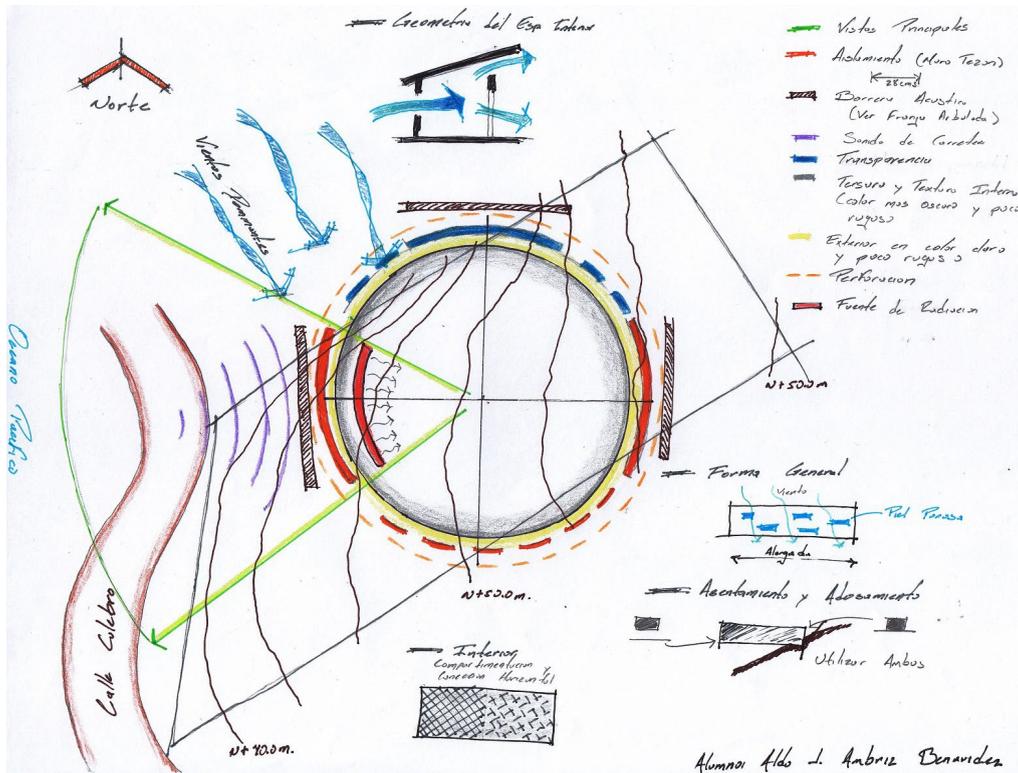


Figura 4. Ejercicio metodológico de análisis bioclimático. Análisis bioclimático de la edificación. Fuente: Alumno Aldo Ambriz.



Figura 5. Proyecto de vivienda bioclimática en Mallorca. Fuente: Alumno Luis Velasco Roldán.

INVESTIGACIÓN- REDES- EXPERIENCIAS PREVIAS

El avance de la investigación, en cuanto a sustentabilidad en el diseño proyectual arquitectónico, se ha visto claramente influenciado y ayudado por las redes de investigación internacionales. Congresos de reconocido prestigio y trayectoria en la materia, como los de PLEA (Passive and Low Energy Architecture²), han generado durante las últimas décadas una red internacional de soporte en investigación sin la cual no habría sido posible el intercambio de experiencias y los avances e innovaciones realizados. Esta red ha proporcionado durante años contacto específico entre investigadores de la Escuela de Arquitectura de Sevilla y de otras universidades europeas y latinoamericanas que han permitido debatir, experimentar y mejorar la incorporación paulatina de los logros en investigación a la docencia arquitectónica, tanto en términos de contenidos como en términos de metodología docente.

Una de las referencias experimentales utilizadas para la metodología empleada en esta investigación fue la experiencia desarrollada en la Escuela de Arquitectura

y Diseño de la Universidad de Colima 2012-2013 para las asignaturas complementarias de proyecto, diseño, hábitat y proyecto urbano (M. López de Asiaín y Luna Montes, 2014). En el desarrollo de estas asignaturas se experimenta desde varios enfoques innovadores: el propio programa docente y su intensificación temporal a modo de taller intensivo, la metodología docente desarrollada y la metodología de análisis bioclimático y de sustentabilidad (Figura 6) transmitida a los alumnos. Los avances de esta experiencia han sido luego incorporados y extrapolados a la docencia en la ETSAS en varias asignaturas y, actualmente, constituyen en gran medida la base de los procesos de innovación docente de los autores.

Con base en las experiencias comentadas, se desarrolla una metodología de análisis y diseño proyectual bioclimático (Figura 7). El objetivo del presente estudio es la comprobación de dicha metodología de análisis y diseño proyectual bioclimático en términos de experiencia educativa, mediante la construcción de un prototipo a escala real en el contexto del Concurso Solar Decathlon Europa 2019.

2 “PLEA is an organisation engaged in a worldwide discourse on sustainable architecture and urban design. It has a membership of several thousand professionals, academics and students from over 40 countries. PLEA stands for “Passive and Low Energy Architecture”, a commitment to the development, documentation and diffusion of the principles of bioclimatic design and the application of natural and innovative techniques for sustainable architecture and urban design. PLEA serves as an open, international, interdisciplinary forum to promote high quality research, practice and education in environmentally sustainable design. PLEA is an autonomous, non-profit association of individuals sharing the art, science, planning and design of the built environment”. (Passive and Low Energy Architecture, 1982)



Figura 6. Concepto de sustentabilidad y habitabilidad. Trabajo alumno Escuela de arquitectura de Colima, México. Fuente: Alumno Carlos Baltazar Ortiz.

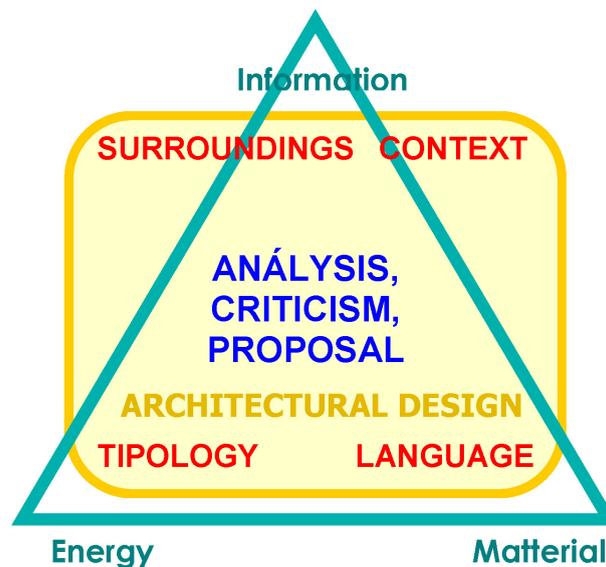


Figura 7. Esquema proceso metodológico proyectual. Fuente: Elaboración de los autores.

Esta metodología de diseño bioclimático, síntesis del proceso de investigación amplio, complejo y colaborativo desarrollado en la ETSAS, tal y como se entiende de lo expresado en los párrafos anteriores, hace uso de diversas herramientas consolidadas. Algunas de ellas son: análisis de geometría solar (Serra Florensa y Coch Roura, 1995), las gráficas sicrométricas de Víctor Olgyay (Olgyay, 1992), Baruch Givoni (Givoni, 1992) y Szokolay (Szokolay, 2008). Se asiste también de numerosos programas informáticos de apoyo, tales como: Heliódón, Archisun, Design Builder o la Herramienta unificada Lider Calener, de relevancia en España.

Para llevar a cabo los objetivos planteados, esta experiencia define un proceso metodológico educativo necesario, basado en el aprendizaje activo por proyectos, que se detalla a continuación.

METODOLOGÍA

La metodología desarrollada por la presente investigación se centra en el desarrollo de las siguientes fases:

- Definición del marco educativo basado en experiencias previas locales consolidadas y

experiencias internacionales de relevancia para la incorporación aspectos de sustentabilidad en la docencia de la arquitectura.

- Determinación de la metodología educativa más adecuada y definición de las variables específicas que la condicionan y/o el enfoque metodológico educativo.
- Determinación del caso de estudio.
- Desarrollo del experimento educativo.
- Extracción de conclusiones y aprendizajes.

El enfoque metodológico educativo posee tres dimensiones: el marco de conocimiento basado en el concepto de desarrollo sustentable en toda su amplitud (medioambiental, social y económica); la metodología de trabajo centrada en el aprendizaje basado en proyectos (el alumno aprende a aprender); y la construcción física del prototipo propuesto como materialización del proyecto solventado y como problema añadido a resolver por parte del alumnado.

EL CONCURSO SOLAR DECATHLON COMO MARCO POTENCIAL

El concurso Solar Decathlon 2019 (Cobo-Fray y Montoya-Flórez, 2021) constituye un marco de experimentación óptimo para la investigación educativa (Chiurini, Grondzik, King, McGinley y Owens, 2013) que se realiza por varias razones:

- Incorpora como requerimiento específico de la propuesta proyectual el enfoque de sustentabilidad medioambiental, social y económica.
- En contraposición con ediciones anteriores, los aspectos urbanos adquieren mayor importancia y el enfoque urbano, por tanto, incorpora la necesidad de trabajar desde la regeneración urbana y la resiliencia social.
- El enfoque del concurso incorpora multitud de aspectos transversales complementarios a los específicamente arquitectónicos (M. López de Asiaín y Cuchi-Burgos, 2005) que obligan a dar una respuesta amplia más allá de la propia disciplina arquitectónica³.
- Es un concurso por y para los alumnos, los cuales se hacen responsables en primera instancia de su propio aprendizaje. Los docentes se incorporan como tutores y mediadores en un plano secundario que fomenta metodologías docentes más dinámicas, prácticas, innovadoras y educadoras, desde un enfoque basado en el concepto de sustentabilidad.
- El requerimiento específico del concurso de construir el prototipo experimental proporciona un marco de trabajo e investigación docente oportuno para la

comprobación de los objetivos de la investigación que se presenta.

Desde sus inicios, el Concurso solar Decathlon ha planteado el componente bioclimático y de eficiencia energética como requerimiento central de sus propuestas y los prototipos presentados a concurso habían de cumplir con dicho requerimiento. El hecho de que el prototipo formulado como objetivo del concurso estuviera siempre constituido como vivienda unifamiliar, unido a la tradición urbanística norteamericana que prima la vivienda unifamiliar frente a la colectiva, ha dificultado, sin embargo, la incorporación de enfoques urbanos más coherentes con el paradigma del desarrollo sustentable.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desde la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla, el enfoque basado en la sustentabilidad que asume el concurso resulta prioritario y absolutamente necesario en términos educativos, por lo que se incorpora a la participación en el concurso con el equipo de la Universidad de Sevilla interpretándolo en términos de investigación educativa. Es tan sólo recientemente cuando el propio concurso comienza a poner énfasis en la relevancia de los aspectos urbanos en materia de sustentabilidad (Herrera-Limones et al., 2017), cuando la investigación educativa adquiere sentido a partir de un prototipo vivienda-propuesta hábitat urbano, construido (Figura 8).

Por otro lado, la participación en dicho concurso del Equipo Solar Decathlon de la Universidad de Sevilla trasciende lo arquitectónico. La oportunidad de trabajar con distintas Facultades y disciplinas a través de sus alumnos y docentes proporciona un marco para la investigación educativa transdisciplinar (Moreno Toledano, 2017) imperioso y pertinente en estos días. El equipo realiza una invitación abierta a participar a las distintas Facultades de la Universidad de Sevilla a través de sus decanos/a y, finalmente, participan en el proyecto para 2019 (Europa y Latinoamérica-Caribe) profesores y/o investigadores de las Facultades de Matemáticas, de Física, de Medicina, de Ciencias de la Educación, de Comunicación, de Psicología, de Económicas y Empresariales, de Bellas Artes, de Biología, la Oficina de Cooperación al Desarrollo o las Escuelas de Ingeniería Informática, la Politécnica Superior o la Superior de Ingeniería de la Edificación (Herrera-Limones et al., 2020). La experiencia se enriquece, además, con la colaboración de investigadores de otras universidades que son invitados como expertos durante el proceso de desarrollo del concurso.

3 Los 10 ítems que define como objetivos el Solar Decathlon son: arquitectura, ingeniería y construcción, eficiencia energética, comunicación y conciencia social, integración urbana e impacto, innovación y viabilidad, condiciones de confort, funcionamiento de la vivienda y balance energético (véase: http://sde2019.hu/index_en.html).

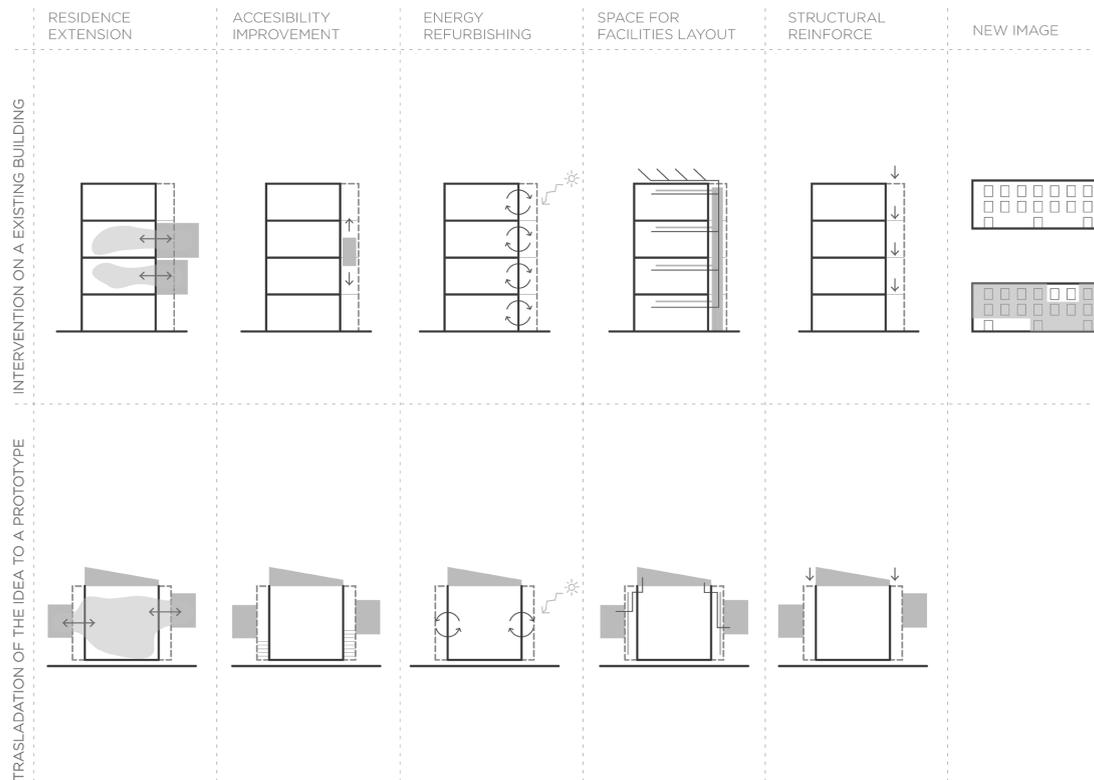


Figura 8. Esquema del 'tipo' desarrollado. Integración y conceptualización urbana trasladada al objeto arquitectónico. Fuente: Elaboración de los autores.

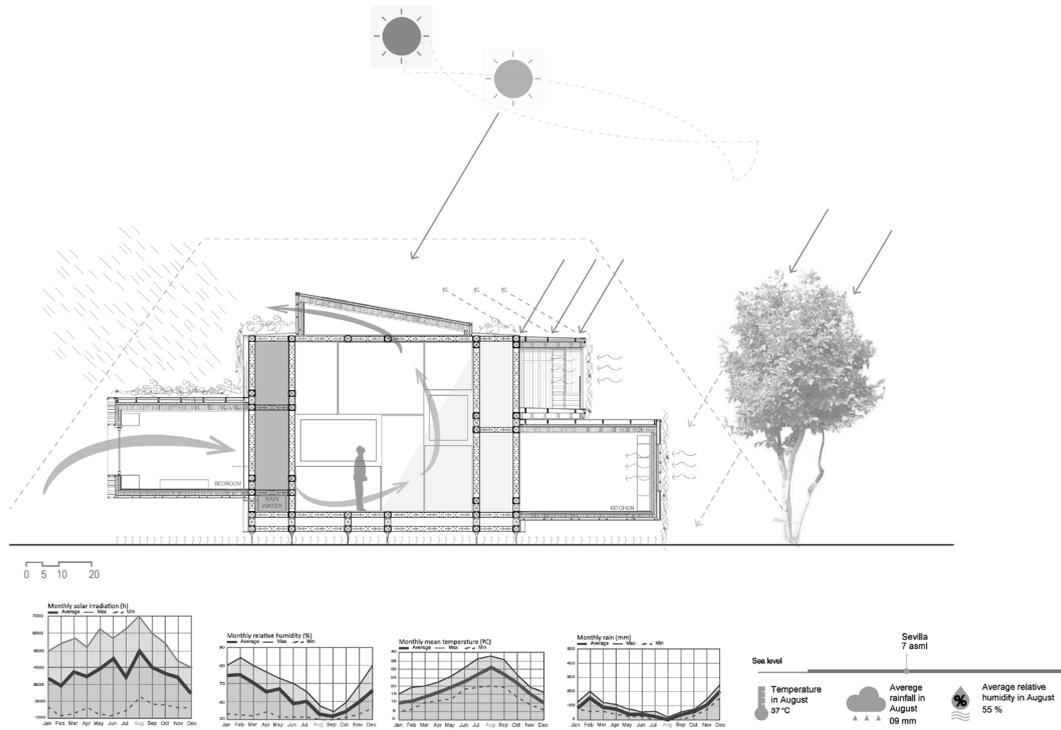
Colaboran, igualmente, en el proyecto de investigación varias redes de innovación docente actualmente activas en la Escuela de Arquitectura de Sevilla, cuyas aportaciones metodológicas son fundamentales para el desarrollo del proyecto. Otras investigaciones paralelas y en desarrollo proporcionan sustento a la experimentación que se plantea. Es el caso de la experiencia del equipo Arus, de la Universidad de Sevilla, que trabaja en el diseño y construcción de prototipos de coches y motos de competición. La colaboración e intercambio con dicho equipo permite, entre otras cosas, avanzar y debatir sobre cuestiones más genéricas pero de gran relevancia de acuerdo con el enfoque metodológico educativo que se está aplicando, como la logística, la gestión, la transmisión del conocimiento entre alumnos de distintos cursos, el liderazgo por parte de los alumnos, etc.

Junto con la consolidación de la metodología de diseño bioclimático, un segundo objetivo en el marco de esta investigación reside en definir y experimentar la potencialidad del prototipo construido (Fernández Saiz, 2016) como herramienta que incorpora el ámbito profesional real a la docencia. De esta forma, los aspectos logísticos, de gestión, económicos, organizativos, forman parte del propio aprendizaje, además de los aspectos puramente disciplinares vinculados al diseño arquitectónico más sustentable. Así, numerosas experiencias previas en diferentes contextos, acompañadas de las propias en la Escuela de Arquitectura de Sevilla ya comentadas, nos han proporcionado las

bases para el enfoque metodológico educativo que aquí se aplica.

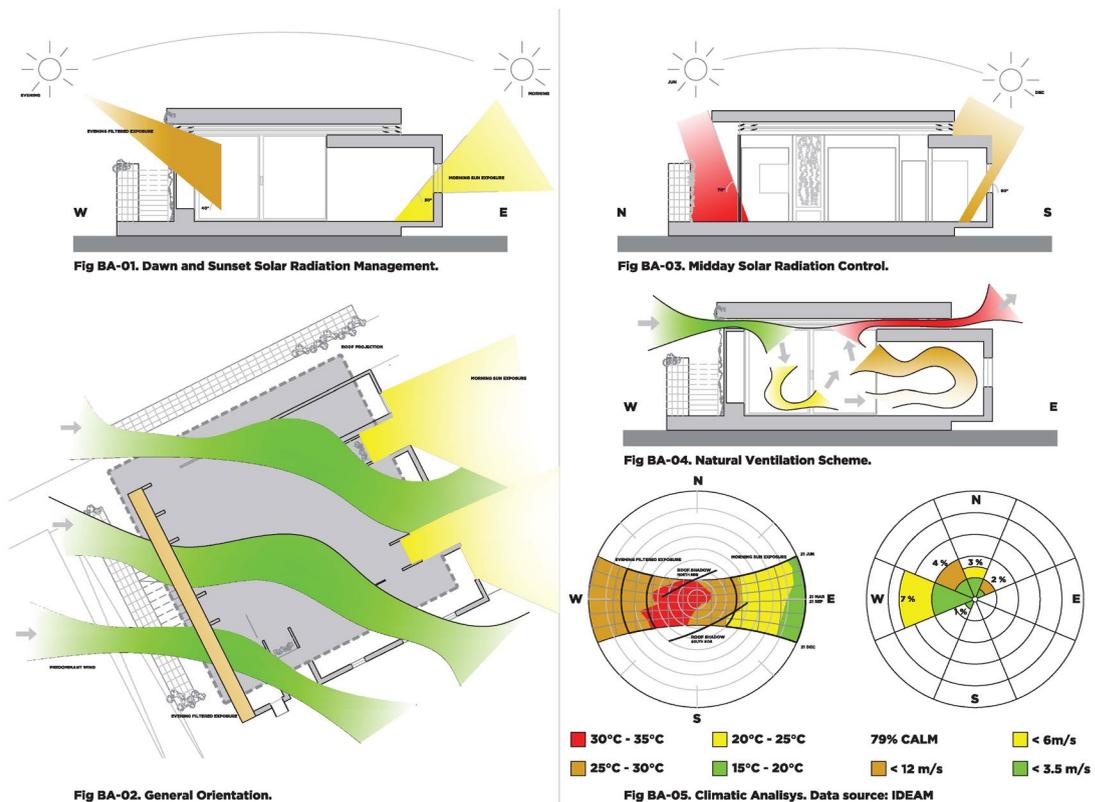
La definición del 'tipo' o 'prototipo' constituye un ejercicio educativo arquitectónico, ya sea académico o profesional, tradicional, que permite la búsqueda y profundización sobre la concepción proyectual del objeto arquitectónico en el que se comprueban requerimientos concretos Figuras 9 y 10). En este caso, se optó por los establecidos por el concepto de desarrollo sustentable. Se analiza, del mismo modo, la adecuación del modelo-prototipo a su contexto, definido como requerimiento de origen del enfoque bioclimático.

Desde la conceptualización, la metodología empleada para el diseño arquitectónico basada en un análisis bioclimático previo de prexistencias (Figura 9) garantiza el ámbito ambiental en el diseño del proyecto (Figura 10), al tiempo que los requerimientos sociales y económicos, estudiados desde el entendimiento y diálogo, tanto con el mercado como con los ciudadanos y sus necesidades específicas, condicionan las decisiones de materialización final y definición constructiva del mismo. Los aspectos más relevantes tenidos en cuenta y logros alcanzados se detallan en la Tabla 1. El proyecto se esboza como una problemática global compleja a solucionar y se aborda desde las diferentes perspectivas y requerimientos arquitectónicos, problema a problema, decisión a decisión, entendiendo el proceso como un viaje de ida y vuelta que se retroalimenta a medida que avanza, reflexiona y se pone en crisis paso a paso.



INTERNATIONAL COMPETITION SOLAR DECAATHLON EUROPE 2019
 PROJECTS DRAWINGS
 April 2019
 BA-001
 Local Climate Analysis
 projects 3.1
 ura

Figura 9. Esquema de análisis bioclimático de preexistencias y comportamiento prototipo. Fuente: Elaboración de los autores.



INTERNATIONAL COMPETITION SOLAR DECAATHLON LATIN AMERICA & CARIBBEAN 2019
 PROJECTS DRAWINGS
 February 2019
 BA-001
 Bioclimatic drawings
 (passive design strategies)
 projects 3.0
 ura

Figura 10. Comportamiento bioclimático del prototipo. Fuente: Elaboración de los autores.

Ámbito económico	
Se realiza un prototipo "Low-Cost" que se priorice el equilibrio de la balanza entre recursos consumidos y resultados obtenidos.	
Ámbito social	
El prototipo se desarrolla en el ámbito de una planificación y gestión urbanística basada en la regeneración de tejido urbano ya edificado, con unas determinadas características de obsolescencia funcional y alto grado de pobreza energética. Se evita propuestas de edificaciones de nueva planta que aborden el consumo y ocupación de nuevo suelo no edificado.	
El objetivo es reducir, reutilizar y reciclar no solo los residuos generados, sino también el propio tejido urbano existente.	
Ámbito medioambiental (bioclimático y ecológico)	
Optimización de los recursos materiales	En el marco del concepto "Low-Cost", se prioriza la utilización de productos y sistemas reciclados, alquilados o prestados, para reducir así el consumo de recursos, emisiones y energía consumidos en el todo el ciclo. Estudiar los sistemas de prefabricación ligera permite controlar y disminuir la cantidad de materia implicada y las emisiones derivadas del proceso edificatorio.
Disminución del consumo energético mediante estrategias pasivas y fomento de energías renovables	Se prioriza la utilización de sistemas pasivos y de captación para el aprovechamiento de energías naturales y las corrientes de aire dominantes del entorno. Se utiliza la ventilación cruzada, un patio central, atomización de los espacios para facilitar su control, iluminación natural, doble piel, control solar, correcta orientación. Se utilizan aislamientos térmicos de alta eficacia en toda la envolvente para evitar puentes térmicos, con una ventilación controlada a fin de mejorar la calidad de aire interior y garantizar el confort interno. Se realizan simulaciones para optimizar la elección y utilización de sistemas y equipos de iluminación y acondicionamiento activos de alto rendimiento de forma puntual.
Disminución de residuos y emisiones	Se prioriza para la construcción la utilización de materiales y sistemas reciclados o alquilados en la estructura, en los cerramientos, en el mobiliario, en las instalaciones, productos que tengan una segunda vida útil y puedan ser remanufacturados en otros procesos constructivos. El uso de sistemas prefabricados facilita la posterior reutilización y ensamblaje en otros proyectos. También se estudia el uso de sistemas de reciclaje interno de agua de lluvia, aguas grises y residuos generados en la propia construcción.
Disminución del mantenimiento, explotación y uso de los edificios	Se efectúa un estudio exhaustivo de las partes del prototipo en cuanto a su ciclo de vida, maximizando las llamadas "tres erres" (reducir-reutilizar-reciclar). Algunas partes empleadas para la construcción del prototipo son alquiladas o prestadas y otras, tras el concurso, son vendidas para su reutilización. El prototipo está diseñado en función de una superficie y durabilidad coherentes con la propia exhibición del concurso. No obstante, en el continuo seguimiento del ciclo de vida útil del mismo se consigue una vez finalizada la exposición: la venta de gran parte del prototipo a un ciudadano de Hungría. Esto permite alargar la vida útil de estos módulos y ahorrar recursos de transporte.
Mejora de la calidad de vida de los ocupantes de los edificios	El estudio del confort interno del prototipo es uno de los pilares de los estudios previos basado en la ventilación natural, una funcionalidad flexible, perfectible y adaptada a las necesidades de los nuevos modelos familiares. Se consigue un equilibrio entre el uso de sistemas domóticos que integran todos estos funcionamientos y optimizan el consumo energético global, con la incorporación de dispositivos pasivos para la regulación del confort (temperatura, movimiento del aire y humedad interior adecuados), además del empleo puntual de sistemas activos de apoyo.

Tabla 1. Aspectos de sostenibilidad abordados en el estudio y construcción del prototipo. Fuente: Elaboración de los autores.

En el ámbito de la construcción, se recupera la tradición mantenida por la Bauhaus respecto del oficio como parte imprescindible y primaria de la formación del arquitecto (Ramos Carranza, 2010), encontrándose en el taller el espacio requerido para la elaboración del proyecto inicialmente y, posteriormente, para su desarrollo constructivo. La construcción física del prototipo (Fernández Saiz, 2016) es una oportunidad educativa de especial relevancia (Figura 11) ya que obliga a los alumnos a enfrentarse a numerosos retos que, de otra forma, no serían sencillos de plantear. En primer lugar, la gestión de los tiempos relativa a la gestión

en obra de diferentes agentes; en segundo lugar, la necesaria profundización en la toma de decisiones, tanto constructivas como estructurales, ya que el prototipo 'ha de construirse'; en tercer lugar, la producción de la información necesaria para la construcción del prototipo en forma de planimetría, y; en cuarto lugar, la gestión y aprovechamiento de las dinámicas de equipo.

La gestión de los tiempos de obra es clave, la unidad de obra depende de la anterior y condiciona los avances; para ello la coordinación en toma de decisiones, producción de planimetría, gestión económica para el



Figura 11. Comienzo de la construcción del prototipo. Fuente: Elaboración de los autores

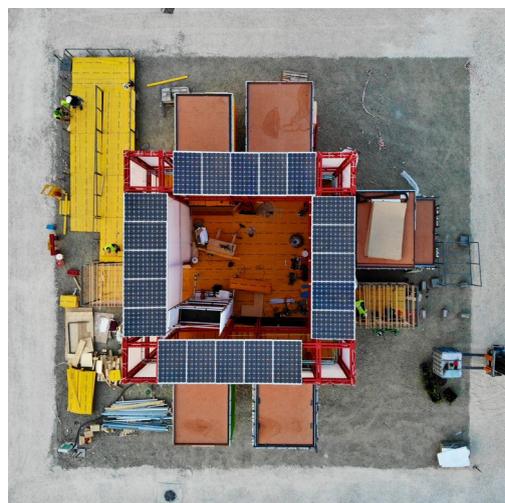


Figura 12. Implantación del prototipo en la localización final. Fuente: Elaboración de los autores.

abastecimiento de materiales, y el propio desarrollo de la construcción, que incluye la gestión de la seguridad en obra, es vital. Los alumnos de arquitectura suelen tener una muy vaga idea de la complejidad de estos procesos y el experimentarlos les da la oportunidad de implicarse en la resolución real de los mismos y la puesta en valor de los procesos constructivos, frente a los procesos de diseño con los que están más familiarizados.

A ello se suma que el proceso de construcción les obliga a profundizar en el diseño constructivo del proyecto y tomar decisiones a las que normalmente no se ven abocados. Enfrentarse a una obra requiere diseñar decidiendo a mayor escala de lo acostumbrado y solucionar problemas sobrevenidos durante el proceso constructivo (Figura 12) que, probablemente, en proyectos meramente académicos serían descartados por considerarse "no relevantes". Ello también exige definir y producir planimetría muy detallada y claramente expresada para su utilización por terceros, quienes pueden no ser diseñadores ni estudiantes.

Este sobresfuerzo resolutivo les proporciona notoria capacidad de reacción y de trabajo. La gestión del equipo y el aprovechamiento de su máximo potencial sumando esfuerzos (Figura 13) quizás es uno de los aprendizajes de mayor valor que se puede adquirir, aunque no es sencillo y debe basarse en la simultaneidad de los aprendizajes integrados del conocimiento (Domingo Santos, 2010). Los estudiantes suelen estar acostumbrados a trabajar en grupo, unos junto a otros, pero de manera secuencial, no integrada, lo cual es totalmente necesario al abordar la colaboración desde un enfoque holístico. Un diseño integrado de un prototipo para el concurso Solar Decathlon exige y promueve la colaboración holística frente a la secuencial tradicional incluso en la profesión arquitectónica entre pares (ya sean arquitectos o ingenieros) que se responsabilizan de diferentes aspectos de un proyecto (estructuras, construcción, instalaciones);



Figura 13. Finalización del prototipo en Hungría. Fuente: Elaboración de los autores.

tal y como comenta Chiuni et al. (2013). La experiencia que supone este concurso durante la fase de construcción, en este sentido, es de gran importancia, aunque básica, debido a los tiempos escasos de maduración del equipo, que siempre demandarían más oportunidades para el aprendizaje colectivo y cooperativo.

Este enfoque metodológico constituye un experimento pedagógico como el desarrollado en Amereida, Ciudad Abierta, Chile (Millán-Millán, 2019), donde se parte de los principios metodológicos de la Bauhaus en su primera etapa y que aúna, en equilibrio, la reflexión teórico conceptual y la práctica real del proyecto arquitectónico. La experiencia constructiva es considerada como una experiencia de vida, no sólo educativa, por sus implicaciones en la formación de la persona y no únicamente en la del técnico. Al afrontar los alumnos cuestiones técnicas prioritarias, urgentes y rigurosas que se ven implicadas en la construcción de un prototipo desde un proceso de toma de decisiones que forzosamente ha de ser consensuado entre muchos -no



Figura 14. Maqueta prototipo Solar Decathlon Europa. Equipo de la Universidad de Sevilla (2019). Fuente: Elaboración de los autores.

decidido por los profesores o un alumno en particular, el ejercicio constructivo conlleva en sí mismo una experiencia vital colaborativa (Figura 13).

El trabajo se acompaña de numerosa planimetría adaptada a cada fase del proceso constructivo. Las maquetas (Figura 14) también son una herramienta fundamental en el desarrollo paulatino del proyecto, adaptándose en escala a la toma de decisiones desde el ámbito de lo urbano, lo arquitectónico y, posteriormente, lo constructivo. El prototipo se elabora mayormente en Sevilla y después se traslada hasta su lugar de competición donde se termina su confección. Este profundo proceso de investigación colaborativa que parte del diseño y adquiere sentido con el de construcción, por parte de los alumnos, resulta una experiencia educativa rara vez reproducida en toda su complejidad experiencial en la Escuela de Arquitectura de Sevilla.

Para el concurso Solar Decathlon Europe 2019 se desarrolló el prototipo AURA 3.1 (Herrera-Limones et al., 2021). El proyecto se basó en una estrategia de construcción sustentable para la regeneración urbana de barrios residenciales obsoletos, a través de la reutilización de edificios existentes teniendo en cuenta el clima mediterráneo, que denominamos Estrategia AURA. El barrio del Polígono San Pablo de Sevilla (España) fue elegido como caso de estudio para la aplicación urbana del proyecto.

La eficacia de la propuesta en términos de sustentabilidad quedó demostrada por los resultados de la competición. Se obtuvo los dos primeros premios obtenidos en las pruebas cuantitativas, basadas en las mediciones *in situ* recogidas con sensores instalados en el prototipo: Condiciones de Confort y Funcionamiento de la Casa (Alonso, Calama, Suárez, León y Hernández, 2022). Además, se consiguió el tercer premio en el concurso de Sustentabilidad, lo que comprueba las enormes posibilidades que tiene la Estrategia AURA en el ámbito

de la regeneración urbana sustentable y comportamiento bioclimático en la rehabilitación de viviendas sociales.

La principal acción regenerativa aplicada consistió en la yuxtaposición sobre un bloque de viviendas sociales de un sistema tecnológico-estructural que aporta nuevas prestaciones tecnológicas y espaciales. Este sistema prefabricado se compone de una envolvente de conexión y módulos de ampliación con las siguientes características: sistema fragmentado que permite una aplicación más generalizada sobre un mayor número de unidades de viviendas y con capacidad de adaptación a los requerimientos específicos de cada edificio/vivienda; sistema progresivo que no requiere una construcción completa para ser operativo; sistema compatible con el uso del edificio durante el proceso de construcción; sistema abierto a la incorporación de futuras necesidades.

Los logros obtenidos en el concurso han permitido continuar perfeccionando las posibilidades de la propuesta, a través del proyecto de investigación titulado "Aplicación directa de Estrategia Aura del Equipo Solar Decathlon- U.S., en rehabilitación de barriadas obsoletas andaluzas", financiado por la Junta de Andalucía (España) y actualmente en desarrollo.

CONCLUSIÓN

La validez del proceso frente al puro carácter finalista de este tipo de estrategias proyectuales docentes, la riqueza de las innumerables situaciones límite planteadas en el camino, como también el aprendizaje bidireccional entre docentes y alumnos, hacen de este tipo de experiencias inmejorables instrumentos de enseñanza en el campo del hábitat social sustentable, dado que durante las mismas se valorizan primordialmente los aspectos bioclimáticos del proceso de ideación, proyecto y ejecución del prototipo.

Esta forma singular de investigar (utilizando los instrumentos del proyecto y la construcción arquitectónica con un prototipo específicamente concebido para cada caso en cuestión) requiere de una previa indagación teórica acerca de cuáles podrían ser los nuevos tipos de sistemas constructivos más sustentables y las soluciones habitacionales ambientalmente más eficientes.

En definitiva, la metodología educativa empleada se confirma como estratégica para la obtención de resultados oportunos que formen al alumno en un marco de sustentabilidad. La metodología activa del aprendizaje basado en proyectos sitúa al alumno frente a la resolución de un problema concreto, para el que dispone del apoyo de sus profesores y del cuerpo doctrinal existente en la materia, pero el que necesita abordar junto a sus compañeros, de manera proactiva, coordinada y resolutoria.

Así, la estrategia de construcción de un prototipo y no únicamente el diseño del mismo con criterios bioclimáticos supone un reto añadido, al implicar ámbitos de la disciplina arquitectónica (sobre todo desarrollo y logística constructiva) que están más allá del proyecto propiamente hablando y que se vinculan a la concreción física del objeto, experiencia a la que los alumnos no suelen enfrentarse. Desde esa óptica, los logros obtenidos en términos de eficiencia del diseño en términos bioclimáticos (constatada por los premios obtenidos y no solo por las simulaciones realizadas), en términos de materialización y construcción final (definición constructiva real), pero también de acercamiento a la realidad compleja profesional (viabilidad organizativa y logística), son múltiples.

Concretamente, el concurso Solar Decathlon ha constituido el marco idóneo para este experimento educativo de incorporación de aspectos de sustentabilidad arquitectura (Chiuini et al., 2013) gracias a sus requerimientos específicos. Los estudiantes, decathletas para el concurso, junto a los profesores e investigadores que los tutorizan y apoyan, han formado un equipo de diseño y construcción que transita el proceso educativo mediante la metodología de trabajo por proyectos y resolución de problemas. La Universidad de Sevilla, que participa asiduamente en la competición desde 2010, ha cerrado (de momento) su participación en este tipo de concursos con el proyecto 'Aura 3.1', construido en Budapest, Hungría, en julio 2019, dentro de la última edición celebrada en Europa.

Los resultados conseguidos permiten afirmar que el enfoque educativo y la metodología educativa empleadas son adecuadas para la incorporación de aspectos de sustentabilidad en la docencia de la arquitectura, no solo desde un punto de vista teórico, sino además de uno prácticos. En efecto, el desarrollo de todo el proyecto supone un avance de relevancia en la transmisión de conocimiento, pero sobre todo de capacidades y habilidades al alumnado de arquitectura. Esto se complementa con otro tipo de habilidades para el trabajo en equipo, que, aunque no específicamente arquitectónicas, sí fortalecen aspectos de sustentabilidad vinculados a la cooperación y colaboración, esenciales en el ámbito social de la misma.

La dinámica metodológica activa, basada en la resolución de proyectos, fue adaptada a los tiempos y gestión correspondientes, planteando las distintas fases de avance en el diseño como problemas a resolver entre alumnos participantes, provenientes de diversas asignaturas involucradas en el proyecto de investigación. De esa forma, los profesores actuaron como tutores de la propia investigación de los estudiantes ayudando a definir objetivos y metas a alcanzar.

La participación de alumnos de diferentes disciplinas (arquitectos, ingenieros, periodistas, comunicadores,

traductores) constituyó un factor de compleja gestión, pero clara mejora del aprendizaje. Hizo posible abordar los retos que definía el concurso desde lo global, de manera holística, reafirmando la complejidad del proceso arquitectónico – constructivo, más allá de la propia disciplina arquitectónica, y proporcionando a los estudiantes un acercamiento experiencial a esta realidad que agudizará su capacidad colaborativa. De igual manera, la experiencia devino un experimento de carácter transversal (Masseck, 2017) dentro de la Arquitectura, donde se hace patente la necesidad de trabajar la complejidad constructiva de un proyecto más allá de su diseño y resolución formal. Con ello, se pudo introducir a los alumnos en la dinámica integral que supone la definición constructiva de un proyecto construido (Alba Dorado, 2019), lo cual supuso enfrentarlos físicamente a la necesidad de materializar constructivamente un diseño (Fernández Saiz, 2016) y garantizar su correcto funcionamiento final.

La dinámica metodológica, que en su planteamiento se ha confirmado como adecuada y muy productiva, sin embargo, ha adolecido de rigurosidad en su aplicación y podemos evidenciar aspectos potenciales de mejora. Algunas propuestas de mejora deben ser enfocadas hacia la mayor implicación de los alumnos en la dirección y gestión del propio proceso. Es posible y deseable que asuman mayor responsabilidad en la toma de decisiones, no ya proyectuales, sino de gestión del proceso de diseño y construcción del prototipo. También es preciso trabajar el involucramiento de un mayor número de alumnos mediante una igualmente mayor difusión de las actividades dentro del ámbito universitario. Numerosas disciplinas que en este caso no han participado pueden incorporarse al proyecto y enriquecerlo como experiencia educativa colectiva.

Por parte del profesorado es fundamental realizar un esfuerzo desde la gestión académica que permita la participación de alumnos sin que ello menoscabe su productividad y resultados académicos vinculados a las asignaturas de los distintos cursos. El aprendizaje que la experiencia de participación en este tipo de concursos proporciona no ha de incrementar la exigencia académica del alumno, sino simplemente variar la metodología de adquisición de conocimientos que deben ser plena y claramente reconocidos desde las diferentes asignaturas implicadas. Desde este enfoque, es necesario definir herramientas de evaluación que permitan valorar los conocimientos adquiridos por todos y cada uno de los estudiantes participantes de forma que la experiencia constituya un itinerario educativo posible vinculado al grado en arquitectura o, incluso, al máster habilitante.

La experiencia desarrollada, sin duda, pone en valor la capacidad educativa que un proceso de diseño y construcción física de un prototipo puede significar para un alumno. El contacto con la realidad constructiva contribuye a acelerar el proceso de maduración arquitectónica y

de interiorización de los conocimientos que adquieren vinculados a cada disciplina arquitectónica trabajada. La metodología implicada le permite experimentar los procesos colaborativos y cooperativos que su futuro laboral demandará y conocer sus potencialidades y debilidades en términos de gestión de equipos, colaboración con pares y con otras disciplinas. Todas estas capacidades resultan hoy en día fundamentales para el quehacer arquitectónico profesional, por lo que la estrategia desarrollada se considera un éxito.

Finalmente, la incorporación del paradigma de la sustentabilidad en la enseñanza de la arquitectura encuentra en esta experiencia una base sólida de desarrollo que concreta los esfuerzos previamente realizados por la Escuela de Arquitectura de Sevilla. La trayectoria ambiental de esta, iniciada con el Seminario de Arquitectura Bioclimática, ahora se concreta con este tipo de experiencias, auspiciadas por la existencia de una línea de investigación en hábitat sustentable en la que participan numerosos grupos, la cual se encarga, a su vez, de velar por el engarce entre los diferentes ámbitos que la sustentabilidad ha sumado en los últimos años, dadas las urgencias del cambio climático y el Marco de referencia de los Objetivos de Desarrollo Sustentable.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alba Dorado, M. I. (2019). Enseñando a ser arquitecto/a. Iniciación al aprendizaje del proyecto arquitectónico. *Jida*, 505. DOI: <https://doi.org/10.5821/jida.2019.8371>
- Alonso, A., Calama González, C. M., Suárez, R., León Rodríguez, Á. L. y Hernández Valencia, M. (2022). Improving comfort conditions as an energy upgrade tool for housing stock: Analysis of a house prototype. *Energy for Sustainable Development*, 66, 209–221. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.12.009>
- Altomonte, S. (2009). Environmental Education for sustainable architecture. *Review of European Studies*, 2(July), 2–5.
- Altomonte, S., Cadima, P., Yannas, S., de Herde, A., Riemer, H., Cangelli, E., de Asiaín, M. L. y Horvath, S. (2012). Educate! Sustainable environmental design in architectural education and practice. *Proceedings - 28th International PLEA Conference on Sustainable Architecture + Urban Design: Opportunities, Limits and Needs - Towards an Environmentally Responsible Architecture, PLEA 2012*. Recuperado de <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84886792414&partnerID=MN8TOARS>
- Blandón González, B. (2018). Propuesta del nuevo modelo didáctico aplicado en construcción. *Jornadas de formación e innovación docente del profesorado*, 1, 58–79. DOI: <https://doi.org/10.12795/jdu.2018.i01.03>
- Blandón González, B. y Vallés Sisamón, A. (2019). Una propuesta de Innovación Docente en el entorno de las asignaturas técnicas = A proposal for Teaching Innovation in the environment of technical subjects. *Advances in Building Education*, 3(1), 34–55. DOI: <https://doi.org/10.20868/abe.2019.1.3883>
- Cangelli, E., Altomonte, S., Yannas, S., de Herde, A., Fink, D., López de Asian, M., Becker, G. y Partners, E. P. (2012). *EDUCATE Portal Development and Testing*. Nottingham: EDUCATE Press.
- Chiuni, M., Grondzik, W., King, K., McGinley, M. y Owens, J. (2013). Architect and engineer collaboration: The Solar Decathlon as a pedagogical opportunity. *Architectural Engineering Conference 2013*, April 3-5, 2013. State College, Pennsylvania, United States. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784412909.021>
- Cobo-Fray, C. y Montoya-Flórez, O. L. (2021). Tuhouse: prototipo de vivienda social sostenible de alta densidad para el trópico. *Revista Hábitat Sustentable*, 11(1), 32–43. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2021.11.01.03>
- Domingo Santos, Juan (2010). Nuevas ilusiones para una Escuela. *Proyecto, Progreso, Arquitectura*, (1), 92–99. DOI: <https://doi.org/10.12795/ppa.2010.i1.07>
- EDUCATE Project Partners (2012a). *EDUCATE Prize International Student Award*. EDUCATE Press/University of Nottingham. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0196-6553\(80\)80011-3](https://doi.org/10.1016/s0196-6553(80)80011-3)
- EDUCATE Project Partners (2012b). *State of the Art of Environmental Sustainability in Professional Practice*. EDUCATE Press/University of Nottingham. DOI: <https://doi.org/10.1192/bjp.112.483.211-a>
- Fernández Saiz, M. del C. (2016). La dimensión material de la arquitectura. Experiencias 1 en 1. *VIII Congreso Regional de Tecnología de La Arquitectura – CRETA*, 10. Recuperado de https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/18827/11_FERNA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Galán Marín, M. D. C. (2018). La docencia de construcción en el máster habilitante en arquitectura: un reto hacia la profesión. *Jornadas de formación e innovación docente del profesorado*, 1, 243–262. DOI: <https://doi.org/10.12795/jdu.2018.i01.14>
- García Sáez, I. (2018). Ciclo de mejora para la adquisición de autonomía y visión crítica en la construcción arquitectónica. *Jornadas de formación e innovación docente del profesorado*, 1, 1341–1360. DOI: <https://doi.org/10.12795/jdu.2018.i01.75>
- Givoni, B. (1992). Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and Buildings*, 18(1), 11–23. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(92\)90047-K](https://doi.org/10.1016/0378-7788(92)90047-K)
- González Sandino, R. y López de Asiaín, J. (1994). *Análisis bioclimático de la arquitectura*. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Arquitectura.
- Granero, A. E. y García Alvarado, R. (2014). Aprendizaje temprano de arquitectura sustentable mediante vistas interiores graduadas. *Revista Hábitat Sustentable*, 4(1), 14–24. Recuperado de <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/440/402>
- Herrera-Limones, R. (2013). *La urdimbre sostenible como táctica para un hacer arquitectónico: de la "arquitectura de países cálidos" hasta los nuevos escenarios y modos de vida emergentes, a través de la dimensión dialógica*. Tesis doctoral. Universidad de Sevilla. Recuperado de <https://idus.us.es/handle/11441/36339>

- Herrera-Limones, R., Gómez García, I., Borrillo Jiménez, M., Iglesia Salgado, F. de la, Domínguez Delgado, A., Gil Marti, M. A., Granados Cabrera, M., López, E., Roa-Fernández, J. y Serrano Fajardo, J. (2017). *Solar Decathlon Latinoamérica y Caribe. Cali 2015 (Colombia), Proyecto AURA*. Recuperado de <https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/59659#XVWWna41WhM.mendeley>
- Herrera-Limones, R., Hernández-Valencia, M., Roa-Fernández, J., Vargas-Palomo, A. C., Guadix-Martín, J. y Torres-García, M. (2021). *La Universidad de Sevilla en 'Solar Decathlon Europe 2019'. Innovación docente a través de un proceso de transferencia de conocimiento*. Recuperado de <http://www.us.es/actualidad-de-la-us/el-equipo-solar-decathlon-de-la-us-recoge-en-un-libro-su-experiencia-con-el>
- Herrera-Limones, R., Rey-Pérez, J., Hernández-Valencia, M. y Roa-Fernández, J. (2020). Student competitions as a learning method with a sustainable focus in higher education: The University of Seville 'Aura Projects' in the 'Solar Decathlon 2019'. *Sustainability*, 12(4). DOI: <https://doi.org/10.3390/su12041634>
- López de Asiaín, J. (1997). *Arquitectura y clima en Andalucía. Manual de diseño*. Sevilla: Dirección General de Arquitectura y Vivienda. Consejería de Obras Públicas y Transportes.
- López de Asiaín, J. (2001). *Arquitectura, ciudad, medioambiente*. Universidad de Sevilla.
- López de Asiaín Alberich, M. (2010). Nuevas metodologías para la incorporación de aspectos de sostenibilidad en la docencia de la arquitectura y el urbanismo. *Temas De Arquitectura*, 1(1). <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/tarquitectura/article/view/868/841>
- López de Asiaín, M. y Cuchi-Burgos, A. (2005). Implications of the term 'sustainability' in architecture: Teaching tools for lecturers. *22nd International Conference, PLEA 2005: Passive and Low Energy Architecture - Environmental Sustainability: The Challenge of Awareness in Developing Societies, Proceedings*, 2(November), 821–824.
- López de Asiaín, M., Echave, C. y Fentanes, K. (2005). A methodological approach to the transference of knowledge. *22nd International Conference, PLEA 2005: Passive and Low Energy Architecture - Environmental Sustainability: The Challenge of Awareness in Developing Societies, Proceedings*, 2(November), 13–16. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84864145229&partnerID=40&md5=f7c8142da3d98cb5c0ca0e58adcefe74>
- López de Asiaín Alberich, M. y Escobar Burgos, C. (2013). Sustainability and Teaching Architecture. Teaching Sustainability To Teachers. *6th International Conference of Education, Research and Innovation, November*, 5436–5441. http://gateway.webofknowledge.com/gateway/Gateway.cgi?GWVersion=2&SrcAuth=ORCID&SrcApp=OrcidOrg&DestLinkType=FullRecord&DestApp=WOS_CPL&KeyUT=WOS:000347240605082&KeyUID=WOS:000347240605082
- López de Asiaín Alberich, M. y Luna Montes, J. G. (2014). Sustainability and Habitability in Architecture. Teaching Complex Concepts. *EDULEARN14 Proceedings*, 4476–4481. Recuperado de http://gateway.webofknowledge.com/gateway/Gateway.cgi?GWVersion=2&SrcAuth=ORCID&SrcApp=OrcidOrg&DestLinkType=FullRecord&DestApp=WOS_CPL&KeyUT=WOS:000366837204092&KeyUID=WOS:000366837204092
- Martínez Osorio, P. A. (2013). El proyecto arquitectónico como un problema de investigación. *Revista de Arquitectura*, 15(1), 54–61. DOI: <https://doi.org/10.14718/RevArq.2013.15.1.6>
- Masseck, T. (2017). Living Labs in Architecture as Innovation Areas within Higher Education Institutions. *Energy Procedia*, 115, 383–389. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.035>
- Millán-Millán, P. M. (2019). De la poesía a la experimentación: la Hospedería del Errante en Ciudad Abierta (Quintero, Chile). *Proyecto, Progreso, Arquitectura*, (20), 106–119. DOI: <https://doi.org/10.12795/ppa.2019.i20.06>
- Moreno Toledano, L. A. (2017). Abordar lo complejo desde el diseño: una mirada hacia la transdisciplinariedad. *Educación y Humanismo*, 19(33), 369–385. DOI: <https://doi.org/10.17081/eduhum.19.33.2650>
- Olgay, V. (1992). *Design with climate : bioclimatic approach to architectural regionalism*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- ONU (2015). Memoria del Secretario General sobre la labor de la Organización. *Naciones Unidas*, 1(1), 1–88.
- Pedreño Rojas, M. A. (2018). El estudio de casos como técnica de mejora docente en la asignatura de taller de arquitectura 6. *Jornadas de formación e innovación docente del profesorado*, 1, 517–530. DOI: <https://doi.org/10.12795/jdu.2018.i01.29>
- Ramos Carranza, A. (2010). Compartir y debatir en arquitectura. *Proyecto, Progreso Arquitectura*, (1), 11-14.
- Ramos Carranza, A. (2018). La Arquitectura sale a escena. Architecture emerges on the scene. *Proyecto, Progreso, Arquitectura*, 19(12–17), 198–200. DOI: <https://doi.org/10.12795/ppa>
- Rivera Gómez, C. A. (2018). Ciclo de mejora para la innovación docente aplicado en materias de un área técnica arquitectónica. *Jornadas de formación e innovación docente del profesorado*, 1, 1170–1190. DOI: <https://doi.org/10.12795/jdu.2018.i01.66>
- Roa Fernández, J. (2018). El aprendizaje de la construcción arquitectónica a partir de los contenidos procedimentales y actitudinales. *Jornadas de formación e innovación docente del profesorado*, 1, 619–636. DOI: <https://doi.org/10.12795/jdu.2018.i01.35>
- Serra Florensa, R., y Coch Roura, H. (1995). *Arquitectura y energía natural (1ª)*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Szokolay, S. V. (2008). *Introduction to architectural science : the basis of sustainable design*. Amsterdam: Elsevier.

OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE AULAS: APROVECHAMIENTO DE LA LUZ NATURAL PARA CONFORT VISUAL EN VILLA MARÍA, ARGENTINA¹

Recibido 28/02/2022
Aceptado 25/05/2022

OPTIMIZATION OF CLASSROOM DESIGN: USE OF NATURAL LIGHT FOR VISUAL COMFORT IN VILLA MARÍA, ARGENTINA

David Salomón

Arquitecto, Proyectista, Secretaría de Planificación Técnica, Servicios y Mantenimiento, Universidad de Villa María (UNVM), Córdoba, Argentina
<https://orcid.org/0000-0003-4029-7737>
arqdavidsalomon@gmail.com

Sofía Avalos Ambroggio

Arquitecta, Docente de Cátedra, Facultad de Arquitectura Urbanismo y Diseño (FAUD-UNC), Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-1520-5389>
sofia.avalos@unc.edu.ar

¹ Este trabajo se llevó a cabo en el marco del Trabajo final Integrador de la Especialidad en Tecnología Arquitectónica (ETArq) de la Facultad de Arquitectura Urbanismo y Diseño, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina (FAUD-UNC).



RESUMEN

El presente trabajo aborda la problemática de la iluminación natural en edificios educativos, enfocándose en el estudio de estrategias de iluminación natural que contribuyan a alcanzar niveles recomendados de confort lumínico dentro de las aulas, correcta distribución de luz y reducción de deslumbramiento. Se analizó, en ese marco, un edificio del campus de la Universidad Nacional de Villa María, Córdoba, Argentina, en el que se evaluó el comportamiento de iluminación natural usando modelos de simulación y mediciones *in situ*. La labor se complementó evaluando el índice Daylight Glare Probability (DGP): verificando ocurrencia de deslumbramiento. El diagnóstico mostró exceso de iluminación en puntos cercanos a aberturas, iluminación insuficiente en puntos lejanos a las mismas, niveles bajos de uniformidad en la distribución de iluminación natural y umbrales intolerables de deslumbramiento. Consiguientemente, se propuso un nuevo ordenamiento del aula, incorporando elementos para la redirección de la luz solar y se verificó su desempeño. Los resultados de la propuesta evidenciaron importantes diferencias. Se consiguió una importante reducción de niveles de iluminación, alcanzando niveles de confort visual para aulas (300-500 lux promedio), mejoras en la uniformidad de luz natural, con su consecuente verificación según los estándares y una reducción significativa de niveles de deslumbramiento por penetración solar directa.

Palabras clave

iluminación natural, confort visual, deslumbramiento, edificios educativos.

ABSTRACT

The present work addresses the problem of natural lighting in educational buildings, focusing on the study of natural lighting strategies that contribute to reaching recommended levels of lighting comfort in classrooms, correct light distribution and glare reduction. In this framework, a building on the campus of the National University of Villa María, Córdoba, Argentina, was analyzed in which the behavior of natural lighting was evaluated using simulation models and *in situ* measurements. The work was complemented by evaluating the Daylight Glare Probability (DGP) index: verifying the occurrence of glare. The diagnosis showed excess lighting at points close to openings, insufficient lighting at points far from them, low levels of uniformity in the distribution of natural lighting and intolerable glare thresholds. Consequently, a new arrangement of the classroom was proposed, incorporating elements for the redirection of sunlight and its performance was verified. The results of the proposal showed important differences. A significant reduction in lighting levels was achieved, reaching levels of visual comfort for classrooms (300-500 average lux), improvements in the uniformity of natural light, with its consequent verification according to standards, and a significant reduction in glare levels due to penetration direct sun.

Keywords

use and management, occupancy, occupant behavior, thermal comfort, bioclimatic strategies

INTRODUCCIÓN

La posibilidad de acceso de luz natural dentro de edificios educacionales es considerada una de las características físicas más determinantes de un aula (Phillips, 1997). Numerosos autores coinciden en que la iluminación natural de calidad dentro de espacios educativos no solo favorece el confort de sus ocupantes, sino que además tiene un impacto directo en el desarrollo de actividades de enseñanza y aprendizaje, así como también en el rendimiento académico de los estudiantes (Gonzalo, Ledesma, Nota y Márquez, 2001; Heschong, Wright y Okura, 2013; Robles Machuca, 2014, entre otros). Por el contrario, la ausencia de una iluminación natural de calidad puede causar fatiga y estrés psicofísico, afectando el estado de ánimo de las personas (Muñoz Núñez, 2010). Se deduce entonces que el acondicionamiento lumínico que incluya iluminación natural de calidad en espacios destinados a la educación es un requisito de fundamental importancia.

En Argentina, las Normas IRAM-AADL constituyen el marco normativo de recomendaciones para eficiencia energética y confort lumínico en edificios institucionales. La Ley de Higiene y Seguridad en el Trabajo N° 19.587 reglamentada por el Decreto N° 351/79 (Capítulo 12 "Iluminación y Color", Artículos 71 al 84 y Anexo IV), incluye exigencias de valores mínimos de iluminación tabulados en la norma IRAM AADL J20-06 (2017) y establece los procedimientos de cálculo de iluminancia media y uniformidad de iluminación, junto con valores admisibles. Asimismo, la Superintendencia de Riesgos de Trabajo (SRT), del Ministerio de Trabajo, Empleo y Seguridad Social elabora procedimientos de medición de iluminación en espacios construidos (Resolución SRT 84/2012).

Ahora bien, las regulaciones y protocolos en torno a este tema son limitados. Las Normas IRAM-AADL son de aplicación orientativa y voluntaria, y no existe un organismo oficial que verifique las exigencias de la Ley 19.587. De esta forma, el objetivo de incluir premisas y estrategias de diseño para confort lumínico recae en la voluntad de equipos profesionales de diseño. La bibliografía en torno al tema señala que, durante la etapa de desarrollo de un proyecto, los diseñadores deben determinar parámetros de disponibilidad y selección de datos apropiados de luz natural que se usarán como base en la propuesta de diseño (Gonzalo et al., 2001; Pattini, 2000). Sin embargo, son pocos los equipos de planificación a cargo del desarrollo de proyectos de edificios educacionales que cuentan con herramientas adecuadas, con un procedimiento establecido para simular el comportamiento de indicadores asociados a la iluminación natural, o con asesorías especializadas en el tema, por lo que resulta muy difícil prever el desempeño futuro del edificio proyectado.

Como consecuencia, muchos edificios construidos tienen problemas de escasa o nula penetración de luz natural durante las horas de trabajo o, por el contrario, excesiva penetración de luz solar y problemas de deslumbramiento. Esto obliga a buscar maneras de contrarrestar los efectos negativos, muchas veces, a través del uso de cortinas interiores que bloqueen el ingreso de luz natural, o bien, complementando la falta de luz con iluminación artificial durante las horas diurnas, con lo cual se desaprovechan los beneficios de la iluminación natural e incrementa el consumo energético del edificio.

El presente estudio se llevó a cabo en conjunto con la Secretaría de Planificación Técnica, Servicios y Mantenimiento de la Universidad de Villa María, Córdoba Argentina. El objetivo radica en analizar el desempeño de un edificio educativo construido y proponer alternativas de mejora para alcanzar niveles recomendados de confort lumínico dentro de las aulas, incorporando estrategias de energía solar pasiva.

ILUMINACIÓN NATURAL EN EDIFICIOS EDUCATIVOS

Tanto el desarrollo de estándares de confort lumínico como la propuesta de recomendaciones de diseño para la incorporación de luz natural en edificios educacionales, han sido objeto de estudio de diferentes institutos y organismos de investigación. En Chile, la Agencia Chilena de Eficiencia Energética (AChEE) desarrolló la Guía de Eficiencia Energética para Establecimientos Educacionales GEEEduc (CITEC-UBB, 2012), que incluye estrategias de diseño para la incorporación de iluminación natural en espacios educativos y recomendaciones para lograr confort visual dentro de las aulas. Piderit y Bodart (2012), asimismo, proponen criterios de diseño para la organización de aulas, estableciendo áreas con distintos requerimientos lumínicos. En la misma línea, otros estudios presentan estrategias de diseño para optimizar la luz natural en oficinas (Piderit y Bodart, 2012; Palarino y Piderit, 2020) y en aulas (Callejas, Pereira, Torres y Piderit, 2020).

En Argentina, la Dirección de Infraestructura del Ministerio de Educación de la Nación (DIMEN) establece condiciones y requerimientos de habitabilidad en edificios escolares en el documento "Criterios y Normativa Básica de Arquitectura Escolar" (DIMEN, 1998). Uno de los objetivos básicos del diseño de edificios se enfoca en "asegurar condiciones de iluminación y ventilación natural como solución principal" (DIMEN, 1998, p. 57). Este documento propone estrategias de diseño en cuanto a orientaciones recomendadas y dimensionamiento de aberturas. A esto se añaden numerosos estudios sobre el uso de iluminación natural en edificios, entre los cuales destacan algunos abocados a la refuncionalización de espacios de trabajo construidos,

Indicador	Rangos					
Iluminancia media (lux)	Insuficiente	Deficiente	Recomendado	Exceso de luz	Disconfort	[1]
	< 200	200 - 300	500-750	2000 - 5000	> 5000	
Uniformidad de iluminación	Insuficiente	Deficiente	Aceptable	Bueno	Exigido	[2]
	< 0.2	0.2 - 0.3	0.3 - 0.4	0.04 - 0.05	> 0.5	
Deslumbramiento (DGP) (%)	Imperceptible	Perceptible	Molesto	Intolerable		[3]
	DGP < 34%	34% < DGP < 38%	38% < DGP < 45%	45% < DGP		

Tabla 1. Indicadores de iluminación natural tenidos en cuenta en el presente trabajo. Fuente: Elaboración de los autores en base a [1] Callejas et al., (2020); Decreto N° 351/79, DIMEN (1998); [2] Callejas et al. (2020); Decreto N° 351/79; [3] Wienold y Christofferen (2006).

ya sean aulas u oficinas, mediante iluminación natural (Ferrón, Pattini y Lara, 2010); a estrategias de diseño de aulas (Pattini, 2009; Cisterna et al, 2015), sobre control de niveles de iluminación y distribución de la luz natural en aulas (Hoses, San Juan, Melchiori y Viegas, 2001; Pattini y Kirschbaum, 2006); a dispositivos de protección de aberturas para evitar radiación solar directa (Ledesma et al., 2004; 2005, Monteoliva, Villalba y Pattini, 2014); al uso de bandejas de luz (Gonzalo et al., 2001; Casabianca y Evans, 2003), y al control de deslumbramiento (Pattini et al., 2009).

INDICADORES DE ILUMINACIÓN NATURAL

La iluminación natural de los espacios interiores de trabajo o lectura debe ser de tipo difusa, uniforme y presentar bajos índices de contraste (Pattini et al., 2009). El nivel de iluminancia (E) está referido a la cantidad de flujo luminoso que emiten las fuentes de luz y que se acerca de forma vertical u horizontal hacia las superficies (Robles Machuca, 2014). El indicador propuesto por el Protocolo de la Resolución SRT 84/2012 para medir Iluminancia es Iluminancia media (Em). Dicho protocolo propone también el cálculo de la Uniformidad de la iluminación (U). Este indicador complementa el análisis de iluminancia, ya que posibilita detectar situaciones donde el promedio correspondiente al valor de Iluminancia media enmascara iluminancias horizontales por debajo del valor aceptable (Pattini et al., 2009). Los espacios educativos requieren un nivel adecuado de iluminancia para garantizar una uniformidad de iluminación (U) relativamente alta sobre el área de trabajo.

El deslumbramiento es uno de los indicadores más influyentes en el confort visual (Monteoliva, Garretón y Pattini, 2021). El modelo de predicción Daylight Glare Probability (DGP), desarrollado por Wienold y Christofferen (2006) es considerado uno de los modelos más precisos para estudiar el deslumbramiento dentro de espacios construidos. Es definido como la probabilidad de disconfort visual percibido por un ocupante, debido a diferencias entre áreas muy oscuras y áreas muy brillantes, causadas por penetración solar directa de una

fuente luminosa o exceso de niveles de iluminación en un ambiente interior (Palarino y Piderit, 2020). Los rangos admisibles de iluminancia media, uniformidad de luz natural y DGP se resumen en la Tabla 1.

METODOLOGÍA

En la actualidad la Universidad Nacional de Villa María (UNVM) está inmersa en un proceso de transformación de su campus universitario, siguiendo lineamientos del Programa "Hacia una Ciudad Universitaria Sustentable" (UNVM, 2019), que incluye un máster plan de desarrollo estratégico, el "Plan Maestro de Infraestructura de la UNVM 2020-2021", impulsado por la Secretaría de Planificación Técnica, Servicios y Mantenimiento (SPTSyM). Uno de los objetivos del Programa es "conocer y analizar las condiciones físicas y niveles de confort que presentan los edificios construidos en el campus, con el fin de proponer intervenciones que ayuden a mejorar las condiciones de trabajo en los espacios áulicos." (SPTSyM, 2020, p. 17). En este contexto, este trabajo se propone evaluar las aulas de uno de los edificios para verificar los indicadores de iluminación natural y plantear alternativas de mejora. La metodología empleada en este estudio (Figura 1) se presenta a continuación.

1. SELECCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

Se eligió un aula que cumpliera con los siguientes criterios: 1. un aula cuya valoración fuese requerida dentro del Plan Maestro de Infraestructura de SPTSyM; 2. un aula que fuera considerada "tipo", en el sentido de que los resultados de la evaluación pudiesen ser extrapolados a otras aulas.

De igual modo, se escogió un determinado edificio, "Institutos II- Rector Carlos Domínguez", el que originalmente fue proyectado como edificio de oficinas administrativas. La falta de espacio físico destinado al dictado de asignaturas hizo que los boxes de oficinas de planta baja fueran usados como aulas de clases. En las Figuras 2 y 3 se muestra el espacio analizado.

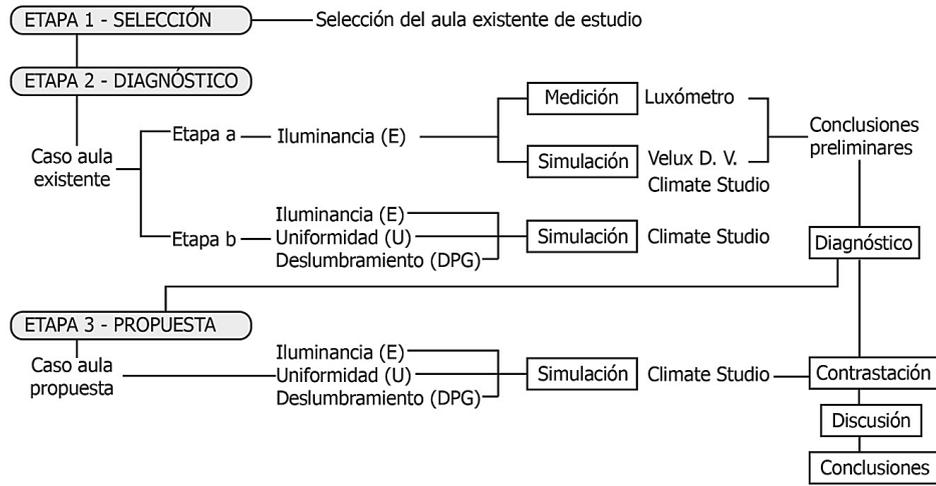


Figura 1. Metodología empleada en este estudio Fuente: Elaboración de los autores.

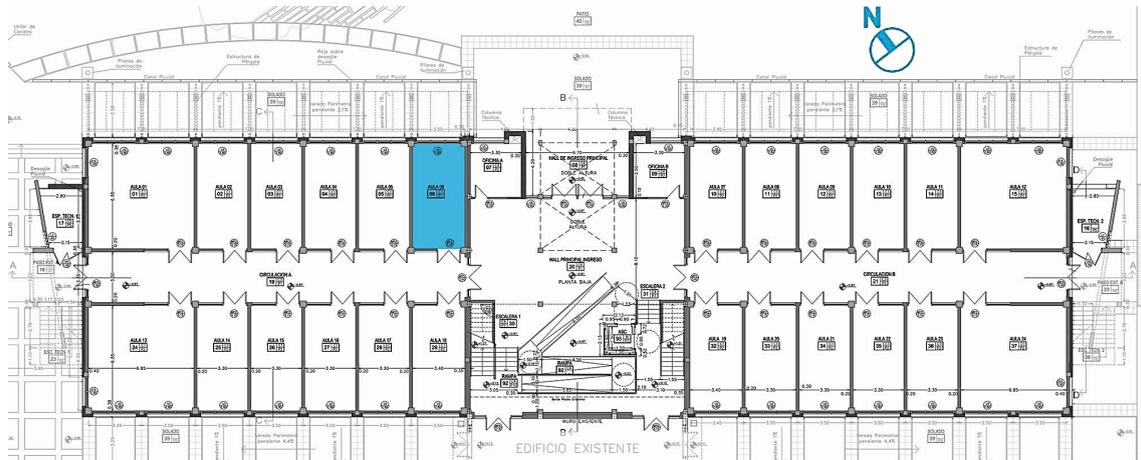


Figura 2. Aula seleccionada. Planta baja del edificio "Institutos II", UNVM. Fuente: Elaboración de los autores.

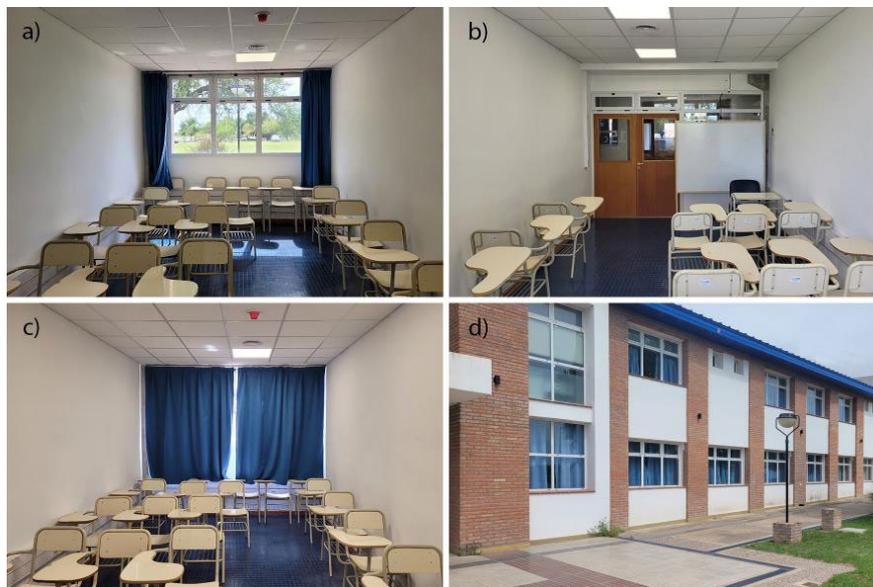


Figura 3. Aula seleccionada. a) Vista interior al fondo del aula. b) Vista interior al frente del aula. c) Vista interior con cortinas cerradas. d) Vista exterior del aula - fachada norte. Fuente: Elaboración de los autores.

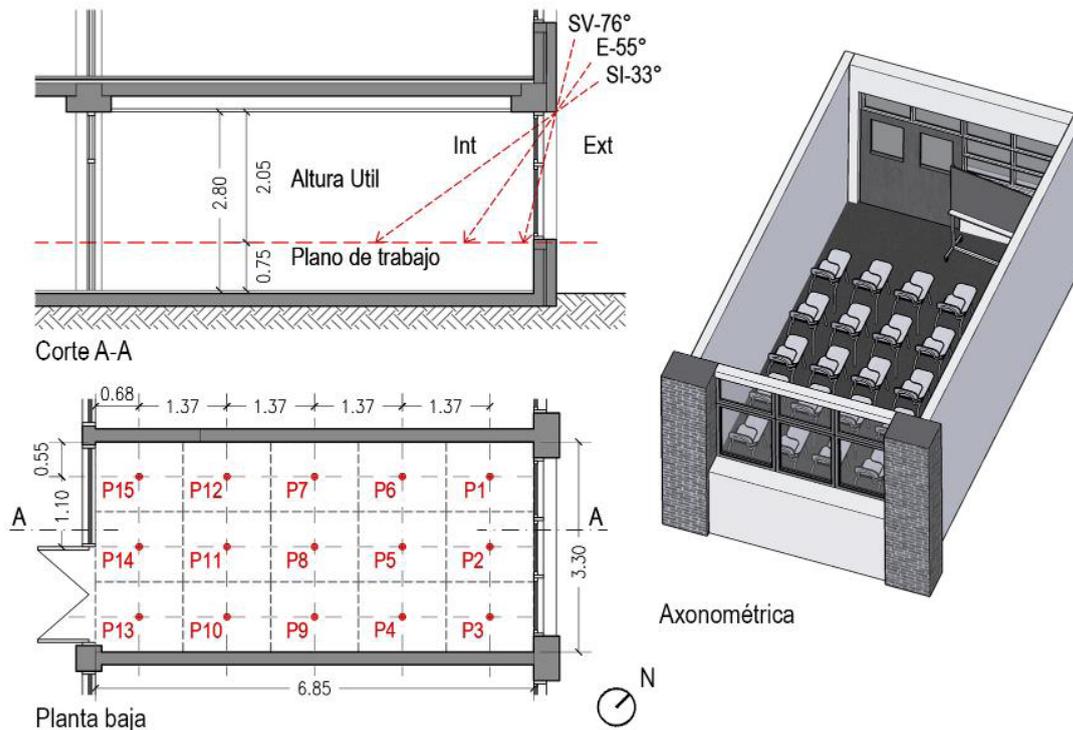


Figura 4. Planta, corte y axonométrica del aula existente con puntos de medición y simulación. Fuente: Elaboración propia.

El aula elegida posee una forma rectangular, de 6.85m x 3.30m. Uno de los lados cortos es un muro exterior, el cual tiene una abertura dividida en 3 paños, orientada al norte y sin protecciones exteriores. El área del pizarrón se ubica al lado de la puerta, por lo tanto, la abertura queda dispuesta en la parte posterior del aula, de espaldas a los pupitres. La abertura cuenta con cortinas interiores opacas, las cuales se cierran cuando el aula está en uso (Figura 3).

2- ETAPA DE DIAGNÓSTICO.

Etapa a

En una primera etapa, se realizó un estudio preliminar de tipo exploratorio, que persiguió dos objetivos. El primero consistió en determinar niveles de iluminación del aula existente, comparando datos obtenidos a través de dos métodos, mediciones *in situ* y simulaciones, y utilizando dos softwares de simulación lumínica: Velux Daylighting Visualizer, desarrollado por la empresa de aberturas Velux, y Climate Studio, desarrollado por Solemma como un *plugin* para Rhinoceros 3D, que utiliza el motor de cálculo Radiance.

Luego, se compararon los datos obtenidos para apreciar si arrojaban resultados consistentes. Se decidió efectuar este estudio el día 28 de agosto de 2019 entre las 9:00 h y las 13:00 h. Tanto las mediciones *in situ* como el uso de softwares de simulación fueron llevados a cabo por arquitectos que trabajan en el área de Planeamiento de la UNVM, es decir, el proceso implicó una etapa de

capacitación previa. Una vez determinada la consistencia de los datos obtenidos, se procedió con el segundo objetivo: evaluar qué estrategia (medición o simulación) y qué software (Velux o Climate Studio) se ajustaba mejor al proceso de trabajo diario seguido por los arquitectos de Planeamiento, para poder sugerir así un método a utilizar en futuros procesos de proyecto.

Las mediciones fueron realizadas de acuerdo al procedimiento descrito en el "Protocolo para la Medición de la Iluminación en el Ambiente Laboral" (Resolución SRT 84/2012). El aula de análisis fue dividida en una cuadrícula de 5 x 3 áreas, de lo que resultaron 15 puntos de medición, un punto por cada pupitre, ubicados a una altura de 0.75m desde el nivel de piso terminado (Figura 4). Las mediciones fueron ejecutadas utilizando un luxómetro calibrado previamente. Se recolectaron datos una vez por hora, a las 10:00 h (con cielo nublado), a las 11:00 h (con cielo intermedio) y a las 12:00 h y 13:00 h (con cielo claro). Las simulaciones fueron configuradas usando la misma grilla y altura de puntos, para contrastar los resultados con los datos medidos.

Etapa b

Una vez ensayados ambos softwares, se determinó que Climate Studio presentaba resultados más ajustados a las mediciones, y su utilización fue accesible y manejable para los arquitectos de Planeamiento. La etapa 2 se enfocó, entonces, en valorar las condiciones de iluminación del aula elegida en base a variables e

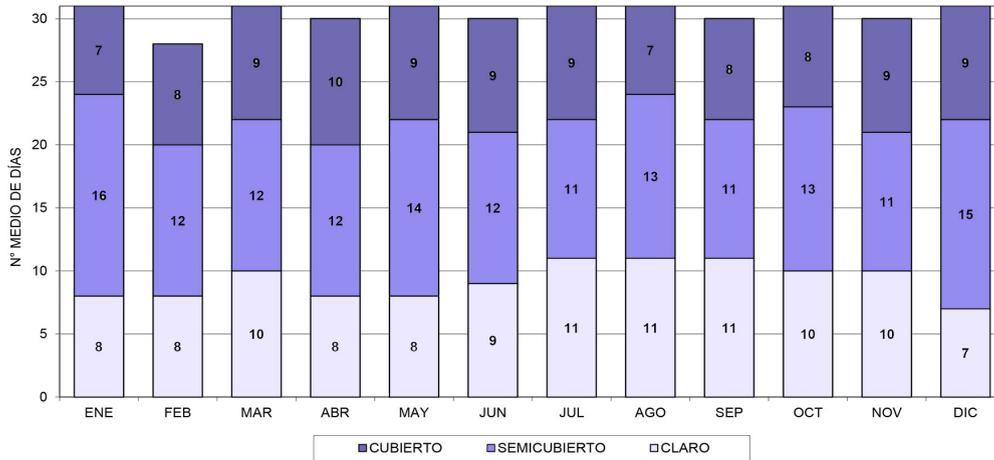


Figura 5. Porcentaje de tipos de cielo (cubierto, semicubierto y claro) a lo largo del año. Fuente: Datos de Estación Meteorológica Aeropuerto incluidos en Gonzalo (2015).

Tipo de Superficie	% Reflex.	Color			Espec.	Rugosidad
	R	R	G	B		
Muros (White Painted Room)	81.19%	0.830	0.808	0.719	0.36	0.200
Piso (Blue Carpet)	6.44%	0.037	0.07	0.300	0.01	0.300
Cielorraso (White Painted Room)	82.20%	0.844	0.817	0.722	0.44	0.200
Equipamiento (Wood Laminate Table)	50.92%	0.603	0.471	0.304	1.41	0.100
Estructura Equipamiento	47.21%	0.456	0.452	0.428	2.07	0.100
Pizarrón (Green Door Panel)	24.10%	0.211	0.254	0.202	0.17	0.200
Carpintería (Aluminio Blanco)	78.24%	0.745	0.773	0.767	1.72	0.200
Bandeja de luz (Whiteboard Paint)	94.42%	0.895	0.897	0.867	4.99	0.010

Tabla 2. Niveles y uniformidad de iluminación en aula existente. Cielo intermedio. Fuente: Elaboración de los autores.

indicadores presentados en la Tabla 1: iluminancia, uniformidad de iluminación y deslumbramiento (DGP) empleando únicamente el software de simulación Climate Studio.

Los valores simulados corresponden a un tipo de cielo intermedio, predominante en Villa María. La Figura 5 expone los porcentajes mensuales de cada tipo de cielo durante los meses del año (cubierto, semicubierto y claro). El cielo predominante es el semicubierto o intermedio.

La Tabla 2 ilustra los tipos de superficies utilizados en las simulaciones, con sus respectivos coeficientes (Reflexión [R], índices de Color RGB, Especificidad y Rugosidad). Los materiales presentados fueron utilizados tanto en el aula existente como el en aula propuesta.

Se mantuvo la cuadrícula de puntos elaborada anteriormente y se optó por armar una grilla que contuviera datos simulados en 3 meses del año y 3

horarios del día. Se eligieron los meses de marzo, julio y noviembre, ya que estos marcan el inicio y finalización del período de clases. Se simularon datos a las 9:00 h, 13:00 h y 17:00 h, en correspondencia con el horario de dictado de clases. Los resultados fueron comparados con rangos admisibles de iluminancia media y uniformidad de luz natural presentes en el Anexo VI Decreto 351/79 (Ley N° 19.587).

El método seleccionado para simular deslumbramiento fue el Daylight Glare Probability (DGP). Para definir el punto de evaluación se consideró la ubicación más desfavorable que pudiera tener un observador dentro del aula. En el caso del aula existente se trató de la posición del docente sentado frente al pizarrón (1.15 m del nivel de piso), ya que para dirigirse a los alumnos debe mirar en dirección a la ventana.

El rango de parámetros de confort lumínico tenidos en cuenta para el análisis de resultados fueron: Iluminancia entre 500 y 750 lux (niveles mínimo y recomendado

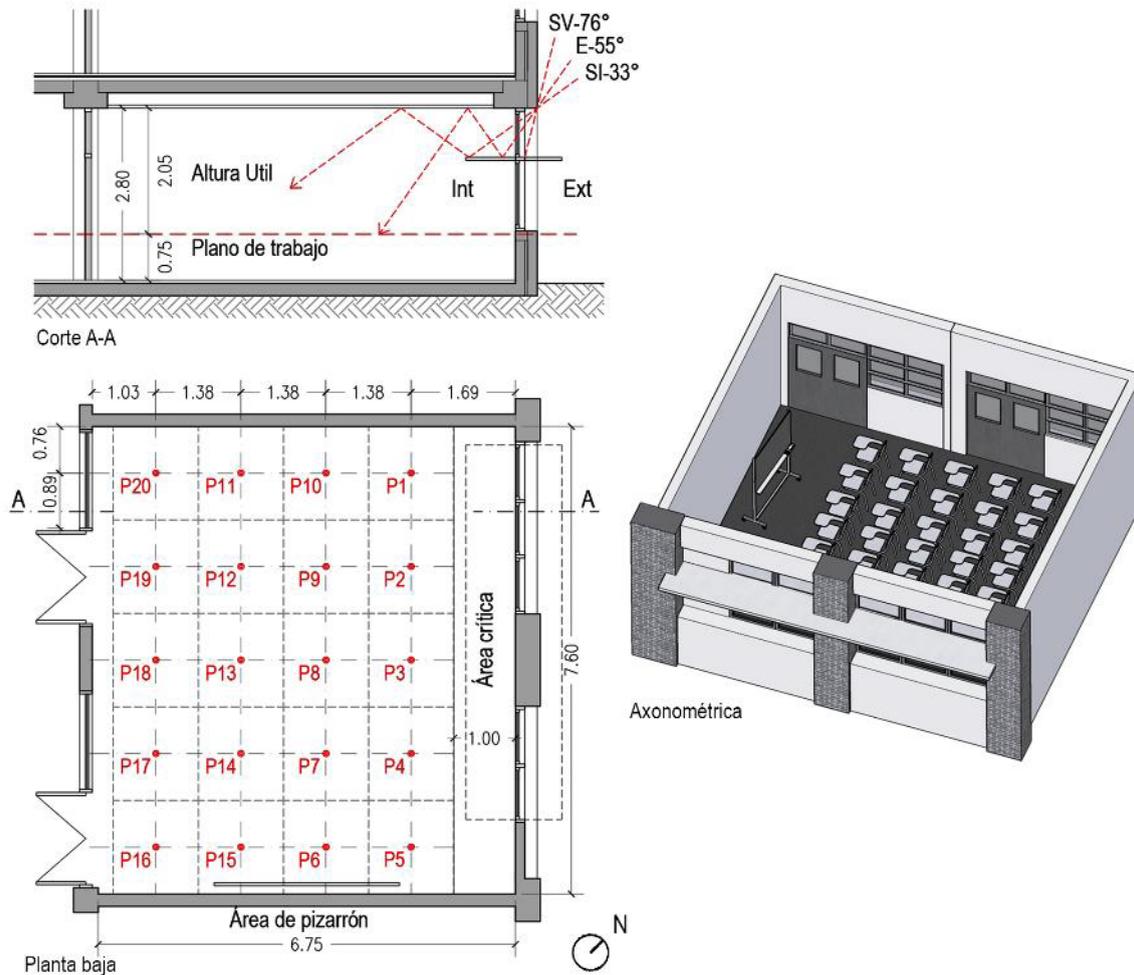


Figura 6. Planta, corte y axonométrica del aula propuesta con puntos de medición y simulación. Fuente: Elaboración de los autores.

para aulas de acuerdo a DIMEN, 1998); Uniformidad de iluminación >0.5 (de acuerdo a la exigencia del Decreto N° 351/79); y un margen de deslumbramiento perceptible hasta 38% (niveles establecidos por Wienold y Christofferen, 2006).

3. ETAPA DE PROPUESTA

Esta etapa implicó la elaboración y evaluación de una propuesta de optimización a partir del diagnóstico realizado, utilizando los mismos indicadores que en la etapa de diagnóstico, a fin de valorar las mejoras.

Se tuvo en cuenta que el edificio es uno construido, por lo tanto, la alternativa planteada debía ser factible de ser ejecutada y de fácil implementación. La propuesta se describe a continuación y se detalla en la Figura 6.

1. Se propuso desmontar el tabique divisorio entre aulas, uniendo dos espacios para formar un aula más grande, de forma cuadrada y con mayor apertura al exterior.
2. Se modificó la ubicación del pizarrón a uno de los tabiques laterales del aula. Además, se planteó

- proteger el área del pizarrón de la penetración solar directa sustituyendo uno de los paños vidriados de la abertura existente por un paño ciego.
3. Se realizaron cambios en la distribución de pupitres, dejando una franja de 1.00 m de ancho a partir del muro exterior (área crítica) para evitar valores de exceso de luz y discomfort visual sobre los planos de trabajo. Con la nueva disposición del pizarrón, las aberturas se disponen del lado izquierdo de los pupitres.
4. Se colocó una repisa de luz, dividiendo la abertura existente en dos paños verticales, para reflejar la luz que incide sobre ella hacia la superficie del techo interior, logrando así una mayor penetración de la luz y una distribución más uniforme.

Al igual que en la etapa de diagnóstico, para definir el punto de evaluación de deslumbramiento, se consideró la ubicación más desfavorable que pudiese adquirir un observador dentro del aula. Luego de modificada la ubicación del pizarrón, la posición más desfavorable ya no es la del docente, sino la de un estudiante sentado en el lado izquierdo del aula, mirando hacia el pizarrón.

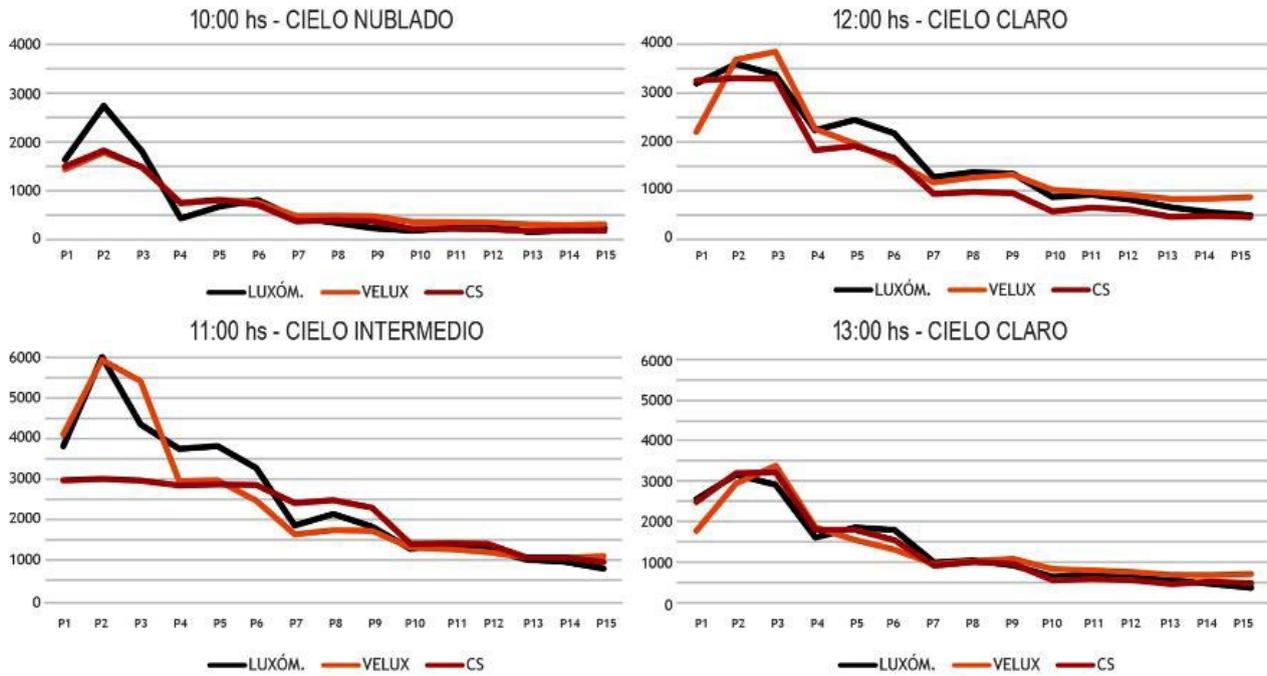


Figura 7. Gráficos comparativos entre resultados medidos y simulados. Fuente: Elaboración de los autores.

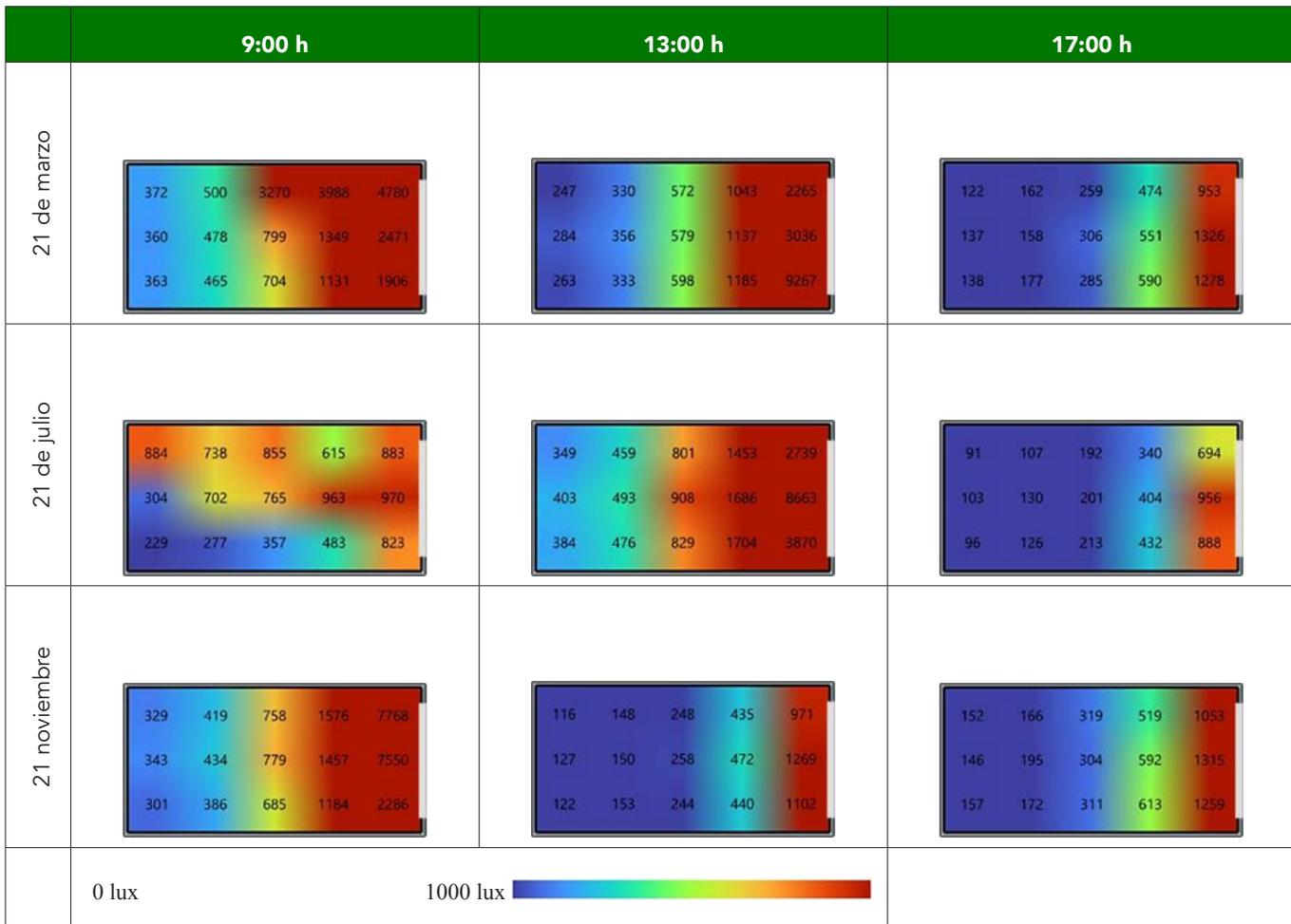


Figura 8. Niveles de iluminación en aula existente. Tipo de cielo intermedio. Fuente: Elaboración de los autores.

	21 de marzo			21 de julio			21 de noviembre		
	9:00	13:00	17:00	9:00	13:00	17:00	9:00	13:00	17:00
P-1	4780	2265	953	883	2739	694	7768	971	1053
P-2	2471	3036	1326	970	8663	956	7550	1269	1315
P-3	1906	9267	1278	823	3870	888	2286	1102	1259
P-4	1131	1185	590	483	1704	432	1184	440	613
P-5	1349	1137	551	963	1686	404	1457	472	592
P-6	3988	1043	474	615	1453	340	1576	435	519
P-7	3270	572	259	855	801	192	758	248	319
P-8	799	579	306	765	908	201	779	258	304
P-9	704	598	285	357	829	213	685	244	311
P-10	465	333	177	277	476	126	386	153	172
P-11	478	356	158	702	493	130	434	150	195
P-12	500	330	162	738	459	107	419	148	166
P-13	372	247	122	884	349	91	329	116	152
P-14	360	284	137	304	403	103	343	127	146
P-15	363	263	138	229	384	96	301	122	157
Emáx.	4780	9267	1326	970	8663	956	7768	1269	1315
Emin.	360	247	122	229	349	91	301	116	146
Emed.	1529.1	1433.0	461.1	656.5	1681.1	331.5	1750.3	417.0	484.9
Un	0.24	0.17	0.26	0.35	0.21	0.27	0.17	0.28	0.30

Tabla 3. Niveles y uniformidad de iluminación en aula existente. Cielo intermedio. Fuente: Elaboración de los autores.

RESULTADOS

DIAGNÓSTICO CASO EXISTENTE

Diagnóstico: Etapa a

En primer lugar, se presentan de manera comparativa los resultados de niveles de iluminación en el aula existente, obtenidos mediante medición y simulación (Figura 7). Puede observarse que los valores simulados son fieles a los valores medidos con luxómetro. A las 11:00 h, la condición de cielo intermedio muestra una mayor diferencia entre los resultados simulados y los medidos.

Se confirma que los valores arrojados por Climate Studio son más cercanos a las mediciones que los obtenidos mediante Velux DV. Esto ocurre ya que Climate Studio tiene un motor de cálculo más preciso.

Los puntos más cercanos a la ventana (P1 a P3) registran valores de más de 1000 lux en los cuatro horarios analizados, excediendo rangos recomendados y llegando, en algunos casos, a alcanzar puntos de disconfort visual (>5000 lux). La totalidad de los puntos medidos y simulados a las 11:00 h presenta valores de exceso de luz (>1000 lux),

con respecto al rango considerado (entre 500 y 750 lux). A medida que los puntos se alejan de la ventana, el nivel de iluminación disminuye. Los puntos P4 a P7 muestran resultados cercanos al rango de confort visual a las 10:00 h (400 a 600 lux), no obstante, desde las 11:00 h hasta las 13:00 h existe exceso de luz (1000 a 2000 lux). Los puntos que se encuentran en el medio del aula (P7 a P12) alcanzan niveles cercanos al confort visual a las 12:00 h y 13:00 h. En los puntos más alejados, P13 a P15, a las 10:00 h, la iluminación disminuye a niveles insuficientes (<200 lux).

Diagnóstico: Etapa b

En seguida, se exponen los resultados de la valoración de los indicadores estudiados durante 3 momentos del año. Con respecto a niveles de iluminación, la grilla de la Figura 8 y la Tabla 3 muestran resultados de niveles de iluminación en los 3 meses y horarios simulados.

Se advierte aquí una relación con resultados anteriores: niveles muy elevados de Emax en puntos cercanos a las aberturas, próximos a los 9200 lux en las primeras horas de la mañana (debido a la existencia de penetración solar directa), que decrecen durante el transcurso del día hasta alcanzar los 1300 lux a las 17:00 h. Los valores de Emin correspondientes al otro extremo del aula evidencian una

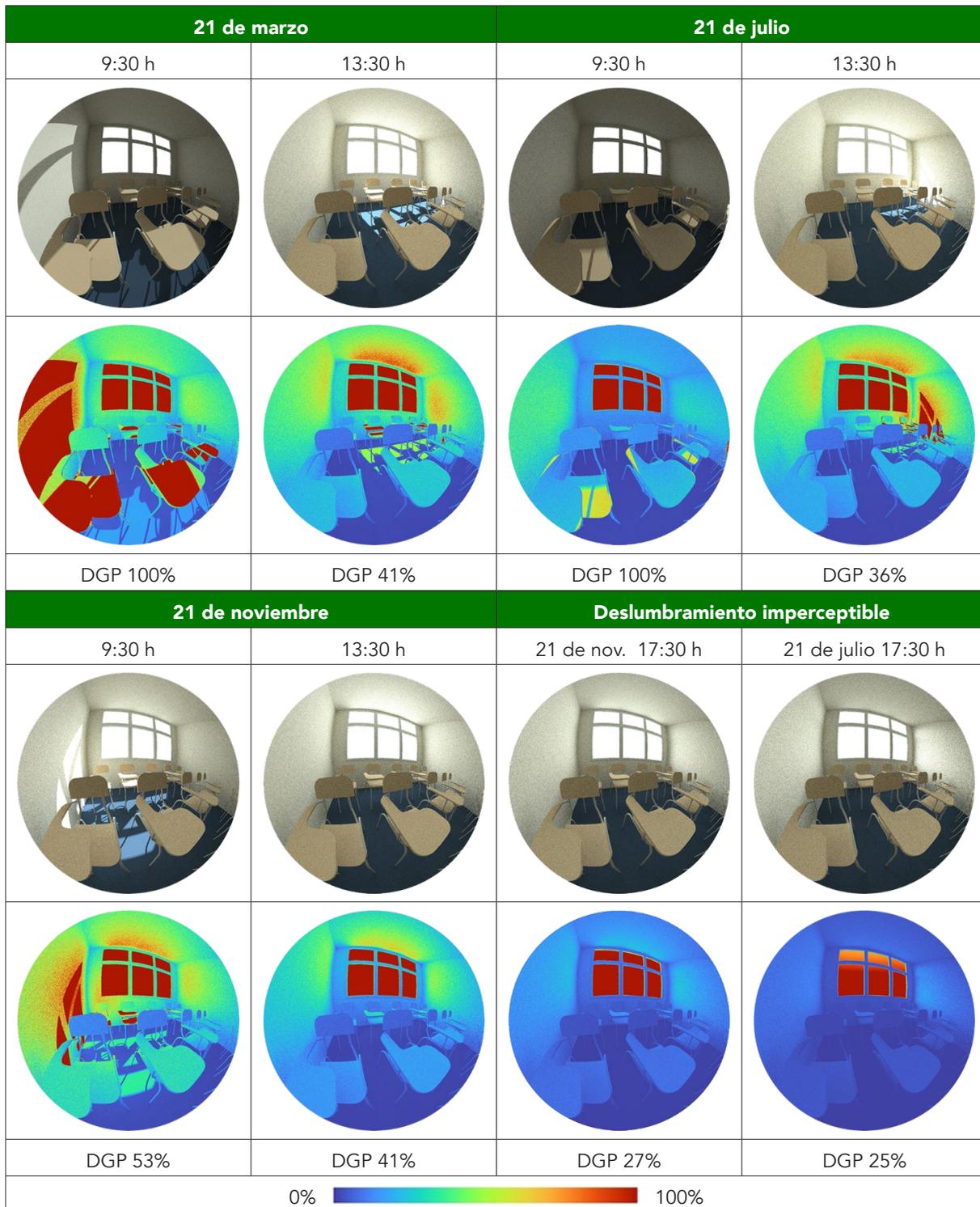


Figura 9. Valores de deslumbramiento DPG (%) del aula existente. Fuente: Elaboración de los autores.

reducción significativa de iluminancia, llegando a niveles menores a 300 lux en los mismos horarios.

En cuanto a la uniformidad en la distribución de luz natural, los valores son, en todos los casos, menores a 0.5, es decir, ninguno verifica a las exigencias establecidas. Solamente uno de los casos (julio a las 9:00 h) presenta una uniformidad aceptable. En general, la uniformidad

de luz es deficiente, ya que hay puntos muy iluminados y puntos muy poco iluminados.

DESOLUMBRAMIENTO

La Figura 9 expresa resultados de índice DGP (%). En ella se puede notar que tales resultados son coherentes con los valores de iluminancia anteriores. La probabilidad de

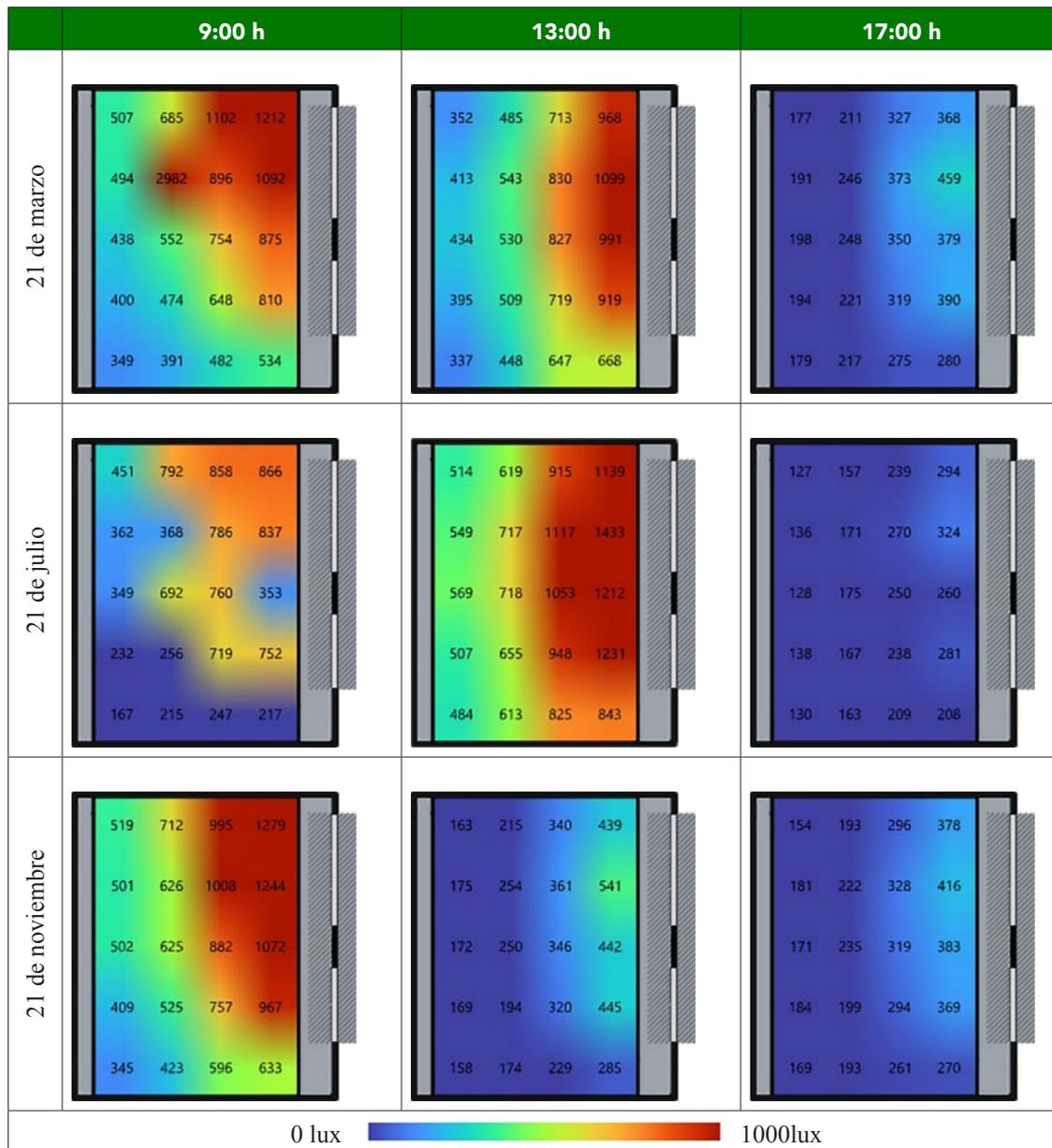


Figura 10. Niveles de iluminación en aula propuesta. Tipo de cielo intermedio. Fuente: Elaboración de los autores.

deslumbramiento es más elevada durante la mañana en todos los casos, llegando a picos del 100% (intolerable) el 21 de marzo y 21 de julio a las 9:30 h, en los momentos de penetración solar directa. Esta situación coincide, además, con los valores más altos de iluminancia y los bajos niveles de distribución de luz.

A partir de las 13:30 los valores empiezan a disminuir. El 21 de julio el deslumbramiento es perceptible de acuerdo a los rangos establecidos (36%). Sin embargo, tanto el 21 de marzo y como el 21 de noviembre siguen presentando valores molestos (41%). A las 17:30 h en todos los casos, la ocurrencia de deslumbramiento es imperceptible, registrándose valores de 29% (21 de marzo), 25% (21 de julio) y 27% (21 de noviembre).

CASO PROPUESTO

NIVELES DE ILUMINACIÓN

La grilla de la Figura 10 y la Tabla 4 exponen resultados de niveles de iluminación del aula propuesta. Por un lado, puede observarse una reducción considerable de Emax, con valores entre 500 y 1000 lux, próximos a las aberturas, presentando un pico de 2962 lux el 21 de marzo a las 9:00 h. Esto ocurre porque la bandeja de luz obstruye la penetración solar directa.

Los puntos en los sectores más alejados de las aberturas tiene valores entre los 350 y 510 lux durante la mañana

	21 de marzo			21 de julio			21 de noviembre		
	9:00	13:00	17:00	9:00	13:00	17:00	9:00	13:00	17:00
P-1	1212	968	368	866	1139	294	1279	439	378
P-2	1092	1099	459	837	1433	324	1244	541	416
P-3	875	991	379	353	1212	260	1072	442	383
P-4	810	919	390	752	1231	281	967	445	369
P-5	534	668	280	217	843	208	633	285	270
P-6	482	647	275	247	825	209	596	229	261
P-7	648	719	319	719	948	238	757	320	294
P-8	754	827	350	760	1053	250	882	346	319
P-9	896	830	373	786	1117	270	1008	361	328
P-10	1102	713	327	858	915	239	995	340	296
P-11	685	485	211	792	619	157	712	215	193
P-12	2962	543	246	368	717	171	626	254	222
P-13	552	530	248	692	718	175	625	250	235
P-14	474	509	221	256	655	167	525	194	199
P-15	391	448	217	215	613	163	423	174	193
P-16	349	337	179	167	484	130	345	158	169
P-17	400	395	194	232	507	138	409	169	184
P-18	438	434	198	349	569	128	502	172	171
P-19	494	413	191	362	549	136	501	175	181
P-20	507	352	177	451	514	127	519	163	154
Emáx.	2962	1099	459	866	1433	324	1279	541	416
Emin.	349	337	177	167	484	127	345	158	154
Emed.	782.9	641.4	280.1	514.0	833.1	203.3	731.0	283.6	260.8
U	0.45	0.53	0.63	0.32	0.58	0.62	0.47	0.56	0.59

Tabla 4. Niveles y uniformidad de iluminación en aula propuesta. Cielo intermedio. Fuente: Elaboración de los autores.

en marzo y julio, alcanzando niveles de confort visual. Será necesario reforzar con iluminación artificial en noviembre a las 13:00 h y en los 3 meses a las 17:00 h, porque los valores son bajos (< de 300 lux).

La uniformidad en la distribución de luz natural registra un aumento en todos los valores, excepto en julio (9:00 h) que muestra una mínima disminución (de 0,35 a 0,32). Los valores más bajos de uniformidad ocurren a las 9:00 h (0.45 en marzo, 0.32 en julio y 0.47 en noviembre), y se acercan mucho a la verificación de las exigencias establecidas en Argentina (0,5). Aun así, se consideran aceptables en el rango presentado. A partir de las 13:00 h, la uniformidad registra resultados superiores a 0,5 en todos los casos.

DESLUMBRAMIENTO

Los resultados de deslumbramiento del aula propuesta se muestran en la Figura 11.

Los resultados obtenidos son coherentes con la reducción de valores de iluminancia y el aumento de uniformidad en la distribución de la luz natural. La probabilidad de deslumbramiento también muestra una reducción significativa durante la mañana en todos los casos. A pesar de esto, los valores siguen correspondiendo al rango de deslumbramiento molesto: de 44% (21 de marzo), 39% (21 de julio) y 35% (21 de noviembre). A partir de las 13:30, los valores se ubican en el rango de deslumbramiento perceptible (31% en marzo y julio) e imperceptible (29% en noviembre y todos los casos a las 17:30 h).

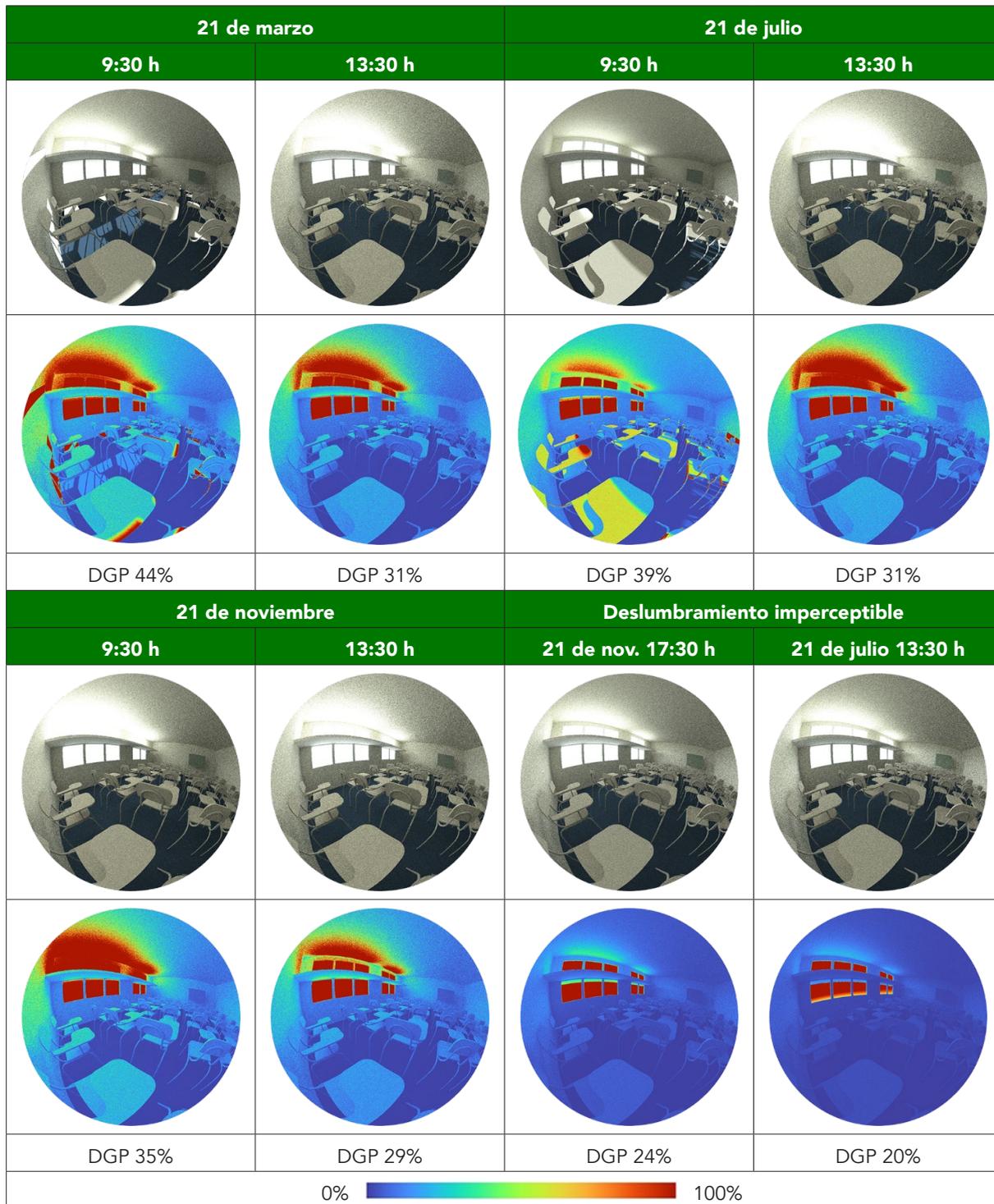


Figura 11. Valores de deslumbramiento DPG (%) del aula propuesta. Fuente: Elaboración de los autores.

DISCUSIÓN

La distribución funcional del aula existente es ineficiente. Los puntos de mayor nivel de iluminación están en la parte de atrás del aula, próximos a la ventana, y no en el punto focal de atención de los alumnos (área del pizarrón). Por lo tanto, en los momentos en donde no están prendidas las luces artificiales, los alumnos arrojan

sombra sobre el plano de trabajo del pupitre. Asimismo, la penetración solar directa existente durante la mañana hace que los pupitres próximos a la ventana tengan exceso de luz en el plano de trabajo, llegando a valores de desconfort visual. Los resultados evidenciaron también que existen problemas serios de deslumbramiento en el punto de vista que tendría una persona mirando hacia la ventana, es decir, comprometiendo el desempeño de

trabajo del docente que mira hacia los pupitres desde el área de pizarrón.

La alternativa propuesta implicó mejoras significativas en el aula. La distribución de pupitres planteada evita que los alumnos arrojen sombra sobre el plano de trabajo, y que el docente mire hacia las ventanas al momento de dar clases. La incorporación de una bandeja de luz posibilitó la obstrucción de la radiación solar directa, impidiendo la incidencia de la misma sobre los planos de trabajo, con lo cual se mejora significativamente los valores de iluminancia próximos a la ventana. Además, la superficie reflectante de la bandeja permitió la reflexión de la luz incidente hacia adentro del aula, posibilitando una distribución más uniforme de la iluminación en el interior del aula. Pese a que se alcanzaron reducciones significativas, los resultados aún pueden mejorarse. Los valores de uniformidad de iluminación todavía son bajos (<0.50) y los valores de deslumbramiento expresan percepción de cierta molestia durante la mañana (44% y 39%). La Tabla 5 resume los resultados obtenidos y los expone de manera comparativa, para evidenciar las mejoras alcanzadas.

CONCLUSIONES

Este trabajo se propuso identificar estrategias de diseño pasivo orientadas a alcanzar niveles recomendados de confort lumínico en espacios interiores de edificios educativos. Los resultados obtenidos muestran el logro de los objetivos planteados. A estos resultados se le suma el beneficio del potencial ahorro de energía eléctrica producto de la utilización de iluminación natural, que podrá ser cuantificado en estudios posteriores.

La discusión de resultados señala que los mismos pueden seguir optimizándose, sobre todo durante los horarios matutinos. En futuros estudios puede proponerse la incorporación de cortinas interiores tipo *roller* con telas *sunscreens*, que actúen como pantallas difusoras, para lograr iluminancias más uniformes y evitar deslumbramientos molestos. De igual forma, los resultados obtenidos podrán tenerse en cuenta en el diseño de integración de iluminación natural con iluminación artificial, en la elección de tipos de lámparas que resulten convenientes.

Tanto el comportamiento del desempeño del aula existente como el diseño de alternativas y la previsualización de resultados fueron posibles gracias a la utilización de herramientas y procedimientos de medición y de simulación, lo que permitió la capacitación de profesionales arquitectos de la SPTSyM- UNVM en el manejo de indicadores asociados a la iluminación natural y su inclusión dentro de prácticas de diseño. El software Climate Studio fue seleccionado por sobre el Software Velux Daylight Visualizer, dado su fácil manejo, su mejor interfaz gráfica, su amplia biblioteca de materiales y sus resultados más ajustados a los valores de las mediciones. Estas herramientas y procedimientos de trabajo serán tenidas en cuenta en el desarrollo de proyectos futuros.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a sus autoridades, Dra. Arq. Mariana Gatani y Mgter. Arq. Gabriela Sánchez. Además, al Arq. Carlos Azócar, Secretario de Planificación Técnica, Servicios y Mantenimiento de la UNVM, Córdoba, Argentina, y a todo su equipo, quienes con su capacidad y experiencia aportaron a la realización de este estudio.

	Indic.	21 de marzo			21 de julio			21 de noviembre		
		09:00	13:00	17:00	09:00	13:00	17:00	09:00	13:00	17:00
AE	E max	4780	9267	1326	970	8663	956	7768	1296	1315
	E min	360	247	122	229	349	91	301	116	146
	E med	1529.1	1433.0	461.1	656.5	1681.1	331.5	1750.3	417.0	484.9
AP	E max	2962	1099	459	866	1433	324	1279	541	416
	E min	349	337	177	167	484	127	345	158	154
	E med	782.9	641.4	280.1	514.0	822.1	203.3	731.0	283.6	260.0
AE	U	0.24	0.17	0.26	0.35	0.21	0.27	0.17	0.28	0.30
AP	U	0.45	0.53	0.63	0.32	0.59	0.62	0.47	0.56	0.59
AE	DGP	100%	41%	29%	100%	36%	25%	53%	41%	27%
AP	DGP	44%	31%	23%	39%	31%	20%	35%	29%	24%

Tabla 5. Análisis comparativo entre aula existente y aula propuesta. Fuente: Elaboración de los autores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Callejas, L., Pereira, L., Torres, P. y Piderit, B. (2020). Optimization of Natural Lighting Design for Visual Confort in Modular Classrooms: Temuco Case. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 503, 012007. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/503/1/012007>.
- Casabianca, G. y Evans, J. (2003). Estantes de luz: Verificación de iluminación natural, asoleamiento y protección solar en maquetas de ensayo. *Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente*, 7(1), 05.25-05.30.
- Cisterna, M., Ledesma, S., Llabra, C., Marquez Vega, S., Martínez, C., Nota, V., . . . Gonzalo, G. (2015). Condiciones de habitabilidad y confort en edificios escolares. Iluminación natural en aulas de escuelas de Tafi del Valle, Tucumán. *Acta de la XXXVIII Reunión de Trabajo de la ASADES*. 3, págs. 01.25-01.37. Mendoza: Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente.
- CITEC-UBB (2012). *Guía de Eficiencia Energética para Establecimientos Educativos (GGGEduc)*. Santiago de Chile: Agencia Chilena de Eficiencia Energética (ACHEE).
- Decreto 351/79(1979). *Anexo IV "Iluminación y color". Correspondiente a los artículos 71 a 84 de la Reglamentación aprobada*. Buenos Aires: Ministerio de Justicia y Derechos Humanos.
- Ferrón, L., Pattini, A. y Lara, M. (2010). Aplicabilidad de sistemas de iluminación natural de bajo costo. Refuncionalización lumínica en una oficina. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 25, 57-63.
- Gonzalo, G. (2015). Manual de Arquitectura Bioclimática. Tucumán: Nobuko.
- Gonzalo, G., Ledesma, S., Nota, V. y Márquez, G. (2001). Evaluación comparativa del comportamiento lumínico y térmico de diferentes soluciones de aventanamientos para escuelas y oficinas de la provincia de Tucumán. *Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente*, 5, 05.13-05.18.
- Heschong, L., Wright, R. y Okura, S. (2002). Daylighting Impacts on Human Performance in School. *Journal of Illuminating Engineering Society*, 31, 101-114.
- Hoses, S., San Juan, G., Melchiori, M. y Viegas, G. (2001). Estrategias de control solar en aulas escolares y análisis de su incidencia en la iluminación natural interior mediante la utilización de modelos analógicos a escala. *Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente*, 5, 05.25-05.30.
- IRAM AADL J20-06 (2017). *Iluminación natural y artificial en industrias*. Buenos Aires: Instituto de Racionalización Argentino de Materiales (IRAM) y Asociación Argentina de Luminotecnica (AADL).
- Ledesma, S., Gonzalo, G., Cisterna, M., Márquez Vega, S., Quiñones, G. y Nota, V. (2004). Evaluación comparativa de eficiencia de parasoles y su incidencia en la iluminación natural de aulas en San Miguel de Tucumán. *Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente*, 8(1), 05.55-05.60.
- Ley N° 19.587 "Higiene y Seguridad en el Trabajo" (1979). Buenos Aires: Ministerio de Justicia y Derechos Humanos.
- Ministerio de Educación [DIMEN] (1998). *Criterios y Normativas básicas de arquitectura escolar*.
- Monteoliva, J., Garretón, J. y Pattini, A. (2021). Comparative Investigation of Daylight Glare Probability (DGP) Comfort Classes in Clear Sky Condition. *Journal of Daylighting*, 8, 284-293.
- Monteoliva, J., Villalba, A. y Pattini, A. (2014). Uso de dispositivo de control solar en aulas: impacto en la simulación dinámica de la iluminación natural. *Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente*, 14, 43-58.
- Muñoz Núñez, D. (2010). La iluminación natural en los espacios arquitectónicos educativos interiores. Modelo de indicadores de diseño. Tesis de Maestría en Ciencias del Hábitat con orientación terminal en Arquitectura. San Luis Potosí, Mexico: Universidad Autónoma San Luis Potosí.
- Palarino, C. y Piderit, B. (2020). Optimisation of Passive Solar Design Strategies in Side-lit Offices: Maximising Daylight Penetration While Reducing the Risk of Glare in Different Chilean Climate Contexts. *Journal of Daylighting*, 7, 107-121.
- Pattini, A. (2000). Recomendaciones de niveles de iluminación en edificios no residenciales. Una comparación internacional. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 4, 7-12.
- Pattini, A. (2009). *La luz natural en las escuelas: aprovechamiento y control de la luz solar en aulas*. Buenos Aires: Editorial Dunken.
- Pattini, A. y Kirschbaum, C. (2006). Iluminación natural en edificios solares. El caso del control y distribución lumínica en aulas de un edificio escolar construido en Mendoza. *Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente*, 10, 05.197-05.201.
- Pattini, A., Rodríguez, R., Lasagno, C., Villalba, A., Córca, L., Ferrón, L. y Rosso, R. (2009). Evaluación de deslumbramiento en edificios con iluminación natural en climas soleados. El caso de una biblioteca con techo vidriado. *Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente*, 13, 05.169-05.177.
- Phillips, R. (1997). *Educational Facility Age and the Academic Achievement of Upper Elementary School Students*. Tesis doctoral. Georgia, Estados Unidos: University of Georgia.
- Piderit, B. y Bodart, M. (2012). Design strategies applied to classroom's daylight design optimization. Optimization of classrooms design. En J. Reiser, C. Jimenez y S. Biondi Antúnez de Mayolo (Eds.), *PLEA 2012 28th Conference: Passive and Low Energy architecture: Opportunities, limits & needs, Towards an environmentally responsible architecture*. Lima, 7 al 9 de noviembre 2012. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2078.1/145792>
- Robles Machuca, L. (2014). *Confort Visual: Estrategias para el diseño de iluminación natural en aulas del sistema de educación básica primaria en el AMM Nuevo León*. Tesis de maestría. México: Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Arquitectura.
- Secretaría de Planificación Técnica, Servicios y Mantenimiento [SPTSyM] (2020). *Plan Maestro de Infraestructura 2020-2021*. Villa María: SPTSyM, Universidad Nacional de Villa María.
- Superintendencia de Riesgos de Trabajo [SRT] (2012). Resolución SRT84-2012. *La Iluminación en el ambiente laboral*. Buenos Aires: SRT, Ministerio de Trabajo, Empleo y Seguridad Social.
- Universidad de Villa María [UNVM] (2019). *Programa "Hacia una Ciudad Universitaria Sustentable"*. Villa María: Universidad de Villa María.
- Wienold, J. y Christoffersen, J. (2006). Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. *Elsevier: Energy and Buildings*, 38(7), 743-757.

USO DE MATERIALES LIGEROS PARA LA PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN DE BAJA DENSIDAD: UNA REVISIÓN LITERARIA¹

USE OF LIGHTWEIGHT MATERIALS FOR THE PRODUCTION OF LOW-DENSITY CONCRETE: A LITERARY REVIEW

Liseth Díaz-Merino

Bachiller de en Ingeniería Civil, Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Señor de Sipán, Chiclayo, Perú
<https://orcid.org/0000-0002-7339-9898>
dmerinoliseth@crece.uss.edu.pe

Luis Fernando Altamirano-Tocto

Bachiller de en Ingeniería Civil, Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Señor de Sipán, Chiclayo, Perú
<https://orcid.org/0000-0002-9126-8787>
atoctoluisferna@crece.uss.edu.pe

Sócrates Pedro Muñoz-Pérez

Doctor en Gestión Pública y Gobernabilidad, Director de la Escuela de Ingeniería Civil, Profesor- Investigador,
Universidad Señor de Sipán, Chiclayo, Perú
<https://orcid.org/0000-0003-3182-8735>
msocrates@crece.uss.edu.pe

1 Agradecer a la Universidad Señor de Sipán que nos ha dado las herramientas como acceso a las bases de datos para poder realizar la búsqueda de la literatura usada en el presente manuscrito.

RESUMEN

A lo largo del siglo XX la industria de la construcción viene empleando grandes cantidades de hormigón, en consecuencia, ha aumentado la demanda de los agregados naturales, de manera que se hace necesario contrarrestar el uso de estos. Frente a tal contexto, el presente trabajo tiene como objetivo presentar una revisión literaria del uso de materiales ligeros para producir hormigón de baja densidad, el cual posee aislamiento térmico que se produce principalmente con agregados ligeros. En ese marco, se revisaron 52 artículos indexados entre los años 2017 y 2021 en la base de datos de Scopus. Los resultados revelaron que, empleando ceramsite de lodo como árido, se puede obtener una densidad de 1251 kg/m³ y, con agregados de arcilla expandida, se puede obtener resistencias a la compresión desde 17.7 a 66.1 MPa. En conclusión, se logró determinar que con el uso de materiales livianos en la producción de hormigón se puede disminuir su densidad, además de contribuir en la reducción de daños que se generan al medio ambiente.

Palabras clave:

agregados ligeros, aislamiento térmico, hormigón de baja densidad, residuos.

ABSTRACT

Throughout the 20th century, the construction industry has been using large quantities of concrete. Consequently, the demand for natural aggregates has increased, making it necessary to counteract their use. In this context, this work aims at presenting a literature review of the use of lightweight materials to produce low-density concrete, whose thermal insulation is mainly made using lightweight aggregates. In this framework, 52 articles indexed between 2017 and 2021 in the Scopus database were reviewed. The results revealed that, by employing ceramsite sludge as an aggregate, a density of 1,251 kg/m³ can be obtained and, with expanded clay aggregates, compressive strengths from 17.7 to 66.1 MPa can be obtained. In conclusion, it was determined that the use of lightweight materials in concrete production can reduce its density, in addition to contributing to the reduction of environmental damage.

Keywords:

lightweight aggregates, thermal insulation, low-density concrete, waste.

INTRODUCCIÓN

El hormigón es el material más empleado en la industria de la construcción: solo en el año 2015 se empleó 20 mil millones de toneladas en el mundo. Este material está compuesto por agregados convencionales que se proporcionan entre un 55 y un 88% del volumen total del hormigón y se estima que para el año 2023 su producción aumentará a un total de 48.3 mil millones de toneladas, lo cual puede conducir a una sobreexplotación en las canteras de agregados (Pokorný, Ševčík, Šál y Zárbynická, 2021). El hormigón es utilizado ampliamente en la construcción de estructuras como edificios, puentes y proyectos de conservación de agua (Ojha, Singh y Behera, 2021). Dichas estructuras, una vez cumplido su horizonte de vida son destruidas y desechadas, de manera que generan grandes daños en el ambiente (X. Sun *et al.*, 2021).

El consumo de energía ha atraído una atención considerable por parte de gobiernos, las industrias y la comunidad científica. A partir de la falta de recursos de energías disponibles se han planteado diversas investigaciones sobre materiales que sean eficientes (Jones, Ozlutas y Zheng, 2017). En ese contexto, se han dedicado muchos esfuerzos al estudio de nuevos materiales en la ingeniería que pueden absorber la energía, como el hormigón liviano, lo que representa un gran paso para reducir la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (Palanisamy *et al.*, 2020).

Es por ello que, en países con mayor solvencia económica y tecnológica ligada a la investigación, se viene implementando el uso de áridos ligeros en el hormigón, en búsqueda de un material de construcción que contribuya a cuidar nuestro planeta (Ajey Kumar, Karthik y Mangala Keshava, 2020). Este tipo de tecnología disminuye impactos perjudiciales para el medio ambiente, al tratarse de productos industriales o naturales que se pueden reutilizar en reemplazo de los agregados convencionales, pues desempeñan funciones similares a estos en el hormigón (Kailash y Rashmi, 2018) y, asimismo, generan alternativas de solución ante la escasez de recursos naturales (X. Sun *et al.*, 2021). De esta forma, es posible reciclar materiales de desecho obteniendo agregados ligeros para así fabricar un hormigón que sea amigable con el medio ambiente (Hamidian y Shafgh, 2021).

El hormigón ligero también llamado "hormigón especial de baja densidad", el cual posee aislamiento térmico avanzado, se produce principalmente con áridos ligeros o una matriz celular (Y. Sun *et al.*, 2021). Estos componen cerca del 50% del volumen del hormigón, mientras que el material hecho de una matriz celular, generalmente, se conoce como "hormigón espumado" debido a los poros que le son introducidos por un agente espumante (Chung, Sikora, Stephan y Abd Elrahman, 2020).

El hormigón con áridos ligeros se puede obtener de forma natural o procesando residuos ambientales e industriales. Gracias a las diferentes propiedades útiles del hormigón ligero como material de construcción está siendo cada vez más conocido (Pateriya, Dharavath y Robert, 2021). Dado que aporta baja densidad, reduce las cargas muertas en las construcciones (Al-lami y Al-saadi, 2021), de manera que estos hormigones permiten producir elementos estructurales con menor peso propio, por lo que mejoran la capacidad de carga lo que, a su vez, posibilita su uso en elementos constructivos como muros portantes, puesto que, además, es un material eficaz de aislamiento térmico (Appavuravther, Vandoren y Henriques, 2021). En ese sentido, el uso de hormigón ligero estructural dará lugar a una estructura menos pesada que logra aminorar cualquier fuerza lateral provocada durante un terremoto (Yinh *et al.*, 2021).

En definitiva, el objetivo principal del uso de hormigón ligero es simplificar el diseño de elementos estructurales con el propósito de crear infraestructuras sostenibles. La aplicación de estos en la construcción reduce los costos, facilita el proceso de construcción y tiene la ventaja de ser un material de construcción relativamente "verde" (A. Mohamed, E. Mohamed, Sang-Yeop, Pawel y Dietmar, 2019). Hoy en día existen distintos tipos de hormigones ligeros, según el árido ligero utilizado, tales como, la arcilla expandida, plástico, madera, cerámica, así como los materiales porosos naturales como la piedra pómez, que normalmente se utilizan como agregado en las mezclas de hormigón ligero (Strzałkowski, Sikora, Chung y Elrahman, 2021). En la misma línea, se tiene en cuenta su aplicación tradicional en la industria de la construcción, por ejemplo, en bloques de hormigón ligero prefabricados hechos de agregados de arcilla expandida, los cuales se pueden utilizar en muros de albañilería, así como también en diferentes elementos estructurales, tales como columnas y losas aligeradas (Hücker y Schlaich, 2017).

Concretamente, el propósito de este artículo es exponer la revisión literaria llevada a cabo en torno al uso de materiales ligeros capaces de producir hormigones de baja densidad.

METODOLOGÍA

El presente artículo de revisión se encuentra enmarcado dentro de un proceso experimental con carácter exploratorio, que tiene como objeto de análisis diferentes artículos de revistas especializadas en los estudios relacionados con hormigones de baja densidad y materiales ligeros, los cuales son empleados en la obras de construcción. Así, se procedió a realizar la búsqueda en la base de datos Scopus desde el año 2017 hasta el 2021, utilizando las palabras claves en inglés "*lightweight materials in low-density concrete*", "*materiales ligeros en hormigones de baja densidad*", e incorporando los operadores booleanos "*and*", "*or*" y "*and not*". Con

Base de datos	Año de publicación					Total
	2017	2018	2019	2020	2021	
Scopus	3	1	4	13	31	52
Total	3	1	4	13	31	52

Tabla 1. Distribución de artículos referenciados de acuerdo al año de publicación y base de datos. Fuente: Elaborado por los autores.

Base de datos	Palabras claves con operadores booleanos	Documentos encontrados	Años de búsqueda	Filtros de búsqueda	Documentos encontrados usando los filtros	Documentos seleccionados
Scopus	(Lightweight AND materials) AND (low-density AND concrete)	158	2017-2021	Área: "Engineering"	34	7
				"Material Science"		
				Tipo de documento: articulo		
	(Lightweight AND materials) OR (low-density AND concrete)	33368	2017-2021	Área: "Engineering", "Material Science"	7456	32
				Tipo de documento: articulo		
	(low-density AND concrete) AND NOT (lightweight AND materials)	678	2017-2021	Área: "Engineering"	138	13
"Material Science"						
Tipo de documento: articulo						

Tabla 2. Resumen, criterios, y resultados de búsqueda en la base de datos Scopus. Fuente: Elaborado por los autores.

el operador "and" se encontraron 154 artículos, para luego filtrar según las áreas de "Engineering", "Material Science" y tipo de documento, "article"; proceso del que resultaron 34 artículos, de los cuales se seleccionó 7. Se repitió la maniobra con el operador "or", para encontrar 33. 368 documentos; posteriormente, se filtró según el área y el tipo de documento, obteniéndose 7. 456, de los cuales se seleccionaron 32 artículos. Y, por último, con el operador "and not" se encontraron 678 documentos, que después de filtrar según el área y el tipo de documento, resultaron en 138, de los cuales se escogió 13 artículos. En la Tabla 1, Tabla 2 y Figura 1 se expone esta metodología con mayor detalle.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

MATERIALES LIGEROS

El agregado ligero es beneficioso porque disminuye las cargas muertas de una estructura y proporciona curado interno para mitigar el agrietamiento temprano, así como también reduce los efectos de un terremoto (Muralitharan y Ramasamy , 2017). Sin embargo, la dosificación de la mezcla y la manipulación de hormigón de agregado ligero (LWAC) recién mezcladas no son tan sencillas como las del hormigón convencional (J. Kim, Lee y Y. Kim, 2021).

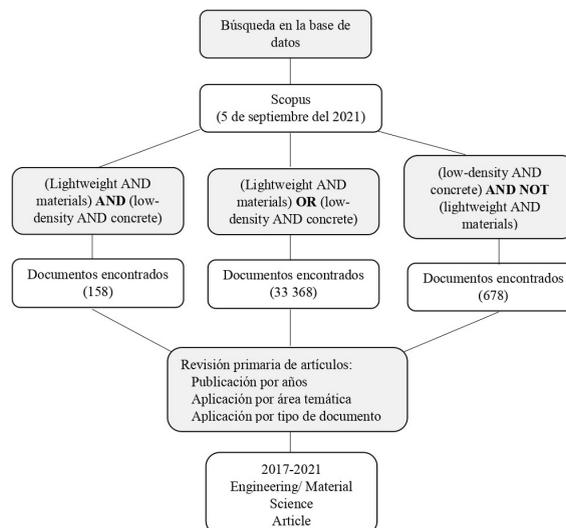


Figura 1. Búsqueda de artículos en la base de datos de Scopus. Fuente: Elaborado por los autores.

La industria de la construcción tiene un gran impacto en el crecimiento económico, pero al mismo tiempo es conocida como uno de los principales consumidores de recursos naturales y energía para la fabricación de materias primas en todo el mundo (Chung, Sikora, Kim, El Madawy y Abd Elrahman, 2021). Así, la concentración en la implementación de desechos y materiales derivados

Tipo de hormigón	Norma (ASTM)	Agregado		Hormigón		
		Tamaños	Densidad (Kg/m ³)	Tipos	Densidad (Kg/m ³)	Resistencia a la compresión (MPa)
Hormigón estructural	C330	*Fino *Grueso *Combinación de agregado fino y Grueso	* >1120 * >880 * >1040	*Escoria de alto horno *Ceniza pulverizada *Arcillas expandidas *Pizarra expandida *Piedra pómez *Escoria *Piedra caliza *Diatomita	1360-1920	17-28

Tabla 3. Resumen de los diferentes tamaños de agregados y tipos de hormigón adicionando materiales ligeros. Fuente: Maghfouri et al. (2021).

Tipo de agregado	Tipo de cemento	Porcentaje de agregado	Resistencia a la compresión (MPa)	Densidad (Kg/m ³)	Relación agua/cemento	Referencia
A. Ligero de Plástico	Portland Ordinario	75%	18	1900	0.5	(Alqahtani et al., 2021)
A. de Poliestireno expandido	Portland Ordinario	60%	30.53	1716	---	(Wibowo et al., 2021)
A. de Poliestireno expandido	CEM I 52.5N	15%	32	1900	0.39	(Rosca, 2021)

Tabla 4. Resistencia a la compresión de los agregados livianos artificiales. Fuente: Elaborado por los autores.

para sustituir los materiales naturales y manufacturados existentes es cada vez más importante para respaldar el concepto de producto ecológico (Moutassem, 2020).

Para producir hormigón ligero, se han empleado distintos tipos de materiales como áridos ligeros. La exhaustiva investigación de Maghfouri et al. (2021) se abocó a esos diversos tipos de materiales que pueden ser utilizados en el LWAC con una densidad aparentemente sobresaliente.

Existen múltiples investigaciones sobre materiales que se pueden adicionar a un hormigón para que sea de menor densidad (Zade, Bhosale, Dhir, Sarkar y Davis, 2021). Por ello se presenta a continuación una revisión sistemática de varios estudios sobre el comportamiento de los materiales (Alqahtani y Zafar, 2020), tanto materiales naturales, artificiales o desechos empleados en un concreto de agregado ligero (Zeng, Sun, Tang y Zhou, 2020).

AGREGADOS LIVIANOS ARTIFICIALES

Agregado de plásticos

Los hallazgos de Dielemans, Briels, Jaugstetter, Henke y Dörfler (2021) indicaron que el uso de agregados ligeros

de plásticos en estructuras de hormigón conduce a ahorros en cantidades de hormigón y acero de hasta un 7.23% y 7.18%. Además, revelaron que las estructuras de losas con luces de entre 4 y 5 m son las que más se benefician con el uso de este tipo de material.

El análisis de Alqahtani, Abotaleb y ElMenshaway (2021) señala, en tanto, que reemplazando el 75% del volumen de agregados naturales con plástico reciclado y haciendo uso de cemento portland ordinario en una relación agua/cemento a/c de 0.5, el hormigón alcanza una resistencia a la compresión ($f'c$) de 18 MPa y una densidad de 1900 kg / m³.

Agregado de poliestireno expandido

El aglomerante utilizado en la investigación de Wibowo, Lianasari, Wiransya y Kurniawan (2021) fue cemento portland ordinario, con un 60% de agregado de poliestireno expandido en reemplazo parcial del agregado fino en volumen. Se alcanzó aquí una $f'c$ de 30.53 MPa y una densidad de 1716 kg/m³.

Otro estudio realizado por Rosca (2021) reveló que con el uso de cemento CEM I 52.5N, tuvo una relación de a/c de

Tipo de agregado	Tipo de cemento	Porcentaje de agregado	Resistencia a la compresión (MPa)	Densidad (Kg/m ³)	Relación agua/cemento	Referencia
A. Ligero de tierra de diatomitas	Portland Ordinario	40%	13.45	1290	0.55	(Hasan et al., 2021)
A. Clinker de aceite de palma	CEM I 42.5N	85%	35.56	1933	0.50	(Sarayreh et al., 2020)
A. de almendra de palma y casara de bigaro	Portland Ordinario	20% c/u	15	1900	0.60	(Ogundipe et al., 2021)

Tabla 5. Resistencia a la compresión de los agregados naturales. Fuente: Elaborado por los autores.

0.39 y un reemplazo del 15% del volumen de agregado grueso por agregado de poliestireno expandido. Se obtuvo una $f'c$ de 32 MPa y una densidad de 1900 kg/m³.

Los datos mencionados en párrafos anteriores están resumidos en la Tabla 4, en donde es posible comparar resultados de las investigaciones realizadas por los autores citados líneas arriba.

AGREGADOS LIVIANOS NATURALES

Agregado tierra de diatomeas

Según el estudio realizado por Vinod, Sanjay, Siengchin y Fischer (2021), la tierra de diatomeas tiene una densidad baja, lo que hace que el material sea útil para producir agregados livianos, específicamente, en la producción de hormigón liviano.

En el trabajo llevado a cabo por Hasan, Saidi y Afifuddin (2021) se efectuaron siete mezclas diferentes, de las cuales se observó que una, en particular, presentaba mejores resultados: una densidad de 1290 kg / m³ y una $f'c$ de 13.45 MPa, para una relación a/c de 0.55, reemplazando el 40% de los agregados naturales en peso.

Agregado de clinker de aceite de palma

El hormigón ligero producido mediante la utilización de materiales de desecho tiene la ventaja de proteger el medio ambiente y reducir los costes en la industria de la construcción.

En la investigación realizada por Sarayreh, Othman, Abdullah y Sulaiman (2020) determinó que con la sustitución del 85% del agregado grueso por agregado de Clinker de aceite de palma y con el uso de cemento portland ordinario CEM I 42.5 en la relación a/c de 0.5, se obtiene una $f'c$ de 35.56 MPa a los 28 días y una densidad de 1933 kg/m³.

Por otra parte, Ogundipe, Ogunbayo, Olofinnade, Amusan y Aigbavboa (2021) utilizaron un 20% de almendra de palma y un 20% de cáscaras de bigaro como agregado grueso y un 60% de agregado grueso natural. Su relación a/c fue de 0.60 y el cemento usado

fue portland ordinario. Los resultados experimentales mostraron que su $f'c$ fue de 15.3 MPa y su densidad, de 2040 kg/m³.

En la Tabla 5 se exponen los resultados mencionados por los autores citados en este apartado.

Agregado de arcilla expandida

Sindhuja y Bhuvaneshwari (2021) determinaron que, empleando cemento Portland ordinario, con una relación a/c de 0.45, y con la sustitución de 30% de los agregados gruesos naturales por agregados de arcilla expandida para ser usados en columnas con un tamaño máximo de agregados de 15 mm, la densidad del hormigón ligero resulta de 1990 kg/m³ y la $f'c$, a los 28 días, de 28.3 MPa.

El artículo de Rahul y Santhanam (2020), por su parte, examinó muestras de hormigones elaborados con agregados livianos de arcilla expandida cuyo tamaño máximo fue de 10 mm. El aglutinante utilizado en el estudio consistió en cemento portland, en mezclas con hasta un 30% de sustitución de agregado grueso se logró alcanzar un $f'c$ 25 MPa, siendo su relación a/c de 0.40 y su densidad de 2158 kg/m³ ().

De manera similar, Long (2020) empleó cemento portland tipo I y una relación a/c de 0.40, obteniendo así una $f'c$ de 19.7 MPa a los 28 días, y una densidad de 1489 kg/m³, al reemplazar el 40% de agregados gruesos en volumen por arcilla expandida, cuyo tamaño de agregados fue de 7 mm.

Mientras, Pontes, Bogas, Real y Silva (2021) usaron cemento portland tipo I 42.5 R, con un 15% de arcilla expandida en reemplazo del agregado grueso, y una relación a/c de 0.35; por ende, se obtuvo una $f'c$ de 66.1 MPa y una densidad fue de 1920 Kg/m³.

Bicer (2021) aplicó arcilla expandida en lugar de agregados convencionales para producir material de construcción de baja densidad. Las muestras se secaron durante 28 días a temperatura ambiente y, luego, se realizaron las mediciones. Para la elaboración de las muestras se empleó cemento portland I 42R, se sustituyó

Tipo de agregado	Tipo de cemento	Porcentaje de agregado	Resistencia a la compresión (MPa)	Densidad (Kg/m ³)	Relación agua/cemento	Referencia
A. arcilla expandida	Portland Ordinario	30%	28.3	1990	0.45	(Sindhuja y Bhuvaneshwari, 2021)
	Portland Ordinario	30%	25	2158	0.4	(Rahul y Santhanam, 2020)
	Portland Tipo I	40%	19.7	1489	0.4	(Long, 2020)
	Portland Tipo I	15%	66.1	1920	0.35	(Pontes et al., 2021)
	Portland Tipo I 42.5 R	10%	24.68	1420	0.5	(Bicer, 2021)
	CEM I 52.5	40%	17.7	1660	0.45	(Moreno-Maroto et al., 2019)

Tabla 6: Resistencia a la compresión de los agregados de arcilla expandida. Fuente: Elaborado por los autores.

Tipo de agregado	Tipo de cemento	Porcentaje de agregado	Resistencia a la compresión (MPa)	Densidad (Kg/m ³)	Relación agua/cemento	Referencia
Piedra Pómez	Portland Ordinario	10%	27.1	---	0.45	(Ramanjaneyulu et al., 2019)
	CEM IV 32,5 R	20%	24	1650	0.5	(Bicer y Celik, 2020)

Tabla 7. Resistencia a la compresión del agregado de piedra pómez. Fuente: Elaborado por los autores.

10% de los agregados naturales por arcilla expandida, y una relación a/c de 0.5. En consecuencia, su f_c fue de 24.68 MPa, la densidad fue 1420 kg/m³ y su coeficiente de conductividad fue 0.215 W / mK. Todas las muestras tenían una tasa de absorción de agua inferior al 30%.

A su vez, Moreno-Maroto, Beaucour, González-Corrochano y Alonso-Azcárate (2019) reemplazaron 40% del agregado grueso por arcilla expandida, empleando un tamaño de 10 mm y cemento Portland CEM I 52.5, para una relación a/c de 0.45, para obtener un f_c de 17.7 MPa y una densidad de 1660 kg/m³.

A continuación, en la Tabla 6 se ofrece un resumen de los resultados mencionados por los autores citados en este apartado.

Agregado de piedra pómez

(Ramanjaneyulu, Seshagiri Rao y Desai, 2019) en su investigación reemplazaron el agregado grueso por piedra pómez, cuyo porcentaje óptimo fue del 10% del agregado de peso normal en fracciones de volumen, con un tamaño máximo de 12 mm. Además, se utilizó cemento portland ordinario y una relación

a/c de 0.45, obteniendo una f_c de 27.1 MPa, y una resistencia a la flexión de 5.06 MPa.

Por el contrario, la proporción óptima de la piedra pómez utilizadas por (Bicer y Celik, 2020) en su estudio fue del 20% del volumen total en reemplazo del agregado grueso natural. Se empleó cemento puzolánico, CEM IV / B (P) 32,5 R, su relación a/c fue de 0.50, siendo su f_c 24 MPa una densidad 1650 kg/m³ y conductividad térmica de 0.45 W/(m.k).

En la tabla 7, contrastamos los resultados mencionados por los autores citados en su investigación.

AGREGADOS DE RESIDUOS RECICLADOS

La utilización de subproductos y materiales de desecho para sustituir los recursos naturales o manufacturados se considera una forma práctica de obtener materiales de construcción ecológicos (Grzeszczyk y Janus, 2020).

Agregados de residuos cerámicos

awoyera, Olalusi y Babagbale (2021) señalaron que, con la sustitución del 100% de la arena por residuos cerámicos y empleando cemento portland ordinario, en una relación cemento/agregado fino de cerámicos pulverizados de

Tipo de agregado	Tipo de cemento	Porcentaje de agregado	Resistencia a la compresión (MPa)	Densidad (Kg/m ³)	Relación agua/cemento	Referencia
A. Residuos Cerámicos	Portland Ordinario	100%	17.97	2363	---	(Awoyera et al., 2021)
A. Ladrillos triturados	CEM-I 42.5R	10%	31.5	2255	0.6	(Tareq Noaman et al., 2020)
	Portland ordinario	100%	45	1920	0.48	(Yang et al., 2020)
	CEM I 52.5 N	10%	33	1845	0.39	(Atyia et al., 2021)

Tabla 8. Resistencia a la compresión de los agregados de residuos reciclados. Fuente: Elaborado por los autores.

1:3, se obtiene un f_c a los 28 días de 17.97 MPa; valores menores a la mezcla de control realizada en dicha investigación, cuya densidad era de 2363 kg/m³ y su resistencia a la flexión, de 1.26 MPa.

Agregados de ladrillo de arcilla triturada

La utilización de un contenido mínimo de materiales naturales en la producción de hormigón representa la principal preocupación de muchos investigadores. Además de que el hormigón de agregado ligero es deseable por su bajo peso y sus propiedades físicas modificadas (Yao et al., 2021).

Así, Tareq Noaman, Subhi Jameel y Ahmed (2020) utilizaron cemento Portland CEM-I 42.5R, para una relación a/c de 0.6. Con un porcentaje óptimo del 10% de agregado de ladrillo de arcilla triturada como reemplazo parcial de la arena natural, se obtuvo una densidad de 2255 kg/m³, un f_c de 31.5 MPa y una absorción de agua de 7.93%.

En cambio Yang et al. (2020) propusieron el uso de ladrillos triturados como agregado grueso para producir un nuevo hormigón de características livianas. En el proceso se usó cemento portland ordinario con grado 42.5 y una relación a/c de 0.48. Como resultado se consiguió una pérdida en la resistencia a la compresión (f_c) de 12 a 25% y, en la resistencia a la flexión, del 9 al 22%, a los 28 días de curado. La muestra que mejor se comportó fue la que usó 100% de agregado de ladrillo triturados, mostrando un f_c de 45MPa, una resistencia a la flexión de 7.5 MPa y una densidad de 1920 kg/m³.

Los resultados experimentales de Atyia, Mahdy y Elrahman (2021) indicaron que los ladrillos de arcilla triturada se pueden reutilizar como reemplazo de agregados de peso normal para obtener hormigón estructural de agregado liviano, utilizando cemento Portland CEM I 52.5 N y reemplazando el 10% de cemento por agregados de ladrillos de arcilla triturada, con una relación a/c 0.39. De ello resultó un f_c de 33 MPa y una densidad de 1845 kg/m³, con una conductividad térmica de 0.6 W/m.k .

En la Tabla 8 se visualiza un resumen de densidades y resistencias de los agregados reciclados mencionados en los resultados de las investigaciones recién citadas:

OTROS TIPOS DE AGREGADOS

Agregado de ceramsite de pizarra

para la producción de probetas de hormigón liviano G. Zhang et al. (2021), se empleó cemento portland ordinario 42,5 con una relación a/c de 0.47 y una proporción óptima de ceramsite de pizarra de 25% en reemplazo del agregado grueso. De esta forma, al ensayar dichas probetas en el laboratorio, se obtuvo una f_c de 28.1 MPa y una densidad de 1907 kg/m³.

Agregado de caucho granulado

Pongsopha et al. (2021) consideraron cemento Portland Tipo I, agregado de caucho granulado, y el reemplazo del 10% del agregado grueso con una relación a/c 0.35. Se obtuvo aquí una resistencia a la compresión y una densidad de 20.8 MPa y 1904 kg/m³ respectivamente, y una resistencia a la flexión de 4.38 MPa. La conductividad térmica resultó de 0.485 W/m°C.

Agregado de ceramsite de lodo

Esta tecnología reduce los impactos perjudiciales de los desechos sólidos en el medio ambiente y aborda la escasez de recursos naturales. Este estudio tuvo como objetivo desarrollar hormigón verde ligero que incorpore de ceramsite de lodo (J. Zhang, Wang, Ge, Yang y Wei, 2021).

En la misma línea, Xie, Liu, Liu, Wang y Huang (2019) determinaron que al utilizar cemento portland ordinario, con una relación a/c de 0.36, y una sustitución de arena de río por 40% de agregado de ceramsite de lodo en volumen, resulta un f_c a los 28 días de 13.63 MPa y una densidad 1251 kg/m³. Por ello, sostienen que la ceramsite de lodo es un material más respetuoso con el medio ambiente que el hormigón normal para estructuras no portantes.

Tipo de agregado	Tipo de cemento	Porcentaje de agregado	Resistencia a la compresión (MPa)	Densidad (Kg/m ³)	Relación agua/cemento	Referencia
A. ceramsite de pizarra	Portland ordinario	25%	28.1	1907	0.47	(J. Zhang et al., 2021)
A. caucho granulado	Portland Tipo I	10%	20.8	1904	0.35	(Pongsopha et al., 2021)
A. ceramsite de lodo	Portland ordinario	40%	13.63	1251	0.36	(Xie et al., 2019)
A. fibra de acero	Portland P · 52,5	2.25%	63.1	1800	0.23	(Wang et al., 2021)

Tabla 9: Resistencia a la compresión de otros tipos de agregados. Fuente: Elaborado por los autores.

Agregado de fibra de acero

En la investigación de Wang, Liu y Guo (2021) se empleó cemento portland P · 52,5, una relación de a/c de 0,23 y un contenido de fibra de acero 2,25% en reemplazo del agregado grueso. Su $f'c$ a los 28 días fue de 63.1 MPa y su densidad, de 1800 kg/m³.

En la Tabla 9 se aprecia un nuevo resumen de densidades y resistencias de otros agregados previamente citados:

CONCLUSIÓN

En base a las opiniones de los diversos autores en este trabajo revisados y de los resultados de sus investigaciones sobre el uso de materiales ligeros en el hormigón, se ha logrado concluir lo siguiente:

Existen materiales livianos que, al usarlos como agregados en el hormigón, provocan que este último baje su densidad, por lo que pueden ser empleados en la construcción de edificios de gran altura, ya que disminuyen el peso propio de la estructura y, a su vez, mejoran la resistencia a la compresión del hormigón.

El agregado de arcilla expandida evidencia mayor resistencia a la compresión, de 66.1 MPa, en comparación con otros materiales empleados en la elaboración de un hormigón de baja densidad.

El hormigón con menor densidad fue elaborado con agregado de ceramsite de lodo, lográndose una densidad de 1251 kg/m³ y una resistencia a la compresión de 14 MPa, al usar un 40% de agregado de ceramsite de lodo y una relación agua/cemento de 0.36.

La utilización de materiales ligeros en la producción de hormigón constituye una alternativa de solución amigable con el medio ambiente, puesto que permite ampliar la gama de agregados que pueden ser empleados en un hormigón con características similares a los de uno convencional. De esta manera, se

estará contribuyendo a reducir el impacto que puede causar la sobreexplotación de agregados pétreos convencionales y la producción de efecto invernadero, tan perjudiciales para el medio ambiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ajey Kumar , V., Karthik , M. y Mangala Keshava. (2020). Production of Recycled Plastic Coarse Aggregates and its Utilization in Concrete. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(8), 4118 - 4122. DOI: <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/14882020>
- Al-lami, M. y Al-saadi, E. (2021). Las relaciones entre la resistencia a la compresión y la densidad del hormigón ligero de poliestireno y sus proporciones de componentes. *Journal of Applied Engineering Science*, 19(1), 175 - 185. DOI: <https://doi.org/10.5937/jaes0-27471>
- Alqahtani, F., Abotaleb, I. y ElMenshawy, M. (2021). Life cycle cost analysis of lightweight green concrete utilizing recycled plastic aggregates. *Journal of Building Engineering*, 40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102670>
- Alqahtani, F. y Zafar, I. (2020). Characterization of processed lightweight aggregate and its effect on physical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116992>
- Appavuravther, E., Vandoren, B. y Henriques, J. (2021). Behaviour of screw connections in timber-concrete composites using low strength lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122973>
- Atyia , M., Mahdy, M. y Elrahman, M. (2021). Production and properties of lightweight concrete incorporating recycled waste crushed clay bricks. *Construction and Building Materials*, 304. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124655>
- Awoyera , P., Olalusi, O. y Babagbale, D. (2021). Production of lightweight mortar using recycled waste papers and pulverized ceramics: Mechanical and microscale properties. *Journal of Building Engineering*, 31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102233>

- Bicer, A. (2021). The effect of fly ash and pine tree resin on thermo-mechanical properties of concretes with expanded clay aggregates. *Case Studies in Construction Materials*, 15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00624>
- Bicer, A. y Celik, N. (2020). Influence of pine resin on thermo-mechanical properties of pumice-cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103668>
- Chung, S.Y., Sikora, P., Kim, D., El Madawy, M. y Abd Elrahman, M. (2021). Effect of different expanded aggregates on durability-related characteristics of lightweight aggregate concrete. *Materials Characterization*, 173. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.110907>
- Chung, S.Y., Sikora, P., Stephan, D. y Abd Elrahman, M. (2020). The Effect of Lightweight Concrete Cores on the thermal Performance of Vacuum Insulation Panels. *Materials*, 13(11). DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13112632>
- Dielemans, G., Briels, D., Jaugstetter, F., Henke, K. y Dörfler, K. (2021). Additive Manufacturing of Thermally Enhanced Lightweight Concrete Wall Elements with Closed Cellular Structures. *Journal of Facade Design and Engineering*, 9(1), 59-72. DOI: <https://doi.org/10.7480/jfde.2021.1.5418>
- Grzeszczyk, S. y Janus, G. (2020). Reactive powder concrete with lightweight aggregates. *Construction and Building Materials*, 263. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120164>
- Hamidian, M. y Shafgh, P. (2021). Post-peak Behaviour of Composite Column Using a Ductile Lightweight Aggregate Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 15(1), 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40069-020-00453-6>
- Hasan, M., Saidi, T. y Afifuddin, M. (2021). Mechanical properties and absorption of lightweight concrete using lightweight aggregate from diatomaceous earth. *Construction and Building Materials*, 277. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122324>
- Hücker, A. y Schlaich, M. (2017). On Bending of Infra-Lightweight Concrete Elements – Material Behavior, Bond, Bearing and Deformation Behavior. *Beton- und Stahlbetonbau*, 112, 282–292. DOI: <http://doi.org/10.1002/best.201700008>
- Jones, M., Ozlutas, K. y Zheng, L. (2017). High-volume, ultra-low-density fly ash foamed concrete. *Magazine of Concrete Research*, 69, 1146–1156. DOI: <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00063>
- Kailash, C. y Rashmi, P. (2018). Investigation into low density fly ash aggregate in microconcrete for lightweight concrete repair. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 3(10), 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41024-018-0039-z>
- Kim, J., Lee, J. y Kim, Y.H. (2021). Equilibrium of capillary and pore water pressure in lightweight aggregates concrete. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 1-7. DOI: <http://doi.org/10.1080/15376494.2021.1949510>
- Long, H. (2020). Influence of coarse aggregates and mortar matrix on properties of lightweight aggregate concretes. *International Journal of GEOMATE*, 19(75), 1-7. DOI: <http://doi.org/10.21660/2020.75.45596>
- Maghfouri, M., Alimohammadi, V., Azarsa, P., Asadi, I., Doroudi, Y. y Balakrishnan, B. (2021). Impact of Fly Ash on Time-Dependent Properties of Agro-Waste Lightweight Aggregate Concrete. *Journal of Composites Science*, 5(6). DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs5060156>
- Mohamed, A., Mohamed, E., Sang-Yeop, C., Pawel, S. y Dietmar, S. (2019). Preparation and characterization of ultra-lightweight foamed concrete incorporating lightweight aggregates. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(7). DOI: <http://doi.org/10.3390/app9071447>
- Moreno-Maroto, J., Beaucour, A., González-Corrochano, B. y Alonso-Azcárate, J. (2019). Study of the suitability of a new structural concrete manufactured with carbon fiber reinforced lightweight aggregates sintered from wastes. *Materiales de Construcción*, 69(336), e204. DOI: <https://doi.org/10.3989/mc.2019.05719>
- Moutassem, F. (2020). Ultra-Lightweight EPS Concrete: Mixing Procedure and Predictive Models for Compressive Strength. *Civil Engineering and Architecture*, 8(5), 963 - 972. DOI: <http://doi.org/10.13189/cea.2020.080523>
- Muralitharan, R. y Ramasamy, V. (2017). Development of Lightweight concrete for structural applications. *Journal of Structural Engineering*, 44(4), 336-344. DOI: <http://doi.org/10.1144/136943jm1a691773>
- Ogundipe, K., Ogunbayo, B., Olofinnade, O., Amusan, L. y Aigbavboa, C. (2021). Affordable housing issue: Experimental investigation on properties of eco-friendly lightweight concrete produced from incorporating periwinkle and palm kernel shells. *Results in Engineering*, 9. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100193>
- Ojha, P., Singh, B. y Behera, A. (2021). Sintered fly ash lightweight aggregate-its properties and performance in structural concrete. *Indian Concrete Journal*, 95(6), 20-30. DOI: <https://doi.org/10.1258.ojh/211957>
- Palanisamy, M., Kolandasamy, P., Awoyera, P., Gobinatha, R., Muthusamy, S., Krishnasamy, T. y Viloría, A. (2020). Permeability properties of lightweight self-consolidating concrete made with coconut shell aggregate. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 3547-3557. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.092>
- Pateriya, A., Dharavath, K. y Robert, D. (2021). Enhancing the strength characteristics of No-fine concrete using wastes and nano materials. *Construction and Building Materials*, 276. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122222>
- Pokorny, J., Ševčík, R., Šál, J. y Zárybnická, L. (2021). Lightweight blended building waste in the production of innovative cement-based composites for sustainable construction. *Construction and Building Materials*, 299. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123933>

- Pongsopha, P., Sukontasukkul, P., Maho, B., Intarabut, D., Phoo-ngernkham, T., Hanjitsuwan, S., . . . y Limkatanyu, S. (2021). Sustainable rubberized concrete mixed with surface treated PCM lightweight aggregates subjected to high temperature cycle. *Construction and Building Materials*, 303. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124535>
- Pontes, J., Bogas, J., Real, S. y Silva, A. (2021). The Rapid Chloride Migration Test in Assessing the Chloride Penetration Resistance of Normal and Lightweight Concrete. *The Rapid Chloride Migration Test in Assessing the Chloride Penetration Resistance of Normal and Lightweight Concrete*, 11. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11167251>
- Rahul, A. y Santhanam, M. (2020). Evaluating the printability of concretes containing lightweight coarse aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103570>
- Ramanjaneyulu, N., Seshagiri Rao, M. y Desai, V. (2019). Behavior of self compacting concrete partial replacement of coarse aggregate with pumice lightweight aggregate. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 7(6), 434-440. Recuperado de <https://www.ijrte.org/wp-content/uploads/papers/v7i6c2/F10790476C219.pdf>
- Rosca, B. (2021). Comparative aspects regarding a novel lightweight concrete of structural grade containing brick aggregate as coarse particles and expanded polystyrene beads. *Materials Today: Proceedings*, 45, 4979-4986. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.415>
- Sarayreh, A., Othman, M. I., Abdullah, R. y Sulaiman, A. (2020). Experimental investigation on structural lightweight aggregate concrete using palm-oil clinker and expanded perlite aggregates. *Journal of Engineering Science and Technology*, 6, 3741-3756. Recuperado de https://jestec.taylors.edu.my/Vol%2015%20issue%206%20December%202020/15_6_17.pdf
- Sindhuja, S. y Bhuvaneshwari, P. (2021). Push-Out Test on Low-Density Concrete Filled Stiffened Steel Tubular Columns. *International Journal of Civil Engineering*, 19, 1399-1413. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40999-021-00638-4>
- Strzałkowski, J., Sikora, P., Chung, S.Y. y Elrahman, M. (2021). Thermal performance of building envelopes with structural layers of the same density: Lightweight aggregate concrete versus foamed concrete. *Building and Environment*, 196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107799>
- Sun, X., Liao, W., Kumar, A., Khayat, K., Tian, Z. y Ma, H. (2021). Multi-level modeling of thermal behavior of phase change material incorporated lightweight aggregate and concrete. *Cement and Concrete Composites*, 122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104131>
- Sun, Y., Li, J.-s., Chen, Z., Xue, Q., Sun, Q., Zhou, Y., ... y Poon, C. (2021). Production of lightweight aggregate ceramsite from red mud and municipal solid waste incineration bottom ash: Mechanism and optimization. *Construction and Building Materials*, 287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122993>
- Tareq Noaman, A., Subhi Jameel, G. y Ahmed, S. (2020). Producing of workable structural lightweight concrete by partial replacement of aggregate with yellow and/or red crushed clay brick (CCB) aggregate. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 34(4), 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.04.013>
- Vinod, A., Sanjay, M., Siengchin, S. y Fischer, S. (2021). Fully bio-based agro-waste soy stem fiber reinforced bio-epoxy composites for lightweight structural applications: Influence of surface modification techniques. *Construction and Building Materials*, 303. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124509>
- Wang, J., Liu, F. y Guo, J. (2021). Cyclic tensile behavior of ultra-high performance lightweight concrete. *Journal of Facade Design and Engineering*, 53(4), 170-176. DOI: <https://doi.org/10.11918/202009053>
- Wibowo, A., Lianasari, A., Wiransya, Z. y Kurniawan, T. (2021). The rapid chloride migration test in assessing the chloride penetration resistance of normal and lightweight concrete. *International Journal of GEOMATE*, 21(83), 150-156. DOI: <https://doi.org/10.21660/2021.83.j2146>
- Xie, J., Liu, J., Liu, F., Wang, J. y Huang, P. (2019). Investigation of a new lightweight green concrete containing sludge ceramsite and recycled fine aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 235, 1240-1254. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.012>
- Yang, J., Shaban, W., Elbaz, K., Thomas, B., Xie, J. y Li, L. (2020). Properties of concrete containing strengthened crushed brick aggregate by pozzolan slurry. *Construction and Building Materials*, 246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118612>
- Yao, X., Liao, H., Dong, H., Yang, F., Yao, Y. y Wang, W. (2021). Influence of water repellent on the property of solid waste based sulfoaluminate cement paste and its application in lightweight porous concrete. *Construction and Building Materials*, 282. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122731>
- Yinh, S., Hussain, Q., Joyklad, P., Chaimahawan, P., Rattanapitikon, W., Limkatanyu, S. y Pimanmas, A. (2021). Strengthening effect of natural fiber reinforced polymer composites (NFRP) on concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00653>
- Zade, N., Bhosale, A., Dhir, P., Sarkar, P. y Davis, R. (2021). Variability of mechanical properties of cellular lightweight concrete infill and its effect on seismic safety. *Natural Hazards Review*, 22(4). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.0000501](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000501)
- Zeng, Y., Sun, P., Tang, A. y Zhou, X. (2020). Shear performance of lightweight aggregate concrete with and without chopped fiber reinforced. *Construction and Building Materials*, 263. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120187>

Zhang, G., Wang, Y., Ge, J., Yang, J. y Wei, Q. (2021). Effect of Lightweight Aggregate on Workability and Mechanical Properties of Ultra-high Performance Concrete. *Journal of Building Materials*, 24(3), 1-9. DOI: [http://doi.org/10.3969 / j.issn.1007-9629.2021.03.008](http://doi.org/10.3969/j.issn.1007-9629.2021.03.008)

Zhang, J., Zhang, G., Sun, X., Pan, W., Huang, P., Li, Z., ... y Zhou, X. (2021). Analysis of compressive dynamic behaviors of plain concrete and lightweight aggregate concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00557>

OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y EL CONFORT TÉRMICO EN EDIFICIOS DE OFICINA PÚBLICOS. PERIODO CRÍTICO DE VERANO EN LA CIUDAD DE SAN JUAN, ARGENTINA¹

Recibido 28/02/2022
Aceptado 17/06/2022

MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF ENERGY EFFICIENCY AND THERMAL COMFORT IN PUBLIC OFFICE BUILDINGS. CRITICAL SUMMER PERIOD IN THE CITY OF SAN JUAN -ARGENTINA

Bruno Damián Arballo

Doctor en Arquitectura, Docente y Becario Postdoctoral CONICET, Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat, Facultad de Arquitectura Urbanismo y Diseño, Universidad Nacional de San Juan. San Juan, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-6121-549X>
arballobruno@gmail.com

Ernesto Kuchen

Doctor en Arquitectura, Docente Investigador CONICET, Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat, Facultad de Arquitectura Urbanismo y Diseño, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina
<https://orcid.org/0000-0001-6649-6932>
ernestokuchen@faud.unsj.edu.ar

Daniel Chuk

Doctor en Ingeniería, Docente Investigador, Instituto de Investigaciones Mineras, Universidad Nacional de San Juan San Juan, Argentina
<https://orcid.org/0000-0003-3171-9571>
dchuk@unsj.edu.ar

¹ Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). A la Universidad Nacional de San Juan.



RESUMEN

El 40% de la demanda mundial de energía y de emisiones de CO₂ proviene de las edificaciones. En Argentina, los edificios son también responsables del 40% del consumo total anual de energía. El problema radica en el desequilibrio provocado entre la necesidad de proveer de una elevada calidad de vida y confort a los espacios de oficina y el costo de energía requerido para acudir a tal propósito. Tanto un alto nivel de confort como el ahorro energético representan dos objetivos a alcanzar. En ese sentido, este artículo propone una nueva metodología que combina la medición *in situ* con herramientas de simulación matemática. Se incorporan técnicas y modelos innovadores para la elaboración de la herramienta aplicando una optimización multiobjetivo termo-energética, que opera dinámicamente durante el horario laboral. Los resultados muestran un importante ahorro en el consumo energético para refrigeración de espacios de oficinas en verano (del 57,5% al 83,3%), junto con un aumento en la calidad del confort térmico de entre el 4,7% y el 29,4%.

Palabras clave

optimización en edificios, ahorro energético, confort interior

ABSTRACT

Buildings represent 40% of the world's energy demand and CO₂ emissions. In Argentina, buildings are responsible for 40% of the total annual energy consumption. The problem lies in an imbalance between the need to provide a high quality of life and comfort in office spaces, and the high energy cost required to meet that goal. Both a high comfort level and energy savings represent two objectives to be achieved. In this sense, this paper proposes a new methodology that combines onsite measurement with mathematical simulation tools. Innovative techniques and models are incorporated to make the tool, applying thermal-energy multi-objective optimization, which operates dynamically during working hours. The results show significant savings in energy consumption regarding cooling office spaces in the summer, from 57.5% to 83.3%, together with an increase in the thermal comfort quality, with improvements between 4.7% and 29.4%.

Keywords

Building optimization, Energy savings, indoor comfort

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial las edificaciones representan alrededor del 40% del uso de energía, constituyéndose naturalmente en potenciales escenarios de ahorro de energía y emisiones (Li, L. Zhang, Zhang y Wu, 2021; Abdou, Mghouchi, Hamdaoui, Asri y Mouqallid, 2021). El ser humano moderno pasa la mayor parte de su tiempo en ambientes interiores, de un 80% a un 90% de dicho tiempo (van Hoof, Mazej y Hensen, 2010). Múltiples investigaciones han validado al confort térmico como una de las variables que mayormente afectan al confort en espacios interiores y, en particular, respecto a la eficiencia energética de los edificios (Nguyen, Reiter y Rigo, 2014). Diversos estudios internacionales legitiman la perspectiva de confort térmico adaptativo como estrategia de ahorro de energía fundamental en edificios (Li et al., 2021; Sánchez-García, Rubio-Bellido, Marrero-Meléndez, Guevara-García y Canivell, 2017; Chandel, Sharma y Marwah, 2016), la cual lleva a ahorros en el rango del 30 al 60%, sobre todo cuando se tiene en cuenta la evolución del clima exterior.

A nivel local, análisis desarrollados en el proyecto PICT2009-0014 Res.N°304/2010, "EEC, Eficiencia Energética y Confort en Espacios de Trabajo" y estudios doctorales (Arballo, 2020), en la ciudad de San Juan Argentina, fundamentan la disconformidad térmica de los habitantes frente a su ambiente laboral y el potencial de la optimización multiobjetivo para mejorar la eficiencia energética y lograr importantes ahorros.

Es de especial relevancia considerar la adaptabilidad de los habitantes y las variables climáticas del sitio en tiempo real, principalmente la temperatura exterior (t_e), a fin de delimitar rangos de aceptación (ver Boerstra, van Hoof y van Weele, 2015). Esta base de datos habilita la definición de perfiles térmicos variables, necesarios para la construcción de modelos para el control de la temperatura interior de *setpoint* (Sp) (Rupp, Kim, de Dear y Ghisi, 2018; Rupp, Vásquez y Lamberts, 2015).

En este contexto, es necesaria una optimización del funcionamiento del edificio (EnBop, 2008) y el desarrollo de una optimización multiobjetivo en tiempo real entre eficiencia energética y confort térmico de los habitantes. Estas variables se encuentran en conflicto, dado que un ahorro significativo de energía en el sistema energético de climatización puede resultar en condiciones interiores de disconformidad térmica para los habitantes. A su vez, el consumo energético de los edificios depende significativamente de las demandas del ambiente interior, el que afecta a la salud, al rendimiento y al confort (Bliuc, Rotberg y Dumitrescu, 2007). Los algoritmos genéticos "MOGA" (Multiobjective Genetic Algorithm) y algoritmos de optimización de partículas "PSO" (Particle Swarm Optimization) son los más utilizados para la optimización de la performance energética y del confort en edificios (Nguyen et al., 2014), debido a sus características favorables y su amplio grado de aplicabilidad (Chambers,

2000). La teoría matemática de los algoritmos genéticos o "MOGA" es presentada en Coello, van Veldhuizen y Lamont (2002) y sus aplicaciones a la optimización de sistemas HVAC, en Lu, Cai, Xie, Li y Soh (2005) y en Atthajariyakul y Leephakpreeda (2005), entre otros. Los algoritmos genéticos resultan ser muy útiles cuando se trata de buscar una solución óptima de preferencia dentro de un conjunto de posibles soluciones en situaciones estáticas (Stanislav, 2003); sin embargo, presentan dificultades para definir posibles soluciones para el control dinámico debido a la aleatoriedad que caracterizan sus operaciones. En la región del Litoral Argentino, el Centro de Investigación de Métodos Computacionales (CONICET-UNL), aplica algoritmos genéticos (NSGA-II) aplicando simulación (Building Energy Simulation) a la reducción del consumo de energía (Bre y Fachinotti, 2017), como también combinando algoritmos genéticos con metamodelos de redes neuronales (Artificial Neural Network Metamodels) (Bre, Roman y Fachinotti, 2020).

Otros algoritmos menos usados y poco probados, pero que demuestran muy buenos resultados en situaciones dinámicas (Y. Yuan, J. Yuan, Du y Li, 2012), son los algoritmos heurísticos de optimización de colonia de hormigas "MOACO" (Multiobjective Ant Colony Optimization). Uno de la clase es el algoritmo "MIDACO" (Mixed Integer Distributed Ant Colony Optimization), usado para calcular trayectorias de vuelos espaciales (Schlueter, Wahib y Munetomo, 2021). En el presente trabajo de investigación MIDACO es aplicado por primera vez al ámbito de la arquitectura.

METODOLOGÍA

MEDICIONES DE CONFORT *IN SITU* Y SIMULACIÓN MATEMÁTICA

La metodología de medición consiste en conducir un procedimiento sistemático de recolección de datos. Para la medición del confort térmico *in situ* se utiliza un sensor de temperatura y humedad HOB0 tipo U12-006 (temperatura interior) anclado a un dispositivo móvil de medición que se desplaza en el interior del edificio (Arballo, 2020). Al momento de la medición, en cada espacio de oficina, el sensor móvil se ubica a $0,90 \pm 0,20$ m sobre el nivel del piso y a un radio no mayor a un metro del lugar de trabajo del habitante evaluado, lo que posibilita captar las condiciones ambientales percibidas por el mismo. Esta medición aporta los datos objetivos de confort térmico. Un sensor fijo exterior en azotea tipo UA-001-64 permite tomar registro de la temperatura exterior. La temperatura operativa se considera como un promedio de la temperatura del aire y la temperatura radiante media ($t_{op} = \frac{t_a + t_{rm}}{2}$) (ISO 7730, 2005), tomando en cuenta que la velocidad del aire se mantiene menor a 0,2m/s y la diferencia entre temperatura del aire y la temperatura radiante media es menor que 4K (kelvin).

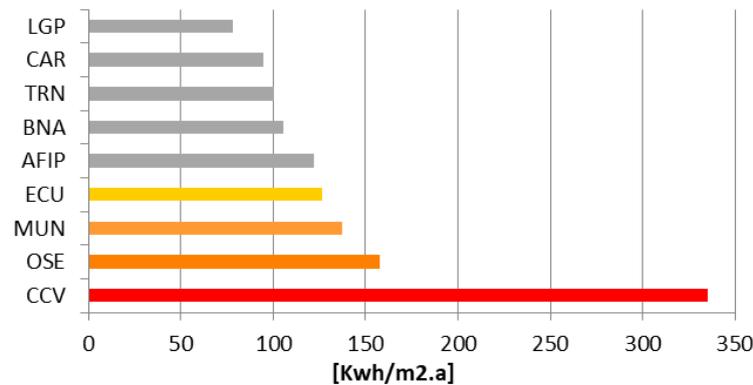


Figura 1. Consumos anuales de energía eléctrica en (KWh/m2.a) más destacados de edificios de oficina en el eje cívico intranillo de la ciudad de San Juan, Argentina. Fuente: EPRE (2017).

	I	II	III		IV
			A	B	
Nombre	CCV	OSE	MUN		ECU
Orientación	E-O	N-S	N-S	E-O	N-S
Superficie (m2)	80873	2455	4920		5320
Consumo Energético (Kwh/m2a)	335	158	137		126
Encuestas	885	84	86	49	121

Tabla 1. Información relevante casos de estudio. Fuente: Arballo (2020, p. 48).

En paralelo a la medición con sensores, se desarrolla una encuesta de confort, que brinda la información subjetiva del habitante en relación a su espacio de trabajo. De la encuesta se obtiene la información sobre el voto de confort (CV), a partir de una escala de 7 puntos (ASHRAE Standard 55, 2004). También se obtienen datos sobre el nivel de actividad (MET) y la vestimenta (CLO), basados en la norma ISO 7730. La medición se realiza de lunes a viernes de 8:00 a 13:30 h en las semanas que presentan condiciones climáticas.

CASOS DE ESTUDIO

Los cuatro casos de estudio seleccionados (Figuras 1 y 2) representan el mayor porcentaje de consumo anual de energía eléctrica (Ente Provincial Regulador de Energía [EPRE], 2017). Se ubican en la ciudad de San Juan, Argentina (zona bioambiental IIIa, según la norma IRAM 11603, 2012), en una altitud de 630 metros, una de latitud 31,6° Sur y una longitud de 68,5° Oeste. Poseen clima templado cálido seco, con temperatura exterior media anual de 17,2°C, humedad relativa media de 53%, elevada radiación solar anual de 2239.64 kW/m², 3300 horas de sol/año, amplitud térmica anual y diaria elevada >14K (Kelvin) y vientos del sector sud-este.

En función a los parámetros enunciados, la selección significativa de los casos de estudio se corresponde a los siguientes edificios (Tabla 1): I. Centro Cívico (CCV); II. Obras Sanitarias Sociedad del Estado (OSE); III. Edificio Central de la Universidad Nacional de San Juan (ECU) y IV. Municipalidad de la Capital (MUN).

Los edificios cuentan con equipo de climatización central, salvo el edificio MUN que se climatiza con equipos de aire acondicionado tipo "split" individuales. Todos cuentan con sistema de parasoles.

El edificio CCV concentra el mayor porcentaje de trabajadores de la administración pública de la provincia de San Juan, alrededor de unos 4000 trabajadores y un promedio de 2000 personas que visitan el edificio cada día laborable. Se trata de una arquitectura sistémica, organizada sobre la base de una célula modulada. La estructura del edificio está conformada por pórticos de hormigón armado. La escala del edificio sobrepasa la de la ciudad y sus características son las propias de las escuelas de arquitectura de la década del 60. Los edificios OSE y ECU incorporaron criterios de diseño bioclimático en la etapa de proyecto, tales como parasoles, reducido porcentaje de ventanas y mampuestos de 30 cm hacia el norte y oeste.

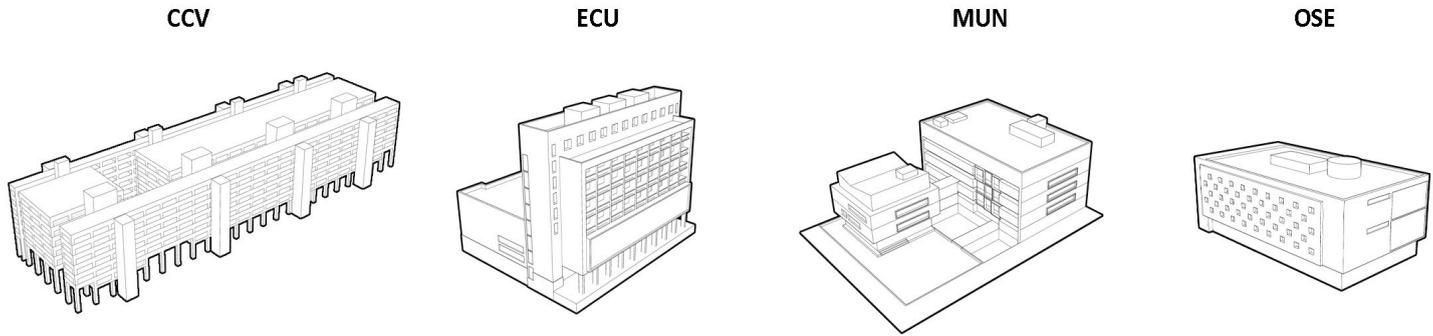


Figura 2. Esquema 3d de cada edificio. Fuente: Arballo (2020, p. 62).

OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO

Resolver el presente problema de optimización multiobjetivo entre eficiencia energética y confort térmico implica seleccionar la mejor decisión entre un conjunto de elementos. En matemáticas, la optimización está relacionada con el proceso de obtener el máximo o mínimo de una o más funciones de evaluación de un sistema, en cuyos casos se habla de optimización de un solo objetivo, o mono-objetivo, y de optimización multiobjetivo. En este último caso existen una serie de funciones de evaluación que compiten entre sí, por lo que no puede hablarse de un valor óptimo único de solución sino de un conjunto de valores que satisfacen en mayor grado a uno u otro objetivo. Dicho conjunto de soluciones se puede encontrar empleando el Criterio de Optimalidad de Pareto (Coello et al., 2002).

A partir de los datos reales basados en las mediciones, se procede a diseñar las funciones objetivo. Las matrices de datos y los funcionales matemáticos de las distintas variables son cargados en el programa de simulación MATLAB. La implementación del algoritmo de optimización multiobjetivo MIDACO permite advertir el espectro de soluciones posibles (Conjunto Óptimo de Pareto) a las que se le aplica una selección de preferencia a fin de alcanzar el óptimo definitivo. Generalmente, se prefiere la solución por "norma 2" o vector ideal al punto de utopía.

La evaluación cuantitativa y cualitativa de los resultados obtenidos conduce a la definición de propuestas de eficiencia energética que implican un mejoramiento en la calidad de vida de los habitantes (salud y rendimiento). La determinación del grado de aplicabilidad de las propuestas de optimización logradas gracias a esta metodología, para cubrir demandas energéticas y térmicas, se realiza mediante un análisis cualitativo.

Esta optimización multiobjetivo se lleva a cabo en un espacio tipo/promedio de cada edificio en el periodo más relevante para la demanda de energía por climatización en el año: verano. A través de la aplicación de la herramienta

de optimización desarrollada se busca disminuir la demanda energética de cada edificio mejorando los niveles de confort encontrados. El valor de confort térmico se expresa como Disc (% de disconformes). La variable Disc se obtiene del modelo de confort térmico adoptado (Kuchen, 2008). La variable demanda energética En se marca en las figuras con líneas punteadas sobre el eje (x).

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA MULTI OBJETIVO Y FUNCIONES OBJETIVO

Llegado este punto, se procede a definir las variables fundamentales que afectan a la toma de decisiones sobre las funciones objetivo o de evaluación en el transcurso de operación dinámica del sistema de optimización multiobjetivo.

El esquema de optimización supone que hay dos tipos de ventilación, ambos excluyentes entre sí:

- Sin renovación de aire:** Un ventilador de techo o en cielorraso que es capaz de mover el aire de todo el ambiente a velocidad v_a , sin que entre aire del exterior. Si el AA está apagado, la única influencia es t_e .
- Con renovación de aire:** Una ventilación cruzada conformada por dos ventiladores ubicados dentro de pasantes en paredes exteriores: Uno en un extremo del ambiente que insufla aire del exterior y el segundo, en el extremo cruzado, lo extrae. El resultado es un movimiento de aire con velocidad v_a , que ingresa aire del exterior. El comportamiento dinámico es distinto al de "a."

Cada "n" intervalos de muestreo k se actualizan las variables de decisión. F es una variable de entrada que diferencia el/los modos de funcionamiento: F1, ventanas cerradas, AA apagado, ventiladores de techo o cielorraso mueven el aire a velocidad v_a tal como se describió en esquema de optimización "a."; F2, Funcionamiento de la ventilación cruzada con ingreso de aire exterior según esquema de optimización "b.", con movimiento del

aire a velocidad v_a y AA apagado; F3, AA encendido. Eventualmente, los ventiladores de techo o cielorraso descriptos en "a." mueven el aire.

Luego, se determinan cinco funciones de evaluación y todas referidas al espacio de tiempo en que se desarrolla el horario de trabajo. Las variables de decisión son el *setpoint* de aire acondicionado SPAA, la velocidad del aire de ventilación v_a y el modo de operación F.: Estas variables no son estáticas, sino que se mueven a lo largo del período de operación, habitualmente 24 horas.

1.- Demanda energética:

$$f_1(\mathbf{x}) = E_n = \frac{\sum_{k=n_{w1}}^{n_{w2}} u_a(k)}{n_{w2} - n_{w1}} \quad (1)$$

Esta ecuación (1), $u_a \in \{0,1\}$, es una variable binaria de control del AA que depende de la secuencia diseñada por el optimizador para el *setpoint* de AA, SPAA, el cual es de tipo ON/OFF. Cuando el compresor del AA está trabajando y, por lo tanto, consume energía, se describe como $u_a = 1$; en caso contrario, $u_a = 0$. Los valores n_{w1} y n_{w2} corresponden en intervalos de muestreo a los horarios de inicio y fin de trabajo, marcados con líneas de puntos verticales en todas las gráficas temporales que se exponen a continuación. De esta forma, $0 < E_n < 1$ es una medida de consumo energético relativo y adimensional. El consumo E_n será el máximo posible –la unidad- cuando el compresor esté permanentemente trabajando, $u_a = 1$ para todos los $n_{w1} < k < n_{w2}$ y, entonces, $= \frac{(n_{w2} - n_{w1})1}{n_{w2} - n_{w1}} = 1$. Esta medida permite comparar fácilmente distintas estrategias de uso del AA para un mismo ambiente y un mismo AA.

2.- Diferencia cuadrática promedio del porcentaje de disconformes Disc:

$$f_2(x) = \frac{\sum_{k=n_{w1}}^{n_{w2}} (Disc(k) - DiscObj)^2}{n_{w2} - n_{w1}} \quad \forall Disc(k) > DiscObj \quad (2)$$

Esta es una función (2) que, por su naturaleza cuadrática, tiene su mínimo cuando para cada intervalo de muestreo k el porcentaje de disconformes Disc es igual a un cierto valor objetivo DiscObj, el cual se fija habitualmente entre un 7% -mínimo admisible de la función de disconformes de Kuchen (2008)- y un 12%.

3.- Control de variaciones de SP del AA (aire acondicionado):

$$f_3(x) = \frac{\sum_{k=n_{w1}}^{n_{w2}} (SP_{AA}(k) - SP_{AA}(k-1))^2}{n_{w2} - n_{w1}} \quad (3)$$

Esta función (3), al igual que las dos consecutivas, tiene el objetivo de estabilizar las oscilaciones del *setpoint* de aire acondicionado SPAA al reducir los cambios entre un intervalo de muestreo y el siguiente.

4.- Control de variaciones en v_a (velocidad del aire).Función (4):

$$f_4(x) = \sum_{k=n_{w1}}^{n_{w2}} (v_a(k) - v_a(k-1))^2 \quad (4)$$

5.- Control de la cantidad de cambios en el modo de funcionamiento F. Función (5):

$$f_5(x) = \sum_{k=h_w(1)}^{h_w(2)} (F(k) - F(k-1))^2 \quad (5)$$

6.- Función (6) de restricción:

$$Disc(k) < DiscMax \quad \forall \quad h_w(1) < k < h_w(2) \quad (6)$$

Esta es la única función de restricción implementada y tiene por propósito que el valor instantáneo de Disc nunca supere una cota de DiscMax que se ubica siempre por encima de DiscObj, por ejemplo 15%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la evaluación del confort térmico se considera la norma ISSO 74: 2014 con objetivo de edificios de clase B, definida en Boerstra et al. (2015) (Figura 3).

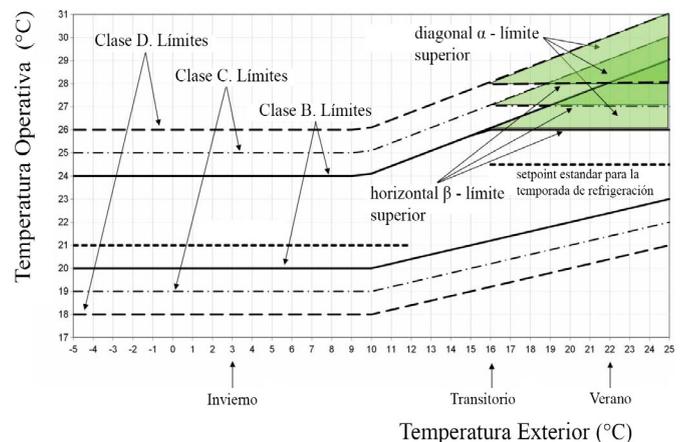


Figura 3. Requerimientos de ISSO 74: 2014 para temperatura operativa en relación a la temperatura exterior para las Clases B, C y D. Fuente: Boerstra et al. (2015, p. 28).

Según la norma ISSO 74: 2014, todos los espacios de trabajo del edificio CCV se determinan como tipo Beta (β) (Boerstra et al., 2015). El nivel de expectativa de confort térmico interior se define como normal, categoría B. El 80% de los espacios de oficina analizados no tienen acceso a la apertura de la ventana (estrategia fundamental para restablecer el confort personal), el 100% de los espacios no presenta posibilidad para la modificación particular del termostato. Los valores promedio de la tasa metabólica (MET) son de 1.35 (se considera normal por ISSO 74). Los valores de

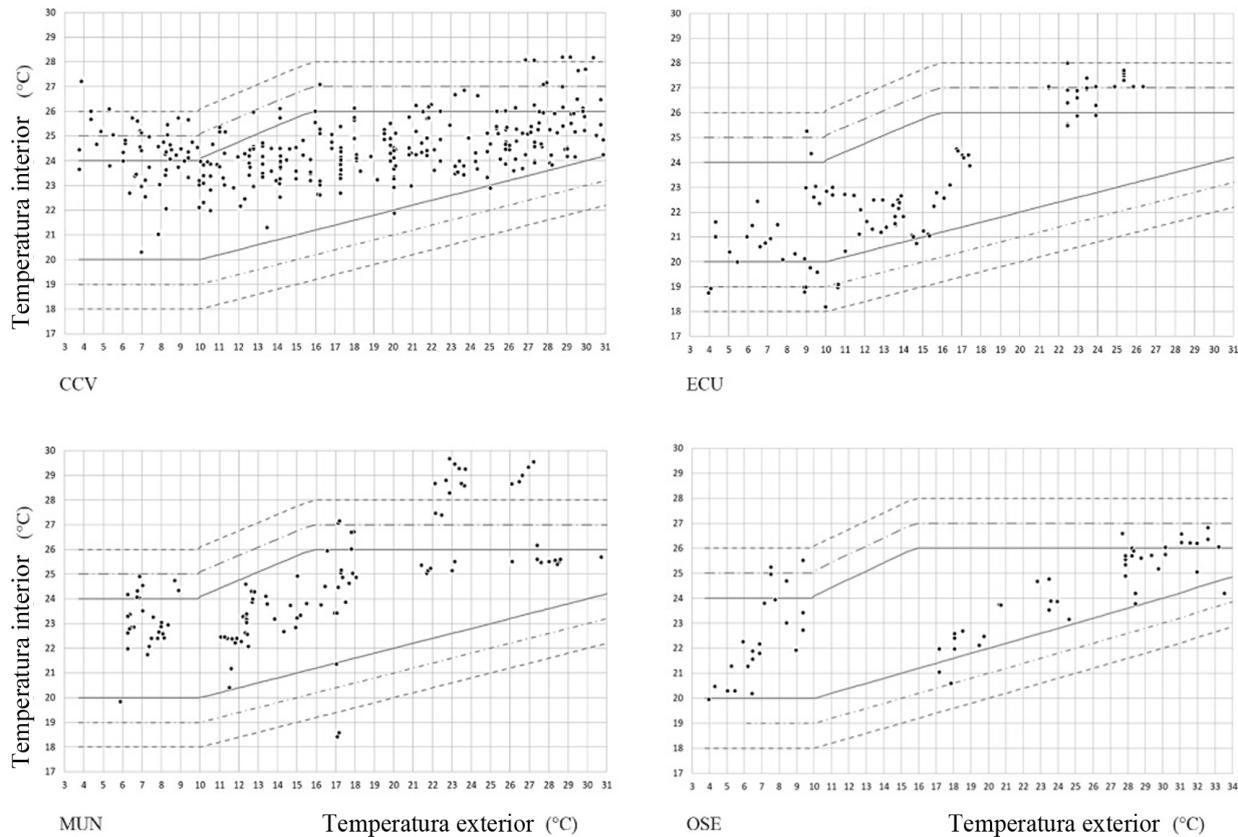


Figura 4. Evaluación confort térmico para el periodo anual y comparación de los edificios. Fuente: Arballo (2020, pp. 72-73).

CLO (aislamiento de la ropa) tienen un promedio de 1,44 (valores para las regulaciones de ropa de oficina normales).

En el compendio anual de datos (Figura 4) se puede observar que el 70% de los datos se incluye en el área de aceptabilidad del 90%, cumpliendo con un nivel medio de confort térmico en función de los límites propuestos por la norma ISSO 74: 2014 para espacios de oficina de tipo β , clase B.

Para el caso de edificio ECU, los espacios de oficina se determinan como tipo β . El nivel de expectativa de confort térmico interior se define como normal, categoría B. Los espacios de oficina tienen acceso a la apertura de la ventana (estrategia fundamental para restablecer el confort personal) y el 100% de los espacios no presenta posibilidad para la modificación particular del termostato. En todos los espacios es claramente percibido el sistema de climatización. Los valores promedio de la tasa metabólica (MET) son de 1.40 (se considera normal por ISSO 74). Los valores de CLO (aislamiento de la ropa) son de 0.76 para verano y de 1.44 para invierno (valores normales para espacios de oficina) (Toranzo, Kuchen y Alonso, 2012).

Para el período de verano, el 14% de los datos están dentro de la clase B (aceptabilidad del 90%) y un promedio

de porcentaje de aceptabilidad de 86%. Para el período transitorio, el 88% de los datos coinciden con el área de clase B. Para invierno, el 92% de los datos responde al área de clase B.

En el compendio anual de datos (Figura 4) se puede ver que el 82% de los datos se incluyen en el área de aceptabilidad del 90%, cumpliendo a nivel de confort térmico medio/alto en función de los límites propuestos por la norma ISSO 74: 2014 para espacios de oficina de tipo β , clase B. El periodo de verano es el periodo más crítico del año en relación a la aceptabilidad térmica de los habitantes de ECU.

En el compendio anual de datos para edificio MUN (Figura 4) se advierte que el 78% de los datos se incluyen en el área de aceptabilidad del 90%, cumpliendo a nivel de confort térmico medio, según los límites propuestos por la norma ISSO 74: 2014 para espacios de oficina de tipo β , clase B.

Para el caso del edificio OSE, el compendio anual de datos (Figura 4) muestra que el 85% de los datos se incluyen en el área de aceptabilidad del 90%, cumpliendo a nivel de confort térmico medio/alto, de acuerdo a los límites propuestos por la norma ISSO 74: 2014 para espacios de oficina de tipo β , clase B.

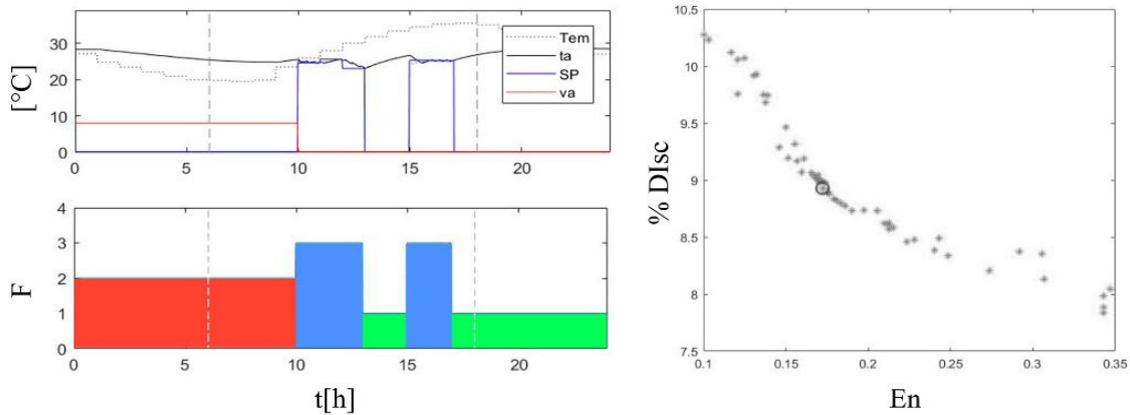


Figura 5. Izquierda: Evolución horaria de modos de funcionamiento F . Derecha: Perfil de Pareto de variables $Disc$ y En . Optimización Multiobjetivo de un día típico de verano en el edificio CCV. Fuente: Arballo (2020, p. 96).

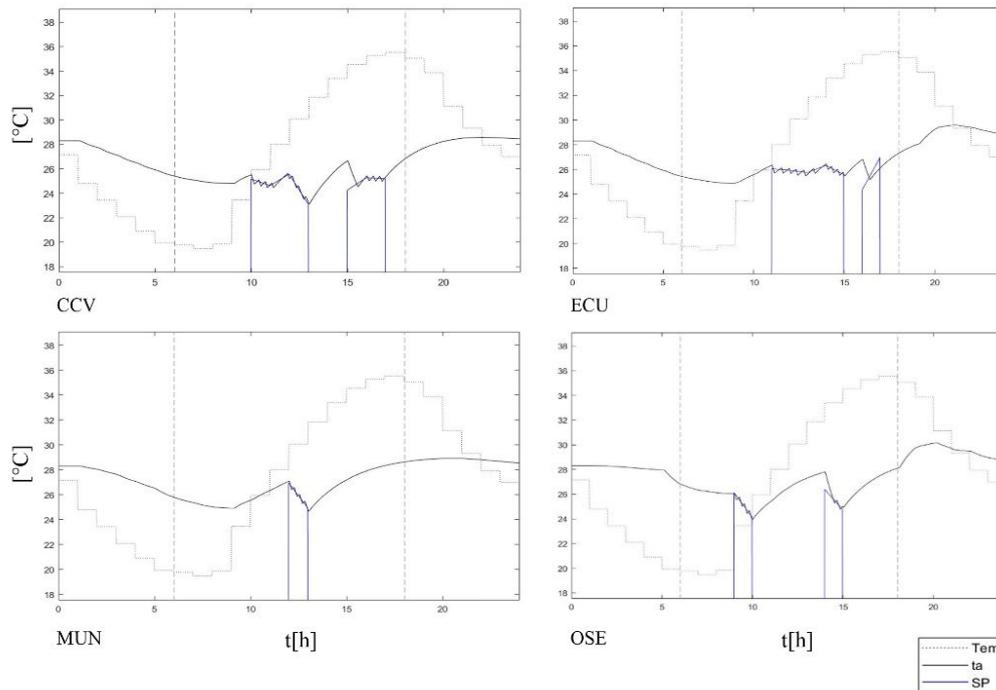


Figura 6. Evolución horaria de Tem (temperatura media exterior), ta (temperatura el aire interior) y SP (temperatura de setpoint). Optimización Multiobjetivo de un día típico de verano para los cuatro edificios. Fuente: Arballo (2020, pp. 97, 100, 104 y 107).

OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO EN CCV

La Figura 5 ilustra los resultados de la optimización para el caso del edificio CCV. Según la evolución diaria, el sistema decide la estrategia $F2$ (Ventana, rojo) durante la noche (más allá de que esto no sea posible actualmente), hasta las 10:00 AM del día siguiente, cuando, por razones del aumento de la temperatura exterior, el optimizador multiobjetivo cambia a estrategia $F3$ (Aire Acondicionado, azul).

En un segmento intermedio del horario de trabajo se decide pasar a estrategia $F1$ (Envoltente, verde). Este

corte en el uso del aire acondicionado (AA) permite un ahorro energético considerable. La Figura 6 muestra en detalle la evolución y relación entre la temperatura media exterior (Tem) y la temperatura del aire interior (ta). Como se observa, antes de las 10:00 de la mañana ta aumenta, lo que conlleva a un cambio de estrategia a $F3$ (AA), siendo $ta=26^{\circ}C$. Con el uso del AA se disminuye a $ta=23.5^{\circ}C$. El sistema luego apaga el AA y lo vuelve a encender cuando $ta=27^{\circ}C$ (15:00 h). Puede que durante este tiempo (estrategia $F1$ de 13:00 a 15:00 h), a pesar de que el sistema define esta opción como la más óptima, este aumento en la temperatura conlleva a rangos estrechos de aceptación térmica para los habitantes. No obstante,

este rango intermedio en estrategia *F1* no implica costo energético, de modo que contribuye a lograr un ahorro de energía significativo.

Estos resultados se obtienen a partir de la selección de solución óptima por norma 2 (mínima distancia al vector ideal) encontrada en el perfil de Pareto (Figura 5). Para edificio CCV, a través de la optimización, se consigue un $Disc=8.85$ y $En=0.17$.

OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO EN ECU

El horario de trabajo se marca con líneas rayadas sobre el eje x. En este caso (Figura 7), el sistema decide la estrategia *F2* durante la mañana, hasta las 9:00; existen 2 horas de estrategia *F1* y luego se modifica a estrategia *F3*. De forma similar al caso de edificio CCV, se decide 1 hora -desde las 15:00 h- de estrategia *F1* (Figura 7).

Cerca de las 11:00 t_a supera la barrera de los 26°C (Figura 6), sugiriendo un cambio de estrategia a *F3* (AA). Con el uso del AA se disminuye a $t_a=26^\circ\text{C}$. El

sistema, después, propone el apagado del AA y lo vuelve a encender cuando t_a se acerca a casi 27.5°C.

Para el edificio ECU, a través de la optimización, se consigue un $Disc=7.95$ y $En=0.12$. (Figura 7).

OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO EN MUN

En esta situación el sistema aconseja la estrategia *F2* durante la mañana hasta las 10:00, luego, 2 horas de estrategia *F1* y, por último, se modifica a estrategia *F3*, que se mantiene durante 1 hora (Figura 8). En este caso, el costo energético es mínimo, en comparación con CCV y ECU.

Con el uso del AA, se disminuye a $t_a=25^\circ\text{C}$. El sistema propone el apagado del AA 1 hora después, lográndose un importante ahorro energético. Hacia el final del horario de trabajo t_a llega a 28°C (Figura 6). La Figura 7 muestra el perfil de Pareto obtenido en base a la selección óptima preferida por norma 2. Para el caso del edificio MUN, a través de la optimización, se consigue un $Disc=8.6$ y $En=0.05$.

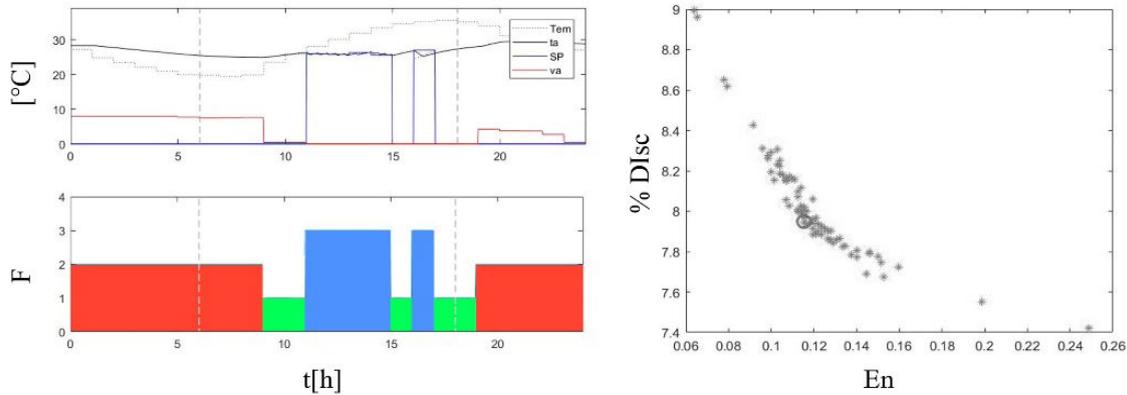


Figura 7. Izquierda: Evolución horaria de modos de funcionamiento *F*. Derecha: Perfil de Pareto de variables *Disc* y *En*. Optimización Multiobjetivo de un día típico de verano para el edificio ECU. Fuente: Arballo (2020, p. 99).

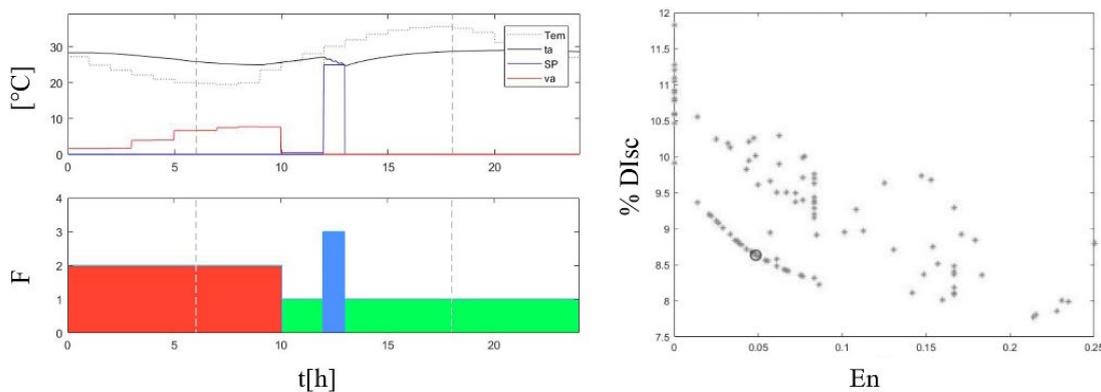


Figura 8. Izquierda: Evolución horaria de modos de funcionamiento *F*. Derecha: Perfil de Pareto de variables *Disc* y *En*. Optimización Multiobjetivo de un día típico de verano para el edificio MUN. Fuente: Arballo (2020, p. 103).

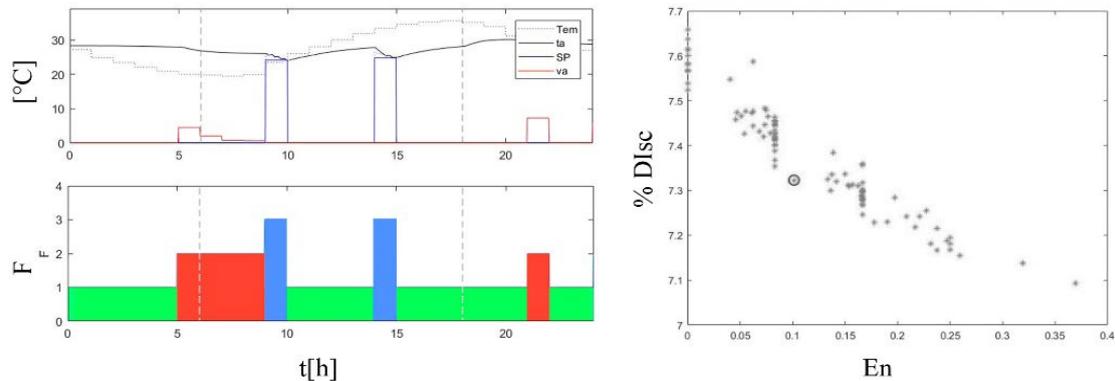


Figura 9. Izquierda: Evolución horaria de modos de funcionamiento F. Derecha: Perfil de Pareto de variables Disc y En. Optimización Multiobjetivo de un día típico de verano para el edificio OSE. Fuente: Arballo (2020, p. 106).

	DISC			EN		
	MED	OPT	%	MED	OPT	%
MUN	38	8.6	29.40	0.3	0.05	83.33
ECU	35	7.95	27.05	0.4	0.12	71.25
CCV	14	8.85	5.15	0.4	0.17	57.50
OSE	12	7.32	4.68	0.3	0.10	66.67

Tabla 3. Mejoras a través de la optimización de Disc y En (verano). Fuente: Arballo (2020, p. 108).

OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO EN OSE

En la situación de estudio del edificio OSE, el sistema promueve la estrategia F2 durante la mañana hasta las 9:00 h. Hasta las 15:00 el sistema aconseja 2 horas de estrategia F3, con un periodo de 4 horas intermedio en F1 (Figura 9).

En seguida se modifica de nuevo a estrategia F1, que se mantiene hasta el final del horario laboral.

A las 9:00 h el sistema se adelanta al aumento de t_a en función a Tem , solicitando un cambio de estrategia a F3 (AA). Con el uso del AA, se disminuye a $t_a=24^{\circ}C$ (Figura 6). El sistema apaga el AA 1 hora después, logrando un importante ahorro energético. Hacia el final del horario de trabajo t_a llega cerca de los $28^{\circ}C$. Para el caso del edificio OSE, a través de la optimización, se consigue un $Disc=7.32$ y $En=0.10$ (Figura 9).

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La presente investigación evidencia (Tabla 3) que, al aplicar la optimización multiobjetivo propuesta -para el periodo de verano-, se obtiene en todos los casos mejoras de la variable Disc (mayor confort térmico), con un porcentaje promedio de 20.53%. La variable de energía normalizada

En también mejora en todos los casos, con un porcentaje promedio de 69.6%. Los resultados demuestran que, a través de la implementación de la herramienta de optimización multiobjetivo termo-energética, puede reducirse ampliamente la demanda de energía para la climatización de espacios de oficina y, simultáneamente, mejorar significativamente la calidad en confort térmico.

A partir de clasificación del consumo de energía según ítems (para el periodo de verano), se determinan los consumos correspondientes al ítem "refrigeración" (Tabla 4), los cuales representan para cada edificio los siguientes porcentajes: $CCV=45\%$; $OSE=24\%$; $MUN=12\%$; $ECU=8\%$ (Kuchen et al., 2016).

Se constatan aportes de beneficio energético de la herramienta de optimización termo-energética, al conseguirse ahorros de hasta un 83.3% -en el caso de edificio MUN- de energía dedicada a refrigeración durante el periodo de verano (Tabla 4). De esta forma, se puede afirmar una proyección de ahorro energético para el caso del edificio CCV (edificio de mayor consumo en la provincia de San Juan), donde se reduce su consumo en el ítem de refrigeración en verano de 62 KWh/m² (meses refrig.) a 26.4 KWh/m² (meses refrig.).

Para los edificios analizados que más consumen, se reduce el porcentaje de ahorro (57,5% y 66.7%), pero para los edificios que menos consumen, el ahorro

	Consumo energético anual [kWh/m ² .a]	Consumo energético verano [kWh/m ² .(verano)]	Consumo refrigeración [kWh/m ² .(verano)]	
			Sin ahorro	Con ahorro
CCV	335	137.5	62	26.4
OSE	158	71.1	17.1	5.7
MUN	137	50.7	6.1	1.0
ECU	126	56.9	4.6	1.3

Tabla 4. Consumos en verano según cada edificio y ahorros para el ítem "climatización" Fuente: Arballo (2020, p. 108).

potencial es mucho mayor, del rango de 71.3% y 83.3%. Los edificios ECU y MUN son lo que menos consumen, pero a costa de un porcentaje promedio Disc elevado (35% y 38%, respectivamente).

CONCLUSIÓN

La presente investigación genera un aporte en la creación de técnicas y herramientas para arquitectos, ingenieros y especialistas del área, dedicados a la planificación de nuevos edificios y existentes, que tiendan a comprometer el uso de recursos naturales (escasos) para el funcionamiento, así como a la emisión de gases de efecto invernadero.

Conocer las ventajas del saneamiento de edificios existentes o, en su defecto, las posibilidades creativas de solución en el desarrollo de nuevos proyectos arquitectónicos, variando esquemas de orientación, ventilación, aislación y usos, es decir, haciendo efectiva y necesaria la incorporación de conceptos bioclimáticos, posiciona al sector edilicio sobre el cambio de paradigma ambiental en la reducción de emisiones a la atmósfera.

En este trabajo se destaca la incorporación de técnicas implementadas por primera vez en la disciplina arquitectónica de saneamiento energético de edificios, en la identificación de variables de diseño (ventilación natural/mecánica, potencia de climatización a instalar) y en el control de climatización interior a través de la optimización multiobjetivo mediante algoritmos del tipo MIDACO (por colonia de hormigas). Estos aportes amplían el alcance de las herramientas de optimización, en comparación con aplicaciones a edificios de oficina en la etapa proyectual (software de simulación térmico-energéticos, como por ejemplo Energy Plus, Trnsys y otros), que se relevan en el estado del arte, abordando la optimización dinámica diaria para el saneamiento de edificios existentes y futura aplicabilidad hacia el desarrollo de sistemas de control inteligentes y definición de pautas de diseño (ventilación), en edificios nuevos.

En concreto, se valida la nueva herramienta de diseño aplicando optimización multiobjetivo, donde se reduce la brecha entre consumo energético y confort térmico, lográndose ahorros significativos de energía en los cuatro casos de estudio. Las soluciones encontradas en los Conjuntos de Pareto permiten contrastar las hipótesis propuestas. Se destaca el alcance de significativos ahorros de energía eléctrica para climatización (ítem refrigeración) en el periodo de verano, entre un 57.5% y un 83.3% de ahorro, manteniendo porcentajes de aceptación térmica por encima del 90% en todos los casos.

La herramienta de diseño permite la obtención de valores objetivo, es decir, la definición de valores de "demandas energéticas de diseño" con alto nivel de detalle diario y por espacio de trabajo para el periodo de verano (en este caso), introduciendo las variables temperatura operativa, temperatura exterior y voto de confort en relación al consumo energético, posibles de obtener a través de el modelado en software de simulación energética (Energy Plus o similares). Lo anterior se ve validado en este trabajo enfocado en edificios de oficinas con climatización en el clima templado cálido seco.

Actualmente, esta investigación se encuentra asociada al desarrollo tecnológico de un sistema de control para optimizar en tiempo real y de forma dinámica las variables de confort y estrategias de climatización/ventilación en espacios interiores. Ha sido premiada con un subsidio del Estado para la compra de insumos de alta calidad y puesta en marcha.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, al Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat de la Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño (UNSJ) y al Instituto de Investigaciones Mineras (UNSJ). Asimismo, se extienden agradecimientos a las autoridades de gobierno de los ministerios concentrados en el Centro Cívico de la Ciudad de San Juan, a las autoridades correspondientes de la Municipalidad de la Capital de la ciudad de San Juan y de Obras Sanitarias Sociedad del Estado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdou, N., Mghouchi, Y. E., Hamdaoui, S., Asri, N. E. y Mouqallid, M. (2021). Multi-objective optimization of passive energy efficiency measures for net-zero energy building in Morocco. *Building and Environment*, 204. DOI: doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108141
- Arballo, B. D. (2020). *Eficiencia Energética y Confort Térmico adaptativo-variable en espacios de oficina mediante Optimización Multiobjetivo*. Tesis doctoral. Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño. Universidad Nacional de San Juan.
- ASHRAE Standard 55 (2004). *Thermal environmental conditions for human occupancy*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Attahariyakul, S. y Leephakpreeda, T. (2005). Neural computing thermal comfort index for HVAC systems. *Energy conversion and management*, 46(15-16), 2553-2565. DOI: doi.org/10.1016/j.enconman.2004.12.007
- Bliuc, I., Rotberg, R. y Dumitrescu, L. (2007). Assessing thermal comfort of dwellings in summer using EnergyPlus. En Proc. of the CLIMA 2007 World Congress "Well Being Indoors".
- Boerstra, A. C., van Hoof, J. y van Weele, A. M. (2015). A new hybrid thermal comfort guideline for the Netherlands: background and development. *Architectural Science Review*, 58(1), 24-34. DOI: doi.org/10.1080/00038628.2014.971702
- Bre, F. y Fachinotti, V. D. (2017). A computational multi-objective optimization method to improve energy efficiency and thermal comfort in dwellings. *Energy and Buildings*, 154, 283-294. DOI: doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.002
- Bre, F., Roman, N. y Fachinotti, V. D. (2020). An efficient metamodel-based method to carry out multi-objective building performance optimizations. *Energy and buildings*, 206. DOI: doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109576
- Chambers, L. D. (2000). *The practical handbook of genetic algorithms: applications*. New York: Chapman and Hall/CRC. DOI: doi.org/10.1201/9781420035568
- Chandel, S. S., Sharma, V. y Marwah, B. M. (2016). Review of energy efficient features in vernacular architecture for improving indoor thermal comfort conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 459-477. DOI: doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.038
- Coello, C. A. C., van Veldhuizen, D. A., y Lamont, G. B. (2002). *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems* (Vol. 242). New York: Kluwer Academic.
- EnBop (2008). *Energie Betriebsoptimierung*. Recuperado de <http://www.enob.info>.
- EPRE (2017). Datos de consumo de energía proporcionados por el Ente Provincial Regulador de Energía. San Juan, Argentina.
- ISO 7730 (2005). *Ergonomics of the thermal environment-Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. ISSO. Rotterdam, Holanda.
- ISSO 74 (2004). *Thermische Behaaglijkheid. Publication 74*, ISSO. Rotterdam, Holanda.
- Kuchen, E. (2008). *Spot-Monitoring zum thermischen Komfort in Bürogebäuden*. Tesis de Doctorado. Tönning, Deutschland: Der Andere Verlag.
- Kuchen, E., Alonso-Frank, A., Alamino-Naranjo, Y., Arballo, B., Galdeano, M. y Accolti, E. (2016). Eficiencia Energética en Edificios Públicos. En *VIII Congreso Regional de Tecnología de la Arquitectura-CRETA* (19 al 21 de octubre). San Juan, Argentina.
- Li, Q., Zhang, L., Zhang, L. y Wu, X. (2021). Optimizing energy efficiency and thermal comfort in building green retrofit. *Energy*, 237. DOI: doi.org/10.1016/j.energy.2021.121509
- Lu, L., Cai, W., Xie, L., Li, S. y Soh, Y. C. (2005). HVAC system optimization—in-building section. *Energy and Buildings*, 37(1), 11-22. DOI: doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.12.007
- Nguyen, A. T., Reiter, S. y Rigo, P. (2014). A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy*, (113), 1043-1058. DOI: doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061
- Norma IRAM 11603 (2012). *Clasificación bioambiental de la República Argentina*. Buenos Aires: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- Rupp, R. F., Kim, J., de Dear, R. y Ghisi, E. (2018). Associations of occupant demographics, thermal history and obesity variables with their thermal comfort in air-conditioned and mixed-mode ventilation office buildings. *Building and Environment*, 135, 1-9. DOI: doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.049
- Rupp, R. F., Vásquez, N. G. y Lamberts, R. (2015). A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy and Buildings*, 105, 178-205. DOI: doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.047
- Sánchez-García, D., Rubio-Bellido, C., Marrero-Meléndez, M., Guevara-García, F. y Canivell, J. (2017). El control adaptativo en instalaciones existentes y su potencial en el contexto del cambio climático. *Revista Hábitat Sustentable*, 7(2), 06-17. DOI: doi.org/10.22320/07190700.2017.07.02.01
- Schlueter, M., Wahib, M. y Munetomo, M. (2021). New State-of-the-Art Results on ESA's Messenger Space Mission Benchmark. In *Advances in Parallel & Distributed Processing, and Applications* (pp. 669-681). Springer, Cham.
- Stanislav, H. Z. (2003). *Systems and Control*. Nueva York: Oxford University Press.
- Toranzo, E., Kuchen, E. y Alonso, A. (2012). Potenciales de eficiencia y confort para un mejor funcionamiento del edificio central de la universidad nacional de San Juan. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente-AVERMA*, 16, 157-164.
- Van Hoof, J., Mazej, M. y Hensen, J. L. M. (2010). Thermal Comfort: Research and Practice. *Frontiers in Bioscience*, 15(2), 765-788.
- Yuan, Y., Yuan, J., Du, H. y Li, L. (2012). An improved multi-objective ant colony algorithm for building life cycle energy consumption optimisation. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 43(1), 60-66.

CONSTRUCCIÓN CON BLOQUES DE SUELO CEMENTO COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE PARA ENVOLVENTE EDILICIA¹

Recibido 23/05/2022
Aceptado 23/06/2022

CONSTRUCTION WITH SOIL-CEMENT BLOCKS AS A SUSTAINABLE ALTERNATIVE FOR BUILDING ENVELOPES

Adriana Belen Costantini-Romero

Arquitecta, Profesora Asistente, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-5164-0601>
belen.costantini@unc.edu.ar

Franco M. Francisca

Doctor en Ciencias de la Ingeniería e Ingeniero Civil, Profesor, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-6965-9036>
franco.francisca@unc.edu.ar

1 Investigación financiada por los proyectos CONICET: "Optimización sustentable de barreras ambientales compuestas para la aislación de residuos incorporando sistemas de recuperación de calor" #11220150100298co; y foncyt: "Optimización del comportamiento de barreras ambientales compuestas para la aislación de residuos mediante la adición de escorias de acería" # PICT-2019-1289.



RESUMEN

Los materiales alternativos, como los bloques de suelo estabilizado con cemento (BSEC), brindan nuevas oportunidades para realizar envolventes amigables con el medio ambiente. Los materiales de construcción realizados con suelo son fáciles de obtener y abundantes en la naturaleza, además de que su uso minimiza los impactos ambientales y mejora el comportamiento térmico de las edificaciones. En este trabajo se analizan las propiedades térmicas de los BSEC con el objeto de evaluar la eficiencia de los bloques para la construcción de envolventes. Se determina, mediante ensayos experimentales, que los porcentajes de cemento deberían ubicarse entre 3% y 9% para la fabricación de BSEC adecuados para mamposterías no portantes. El contenido de humedad debería ser inferior al 20%, a fin de evitar aumentos significativos en la conductividad térmica. A través de termografía pasiva se define también la resistencia térmica de los muros y las resistencias superficial interior y exterior mediante. Las distintas composiciones de muros con BSEC de una vivienda experimental en condiciones reales de uso se monitorearon durante época invernal y, a partir de ello, se establecieron transmitancias térmicas para los muros desde 1,219 W/m²K a 1,599 W/m²K. Los resultados obtenidos permitieron determinar la eficiencia relativa de los distintos tipos de envolventes para evitar pérdidas de calor.

Palabras clave

ladrillos sustentables, termografía pasiva en viviendas, reducción de pérdidas de calor, conductividad térmica, resistencia térmica superficial.

ABSTRACT

Alternative materials, such as cement-stabilized earth blocks (CSEB), provide new opportunities to make environmentally friendly envelopes. Earth-based construction materials are easy to obtain, abundant in nature, and their use minimizes environmental impacts and improves the thermal performance of bricks. In this work, the thermal properties of CSEB are analyzed, to evaluate their efficiency for building envelopes. It is experimentally determined that cement percentages are between 3% and 9% for the manufacturing of CSEB for non-bearing masonry. The moisture content should be less than 20%, to avoid significant increases in thermal conductivity. Wall thermal resistivity and inner and outer thermal resistance are also determined by means of passive building thermography measurements. The different CSEB wall compositions of experimental dwellings under real use conditions were monitored during the winter, and from this, thermal transmittances were established for the walls of 1,219 W/m²K to 1.599 W/m²K. The results obtained allow determining the relative efficiency of each building envelope type in avoiding heat losses.

Keywords

sustainable bricks, passive thermography in buildings, reduction of heat losses, thermal conductivity, surface thermal resistance.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad las edificaciones son responsables de un gran porcentaje de consumo energético en todo el mundo. El programa ambiental de las Naciones Unidas indica que, en efecto, las edificaciones representan más del 40% del consumo de energía en el mundo (United Nations Environment Programme [UNEP], 2009). Este gasto de energía genera entre un 25 y un 30% de las emisiones anuales de CO₂ y constituye, por lo tanto, entre el 10 y 12% de la contribución humana al cambio climático por el calor retenido en la atmósfera. Frente a este escenario, toda mejora tecnológica y utilización de materiales alternativos de construcción que posea la capacidad de disminuir las pérdidas y ganancias de calor en edificaciones tiene un impacto potencial muy alto en la reducción de emisiones de gas de efecto invernadero y del consecuente calentamiento global.

Según el Instituto Nacional de Tecnología Industrial de Argentina, se podría decir que aproximadamente un tercio de la energía que se genera en ese país es consumido por las edificaciones y un poco menos de la mitad de esa energía se pierde en la demanda de acondicionamiento térmico (INTI, 2005). De esta cantidad, casi la mitad se utiliza para satisfacer la demanda de calefacción y refrigeración, y más del 30% del resto se disipa por techos con mala calidad de aislación térmica, lo que produce escapes de calor en invierno y sobrecalentamiento en verano.

En Argentina son varias las normas que definen los lineamientos de acondicionamiento térmico de edificaciones (IRAM N° 11549, 11601, 11603, 11604, 11605, 11507-4, 11900, 11659-1 y 11659-2). Estas normas establecen los valores térmicos, entre otros parámetros de diseño, para los materiales de construcción más utilizados. Entre los parámetros más importantes para el flujo de calor destacan la densidad ρ (kg/m³), la conductividad térmica λ (W/mK), el calor específico c_p (J/kgK) y el factor de resistencia a la difusión del vapor de agua μ (adimensional). A partir de ellos, es posible caracterizar los materiales de construcción con el objeto de obtener la transmitancia térmica K (W/m².K), o su inversa, la resistencia térmica R (m².K/W). Es importante considerar que las determinaciones térmicas se hacen en régimen estacionario, por lo cual el parámetro de mayor relevancia es la conductividad térmica λ del material (Damfeu, Meukam y Jannot, 2016; Ouedraogo, Aubert, Tribout y Escadeillas, 2020).

Los mecanismos de transferencia de calor son la conducción, convección y radiación. Las envolventes tradicionales de las edificaciones se realizan, en su mayoría, con materiales sólidos de porosidades medias o bajas, los cuales se encuentran sometidos a cambios de temperatura ambiente. Las normativas que regulan los cerramientos de viviendas están principalmente basadas en el control de transmisión de calor en los

cerramientos, por lo que consideran prioritario la definición de la masa y material de la envolvente (Dao, Ouedraogo, Millogo, Aubert y Gomina, 2018).

En las últimas décadas se ha producido un aumento significativo en el interés por conseguir nuevos materiales para envolventes con el propósito de hacer más eficiente las edificaciones desde el punto de vista energético. Los bloques de suelo-cemento compactados (BSEC) constituyen una de las alternativas exploradas por tratarse de materiales de bajo costo, cuya fabricación es amigable ambientalmente ya que su utilización minimiza las emisiones de dióxido de carbono generadas por la industria de la construcción tradicional. Los BSEC se fabrican con suelo local y el agregado de algún aditivo (generalmente, cemento y/o cal hidratada) y agua, lo que provee cohesión a la mezcla y resistencia mecánica a los mampuestos. Esta mezcla se somete a elevadas presiones por compresión mecánica y, a diferencia de otros mampuestos, no tiene ningún tipo de proceso de cocción (Nagaraj, Sravan, Arun y Jagadish, 2014; Costantini, Francisca y Giomi, 2021; Allen, 2012; Sekhar y Nayak 2018). Luego, se realiza un curado durante por lo menos 28 días. Estos bloques son una alternativa ecológica económica y eficiente para edificaciones (Dahmen y Muñoz 2014; William, Goodhew, Griffiths y Watson, 2010).

La industrialización y construcción con BSEC está limitada por la escasa normalización en esta materia. Existe normativa que aborda la selección adecuada de suelos y la construcción de BSEC con lineamientos de principios y formas para construir en países como España, Francia, Nueva Zelanda, Estados Unidos, y varias regiones de África. Todas estas normas establecen recomendaciones y directivas del proceso de producción de los BSEC (AENOR, 2008). A pesar de las ventajas del uso de suelo local y de la escasez de regulaciones en muchos países, el uso de BSEC para la construcción de envolventes se ha incrementado notoriamente en la actualidad (Costantini, Carro Pérez y Francisca, 2016). Estudios recientes demostraron que los BSEC con distintos tipos de suelos y un adecuado contenido de aditivos estabilizantes superan la resistencia mecánica requerida por las normativas de construcción tradicional para mampuestos sismorresistentes (AENOR, 2008; Balaji, Mani y Venkatarama Reddy, 2016; Sittou, Zeinali, Heidarian y Story, 2018).

El flujo de calor a través de los BSEC es considerado, por lo general, como conducción pura, pero también se produce transferencia de calor por radiación y por convección. En los medios porosos, tales como los suelos compactados, el modo principal de transferencia de calor es la conducción a través de las partículas sólidas (Yagi y Kunii 1957; Yun y Santamarina, 2008; Borbón, Cabanillas y Pérez, 2010; Mozejko y Francisca, 2020), dado que la conductividad térmica de los minerales es mayor a la del agua y el aire que se encuentran en los

poros entre partículas. Es por ello que entre los factores que controlan la conductividad térmica de un material formado por partículas, se encuentra el contacto entre dichas partículas, la densidad (o porosidad) y el grado de humidificación (o contenido de humedad) (Costantini *et al.*, 2021). Asimismo, existen otros factores secundarios que influyen, en menor medida, en la transferencia de calor a través de los medios porosos, tales como la mineralogía de las partículas, el tamaño de partículas y la presión aplicada (Reuelta, García-Calvo, Carballosa y Pedrosa, 2021).

En el caso de suelos cementados es necesario considerar, además, las propiedades termofísicas del material estabilizante incorporado, el tiempo de curado y la capacidad calorífica y conductividad térmica del mismo (Costantini *et al.*, 2021). En los BSEC, el flujo de calor se genera principalmente a través de los sólidos (partículas de suelo y cementante), ya que el calor se transmite más fácilmente por conducción que a través del aire de los poros. A medida que la porosidad aumenta (por ejemplo, en BSEC con menor densidad o perforados), la conductividad térmica disminuye, pero comienzan a tener relevancia los fenómenos de convección y radiación (Muñoz, Thomas y Marino, 2015; Balaji y Mani, 2019).

El uso de técnicas como la termografía permite calificar la eficiencia energética de las construcciones, detectar problemas constructivos, puentes térmicos, falta de estanqueidad y pérdidas de calor, mediante contrastes térmicos en función de los cuales se puede diferenciar patologías y defectos específicos (Sharlon, 2008; Fox, Coley, Goodhew y de Wilde, 2014). Experiencias reportadas en la literatura especializada han demostrado la aptitud de los análisis termográficos para cuantificar la eficiencia de sistemas de aislación, detectar caminos preferenciales de flujo de calor, detección de pérdidas de aire y mapeos de contenido de humedad (Grinzato, Vavilov y Kauppinen, 1998). Una de las principales ventajas de la termografía en viviendas es que permite medir temperaturas superficiales de manera no invasiva. A partir de estas mediciones es posible realizar análisis cualitativos, diferenciando zonas en las edificaciones y diferentes materialidades (Revillas, 2011). Esto facilita, a su vez, cuantificar las pérdidas de calor a través de una envolvente y definir el coeficiente de transmitancia térmica de cada uno de los muros que constituyen una edificación (Sekhar y Nayak, 2018; Muñoz *et al.*, 2015).

Concretamente, el propósito de este trabajo es evaluar el comportamiento térmico de bloques de suelo-cemento compactados utilizados para la construcción de envolventes en una vivienda experimental. En tal sentido, se analizan distintos tipos de muros en la vivienda con el fin de determinar la transmitancia térmica de cada composición con BSEC y las resistencias térmicas superficiales (interior y exterior) para determinar la eficiencia de cada envolvente.

METODOLOGÍA

En primera instancia, se caracteriza la conductividad térmica de los bloques de suelo cemento en laboratorio y se definen las propiedades térmicas de los materiales de construcción, utilizadas para el análisis de resultados. En seguida, se presenta el monitoreo de una edificación mediante hobos y cámara termográfica, determinando variaciones de temperaturas y puentes térmicos con un análisis cualitativo y cuantitativo de temperaturas superficiales de las envolventes. Se realiza, posteriormente, un análisis de las normativas argentinas (IRAM) y los requerimientos de confort adecuados para envolventes edilicias. A partir de ello, se analizan los valores admisibles de resistencias superficiales y de transmitancia térmica en muros, determinando los valores mínimos para alcanzar el confort térmico de acuerdo con la zona bioambiental. Así, se calculan las resistencias térmicas superficiales para poder definir las pérdidas de calor en cada tipología de envolventes configurada con bloques de suelo cemento, en condiciones reales de uso y época invernal.

MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

La conductividad térmica de los mampuestos de suelo-cemento que constituyen la envolvente se efectúa a través de un sensor de aguja marca East 30 Sensors. El procedimiento experimental y los detalles metodológicos de esta técnica se enmarcan en la norma ASTM D-5334. Previo al ensayo de los ladrillos, se calibra la aguja de medición y se comparan los valores medidos con la conductividad térmica de materiales con propiedades conocidas. Para la calibración, se utiliza una agua destilada y glicerina líquida; proceso del que resulta, en el caso del primer material, un valor de 0,595 W/(m K), para un valor teórico de 0,607 +/-0,03, y del segundo, un valor de 0,293 W/(m K), para un valor teórico de 0,292 +/-0,003. Cabe destacar que los errores porcentuales son inferiores a +/- 3%.

Los BSEC son prismas machihembrados, de 25 cm de largo, 12,5 cm de ancho y 7 cm de alto. Tienen dos orificios de 7 cm de diámetro dispuestos de manera transversal que son usados para las instalaciones en el interior del muro. Para medir la conductividad térmica de los BSEC se introduce el sensor de aguja, de acero inoxidable de 1 mm de diámetro y 60 mm de longitud en un orificio perforado en los bloques. El orificio se realiza con un diámetro ligeramente superior al del sensor, de manera de poder introducir la aguja. La posición del orificio se selecciona cuidadosamente para evitar que la presencia de las cámaras de aire produzca efectos de borde que pudieran afectar los resultados medidos.

Una vez inserta el agua, se le aplica la corriente continua mediante un generador de voltaje Agilent E3645A, la cual produce su calentamiento ya que en el interior de la aguja se encuentra alojado un hilo conductor. El calor generado se disipa a través del medio en contacto con la

aguja, mientras una termocupla de 0,01°C de precisión en el centro de la aguja detecta los cambios de temperatura con el transcurso del tiempo. Esta medición se lleva a cabo con un multímetro Agilent 34410A. A partir de los cambios de temperatura en función del tiempo, se realiza un análisis inverso para calibrar la solución de la ecuación de flujo de calor axisimétrico y así determinar la conductividad térmica del material que rodea la aguja. La Figura 1 presenta un resultado tipo donde puede observarse el incremento de temperatura provocado por el calentamiento de la aguja en función del tiempo y el sector de la curva utilizado para aproximar la solución teórica a los resultados experimentales, siguiendo los lineamientos sugeridos en la norma ASTM D 5334.

El tiempo de monitoreo de temperaturas oscila entre los 60 y los 120 segundos, durante el cual se debe cuidar que el incremento de temperatura del sensor no supere los 3°C. Todos los ensayos se efectúan en condiciones controladas de temperatura y humedad de 24°C y 50%, respectivamente. Cada ensayo se repitió un mínimo de 6 veces, para luego adoptar como valor representativo el promedio de las mediciones.

ANÁLISIS TERMOGRÁFICO

La adquisición de imágenes se realizó mediante una cámara termográfica TESTO 871, con una resolución IR de 240 x 180 pixels, campo de visión de 35° x 26°/ 0,5m, resolución espacial 1,6 mrad, sensibilidad térmica 90 mK, frecuencia de la medición 9Hz, rango de temperatura de -30°C a 650°C, y precisión 2 °C, ±2 % del valor medido.

Durante las mediciones se adoptó como configuración de la cámara una emisividad igual a 0,95 y una compensación de la temperatura reflejada de fondo de 20°C, de acuerdo a las recomendaciones de la guía de la termografía infrarroja (Revillas, 2011). Las imágenes termográficas se tomaron en 4 momentos diferentes del día, con clima nublado para evitar la radiación solar directa en las imágenes exteriores de la vivienda. A partir de estas imágenes, se determinó la temperatura superficial promedio diaria de cada tipo de muro. El mismo procedimiento permitió obtener imágenes del interior en un tiempo mínimo de diferencia y así conocer la diferencia de temperatura interior-exterior en periodos cercanos de tiempo (no superiores a 1 minuto). Tras el análisis y procesamiento de los termogramas, se determinó la resistencia superficial de los muros, empleada para el cómputo del flujo de calor y resistencia térmica de los mismos.

Para el cómputo de la resistencia térmica superficial se emplearon las propiedades de la superficie, la emisividad, la velocidad del aire a lo largo de la superficie y las temperaturas de la superficie, del aire ambiente y de las superficies circundantes. De esa forma, la resistencia térmica superficial R_s en superficies planas resultó (AENOR, 2008):

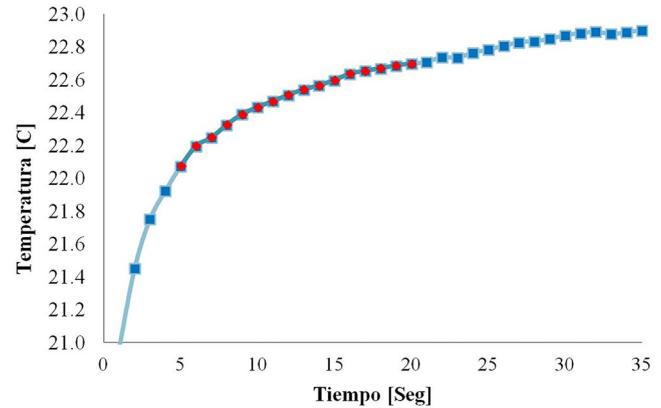


Figura 1. Respuesta tipo de cambio de temperatura de la aguja en función del tiempo durante la medición de conductividad térmica. Fuente: Elaboración de Francisca y Costantini Romero.

$$R_s = 1/(h_c + h_r) \dots\dots\dots(1)$$

Donde h_c es el coeficiente de convección y h_r es el coeficiente de radiación. El coeficiente de convección, en el caso de flujo de calor horizontal, resultó igual a 2,5 W/(m²K) en la superficie interior y 20 W/(m²K), en la exterior, según norma IRAM (1996). Por otro lado, el coeficiente de convección se determinó de la siguiente manera:

$$h_r = \epsilon h_{r0} \dots\dots\dots(2)$$

Donde ϵ es el coeficiente de emisividad y h_{r0} es el coeficiente de radiación para un cuerpo negro, siendo:

$$h_{r0} = 4 \sigma T_m^3 \dots\dots\dots(3)$$

Donde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ es la constante de Stefan-Boltzmann y T_m es la temperatura media termodinámica de la superficie y sus alrededores. Según las ecuaciones (1) a (3), R_s resultó:

$$R_s = 1/(h_c + \epsilon 4 \sigma T_m^3) \dots\dots\dots(4)$$

VIVIENDA EXPERIMENTAL

La metodología propuesta se aplicó al estudio de las fachadas de la planta alta de una vivienda experimental ubicada en la ciudad de Alta Gracia, en la provincia de Córdoba, Argentina, la que se muestra en la Figura 2. La vivienda cuenta con doble altura y sólo la planta alta se encuentra construida con mampostería de bloques de suelo-cemento compactados (BSEC). La particularidad de esta vivienda es que, en toda la planta superior, construida con sistema tradicional o húmedo, se utilizaron diferentes tipos de revestimientos en los muros de la envolvente. El destino de esta vivienda es de uso residencial.



Figura 2. Vivienda experimental: a) fachada Este; b) fachada Oeste. Fuente: Elaboración de Costantini Romero.

La evaluación del comportamiento térmico de la edificación fue llevada a cabo con el registro continuo de temperatura y humedad durante 7 días del mes de agosto: desde el viernes 9 de agosto, al viernes 16 de agosto de 2019. En este periodo las tendencias de los resultados obtenidos fueron similares.

La Figura 3 exhibe la planta alta de la vivienda en estudio con la posición de los sensores instalados y la descripción y ubicación de los muros en estudio. Como puede apreciarse, los sensores de temperatura y humedad se encuentran en la sala principal, en una de las habitaciones y el exterior de la vivienda. El monitoreo de las condiciones ambientales se realizó mediante la instalación de HOBOtemp y el almacenamiento y registro de los datos con un RH logger. Se colocaron 2 HOBO en el interior de la vivienda a una altura de 1,50 m del piso y uno en el exterior, lo que permitió obtener la temperatura real del entorno con registros de valores cada 60 minutos.

Las temperaturas registradas oscilaron entre los 2°C y los 32°C, mientras que las humedades relativas exteriores lo hicieron entre el 15 y el 75%. La Tabla 1 presenta esquemas y una descripción de la configuración de cada uno de los muros analizados en la vivienda experimental.

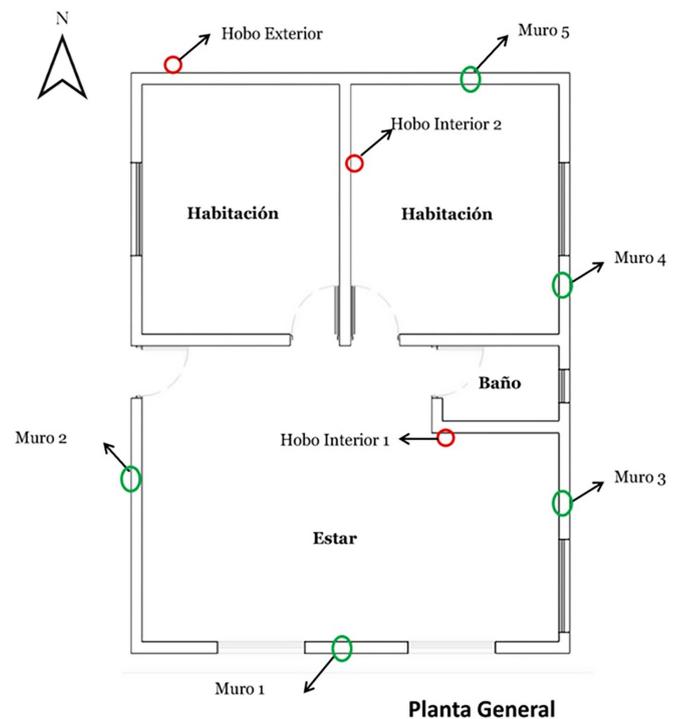


Figura 3. Planta general de la vivienda con disposición de hobos y designación de muros. Fuente: Elaboración de Costantini Romero.

RESISTENCIA TÉRMICA Y FLUJO DE CALOR

El flujo de calor por unidad de área [W/m²] a través de una envolvente edilicia puede calcularse como:

$$q = K (T_e - T_i) \dots\dots\dots(5)$$

Donde K [W/(m² K)] es la transmitancia térmica de la mampostería, y T_e y T_i [K] corresponden a la temperatura exterior e interior, respectivamente. Como son envolventes exteriores, el valor de K se obtiene por medio de la resistencia al paso del calor R, teniendo en cuenta que se trata de un problema de flujo de calor perpendicular a las capas del muro, de lo que resulta:

$$R = 1/K = R_{si} + \sum_i e_i / \lambda_i + R_{se} \dots\dots\dots(6)$$

Siendo e_i [m] el espesor de cada capa componente del muro; λ_i [W/(m K)], la conductividad térmica del material de cada capa del muro; R_{si} [m² K/ W], la resistencia térmica superficial interna; y R_{se} [m² K/ W], la resistencia térmica superficial externa.

En la ecuación [6], la conductividad térmica de cada capa se obtuvo de la normativa vigente en Argentina, IRAM 11601. En el caso de los BSEC, esta se calculó a partir de las mediciones de λ del material, de la geometría (12,5 cm x 25 cm x 7 cm) y las 2 cámaras de aire de 7 cm de diámetro ubicadas de manera simétrica y equidistante de las paredes del bloque. Para el caso del aire, se consideró λ_{aire} = 0,165 W/mK, valor obtenido de la norma IRAM [4].

Muro	Tipo de Muro	Esquema y descripción
Muro 1	suelo cemento revocado	
Muro 2	suelo cemento	
Muro 3	suelo cemento con porcelanato	
Muro 4	suelo cemento con placa de yeso	
Muro 5	suelo cemento con placa de yeso y poliestireno.	

Tabla 1. Principales características de los muros ensayados. Fuente: Elaboración de Costantini Romero.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LOS BSEC

Los valores de conductividades se obtuvieron a partir de ensayos en 10 BSEC. Estas mediciones permitieron definir la conductividad térmica de la fracción sólida de los BSEC, es decir, del suelo-cemento compactado. A partir de estas mediciones, se calculó un promedio y una desviación estándar para el suelo cemento compactado: $\lambda = 0,347 \pm 0,021$ W/mK. Luego, se determinó analíticamente la conductividad térmica equivalente del BSEC teniendo en cuenta la geometría del bloque y la presencia de las cámaras de aire mostradas. De esta manera, se obtuvo, para los BSEC, una conductividad térmica de $\lambda_{BSEC} = 0,283$ W/mK.

La diferencia entre la conductividad térmica del material que constituye el bloque (suelo cemento compactado) y la del bloque mismo ($\lambda = 0,347$ W/mK en el primer

caso y $\lambda_{BSEC} = 0,283$ W/mK en el segundo caso) refleja la importancia de los orificios y los puentes térmicos, ya que prácticamente todo el flujo de calor en los BSEC estaría transitando a través de los nervios, a pesar de que el 46% de la sección transversal se encuentra interrumpida por las cámaras de aire.

RESISTENCIAS SUPERFICIALES INTERIOR Y EXTERIOR

Las resistencias superficiales se calculan a partir de las temperaturas interiores y exteriores de la superficie de cada muro seleccionado. La Figura 4 expresa termogramas de los muros exteriores de la vivienda experimental. Los termogramas muestran las diferencias de temperaturas de los diferentes materiales de construcción diferenciando los puentes térmicos y destacando las pérdidas o ganancias térmicas a través de la envolvente. La emisividad de los distintos materiales (principalmente en el interior) demuestra que las R_{se} deberían ser distintas para calcular la conductividad térmica de cada tipología de muro.

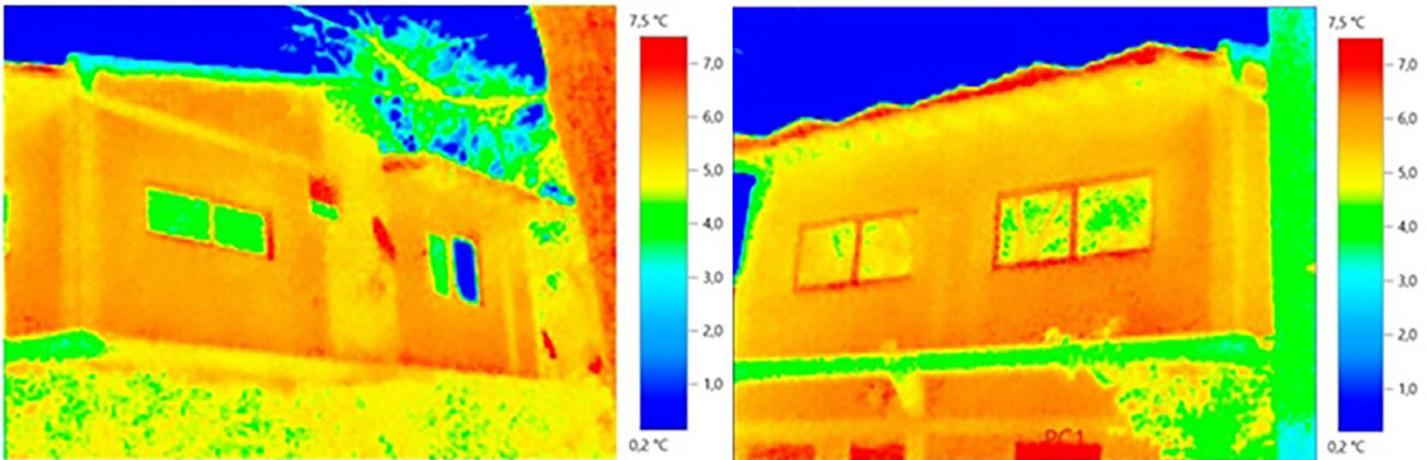


Figura 4. Imágenes termográficas exteriores. Fuente: Elaboración de Costantini Romero.

Las resistencias térmicas superficiales interiores y exteriores se obtuvieron a partir de la ecuación (4), considerando las temperaturas medias T_m superficiales determinadas a través de los termogramas y los coeficientes de emisividad ϵ establecidas en la normativa AENOR (2008) para los distintos tipos de superficie. Los resultados alcanzados para cada tipo de muro se exponen en las Tablas 2 y 3.

Los valores obtenidos se encuentran muy próximos a los recomendados en la normativa de Argentina, donde se establece para la resistencia térmica superficial interna y externa los siguientes valores: $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ y $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$, respectivamente. En ambos casos, estos valores corresponden a muros verticales con flujo de calor horizontal. Se observa, además, que la variación a lo largo del día resulta despreciable para todos fines prácticos. Es importante subrayar la importancia de determinar experimentalmente los valores de R_{si} y R_{se} , a fin de tener mayor información sobre la eficiencia energética de los cerramientos y, por lo tanto, de las edificaciones. La adopción de valores normalizados no sería recomendable y podría inducir en desviaciones significativas en las pérdidas de calor estimadas para las viviendas.

FLUJO DE CALOR

El flujo de calor se define considerando la composición y tipología de cada uno de los 5 muros de la envolvente de la vivienda en estudio, las R_{si} y R_{se} promedio calculadas en las Tablas 2 y 3 y la conductividad térmica de los BSEC determinada de manera experimental. Los resultados, en este sentido, se presentan en la Tabla 4. En los mismos se advierte que la transmitancia térmica de los muros decrece a medida que se incorporan elementos aislantes como cámaras de aire, poliestireno o yeso, incorporando o aumentando la resistencia térmica del conjunto. Los muros 4 y 5, con transmitancia $K = 1,219 \text{ W/m}^2\text{K}$ y $1,251 \text{ W/m}^2\text{K}$, no sólo son los más resistentes

Muro	Superficie del muro	Hora del día				Promedio
		00:00	06:00	12:00	18:00	
Muro 1	Barnizado ($\epsilon=0,85$)	0,147	0,148	0,146	0,142	0,146
Muro 2	Barnizado ($\epsilon=0,90$)	0,142	0,143	0,141	0,136	0,141
Muro 3	Barnizado ($\epsilon=0,95$)	0,137	0,138	0,136	0,132	0,136
Muro 4	Barnizado ($\epsilon=0,80$)	0,153	0,154	0,152	0,147	0,152
Muro 5	Barnizado ($\epsilon=0,93$)	0,139	0,140	0,138	0,133	0,138

Tabla 2. Resistencia térmica superficial interior (R_{si}) para cada tipo de muro. Fuente: Elaboración de Costantini Romero.

Muro	Superficie del muro	Hora del día				Promedio
		00:00	06:00	12:00	18:00	
Muro 1	Barnizado ($\epsilon=0,85$)	0,041	0,041	0,040	0,040	0,041
Muro 2	Barnizado ($\epsilon=0,85$)	0,042	0,041	0,041	0,041	0,041

Tabla 3. Valores de Resistencia superficial exterior (R_{se}) para cada tipo de muro. Fuente: Elaboración de Costantini Romero.

Muro	Capa del elemento	Espesor (m)	λ (W/mK)	R (m ² K/W)	K (W/m ² K)
Muro 1	Rsi	-	-	0,1460	1,499
	2- Ladrillo	0,1300	0,283	0,3662	
	3- Revoque Interior	0,0200	0,960	0,0208	
	Rse	-	-	0,0410	
	Espesor total	0,15	Resistencia Total	0,6672	
Muro 2	Rsi	-	-	0,1410	1,599
	2- Ladrillo	0,1300	0,283	0,3662	
	Rse	-	-	0,0410	
	Espesor total	0,13	Resistencia Total	0,6414	
Muro 3	Rsi	-	-	0,136	1,473
	2- Ladrillo	0,13	0,283	0,3662	
	3- Mortero	0,005	0,160	0,031	
	4- Porcelanato	0,008	0,700	0,011	
	Rse	-	-	0,041	
	Espesor total	0,143	Resistencia Total	0,679	
Muro 4	Rsi	-	-	0,152	1,219
	2- Ladrillo	0,13	0,283	0,3662	
	3- Cámara Aire	0,02	0,165	0,125	
	4- Placa de yeso	0,015	0,347	0,043	
	Rse	-	-	0,041	
	Espesor total	0,165	Resistencia Total	0,821	
Muro 5	Rsi	-	-	0,138	1,251
	2- Ladrillo	0,13	0,283	0,3662	
	3- Poliestireno	0,02	0,170	0,118	
	4- Placa de yeso	0,015	0,347	0,043	
	Rse	-	-	0,041	
	Espesor total	0,165	Resistencia total	0,799	

Tabla 4. Valores de transmitancia térmica para cada tipología de mampostería. Fuente: Elaboración de Francisca y Costantini Romero.

térmicamente, sino que también alcanzan los valores que establece la norma IRAM para ser recomendados en la construcción eficiente en la condición de verano, donde la normativa establece un valor máximo de 1,80 W/m²K. Para la estación invernal, en cambio, ninguna de las envolventes debería superar el mínimo valor exigido de 1,00/m²K, ya que las exigencias son más rigurosas.

Las cámaras de aire incorporadas en la mampostería, materializadas a través de las placas de yeso, mejoran el comportamiento térmico de los muros, disminuyendo en hasta casi un 25% el flujo de calor. El descenso en K es significativo comparado con el de un muro simple de mampostería de BSEC. En los muros con la cámara de aire y yeso, y con agregado de poliestireno y yeso se observaron mejoras de eficiencia considerables. Los resultados de la presente investigación proporcionan, como se ve, una base de datos experimental para la validación de modelos de transferencia de calor en muros. Estos resultados demuestran las ventajas de utilizar suelo como material de construcción sostenible.

CONCLUSIÓN

En el trabajo expuesto se evaluaron las propiedades térmicas de los ladrillos de suelo-cemento compactado como una alternativa sostenible para la construcción de envolventes en edificaciones. En ese marco, se examinaron las principales propiedades térmicas de los ladrillos y su aplicación en una vivienda experimental donde la planta alta se construyó con muros de suelo-cemento compactado con diferentes tecnologías constructivas para los cerramientos. Se analizaron las pérdidas de calor para cada alternativa y, finalmente, se determinaron las ventajas de la adopción de ladrillos de este tipo para la construcción de fachadas de alta eficiencia térmica. Las principales conclusiones del estudio se resumen de la siguiente manera:

- El análisis de las transmitancia térmica de cinco tipos de muros estructurados de formas diferentes contruidos utilizando bloques de suelo cemento compactado permite afirmar que los ladrillos utilizados son una excelente alternativa para materializar construcciones con un bajo impacto ambiental, ya que su uso minimiza las pérdidas y ganancias de calor interior durante el invierno y verano, respectivamente.
- La termografía pasiva resultó ser un método no invasivo y de bajo costo mediante el cual es posible detectar las temperaturas superficiales de cada muro. Así, se obtienen de manera directa las resistencias térmicas superficial interior y exterior de un muro envoltente, lo que da lugar al desarrollo de un diseño adecuado para el acondicionamiento térmico de una edificación. Contar con una medición directa de las resistencias térmicas

superficiales permite aumentar la precisión en la determinación de pérdidas de calor en edificaciones determinando experimentalmente la conductividad térmica del material de los mampuestos y las resistencias superficiales Rsi y Rse de los revestimientos de la envoltente.

- La transmitancia térmica de cada tipología de muro varía en función de las resistencias al paso del calor que ofrece cada mampostería. Para los distintos muros evaluados, se obtuvieron valores entre 1,219 y 1,599 W/m²K, los cuales se encuentran en un rango adecuado para la condición de verano, de acuerdo a la normativa argentina. El método de análisis desarrollado en este trabajo puede ser aplicado a viviendas materializadas con otras técnicas constructivas y en diferentes ubicaciones, pero siempre teniendo la reserva de comparar las transmitancias térmicas obtenidas con las regulaciones locales.
- Las resistencias superficiales varían con cada tipo de material y a lo largo del día, por lo que se recomienda su determinación directa en lugar de la adopción de valores únicos normalizados. Respecto a los muros ensayados, los valores obtenidos oscilaron entre 0,138 m²K/W y 0,152 m²K/W, para la resistencia interna, y 0,041 m²K/W, para la resistencia externa. La adopción de valores adecuados a la realidad permite adecuar los diseños de envolventes y uso de materiales con el fin de ahorrar energía en el acondicionamiento térmico de viviendas. Igualmente, cabe relevar que el procedimiento propuesto y desarrollado en esta investigación es aplicable a cualquier tipología constructiva y a edificaciones en cualquier región bioclimática en cualquier país. Se recomienda adoptar el procedimiento propuesto aquí y comparar los resultados obtenidos con la normativa local de cada país.
- Los resultados alcanzados demuestran la importancia de disponer de determinaciones cuantitativas de flujo de calor luego de construida una vivienda. Ello permite tener en cuenta de manera directa y concreta el lugar de emplazamiento en el cómputo de consumo energético para acondicionamiento térmico, como también diseños ajustados a las necesidades reales de acondicionamiento, a fin de lograr el confort térmico en las construcciones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa “La Primera Ladrillos” por la provisión de los bloques para su ensayo y por el acceso a la vivienda experimental para su estudio. A.B. Costantini Romero agradece la beca Doctoral del CONICET. Los autores agradecen al CONICET y SECyT-UNC por el financiamiento recibido para las investigaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AENOR (2008). *Norma española UNE 41410. Bloques de Tierra Comprimida para Muros y Tabiques. Definiciones especificaciones y métodos de ensayo*. Recuperado de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0042285>

Allen, G. T. R. (2012). *Strength Properties of Stabilized Compressed Earth Blocks with Varying Soil Compositions*. Tesis doctoral. University of Colorado.

Balaji, N. C., Mani, M. (2019). Error Analysis on Thermal Conductivity Measurements of Cement-stabilized Soil Blocks. *Earthen Dwellings and Structures* (pp. 333-343). Singapore: Springer. DOI: https://10.1007/978-981-13-5883-8_29

Balaji, N. C., Mani, M. y Venkatarama Reddy, B. V. (2016). Thermal conductivity studies on cement-stabilised soil blocks. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 70(1), 40-54. DOI: <https://doi.org/10.1680/jcoma.15.00032>

Borbón, A. C., Cabanillas, R. E. y Pérez, J. B. (2010). Modelación y simulación de la transferencia de calor en muros de bloque de concreto hueco. *Información tecnológica*, 21(3), 27-38. DOI: [doi:10.1612/inf.tecnol.4223it.09](https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.4223it.09)

Costantini, A. B., Carro Pérez, M. E. y Francisca, F. M. (2016). Evaluación del comportamiento térmico de una edificación reemplazando el material de la envolvente por suelo-cemento. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 20, 33-43.

Costantini, A. B., Francisca, F. M. y Giomi, I. (2021). Hygrothermal properties of soil-cement construction materials. *Construction and Building Materials*, 313, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125518>.

Dahmen, J. y Muñoz, J. F. (2014). Earth masonry unit: sustainable CMU alternative. *International Journal of GEOMATE*, 6(2 SERL 12), 903-910.

Damfeu, J. C., Meukam, P. y Jannot, Y. (2016). Modeling and estimation of the thermal properties of clusters aggregates for construction materials: The case of clusters aggregates of lateritic soil, sand and pouzzolan. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 102, 407-416. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.044>

Dao, K., Ouedraogo, M., Millogo, Y., Aubert, J. E. y Gomina, M. (2018). Thermal, hydric and mechanical behaviours of adobes stabilized with cement. *Construction and Building Materials*, 158, 84-96. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2017.10.001](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.001)

Fox, M., Coley, D., Goodhew, S. y de Wilde, P. (2014). Thermography methodologies for detecting energy related building defects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 296-310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.188>

Grinzato, E., Vavilov, V. y Kauppinen, T. (1998). Quantitative infrared thermography in buildings. *Energy and buildings*, 29(1), 1-9. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00039-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00039-X)

INTI (2005). Ahorro y certificación energética: la envolvente de los edificios. *Saber cómo*, (27), 4.

Mozejko, C. A. y Francisca, F. M. (2020). Enhanced mechanical behavior of compacted clayey silts stabilized by reusing steel slag. *Construction and Building Materials*, 239. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117901>

Muñoz, N., Thomas, L. P. y Marino, B. M. (2015). Comportamiento térmico dinámico de muros típicos empleando el método de la admitancia. *Energías Renovables y Medio Ambiente (ERMA)*, 36, 31-39.

Nagaraj, H. B., Sravan, M. V., Arun, T. G. y Jagadish, K. S. (2014). Role of lime with cement in long-term strength of Compressed Stabilized Earth Blocks. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3(1), 54-61.

Norma IRAM N° 11601, (1996). Aislamiento térmico de edificios. Propiedades térmicas de los materiales para la construcción. Método de cálculo de la resistencia térmica total. www.iram.org.ar.

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>.

Revillas, S. M. (2011). *Guía de la Termografía Infrarroja*. Madrid: Asociación Española de Termografía Infrarroja.

Revuelta, D., García-Calvo, J. L., Carballosa, P. y Pedrosa, F. (2021). Evaluation of the influence of the degree of saturation, measuring time and use of a conductive paste on the determination of thermal conductivity of normal and lightweight concrete using the hot-wire method. *Materiales de Construcción*, 71(344), e260-e260. DOI: <https://doi.org/10.3989/mc.2021.03621>

Sekhar, D. C. y Nayak, S. (2018). Utilization of granulated blast furnace slag and cement in the manufacture of compressed stabilized earth blocks. *Construction and Building Materials*, 166, 531-536. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.125>

Sharlon, M. R. (2008). *Active Thermography: An Overview of Methods and Their Applications in Use Today*. Orlando, Florida.

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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.005>

United Nations Environment Programme [UNEP] (2009). Recuperado de <https://www.unenvironment.org/resources/annual-report/unep-2009-annual-report>

Williams C., Goodhew S., Griffiths R. y Watson, L. (2010). The feasibility of earth block masonry for building sustainable walling in the United Kingdom. *Journal of Building Appraisal*, 6(2), 99-108.

Yagi S. y Kunii D., (1957) Studies on Effective Thermal Conductivity in Packed Bed *AIChE Journal*, 3(3), 373-381. DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.690030317>

Yun, T. S. y Santamarina, J. C. (2008). Fundamental study of thermal conduction in dry soils. *Granular matter*, 10(3). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10035-007-0051-5>

