



Revista de Arquitectura

ISSN: 1657-0308

ISSN: 2357-626X

Universidad Católica de Colombia, Facultad de Diseño y
Centro de Investigaciones (CIFAR)

Medina-Patrón, Natalia; Escobar-Saiz, Jonathan
Envolventes eficientes. Relación entre condiciones
ambientales, espacios confortables y simulaciones digitales
Revista de Arquitectura, vol. 21, núm. 1, 2019, Enero-Junio, pp. 90-109
Universidad Católica de Colombia, Facultad de Diseño y Centro de Investigaciones (CIFAR)

DOI: <https://doi.org/10.14718/RevArq.2019.21.1.2140>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=125160041009>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UDEM
redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Envolventes eficientes

Relación entre condiciones ambientales, espacios confortables y simulaciones digitales

Efficient building envelopes: Relationship between environmental conditions, comfortable spaces, and digital simulations

Envolventes eficientes: relação entre condições ambientais, espaços confortáveis e simulações digitais

Natalia Medina-Patrón

Jonathan Escobar-Saiz

Universidad Católica de Colombia, Bogotá (Colombia)

Facultad de Diseño, Programa de Arquitectura

Centro de investigaciones CIFAR

Semillero Análisis de envolventes eficiente

Medina-Patrón, N., & Escobar-Saiz, J. (2019). Envolventes eficientes: relación entre condiciones ambientales, espacios confortables y simulaciones digitales. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 21(1), 90-109. doi: <http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2019.21.1.2140>



<http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2019.21.1.2140>

Natalia Medina-Patrón

Arquitecta, Universidad de los Andes, Bogotá (Colombia).

Máster en Arquitectura y Sostenibilidad, Universidad Politécnica de Cataluña (España).

Directora de Efecto Habitar. Arquitectura Sostenible y Diseño Bioclimático. <https://www.efectohabitar.com/>

<https://orcid.org/0000-0001-5991-1771>

nlmedina@ucatolica.edu.co

Jonathan Escobar-Saiz

Arquitecto, Universidad Católica de Colombia, Bogotá (Colombia).

<https://orcid.org/0000-0003-3679-7149>

jescobar00@ucatolica.edu.co

Resumen

La vivienda social en Colombia presenta una problemática asociada a la selección y el uso de una materialidad consecuente con el cambio climático y las condiciones de confort térmico y lumínico. En esta investigación se evalúan opciones para sugerir una mejor selección de materiales de la envolvente, para esto, se emplea un prototipo de vivienda ubicada en el barrio Bella Vista, municipio de Soacha (Colombia); este se modela con tres grupos de materiales categorizados como: tradicionales, de vanguardia e innovadores. Se realizan 144 simulaciones térmicas y 18 lumínicas en las que se consideran el clima y sus variaciones durante los siguientes 55 años de vida útil de la edificación, con el fin de comparar e identificar la combinación de materiales que logran mejor eficiencia térmica y lumínica. Como resultado se encuentra que los materiales tradicionales e innovadores responden con mayor eficiencia, aunque requieren de acciones pasivas de diseño, por estar fuera de los rangos de confort. Por su parte, los materiales de vanguardia se encuentran en balance dentro de las dos categorías.

Palabras clave: adaptación al clima; arquitectura bioclimática; comportamiento térmico; confort térmico y lumínico; materiales de construcción; modelo de simulación.

Abstract

Social housing in Colombia presents a problem associated with the selection and use of materials that are consistent with climate change and the conditions of thermal and lighting comfort. This research evaluates different options to suggest a better selection of building envelope materials; for this, an urban housing prototype located in the Bella Vista district of Soacha (Colombia) was used. The modeling used three groups of materials categorized as traditional, avant-garde, and innovative. 144 thermal and 18 lighting simulations were carried out, considering the climate and its variations during the next fifty-five years of useful life of the building, in order to compare and identify the combination of materials that achieve better thermal and lighting efficiency. As a result, the paper found that traditional and innovative materials have greater efficiency, although they require passive design actions since they are outside the comfort ranges. Avant-garde materials showed balanced values within the two categories.

Keywords: Adaptation to climate; bioclimatic architecture; thermal behavior; thermal and lighting comfort; construction materials; simulation model.

Resumo

A moradia social na Colômbia apresenta uma problemática associada com a seleção e o uso de uma materialidade consequente com a mudança climática e com as condições de conforto térmico e luminoso. Nesta pesquisa, são avaliadas opções para sugerir uma melhor seleção de materiais da envolvente; para isso, é empregado um protótipo de moradia localizada no bairro Bella Vista, município de Soacha (Colômbia), o qual é modelado com três grupos de materiais categorizados como: tradicionais, de vanguarda e inovadores. São realizadas 144 simulações térmicas e 18 luminosas nas quais são considerados o clima e suas variações durante os seguintes 55 anos de vida útil da edificação, com o objetivo de comparar e identificar a combinação de materiais que conseguem melhor eficiência térmica e luminosa. Como resultado, constata-se que os materiais tradicionais e inovadores atendem com maior eficiência, embora requeiram de ações passivas de desenho, por estarem fora dos padrões de conforto. Por sua vez, os materiais de vanguarda se encontram em equilíbrio dentro das duas categorias.

Palavras-chave: adaptação ao clima; arquitetura bioclimática; comportamento térmico; conforto térmico e luminoso; materiais de construção; modelo de simulação.

Recibido: junio 2 / 2018

Evaluated: octubre 22 / 2018

Aceptado: diciembre 5 / 2018

Introducción

Esta investigación se desarrolla en el marco del semillero: Análisis de envolventes eficientes, financiado y avalado por la Universidad Católica de Colombia; en este se aborda el análisis y la evaluación de materiales envolventes en prototipos habitables, y su comportamiento frente a las condiciones del clima. El desarrollo de estas actividades permitió contemplar aspectos bioclimáticos en el diseño del proyecto de grado¹ de uno de los integrantes. Lo anterior, con el fin de identificar la correcta selección material de la envolvente en términos de bienestar térmico y lumínico frente a las condiciones climáticas presentes y futuras en el barrio Bella Vista, ubicado en el municipio de Soacha, Cundinamarca (Colombia) (Figura 1).

El proyecto desarrollado consistía en una propuesta habitacional que respondiera al déficit de vivienda cuantitativo y cualitativo existente en el barrio. En la primera fase, el diseño fue concebido sin ningún planteamiento bioclimático, y no se definió un material para la envolvente que fuera acorde con las condiciones climáticas del lugar. Esta situación no es diferente a las soluciones de viviendas de interés social (VIS) y prioritario (VIP) que ofrecen las entidades constructoras en el país, debido en gran medida al enfoque económico de las corporaciones privadas que acaparan la construcción de estas viviendas con fines lucrativos, unido a la ausencia de políticas públicas en materia de sostenibilidad, como lo menciona Bedoya (2011, p. 29).

Lo anterior, con el agravante del desconocimiento o la escasa aplicación de estrategias pasivas de adaptación al clima en arquitectura, y la ausencia de nociones de control del confort térmico y lumínico, lo que agudiza el problema del confort y la baja ventilación en la VIS, como lo afirman Giraldo y Herrera (2017, p. 79); en este punto, es sustancial entender el concepto de confort que forma parte importante del objetivo de esta investigación, y que de acuerdo con Víctor Armando Fuentes Freixanet, en el texto *Clima y arquitectura*, es definido así:

El cuerpo humano es afectado por todos los factores y variables ambientales que le rodean, tanto físicas como psicológicas. La Organización Mundial de la Salud define a la salud como aquel estado de bienestar físico, psicológico y social del individuo en relación con su entorno. Cuando el cuerpo ofrece el menor esfuerzo para mantener sus condiciones de equilibrio y mantener en óptimo funcionamiento todos sus órganos, se

¹ Consiste en un diseño arquitectónico realizado en el núcleo proyecto, el cual es desarrollado bajo la idea de diseño concurrente (urbano, arquitectónico y constructivo), que conduce a la obtención del título de arquitecto (PEP, 2010).

Localización geográfica

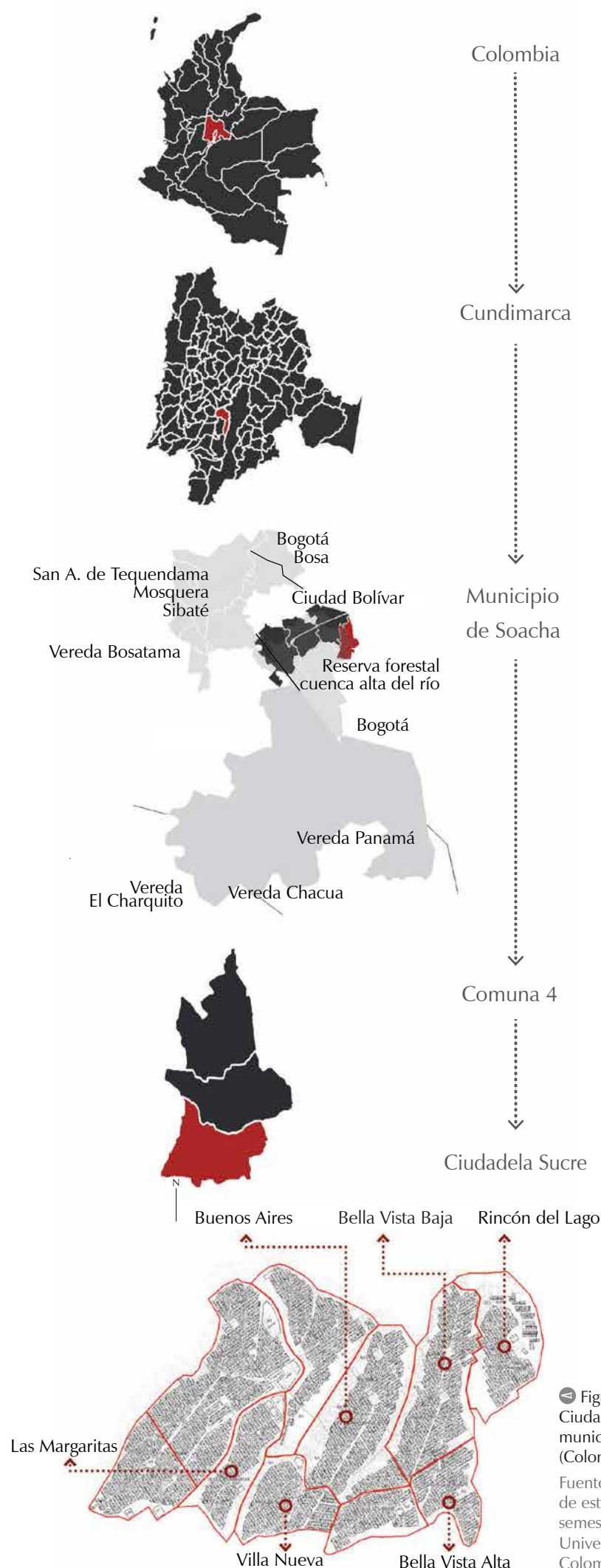


Figura 1. Localización Ciudadela Sucre, municipio de Soacha (Colombia)

Fuente: elaboración de estudiantes décimo semestre, 2017, Universidad Católica de Colombia.

dice que está en condiciones de confort. Como se puede apreciar, aparentemente no existe diferencia significativa entre las definiciones de salud y confort (2004, p. 20).

Adicionalmente, se establece así una marcada tendencia a implementar soluciones de vivienda social que no evidencian responsabilidad ambiental frente al problema del cambio climático, sino que, por el contrario, se suman a los efectos negativos que se producen en el medio y relega a los profesionales a plantear soluciones descontextualizadas de las necesidades colectivas, lo que impacta el ambiente de manera negativa.

En estas condiciones, la vivienda se transforma en un elemento redituable, lo que la convierte en otro producto más del mercado. No obstante, las soluciones habitacionales deberían trascender de los hechos económicos y generar impactos positivos en la población, mitigando los efectos negativos inherentes de la construcción, tal como el consumo energético, el cual, de acuerdo con los expertos sobre el cambio climático del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPPC, por sus siglas en inglés), corresponde al 32 % del consumo de energía del total mundial, y, como afirman Giraldo, Bedoya y Alonso (2015, p. 155), en la mayoría de los casos las viviendas requieren sistemas de climatización y ventilación mecánica por problemas de confort y baja ventilación, lo que por un lado agudiza la crisis energética y, por el otro, es nocivo para la salud (Giraldo y Herrera, 2016, p. 79).

Como es predecible, la población aumentará con el paso del tiempo (UN, 2015) y ello implica una mayor demanda en la necesidad de vivienda; además, se espera que las variaciones climáticas contemplen mayores deltas, con olas de calor, inundaciones, disminución en periodos invernales, e incremento de polución y contaminación del aire y el agua (Wilby, 2007, p. 33). Dadas las anteriores circunstancias, se evidencia la necesidad de replantear el papel del diseñador, quien debería aportar soluciones pasivas desde el diseño arquitectónico como profesional responsable, consciente de la situación de emergencia del medio ambiente y los efectos que sus decisiones implican para la salud de las personas.

Dentro de las herramientas pasivas que puede usar el arquitecto como medidas para mitigar los efectos negativos del cambio climático se encuentra el diseño de envolventes. Estas son las barreras entre el interior y el exterior de las viviendas que, por lo tanto, tienen una gran implicación en términos de confort y, como consecuencia, juegan un papel clave en la consonancia entre el clima del lugar y las condiciones de confort en los espacios. En esa medida, las envolventes son el objeto de estudio esta inves-

tigación, en tanto las superficies de fachada se convierten en un elemento arquitectónico capaz de aislar y conferir óptimas características de confort térmico y lumínico de acuerdo con la correcta selección de sus materiales.

Las envolventes, que hace pocos años podrían haberse entendido como una expresión relacionada con el campo de las matemáticas y las artes, hoy se han popularizado dentro del campo de la arquitectura desde el aspecto tecnológico. Por un lado, el término envolvente, a diferencia de las particulares definiciones de fachada y cubierta, no da a entender un límite difuso y heterogéneo, sino dinámico, al menos configurador de un espacio flexible para ser definido por factores medioambientales, tecnológicos y funcionales particulares (Velasco y Robles, 2011, p. 94).

Pero, además, las envolventes son un elemento mucho más complejo, que va más allá de un valor funcional, ya que son los componentes con mayor área e incidencia en el control térmico y lumínico de la edificación. Velasco y Robles (2011), en el artículo "Diseño de ecoenvolventes", establecen que:

Los tipos de factores determinantes del diseño para las eco-envolventes arquitectónicas son tres: los primeros implican lo relacionado con el funcionamiento de la fachada como proveedora de confort interno; el segundo tipo de factores implica el área tecnológica, directamente ligada a la materialidad y constructibilidad de las propuestas, mientras el tercer tipo de factores serían los medioambientales, más importantes aun cuando nuestro énfasis está en la sostenibilidad espacio-ambiental del sistema envolvente (p. 94).

Dicho esto, y teniendo en cuenta que en la actualidad existen muchas alternativas materiales que mediante un uso adecuado son capaces de generar efectos positivos en el confort de las edificaciones, podríamos encaminarnos a una solución rápida que contemple las consideraciones de ecoenvolventes. Sin embargo, la selección de los materiales está íntimamente relacionada con el contexto, la función y la estética del proyecto arquitectónico, y, en esa medida, no es una tarea sencilla, pues no siempre existe un único criterio de selección. Ahora bien, es imperante la selección de los materiales como respuesta a las condiciones del clima y, además, esta información se debe evaluar constantemente con el fin de realizar una consideración apropiada y justificable de la elección (Ogunkah y Yang, 2012, p. 2).

En efecto, estas decisiones requieren de conocimiento del clima del lugar y las propiedades físicas de los materiales en cuanto a termodinámica. Pero, además, con los avances tecnológicos desarrollados en las últimas décadas se incorporaron las simulaciones digitales como alternativas que permiten evaluar el confort térmico y lumínico de los proyectos arquitectónicos, las que mediante bases climáticas y construcción de modelos de material basados en sus propiedades

térmicas permiten ratificar el confort, la disposición espacial y la localización en relación con la asoleación, buscando que sean los adecuados a las condiciones climáticas propias del lugar.

Dentro de estas alternativas se encuentra Autodesk Ecotect Analysis², un software de interfaz amigable, cuyas “principales ventajas frente a otros programas de simulación radican en su visualización gráfica en tres dimensiones de los resultados”³. Así, una vez realizada la descripción geométrica del modelo se puede hacer todo tipo de cálculos y modificaciones, ingresando o editando datos en forma progresiva, a medida que se ajusta el diseño, en forma rápida y eficaz (Boutet et al., 2007, p. 79).

Ahora bien, es importante mencionar que la precisión de cualquier software radica en su correcto uso y en la calidad de los datos ingresados, en este caso, bases climáticas, coeficientes térmicos y lumínicos. Por otro lado, como se menciona en Autodesk Knowledge Network (2016), Ecotect Analysis se integraría en la familia de productos Revit, en un esfuerzo de Autodesk para proporcionar un software adaptado a la plataforma BIM (Building Information Modeling).

De este modo, basándose en las diferentes opciones disponibles actualmente para responder de manera eficiente ante la problemática, se procedió a articular los temas relacionados con la selección de materiales de la envolvente de acuerdo con el análisis de datos climáticos en un modelo arquitectónico, estudiando los datos meteorológicos de Soacha y estableciendo las bases climáticas correspondientes; de manera simultánea, se realizó la selección de materiales existentes dentro de una matriz elaborada con el fin de analizar y disponer rápidamente de las propiedades térmicas para, de esta forma, realizar las simulaciones térmicas y lumínicas del caso; finalmente, se compararon los resultados y se identificaron los materiales de envolvente con mejor desempeño frente al clima del futuro del barrio Bella Vista en Soacha.

Metodología

Esta investigación utilizó una metodología exploratoria-descriptiva, en la que se evaluaron diferentes variables. Consecuentemente, y con el fin de alcanzar los objetivos, se desarrollaron las etapas que se describen a continuación.

Se inicia por un análisis de datos meteorológicos, mediante la obtención de la triangulación de bases climáticas cercanas del barrio Bella Vis-

ta obtenidas del IDEAM, y que evidenciarán las variaciones de temperatura consecuencia del calentamiento global, para lo cual se utilizó la herramienta CC Weather Gen, que emplea la llamada metodología *morphing* sobre modelos de circulación general para la transformación de las bases que contemplan el cambio climático. Esta herramienta, mediante el uso de computadoras, calcula un modelo matemático que determina la circulación de energía térmica sobre la atmósfera. Esta metodología tiene un enfoque provisional viable de acuerdo con Jentsch, James, Bourikas y Bahaj, (2013, p. 523), pues evalúa las proyecciones en un escenario de emisiones medias-altas, contexto dado según la clasificación de posibles escenarios futuros por IPPC. Así, la base se genera ajustando datos meteorológicos actuales con modelos climáticos futuros, lo cual produce condiciones climáticas promedio realistas. Este método tiene varias ventajas, entre ellas la confiabilidad del clima de referencia, ya que es el clima de las series meteorológicas actuales, y, por tanto, existe una alta probabilidad de que la secuencia resultante sea meteorológicamente consistente (Belcher, Hacker y Powell, 2005, p. 51).

En consecuencia, se debe analizar el clima del área que es objeto de esta investigación, y para ello es importante entender el concepto que Gonzales estableció en 2004:

El clima de un lugar, que es el conjunto de fenómenos meteorológicos que caracterizan el estado medio de la atmósfera, queda determinado por los denominados factores climáticos. Son características inalterables del lugar, propias de su ubicación, que darán lugar a los elementos climáticos más evidentes, como la temperatura, la humedad, la pluviosidad, etc. (p. 20).

Dicho esto, la caracterización de las bases climáticas es consecuente con la pertinencia de los datos; en ese sentido, se hace imprescindible registrar de una manera detallada el comportamiento climático del lugar de implantación, lo que implica consultar varias bases de datos oficiales meteorológicas, con el fin de comparar e interpolar datos para una aproximación numérica más detallada. Las variables más significativas en este caso son: temperatura máxima, temperatura promedio, temperatura mínima, humedad relativa, radiación solar y vientos. El análisis de esta información climática permite reconocer cuáles son las condiciones inherentes de un lugar determinado, las necesidades derivadas de este contexto climático particular, y cómo el material de la envolvente se convierte en un componente fundamental para la interacción entre el espacio interior y exterior, buscando optimizar o mitigar las variables del ambiente según el caso de captura de datos.

Además, como es mencionado por Vahid y Jesper (2017, p. 617), evaluar los impactos del cambio

2 Es un software de análisis de edificios desarrollado en la Escuela de Arquitectura y Bellas artes de la Universidad de Australia Occidental, que ofrece una interfaz 3D de modelización integrada con una amplia gama de funciones.

3 Se optó por este software debido a la posibilidad de descarga gratuita, acceso a licencias educativas y a la facilidad de aprendizaje.

Figura 2. Comparativo de bases climáticas

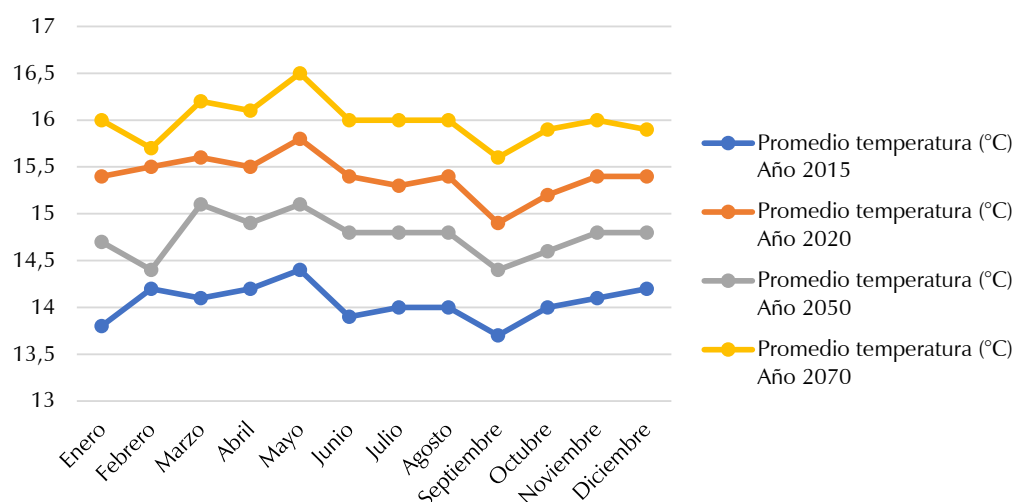
Fuente: elaboración propia, 2017, en Microsoft Excel.

2015					
Mínima temperatura		Media temperatura		Máxima temperatura	
Enero	4,8	Enero	13,8	Enero	23,0
Febrero	5,1	Febrero	14,2	Febrero	22,6
Marzo	5,5	Marzo	14,1	Marzo	21,7
Abril	7,9	Abril	14,2	Abril	21
Mayo	7,2	Mayo	14,4	Mayo	21,9
Junio	6,6	Junio	13,9	Junio	20,8
Julio	6	Julio	14	Julio	21,5
Agosto	6,7	Agosto	14	Agosto	20,4
Septiembre	5,8	Septiembre	13,7	Septiembre	21,6
Octubre	5,6	Octubre	14	Octubre	21,4
Noviembre	7,1	Noviembre	14,1	Noviembre	21
Diciembre	5,5	Diciembre	14,2	Diciembre	22,6

2020					
Mínima temperatura		Media temperatura		Máxima temperatura	
Enero	6,2	Enero	14,7	Enero	24,4
Febrero	5,8	Febrero	14,4	Febrero	22,5
Marzo	7	Marzo	15,1	Marzo	22,4
Abril	9,3	Abril	14,9	Abril	21,8
Mayo	8,9	Mayo	15,1	Mayo	21,8
Junio	7,6	Junio	14,8	Junio	21,3
Julio	7	Julio	14,8	Julio	22,3
Agosto	6,7	Agosto	14,8	Agosto	22,1
Septiembre	6,3	Septiembre	14,4	Septiembre	22,7
Octubre	6,5	Octubre	14,6	Octubre	22,2
Noviembre	6,2	Noviembre	14,8	Noviembre	23,5
Diciembre	6,4	Diciembre	14,8	Diciembre	22,6

2050					
Mínima temperatura		Media temperatura		Máxima temperatura	
Enero	6,3	Enero	15,4	Enero	24,7
Febrero	6,6	Febrero	15,5	Febrero	23,7
Marzo	7,9	Marzo	15,6	Marzo	22,9
Abril	8,2	Abril	15,5	Abril	23
Mayo	8,6	Mayo	15,8	Mayo	24
Junio	9,3	Junio	15,4	Junio	21,5
Julio	8,3	Julio	15,3	Julio	22,1
Agosto	8,8	Agosto	15,4	Agosto	21,4
Septiembre	6,6	Septiembre	14,9	Septiembre	24,4
Octubre	7,5	Octubre	15,2	Octubre	23,1
Noviembre	7,3	Noviembre	15,4	Noviembre	23,6
Diciembre	7,3	Diciembre	15,4	Diciembre	23,8

2070					
Mínima temperatura		Media temperatura		Máxima temperatura	
Enero	6,8	Enero	16	Enero	24,6
Febrero	7,2	Febrero	15,7	Febrero	24,5
Marzo	8,4	Marzo	16,2	Marzo	24
Abril	9,4	Abril	16,1	Abril	24,3
Mayo	9,8	Mayo	16,5	Mayo	22,9
Junio	8,8	Junio	16	Junio	23,1
Julio	9,1	Julio	16	Julio	22,7
Agosto	8,7	Agosto	16	Agosto	22,2
Septiembre	8,2	Septiembre	15,6	Septiembre	22,7
Octubre	7,2	Octubre	15,9	Octubre	23,3
Noviembre	7,4	Noviembre	16	Noviembre	24
Diciembre	7,6	Diciembre	15,9	Diciembre	23,6



climático es simular los fenómenos estudiados utilizando el futuro de escenarios climáticos, por lo tanto, se obtienen bases climáticas de los siguientes 55 años de vida útil de la edificación, interpolados de manera aleatoria desde la fecha de inicio de esta investigación, así: 2015, 2020, 2050 y 2070, lo que, por un lado, evidencia los impactos del cambio climático, y, por el otro, establece el contexto de problema de este estudio. De la misma forma, la obtención de las bases climáticas se basa en lo expuesto por Erbaa, Causone y Armani (2017, p. 547) quienes asocian el resultado de simulaciones más precisas con la consecución de bases de datos comparativas de varias fuentes primarias.

Para el caso de esta investigación se utilizaron las siguientes:

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), en el que están registrados los promedios de los datos hidroclimáticos de los últimos diez años de las estaciones meteorológicas que se encuentran cercanas al área objeto de análisis, tales como:
 - 21206940, Ciudad Bolívar, automática con telemetría, climatológica principal, corriente Tunjuelito.
 - 21205900, Induquímica, convencional, meteorológica especial, corriente Bogotá.
 - 21206170, Claretiano, convencional, climatológica ordinaria, corriente frío.
 - 21206660, Colegio Santiago Pérez, convencional, climatológica ordinaria, Tunjuelito.
- El software Meteonorm, que proporciona datos meteorológicos mediante valores mensuales, diarios y horarios, por medio de la interpolación de estaciones cercanas que desarrollan los cálculos de variables climatológicas, contiene datos climatológicos de 7400 estaciones meteorológicas actualizables. Estos datos analizan los factores de: precipitación, temperaturas mínimas, temperaturas medias, temperaturas máximas, brillo solar, humedad relativa, frecuencia y dirección de vientos, para llegar a conclusiones climáticas precisas sobre el lugar de implantación.


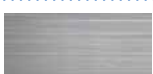
- Adicionalmente, fue utilizado el CC Weather Gen: Climate Change Weather File Generator⁴, software que permite analizar el modelo del proyecto con referencia a bases de cambios climáticos futuros. Este generador produce información desde archivos en condiciones de tiempo de cambio climático para la construcción de programas de simulación.

De esta manera se realizan cuadros climáticos de las bases obtenidas de los años 2015, 2020, 2050 y 2070, realizadas con la herramienta CC Weather Gen, IDEAM y Meteonorm, en los que se compararon factores meteorológicos como: humedad relativa, temperatura, radiación directa y difusa, nubosidad, precipitación, cuyo resultado permitió construir una matriz comparativa de los datos más representativos. Para el caso de estudio, la metodología proyecta resultados del clima de Soacha, que se registran en la Figura 2, en la que se evidencia un aumento de 2,1 °C en la temperatura en este periodo de tiempo.

El estudio comparativo de las bases climáticas permitió que el proyecto desarrollado adoptara lineamientos bioclimáticos a partir del entendimiento del lugar y sus variables en cuanto al clima. Igualmente, permitió dilucidar que la envolvente del proyecto debería ajustarse a estas variaciones para asegurar el confort en el ciclo de vida de la edificación.

Por lo tanto, en la segunda etapa, el enfoque se traslada a los materiales de la envolvente. Para esto se clasificaron los materiales en matrices (Figuras 3, 4 y 5) que permitieran filtrar coeficientes térmicos y lumínicos ligados a las fichas técnicas construidas, para de esta manera encontrar con facilidad las mejores opciones de acuerdo con las condiciones ambientales, haciendo hincapié que para esta investigación solo se tendrían en cuenta aspectos técnicos y de comportamiento físico de los materiales. El propósito de este análisis fue reconocer las condiciones de eficiencia y efectividad de los diferentes tipos de materiales, y así seleccionar las mejores alternativas entre los tres grupos, aquellos con el mejor comportamiento de acuerdo con la

⁴ Esta herramienta fue desarrollada por el Grupo de Investigación de Energía Sostenible, en la División de Investigación de Energía y Cambio Climático de la Facultad de Ingeniería y Medio Ambiente de la Universidad Southampton, Inglaterra. Este software es descargable de manera gratuita por internet.

MATERIALES TRADICIONALES		Material	λ	(VALOR U) W/ mk	Transmisión lumínica (%)	Ilustración
	Concreto Profesional	Cerramientos	1,0 - 1,8	7,00	-	
	Ladrillo medio fachada rojo	Cerramientos	0,8	6,96	-	
	Ladrillo portante prensado	Cerramientos	0,7 - 0,15	0,76	-	
	Ladrillo perforado estructural	Cerramientos	0,49 - 0,76	5,22	-	
	Madera tinglado	Cerramientos	0,04 - 0,004	1,05	-	
	Yeso	Cerramientos	0,81	67,5	-	
	Bloques de hormigón	Fachada	0,38 - 0,48	1,79	-	
	Bloques de hormigón liviano	Fachada	0,30 - 0,60	4,5	-	
	Aluminio	Fachada - Perfiles	273	546000	-	
	Vidrio común	Fachadas	7	2333	63	
	Pizarra negra	Fachadas	3,5	350	-	
	Cobre	Fachada	401	334167	-	
	Teja de barro	Cubierta	0,76	50,7	-	
	Teja de PVC	Cubierta	0,21	70	-	

λ Conductividad térmica

Figura 3. Matriz de clasificación de materiales tradicionales

Fuente: elaboración propia, 2017.

necesidad de material en cubierta, fachadas, ventanería, aislamientos y estructura.

Este compendio, por un lado, posibilita la disposición y lectura de información de forma abreviada, y, por el otro, filtra resultados de acuerdo con la necesidad de búsqueda de un gran volumen de datos en poco tiempo, estrategia metodológica que es consecuente con lo planteado por Mehta, Mehta y Sharma (2014, p. 80), quienes establecen dentro de los principios de selección de materiales la importancia de la reunión de toda la información técnica para ser evaluada, como uno de los factores imprescindibles que debe ser considerado en la selección de materiales de proyectos *green construction*. De igual modo, autores como Flórez y Castro-Lacouture (2013, p. 310) hacen énfasis en la importancia de la correcta selección material, que influye positivamente en la reducción de la energía incorporada dentro de una edificación, en las emisiones de dióxido de

carbono y en la energía requerida en procesos de fabricación.








La construcción de dichas matrices permitió profundizar en algunos conceptos de termodinámica, comprender las condiciones físicas de los materiales e interpretar la información presentada en las fichas técnicas. Por ejemplo, se analizaron conceptos como: 1) el valor U, que es el coeficiente que establece el intercambio de energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que se encuentran a distinta temperatura. Teniendo en cuenta las formas de transferencia de calor, ya sea mediante convección, radiación o conducción. 2) El coeficiente de conductividad térmica, el cual está ligado a la velocidad de calentamiento o enfriamiento. 3) La efusividad térmica, que es la capacidad para acumular energía térmica, una alta efusividad está ligada a una gran masa térmica tiene mayor facilidad para calentarse y acumular como la piedra, una baja efusividad

MATERIALES DE VANGUARDIA	Material	Implementación	λ	(VALOR U) W/mk	Transmisión lumínica (%)	Ilustración
	Concreto translúcido	Cerramientos / Muros	0,21	0,84	-	
	Cartón yeso	Cerramientos / Muros	0,16 - 0,40	52,5	-	
	Poliéster de fibra de vidrio	Cerramientos / Muros	0,23 - 0,34	216	-	
	Fibro-cemento	Cerramientos	0,28	46,7	-	
	Madera machiembrada	Cerramientos	0,14	140	-	
	Polycarbonato estructurado	Cerramientos / Cubiertas	0,21	13,1	-	
	Láminas de fibra de vidrio	Cubiertas	0,033	3,30	-	
	Lana mineral de vidrio	Aislamientos	0,05	1,0	-	
	PVC	Revestimientos	0,25	25	-	
	Acero galvanizado	Revestimientos	0,023	12	-	
	Vidrio externo Xtrem 60/28	Fachadas	0,006	1,5	60	
	Vidrio externo 174SKN174II	Fachadas	0,0096	1,6	67	
	Vidrio externo 164SKN164II	Fachadas	0,0096	1,6	59	
	Vidrio externo 154SKN154II	Fachadas	0,009	1,6 - 1,5	50	

λ Conductividad térmica

Figura 4. Matriz de clasificación de materiales no convencionales

Fuente: elaboración propia, 2017.

MATERIALES INNOVADORES	Material	Implementación	λ	(VALOR U) W/mk	Transmisión lumínica (%)	Ilustración
	Poliestireno expandido	Cerramientos / Muros	1,99	9,95	-	
	Aluminio poroso	Cerramientos / Muros	16,7	657	25 - 50	
	Lámina EPS y fibra de vidrio	Cerramientos	0,035	0,7	-	
	Aerogel de polietileno	Aislamiento	0,005	5	20	
	Poliestireno extruido	Aislamiento	0,034	0,89	-	
	Plástico ETFE	Cubiertas	0,24	240	20	
	Vidrio externo Polysolar	Fachada	0,22	73	10 - 50	

λ Conductividad térmica

Figura 5. Matriz de clasificación de materiales innovadores

Fuente: elaboración propia, 2017.

está ligada a la poca capacidad de acumular, son mejores aislantes como el aire. 4) Coeficiente de transmisión luminosa y radiación solar dentro del espectro visible de 0 a 100% entre mayor el porcentaje mayor entrada de luz, mayor transparencia, relacionada con la unidad de medida de la iluminación (lux).

Posterior al análisis, los materiales fueron categorizados en los siguientes tres grupos:

1. Materiales tradicionales, que corresponden a los utilizados habitualmente en la construcción en Colombia, tales como: concreto, ladrillo, madera, yeso, bloques de hormigón, aluminio, vidrio 3 mm, teja de barro, teja de PVC, teja de zinc, cemento, caucho, asfalto (Figura 3).
2. Materiales de vanguardia, que corresponden a materiales que han evolucionado su uso habitual tales como: vidrios dobles o vidrios con cámara de aire, concreto de agregados livianos, yeso cartón, poliéster en fibra de vidrio, fibro-cemento, policarbonato, lana de vidrio y acero galvanizado (Figura 4).
3. Materiales innovadores, que ofrecen impactos positivos bastante significativos, basados en química y tecnología de punta para su obtención: poliestireno expandido, aluminio poroso, aerogel de polietileno, ETFE, vidrios con gas argón y vidrios con paneles solares (Figura 5).

Una vez el proyecto arquitectónico tenía definida una estructura espacial, se procedió a desarrollar la tercera fase correspondiente al modelado de tres prototipos con materiales envolventes diferentes, escogidos de las matrices. La selección de estos surgió, en el caso de los materiales clasificados como tradicionales, del uso habitual de los mismos en la vivienda dentro del país; los de vanguardia, de acuerdo con los que presentaban mejores características aislantes y de fácil acceso por su economía; y, por último, los innovadores, que fueron seleccionados teniendo en cuenta sus coeficientes térmicos y sus ventajas de adaptación frente a la contaminación y adversidad climática.

Para el desarrollo se usó el software Ecotect Analysis®, teniendo en cuenta que se implementó en una etapa temprana cuando solo se tenía definida la volumetría del edificio, con el objetivo de obtener una pronta retroalimentación de los cambios volumétricos y de orientación según la soleación que, de acuerdo con Crawley, Hand, Kummert y Griffith (2006, p. 232), “es donde radica su principal ventaja frente a otros programas de simulación”. Por otro lado, se considera metodológicamente viable un primer acercamiento al problema, mediante simulaciones digitales, ya que como lo expresan Kolaveric y Malkawi, en su texto *Performative Architecture: Beyond Instrumentality* (2005):

El entorno construido es sumamente complejo, en él participan muchos sistemas interdependientes y, en este sentido, hay una necesidad de digitalizar el mundo circundante en modelos matemáticos que permitan que se lleven a cabo simulaciones para representar mejor y analizar estas relaciones y optimizarlas hacia ciertos objetivos. Los arquitectos están experimentando cada vez más con la computación para simular el comportamiento del edificio y su entorno (p. 20).

Considerando lo anterior, y para dar continuidad a la metodología, fueron asignados los materiales de las superficies que conforman la espacialidad de la vivienda (muros, cubierta, elementos translúcidos y el suelo) con sus respectivos valores de coeficientes de conductividad térmica, densidad, calor específico, reflectividad y absorptancia de las superficies. Los valores fueron verificados y ajustados según las fichas técnicas de cada material seleccionado, para tener certeza de que los resultados térmicos correspondan en composición y coeficientes técnicos a las características de los materiales analizados inicialmente, y al contexto de nuestro país (Figuras 3, 4 y 5).

Ecotect Analysis® cuenta con una biblioteca de materiales preestablecidos que contiene coeficientes tales como: Valor U, admitancia, retraso térmico (*thermal lag*), espesor y peso. Sin embargo, estas capas que se asignan por defecto en la creación de zonas son editables manualmente y, además, es posible construir elementos compuestos por más de un material, lo que permite el cálculo de sus respectivos coeficientes mediante un algoritmo.

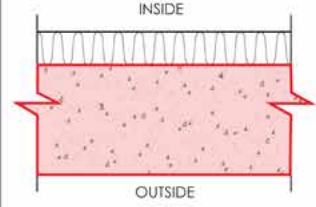
No obstante, el algoritmo de cálculo no incluye el *thermal lag* o desfase térmico dentro de su sintaxis y, por lo tanto, se debió obtener a través de *Ecomat*, una herramienta alterna diseñada por el equipo de Aurea Consulting Sustainable Architecture & Engineering, que es usada para el cálculo de parámetros característicos de la envolvente constituida por una o varias capas de materiales conforme a los datos de Ecotect. Este programa relaciona variables como la resistencia superficial interior y exterior del aire con las capas del elemento, lo que arroja coeficientes térmicos más certeros y calcula el coeficiente de desfase térmico. Estos parámetros se calculan conforme a la norma EN ISO 13786:2007 - *Thermal performance of building components*, en la que se basa el método CIBSE de la admitancia y, en este, el método de cálculo térmico de Ecotect.

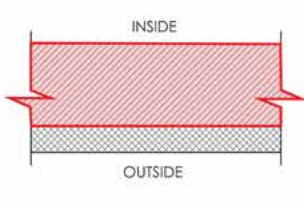
Resultados

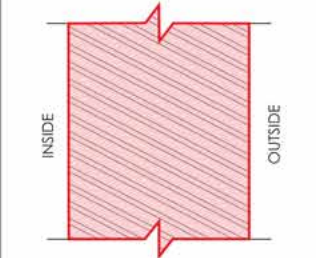
Teniendo en cuenta el proceso descrito fueron escogidos cuatro materiales por cada clasificación, con estos se modelaron y generaron los prototipos comparativos de simulación.

Modelo con materiales tradicionales

Muro en bloque estructural, vidrio de baja especificación, entrepiso y cubierta en concreto reforzado con bitumen asfáltico, vigas de concreto y teja zinc, como se muestra en las Figuras 6 y 7.

CONCRETO PROFESIONAL CEMEX					
U-Value (W/m2.K):	0.360				
Admittance (W/m2.K):	0.360				
Solar Absorption (0-1):	0.6				
Visible Transmittance (0-1):	0				
Thermal Decrement (0-1):	1				
Thermal Lag (hrs):	0.02				
(SBEM) CM 1:	0				
(SBEM) CM 2:	0				
Thickness (m):	0.000				
Weight (kg):	240.000				
Internal	External				
Colour:	(R: 0.592)	(R: 0.592)			
Emissivity:	0.9	0.9			
Specularity:	0	0			
Roughness:	0	0			
Layer Name	Width	Density	Sp. Heat	Conduct.	Type
1. Concrete	0.150	2400.0	1.800	1.800	33
2. Polystyrene general	0.050	36.0	0.020	0.020	45

TEJA DE ZINC HUNTER DOUGLAS					
U-Value (W/m2.K):	2.600				
Admittance (W/m2.K):	2.600				
Solar Absorption (0-1):	0.368				
Visible Transmittance (0-1):	0				
Thermal Decrement (0-1):	1				
Thermal Lag (hrs):	0				
(SBEM) CM 1:	0				
(SBEM) CM 2:	0				
Thickness (m):	0.050				
Weight (kg):	9.200				
Internal	External				
Colour:	(R: 0.702)	(R: 0.702)			
Emissivity:	0.9	0.9			
Specularity:	0	0			
Roughness:	0	0			
Layer Name	Width	Density	Sp. Heat	Conduct.	Type
1. Aluzinc	0.005	50.0	0.023	0.023	65
2. Injected Polyurethane	0.002	10.0	0.023	0.023	95

LADRILLO ESTRUCTURAL					
U-Value (W/m2.K):	1.060				
Admittance (W/m2.K):	1.060				
Solar Absorption (0-1):	0.6				
Visible Transmittance (0-1):	0				
Thermal Decrement (0-1):	1				
Thermal Lag (hrs):	0				
(SBEM) CM 1:	0				
(SBEM) CM 2:	0				
Thickness (m):	0.115				
Weight (kg):	138.000				
Internal	External				
Colour:	(R: 0.555)	(R: 0.561)			
Emissivity:	0.9	0.9			
Specularity:	0	0			
Roughness:	0	0			
Layer Name	Width	Density	Sp. Heat	Conduct.	Type
1. Brick Masonry Medium	0.115	1200.0	0.150	0.150	25

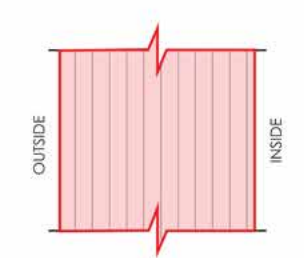
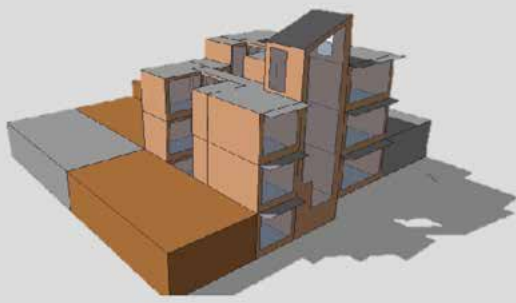
VIDRIO EXTERNO SOLAR					
U-Value (W/m2.K):	6.000				
Admittance (W/m2.K):	6.000				
Solar Heat Gain Coeff. (0-1):	0.94				
Visible Transmittance (0-1):	0.75				
Refractive Index of Glass:	1.74				
Alt Solar Gain (Heavywt):	0.47				
Alt Solar Gain (Lightwt):	0.64				
Thickness (m):	0.010				
Weight (kg):	2.000				
Internal	External				
Colour:	(T: 0.725)	(T: 0.725)			
Emissivity:	1	1			
Specularity:	0	0			
Roughness:	0	0			
Layer Name	Width	Density	Sp. Heat	Conduct.	Type
1. Glass - low properties	0.001	2.0	1.890	1.890	75

Figura 6. Fichas técnicas, materiales tradicionales
Fuente: elaboración propia en Ecotect, 2011


Figura 7. Selección y modelado con materiales tradicionales
Fuente: elaboración propia en Ecotect, 2011.

Selección de materiales TRADICIONALES



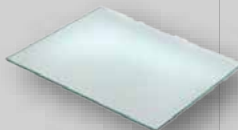
3d aplicación de materiales ecotect

1. MUROS




- Muros en bloque estructural

2. VIDRIOS

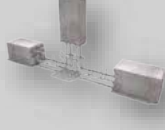


- Vidrio de baja especificación


3. ENTREPIOS Y CUBIERTAS



- Concreto reforzado + bitumen asfáltico



- Vigas en concreto



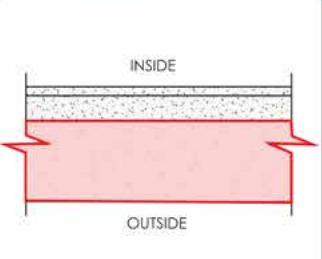
- Tejas de ZINC

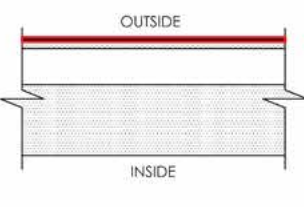
Modelo con materiales de vanguardia

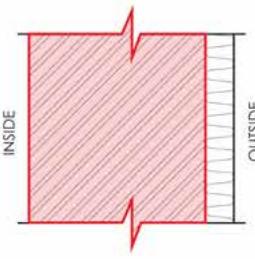
Muros con entramado en madera y paja, bloque estructural con aislante y lana, vidrio de baja especificación, entrepiso y cubierta en fibrocemento, vigas en madera y teja de arcilla (Figuras 8 y 9).

Figura 8. Fichas técnicas de materiales de vanguardia

Fuente: elaboración propia en Ecotect, 2011.

FIBROCEMENTO IMPERMEABILIZANTE					
U-Value (W/m2.K):	0.610				
Admittance (W/m2.K):	2.190				
Solar Absorption (0-1):	0.6				
Visible Transmittance (0-1):	0				
Thermal Decrement (0-1):	0.4				
Thermal Lag (hrs):	8.47				
(SBEM) CM 1:	0				
(SBEM) CM 2:	0				
Thickness (m):	0.191				
Weight (kg):	125.045				
Colour:	Internal (R: 0.592) External (R: 0.592)				
Emissivity:	0.9				
Specularity:	0				
Roughness:	0				
Layer Name	Width	Density	Sp. Heat	Conduct.	Type
1. Beam in wood	0.150	650.0	1200.000	0.140	115
2. Asphaltic bitumen	0.001	1090.0	920.000	0.190	115
3. Floor in Fibrocemento	0.030	350.0	1300.000	0.082	35
4. Waterproof mortar	0.010	1650.0	920.000	0.720	35

TEJA DE CERÁMICA					
U-Value (W/m2.K):	0.020				
Admittance (W/m2.K):	2.250				
Solar Absorption (0-1):	0.639				
Visible Transmittance (0-1):	0				
Thermal Decrement (0-1):	8				
Thermal Lag (hrs):	0.7				
(SBEM) CM 1:	0				
(SBEM) CM 2:	0				
Thickness (m):	0.245				
Weight (kg):	117.698				
Colour:	Internal (R: 0.702) External (R: 0.702)				
Emissivity:	0.9				
Specularity:	0				
Roughness:	0				
Layer Name	Width	Density	Sp. Heat	Conduct.	Type
1. Tile	0.010	1900.0	840.000	0.950	25
2. Cork insulation	0.010	110.0	1800.000	0.040	115
3. Air chamber	0.075	1.3	1004.000	5.560	0
4. X	0.150	650.0	1200.000	0.140	115

MURO EN LADRILLO ESTRUCTURAL AISLANTE DE LANA					
U-Value (W/m2.K):	0.890				
Admittance (W/m2.K):	1.020				
Solar Absorption (0-1):	0.695				
Visible Transmittance (0-1):	0				
Thermal Decrement (0-1):	0.56				
Thermal Lag (hrs):	4.95				
(SBEM) CM 1:	0				
(SBEM) CM 2:	0				
Thickness (m):	0.145				
Weight (kg):	234.200				
Colour:	Internal (R: 0.339) External (R: 0.339)				
Emissivity:	0.9				
Specularity:	0				
Roughness:	0				
Layer Name	Width	Density	Sp. Heat	Conduct.	Type
1. Brick Masonry SantaFe	0.115	2000.0	836.800	0.711	25
2. Wool	0.030	140.0	840.000	0.038	45

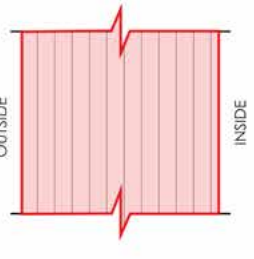
VIDRIO BAJA ESPECIFICACIÓN					
U-Value (W/m2.K):	6.000				
Admittance (W/m2.K):	6.000				
Solar Heat Gain Coeff. (0-1):	0.94				
Visible Transmittance (0-1):	0.707				
Refractive Index of Glass:	1.74				
Air Solar Gain (Heavywt):	0.47				
Air Solar Gain (Lightwt):	0.64				
Thickness (m):	0.003				
Weight (kg):	2.000				
Colour:	Internal (T: 0.707) External (T: 0.707)				
Emissivity:	0				
Specularity:	0				
Roughness:	0				
Layer Name	Width	Density	Sp. Heat	Conduct.	Type
1. Glass - low properties	0.003	2.0	836.000	6.000	75

Figura 9. Selección y modelado con materiales de vanguardia

Fuente: elaboración propia en Ecotect, 2011.

Selección de materiales NO CONVENCIONALES



3d aplicación de materiales ecotect

1. MUROS





- Entramado en madera y paja
*Economía y peso

- Bloque Est. aislante
*Sismo resistente

- Lana

2. VIDRIOS Y AISLANTES




- Vidrio de baja especificación

- Papel y cartón

3. ENTREPISOS Y CUBIERTAS





- Fibrocemento

- Vigas en madera

- Tejas de arcilla

Modelo con materiales innovadores

Muros en mampostería con recubrimiento en alucobond autolimpiante, vidrio doble con cámara de argón y *eco-clean*, entrepisos, cubierta en concreto con parafina encapsulada y ETFE (tetrafluoroetileno) (Figuras 10 y 11).

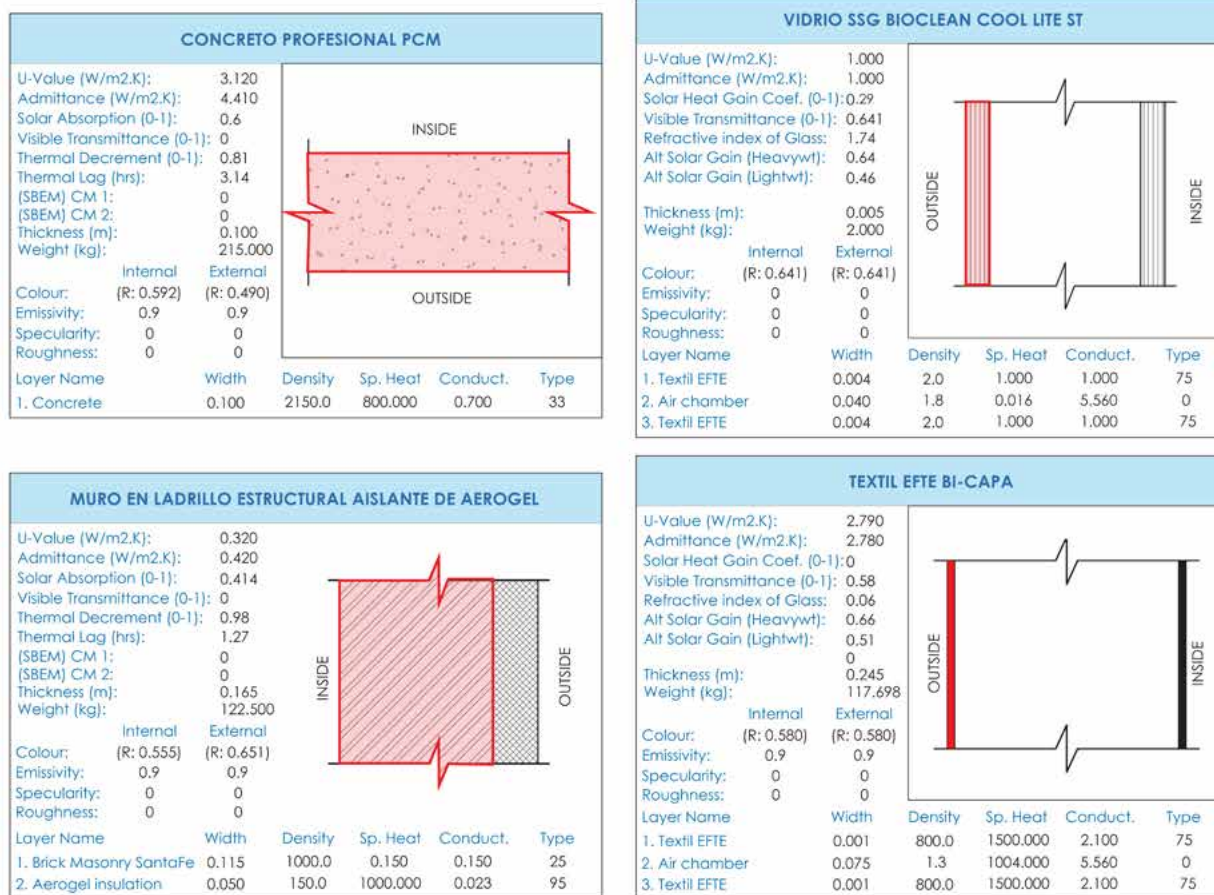


Figura 10. Fichas técnicas de materiales innovadores

Fuente: elaboración propia en Ecotect, 2011.

Figura 11. Selección y modelado con materiales innovadores

Fuente: elaboración propia en Ecotect 2011.

Selección de materiales INNOVADORES

3d aplicación de materiales ecotect

- MUROS (TiO₂ Dióxido de titanio)**

- Buildblock plastic and concrete
- Aislantes encofrados de hormigón
- Alucobond auto limpiante
- VIDRIOS**

Moléculas que reaccionan a los rayos UV
(Sustancia foto catalítica e hidrófila) Moléculas que se unen con las de H₂O

- Vidrio doble con cámara de argón y ecoclean
- Aerogel - Coloide
- ENTREPISOS Y CUBIERTAS (Cambio de fase)**

- Concreto con parafina encapsulada
- Etfe (Tetrafluoroetileno) 100 veces – vidrio

Proceso de simulación

El uso de programas de simulación en estudios higrotérmicos busca predecir las condiciones de los espacios interiores que responden a una condición climática cambiante exterior. Una simulación de este tipo permite predecir con alta precisión el comportamiento de la vivienda en diferentes condiciones climáticas, estudio que manualmente sería imposible de realizar. El método utilizado para el estudio del confort térmico es la simulación virtual con el software Ecotect 2011 Thermal Analysis® (Autodesk, 2011).

Para realizar el análisis térmico de la vivienda se establecieron las siguientes variables: operación del edificio, ocupación específica de cada espacio por analizar, el tipo de actividad, el "clo": unidad de medida empleada para el índice de indumentaria, los promedios de horarios de uso equivale a 1,0; el sistema de ventilación mínimo por filtración de ventanería es de 0,5 %, la velocidad de aire exterior corresponde al informe de calidad de aire de la Secretaría Distrital de Ambiente de la Alcaldía Mayor de Bogotá 2015, con dirección proveniente del sur y sur oriente, y velocidades entre 1,9 m/s y 2,7 m/s, los horarios de uso corresponden a 50 % entre las 7 a.m. y las 5 p.m., y 100 % entre las 5 p.m. y las 7 a.m.; la tasa metabólica por persona corresponde a 100 vatios, la densidad de ocupación promedio de la vivienda es de 0,1 personas/m², la semana más crítica de frío corresponde a septiembre y la más cálida a enero.

Operativamente, el ejercicio de simulación térmica fue realizado de la siguiente manera: 1) un modelo arquitectónico de seis pisos con diferentes distribuciones arquitectónicas y ocupación de una familia por piso; 2) tres variaciones tipológicas materiales (tradicional, vanguardia e innovador) ; 3) identificación de las semanas críticas (fría-caliente) en las bases climáticas; 4) incorporación de bases climáticas (2015, 2020, 2050 y 2070). Estas cuatro operaciones dieron como resultado el análisis térmico de 144 simulaciones.

Es importante aclarar que el rango de confort térmico que el software define está entre 18 y 26 °C, el mismo fue ajustado teniendo en cuenta la realidad climática de Soacha, donde el rango de confort propuesto es de 18 a 24 °C, de acuerdo con el estándar ASHRAE 55.1 de 2010, que clasifica a Colombia como zona climática tipo A: "zona húmeda no marítima". Asimismo, el *Atlas del IDEAM* clasifica a Bogotá como altiplano frío, teniendo en cuenta una temperatura media de 13,5 °C centígrados, que oscila entre 8 y 25 °C, y una humedad promedio de 80 %.

En cuanto a los criterios de iluminación es importante comprender que la principal fuente de

luz es el sol, la que se dispersa en la atmósfera hasta convertirse en luz visible. La luz directa es la energía que atraviesa la atmósfera y llega directamente a la superficie de la tierra. La luz difusa, es la energía reflejada por las partículas en suspensión de gases o nubes, que queda atrapada en la tierra, mientras gran parte de esta energía es reflejada y devuelta al espacio.

Teniendo en cuenta la condición de cielo nublado presente en Soacha, se optó por desarrollar la simulación lumínica en *Desktop Radiance* y *Daysim*. Este programa es una herramienta de análisis de iluminación natural precisa e integral vinculada a través de Ecotect⁵.

Este software tiene tres métodos de simulación lumínica: 1) factor promedio de luz día: simulación de una zona específica, considera solo las ventanas, el sombreado y la reflectancia de las superficies internas; 2) superposiciones de cielo: la simulación consiste en subdividir el cielo en puntos específicos, se utiliza para estimar visualmente la luz del día por medio del conteo de los puntos visibles; 3) *Radiance* y *Daysim*: software anexo de análisis de iluminación natural basado en la radiancia, modela la cantidad anual de luz diurna dentro y alrededor de un edificio. Permite a los usuarios modelar sistemas dinámicos de fachadas tales como: persianas, elementos de redirección de luz y doubles fachadas de vidrio. El programa calcula con precisión el factor de luz natural, la iluminancia, la luminosidad y la autonomía de la luz del día.

Para el caso de estudio, los parámetros de simulación utilizados en *Radiance* y *Daysim* fueron los correspondientes a los valores de radiación directa y difusa en un día desfavorable, con condiciones de alta nubosidad, iluminación promedio de 10.000 lux al exterior, altura del plan de trabajo de 0,60 m, grilla mínima de 0,25 m x 0,25 m; se tuvieron en cuenta el espesor de los muros, los factores de transmisión lumínica y de reflexión de los materiales que intervienen en el estudio. En las Figuras 12 a 20 se presentan los resultados de las simulaciones realizadas.

Comparación de eficiencia térmica y lumínica

Con las modelaciones desarrolladas en 3D y el ingreso de las bases climáticas EPW, se llevaron a cabo las simulaciones digitales de iluminación natural, temperatura radiante de la envolvente y temperatura operativa. La temperatura radiante está ligada al calor que irradian los materiales de la envolvente, la temperatura operativa repre-

⁵ Este fue elegido por la posibilidad de descarga gratuita y por la facilidad de aprendizaje.

senta la media entre la temperatura radiante y la del aire.

La importancia de estas simulaciones radica en la posibilidad de mejorar la aproximación al diseño de objetos arquitectónicos y su relación con el lugar donde se implantan.

En general, las simulaciones lumínicas (Figura 12) tienen una marcada tendencia a aumentar la cantidad de lux, conforme se sube de nivel de piso en el proyecto, lo que es previsible teniendo en cuenta las condiciones del contexto donde los vecinos inmediatos son de solo uno o dos niveles de altura. Las áreas contiguas a fachada principal y vacíos tienen buenos niveles de iluminación, en contraste con las áreas posteriores del proyecto que muestran muy bajos niveles. A continuación se describen los resultados de cada grupo de materiales analizados.

Materiales tradicionales: teniendo en cuenta que en la construcción del material se utilizó un vidrio de baja especificación, como lo evidencian sus índices en la Figura 5, las simulaciones lumínicas de este grupo de materiales muestran mayor cantidad de iluminación natural, 1265.17 lux en promedio, como es de esperarse ya que el factor de transmitancia visible es superior. Esto deslumbraría algunos espacios, en especial los de áreas contiguas a la fachada exterior, pero se podrían controlar mediante soluciones pasivas como aleros o celosías.

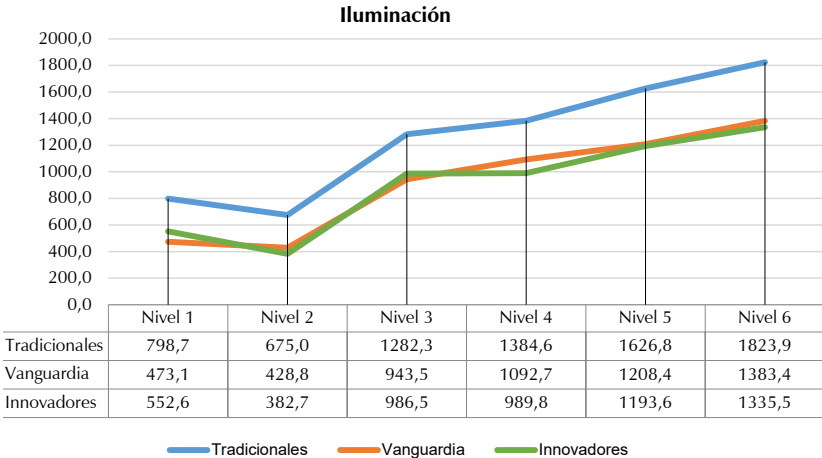
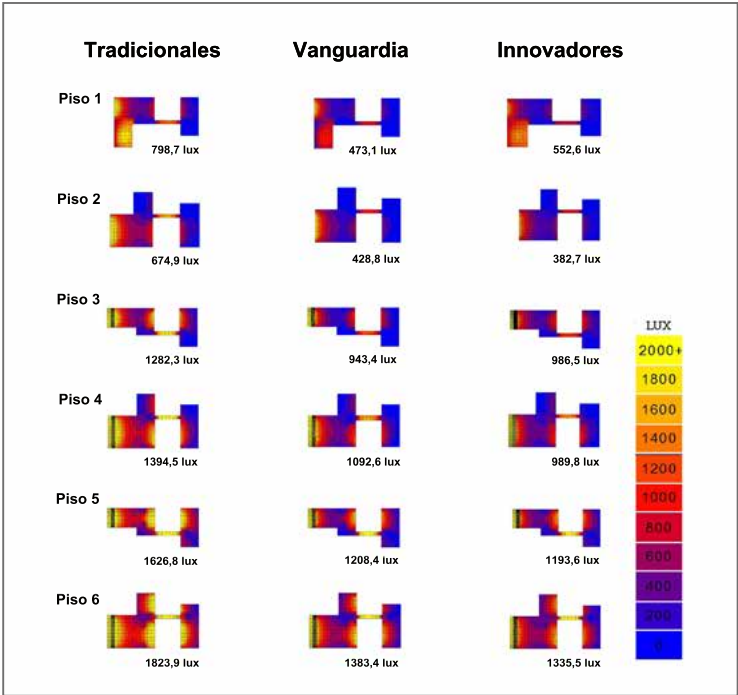


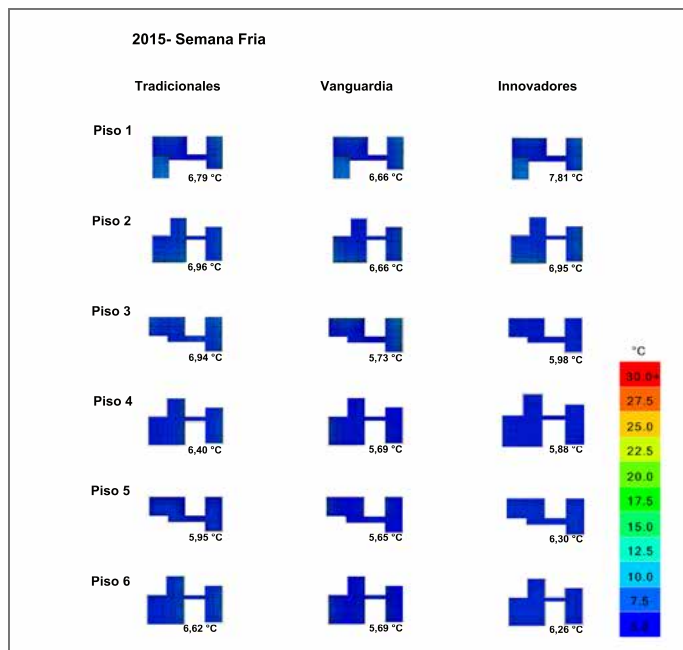
Figura 12. Simulaciones lumínicas
Fuente: elaboración propia en Ecotect, 2011.

Grupo	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6	Promedio
Tradicionales	798,7	675,0	1282,3	1384,6	1626,8	1823,9	1265,18
% del total	11	9	17	18	21	24	
De vanguardia	473,1	428,8	943,5	1092,7	1208,4	1383,4	921,63
% del total	9	8	17	20	22	25	
Innovadores	552,6	382,7	986,5	989,8	1193,6	1335,5	885,63
% del total	10	7	19	19	23	22	

Tabla 1. Promedios y porcentajes de iluminación (lux) por piso
Fuente: elaboración propia.

USOS	Nivel mínimo (lux)	Nivel recomendado (lux)
Pasillos	70	100
Escaleras	100	150
Aseos (general)	70	100
Aseos (puntual)	200	500
Dormitorios (general)	70	200
Dormitorios (cabecera)	200	500
Cocinas	100	200
Estancias (general)	70	200
Estancias (puntos de lectura)	300	500
Totales	380	800

Tabla 2. Normativa de iluminación natural para viviendas
Fuente: elaboración propia, 2017, con base en Retilap (Resolución 180540).



Materiales de vanguardia: teniendo en cuenta que se utilizó un vidrio con mejor especificación –como se constata en la figura 6– respecto a los materiales tradicionales, lo que disminuye su coeficiente de transmitancia visible, el resultado de las simulaciones evidencia disminución en la cantidad de iluminación natural que ingresa al edificio, con 921,62 lux en promedio.

Materiales innovadores: de acuerdo con la especificación del vidrio usado, tal y como se muestra en la Figura 10, su transmitancia visible disminuye notablemente frente a los anteriores vidrios y, por lo tanto, el ingreso de iluminación natural es el más bajo de los tres grupos, con 885,63 lux en promedio.

En la Tabla 1 se muestra un resumen de los resultados obtenidos, los respectivos promedios generales de cada grupo de materiales, así como el porcentual de lux por piso obtenido de las simulaciones.

En conclusión, y partiendo del hecho de que se realizaron simulaciones lumínicas de las tres clasificaciones de materiales con fecha de 2015, y dado que la proyección de las bases climáticas contempla únicamente variaciones en las condiciones de temperatura, se puede inferir que el grupo de materiales clasificados como tradicionales, que en su composición contenía vidrio de baja especificación, presenta un mejor comportamiento lumínico en tanto el material permite mayor ingreso de luz. Mientras en las otras dos clasificaciones de materiales, de vanguardia e innovadores, se evidenció menor ingreso de luz dado su índice de transmitancia visible.

Por otro lado, con base en Retilap (Resolución 180540), en la Tabla 2 se establecen valores lux mínimos y recomendados para vivienda. Dado que el diseño arquitectónico del proyecto objeto de esta investigación contemplaba espacios abiertos, omitiendo el uso de muros divisorios, se opta por sumar los valores de las dependencias marcadas en azul dentro de la Tabla 2, que serían las mismas que conforman los espacios en cuestión de cada unidad habitacional.

Como resultado tenemos 380 lux mínimos y 800 lux recomendados, lo que al ser comparado con la Figura 12, muestra una tendencia a deslumbrar los espacios a partir del tercer nivel en las tres clasificaciones de materiales. Mientras tanto, para los casos del primer y segundo nivel, los valores más cercanos a los lux recomendados están únicamente en el grupo de materiales tradicionales, lo que supone que su uso sería viable aplicando medidas de diseño pasivo en los niveles superiores, tamizando o redirigiendo los rayos solares cuando estos tengan incidencia directa con las fachadas.

Figura 13.
Simulaciones térmicas semana fría-base climática 2015
Fuente: elaboración propia en Ecotect, 2011.

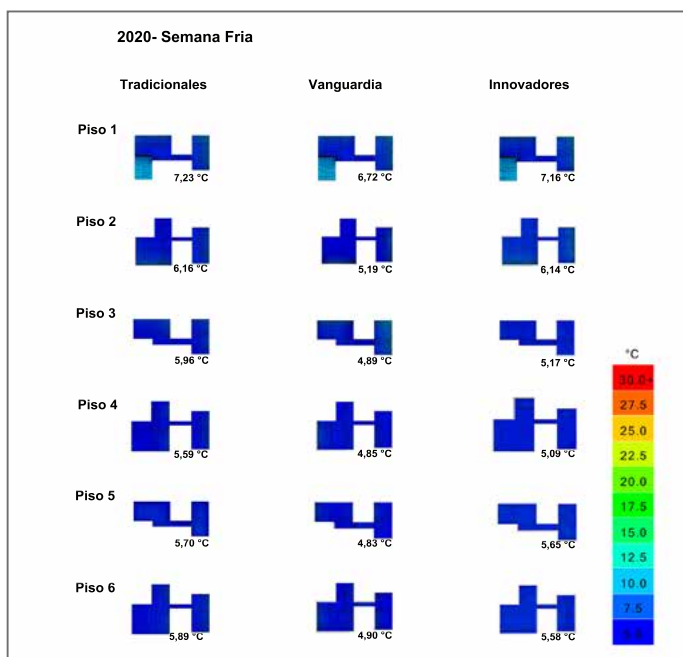
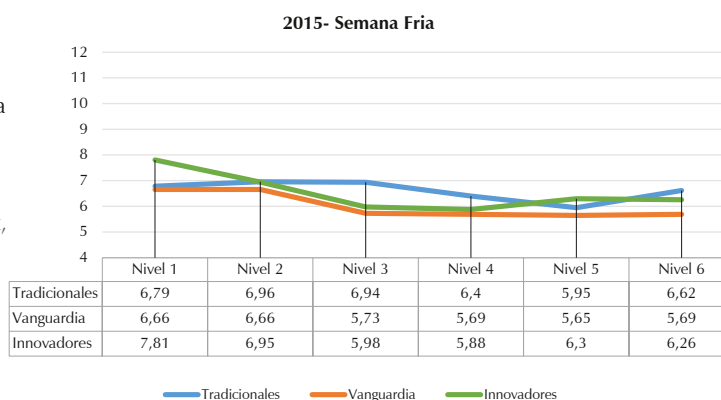
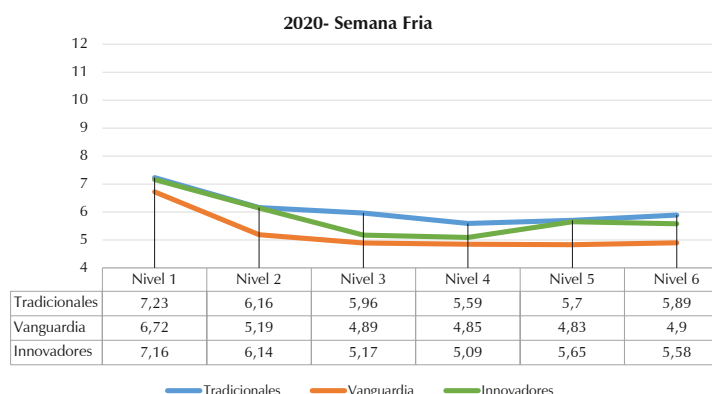


Figura 14.
Simulaciones térmicas semana fría-base climática 2020
Fuente: elaboración propia en Ecotect, 2011.



Semanas frías

A continuación se presentan las simulaciones de semanas frías promedio por año, las cuales se ordenan cronológicamente desde la base 2015 a 2070 (Figuras 13 a 16). La información se organizó en una matriz que establece en su primera fila superior la clasificación de materiales, y en la primera fila del costado izquierdo el piso simulado; así, dentro de la matriz se encuentra cada piso simulado en planta con su respectivo promedio en °C, dejando en el costado inferior derecho una escala de convención para los colores representados en las plantas.

Adicionalmente, se generó una gráfica que relaciona el comportamiento de los tres grupos de materiales sobre una recta, que permite evidenciar gráficamente el comportamiento y la fluctuación de temperatura dentro de los espacios en semana fría.

Para el caso de las simulaciones de semana fría se observa un mejor comportamiento de cobijo ante las condiciones climáticas por parte de los materiales tradicionales, seguidos por los materiales clasificados como innovadores; los materiales de vanguardia fueron los más lejanos al rango de confort.

Semanas calientes

Por otra parte, se presentan las simulaciones de semanas calientes promedio por año, las cuales se ordenan cronológicamente desde la base 2015 a 2070 (Figuras 17 a 20). Organizando la información en una matriz con las mismas características de las figuras anteriores, de la misma manera en la parte inferior se encuentra una gráfica que muestra el comportamiento de los materiales en condiciones de semana caliente, representados sobre una gráfica de líneas.

Las simulaciones de semana caliente evidenciaron una marcada tendencia de los materiales clasificados como innovadores para mantener más fresca la temperatura operativa de los espacios; siguieron los materiales de vanguardia que se encuentran balanceados, y los tradicionales quedaron como los menos eficientes ante el calor.

De la misma manera que en el caso de las simulaciones lumínicas, se denota un aumento de temperatura conforme se avanza hacia los pisos superiores, lo que se traduce en la necesidad de utilizar recursos de diseño para aislar los pisos superiores ante olas de calor que dejarían mucho más susceptibles las dependencias cerca de la cubierta y las fachadas en los últimos pisos de la edificación.

Figura 15.
Simulaciones térmicas semana fría-base climática 2050
Fuente: elaboración propia en Ecotect, 2011.

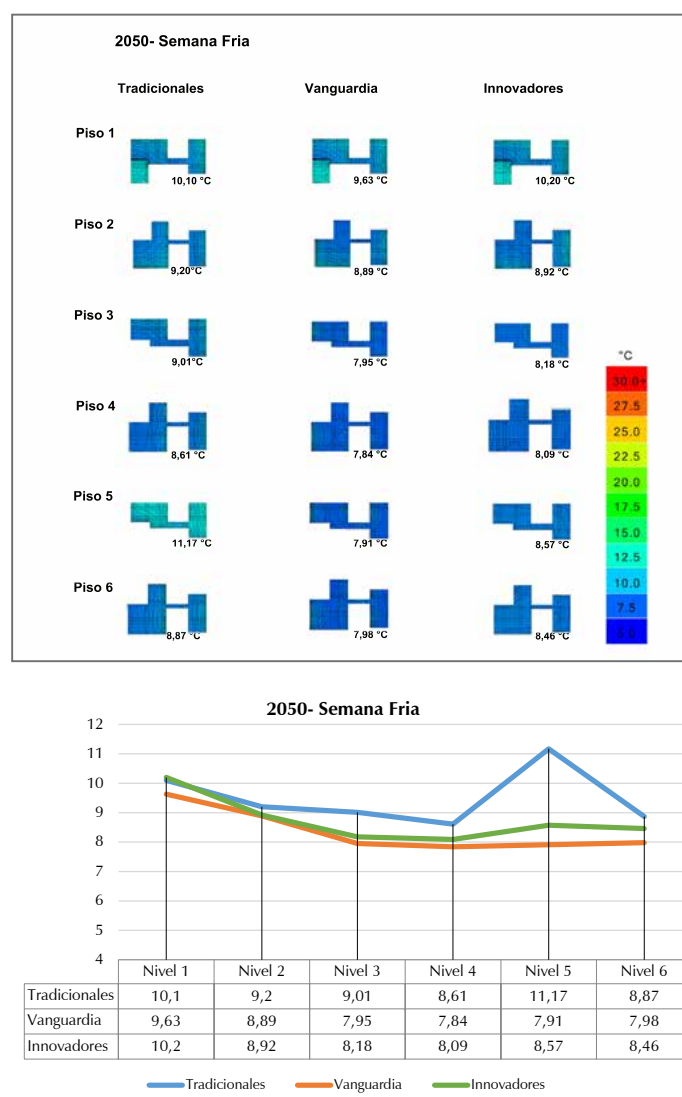
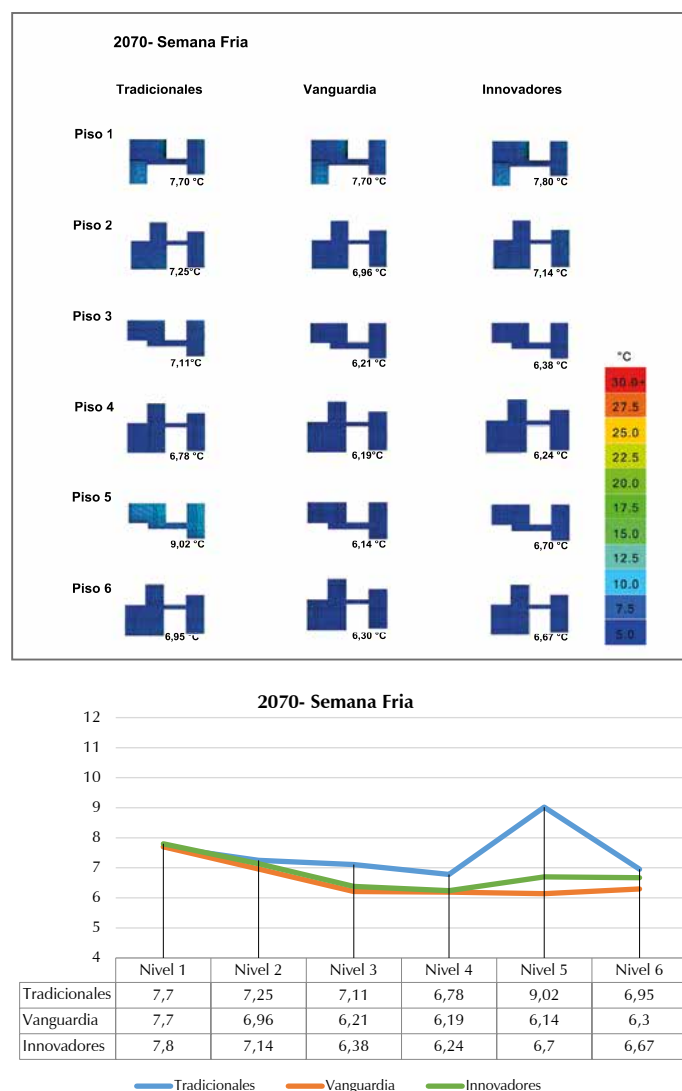
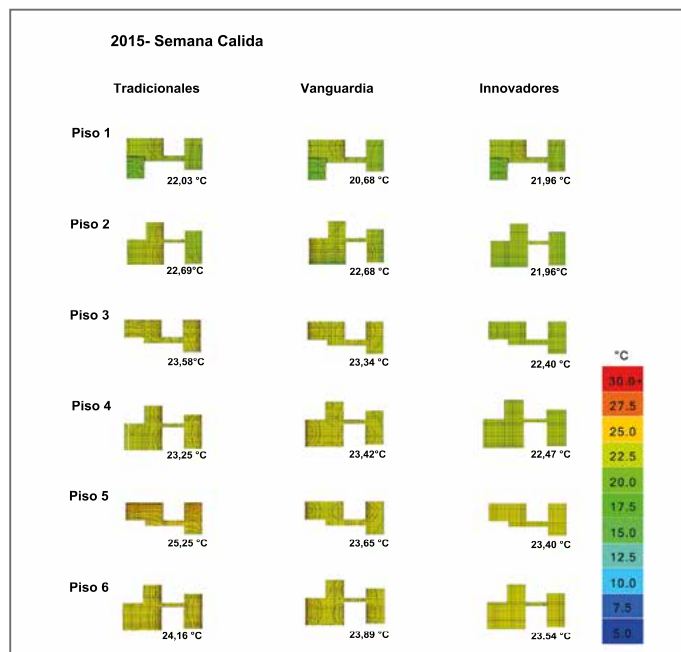


Figura 16.
Simulaciones térmicas semana fría-base climática 2070
Fuente: elaboración propia en Ecotect, 2011.





El resultado del ejercicio establece la construcción de las matrices (Tablas 3 y 4) en las que se registran los resultados de la temperatura operativa de cada prototipo según el tipo de material y la base climática ingresada, tanto para semana fría como para semana caliente. Estos datos permiten indagar acerca de nuevas opciones de aproximación, desde una perspectiva resiliente, a la problemática del cambio climático.

Los resultados de las condiciones de los materiales de la envolvente para la semana fría (Tabla 3) presentan datos con mayor frecuencia cerca de los rangos de confort, cuando corresponden a los materiales tradicionales. En segundo lugar se ubican los materiales innovadores, y los registros de menor valor corresponden a los materiales de vanguardia.

Los resultados de la semana caliente (Tabla 4) en cuanto a los materiales de la envolvente tienen una preponderante incidencia en el comportamiento higrotérmico de los espacios. Se observa que los materiales innovadores tienen mayor capacidad aislante y, por tal razón, mantienen una temperatura interior menor que los materiales tradicionales, mientras que los materiales de vanguardia le preceden.

El ejercicio desarrollado plantea una base de conocimiento para reconocer la relación entre la materialidad de un proyecto, las condiciones meteorológicas extremas del contexto y la vulnerabilidad de los asentamientos urbanos al cambio climático. El caso de estudio expuesto anteriormente demuestra la necesidad de desarrollar estrategias de adaptación y mitigación exitosas, que busquen que dicho conocimiento pueda traducirse en diferentes contextos.

Visto de esta manera, la planificación de la adaptación al cambio climático a nivel local debe tener como sustento la exploración de distintas estrategias en cuanto a la materialidad propia de la envolvente y su capacidad para responder de manera efectiva a las condiciones del cambio climático. Esto, teniendo en cuenta que la temperatura promedio –dado el pronóstico de aumentos de temperatura en el año 2070, que es la última fecha analizada, y tomando los principios y las fórmulas de Auliciems *et al.* (2011)– y el rango de confort para la vivienda VIS en Soacha, en 2070, sería de: 19,5 a 25,5 °C de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\text{Cálculo} = (\text{Temperatura neutra} = 17,6 + \text{temperatura promedio} * 0,31), \text{zona de confort} \pm 3^\circ\text{C}.$$

$$\text{Temperatura neutra} = 17,6^\circ\text{C} + 16,0^\circ\text{C} * 0,31 = 22,5^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C} = 19,5^\circ\text{C} \text{ a } 25,5^\circ\text{C}$$

Figura 17.
Simulaciones térmicas semana caliente-base climática 2015
Fuente: elaboración propia en Ecotect, 2011.

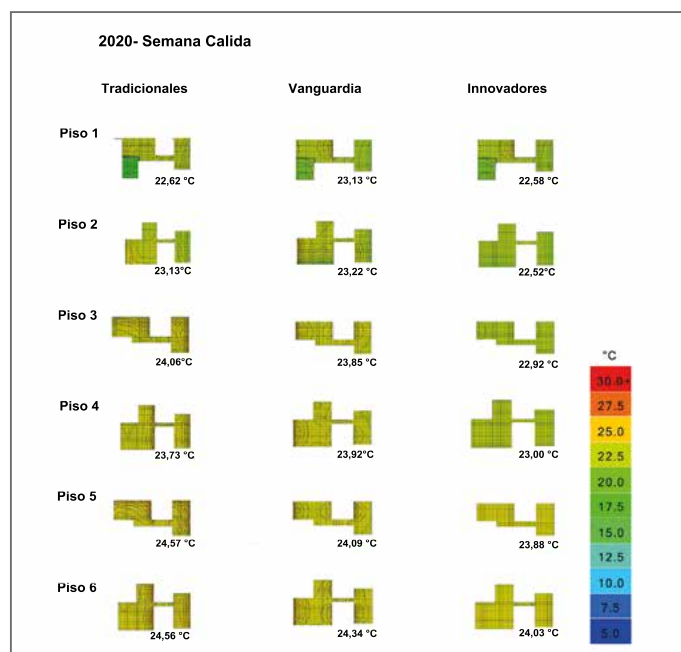
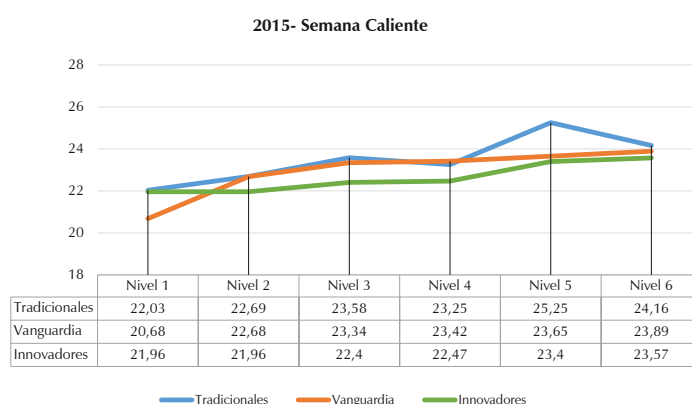
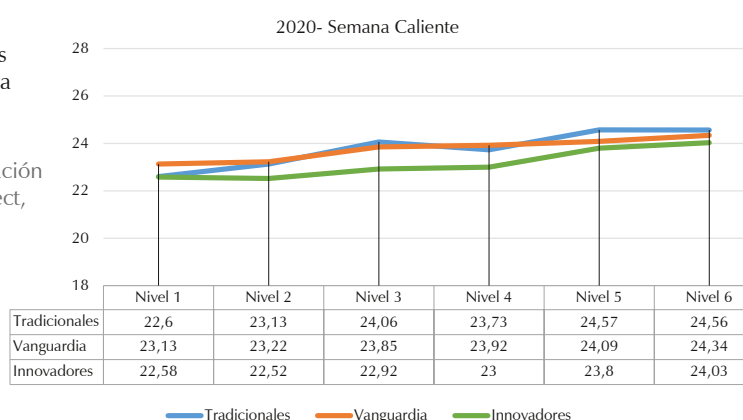


Figura 18.
Simulaciones térmicas semana caliente-base climática 2020
Fuente: elaboración propia en Ecotect, 2011.



Discusión

Los resultados de las simulaciones lumínicas muestran un mejor comportamiento en el grupo de materiales tradicionales. De igual forma, para el caso de los resultados de las simulaciones térmicas en la semana fría los materiales evidenciaron que el grupo que mejor cobijó da a las condiciones climáticas es el de los tradicionales. No obstante, en la semana caliente el grupo de materiales con mejor comportamiento térmico, el cual brindó mejor aislamiento, fue el de los innovadores, aunque los materiales de vanguardia y tradicionales se mantienen dentro de los rangos de confort. Esto significa que los materiales que se suelen utilizar en la construcción de la VIS en Colombia no presentan un comportamiento térmico y lumínico desfavorable en condiciones de frío, sin embargo, deberían evaluarse soluciones en condiciones de clima caluroso. Aun así, existen otros elementos importantes por evaluar, ya que, por ejemplo, las ventanas de los materiales tradicionales operan muy bien en cuanto al ingreso de luz natural, pero su confort térmico es deficiente comparado con vidrios bicapa.

Sin embargo, este ejercicio plantea discusiones en torno a la fiabilidad de las bases climáticas, tal como lo expresan Erbaa, Causone y Armani (2017, p. 546): “Las simulaciones digitales pueden ser objeto de incertidumbre”, esto está relacionado principalmente con la construcción incorrecta de componentes, la limitación de los algoritmos de simulación usados por el *software* y, sobre todo, la confiabilidad de los datos contenidos en las bases climáticas, como es el caso de la ausencia del cálculo del *thermal lag* en materiales compuestos, falencia que presumen Prashant, Chirag y Ramachandraiah (2017, p. 221) en su trabajo de investigación: “A simplified tool for building layout design based on thermal comfort simulations”, donde describen las limitantes de Ecotect.

Además, en investigaciones de autores como Kershaw, Eames y Coley (2010, p. 359), referidas al papel de las bases climáticas en relación con el cambio climático, se evidencia una realidad indiscutible donde las únicas formas de encontrar bases de datos de clima futuro se basan en proyecciones del clima de bases de los años inmediatamente anteriores.

Por otro lado, los materiales experimentales con cambio de fase son objeto de estudio y actualización en los *softwares* de simulación, toda vez que el algoritmo de simulación no contempla los efectos de histéresis térmica propia de los ma-

Figura 19.
Simulaciones térmicas semana caliente-base climática 2050
Fuente: elaboración propia en Ecotect, 2011.

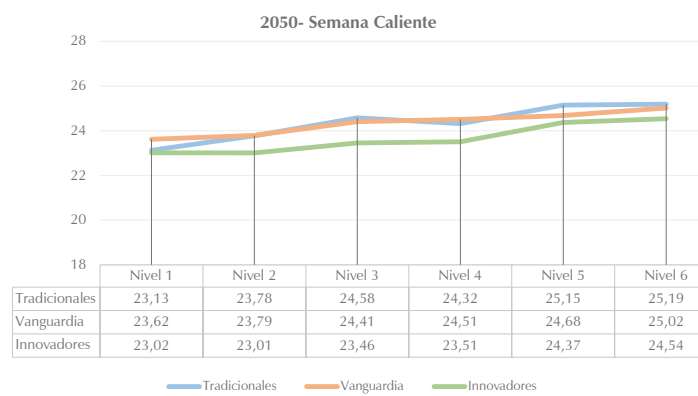
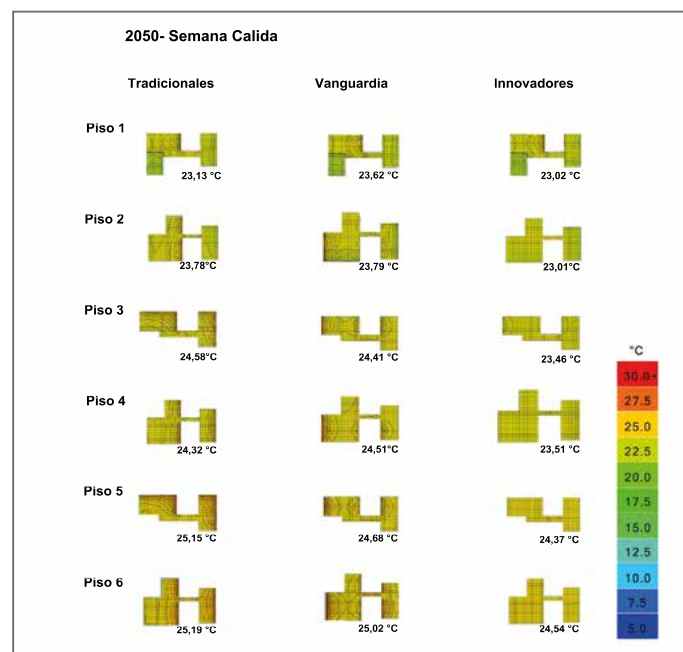
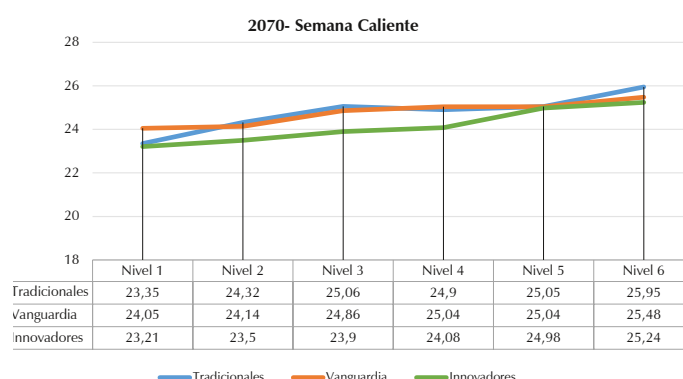
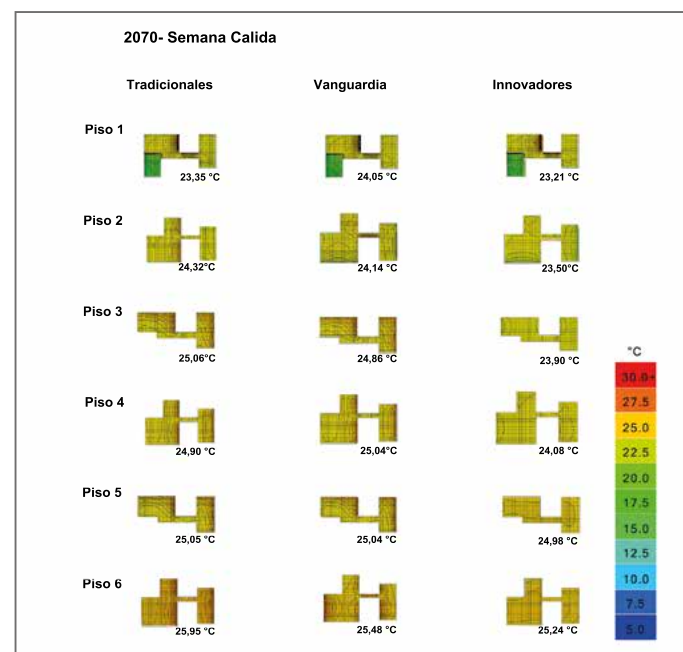


Figura 20.
Simulaciones térmicas semana caliente-base climática 2070
Fuente: elaboración propia en Ecotect, 2011.



Semana fría - Resultados temperatura operativa			
Año	Tradicionales	Vanguardia	Innovadores
2015	6,6	6,0	6,5
2020	6,1	5,2	5,8
2050	9,5	8,4	8,7
2070	7,5	6,6	6,6

Tabla 3. Promedios de temperatura operativa semana fría
Fuente: elaboración propia.

Semana caliente - Resultados temperatura operativa			
Año	Tradicionales	Vanguardia	Innovadores
2015	23,5	22,9	22,6
2020	23,8	23,8	23,1
2050	24,4	24,3	23,7
2070	24,8	24,8	24,2

Tabla 4. Promedios de temperatura operativa semana caliente
Fuente: elaboración propia.

teriales con cambio de fase (PCM, por sus siglas en inglés, lo que supone resultados erráticos en las simulaciones (Goia, Chaudhary y Fantucci, 2018, p. 56).

En consecuencia, siempre existirá incertidumbre acerca de los resultados arrojados por *softwares* de simulación, teniendo en cuenta lo impredecible y complejo del fenómeno del cambio climático, así como el problema del origen de los datos, la calibración del programa y las fallas en el algoritmo de programación.

En ese sentido, estas fallas podrían afectar la precisión de las simulaciones digitales y, por lo tanto, sería necesario corroborar los datos obtenidos mediante una nueva fase de investigación que involucre mediciones de prototipos a escala en el sitio, con el fin de comparar y corroborar los datos simulados y reales, explicando los resultados desde el punto de vista comparativo, mediante documentos o conocimiento previo en el tema. Esto evidenciaría si existen discrepancias o nuevos aportes en relación con los resultados obtenidos por otros autores.

Conclusiones

El uso de simulaciones digitales permitió definir que los materiales de envolvente con mejor desempeño térmico y lumínico en las condiciones climáticas del barrio Bella Vista en Soacha podrían ser los tradicionales, teniendo en cuenta los resultados en las simulaciones lumínicas y térmicas de semana fría.

No obstante, los altos índices de conductividad térmica de estos materiales sugieren que este comportamiento se debe a la carga de ocupación con la que se simuló, debido a las determinantes de diseño, donde espacios pequeños deben acoger entre tres y cuatro personas por apartamento. Situación que se ratifica con las simulaciones del grupo de materiales innovadores, los cuales muestran un mejor resultado como aislantes térmicos ante condiciones de aumento excesivo de temperatura.

En definitiva, se puede decir que existen muchas variables para tener en cuenta en el análisis y desarrollo de esta investigación, que hacen complejo el proceso. Algunas, tales como la variabilidad del clima como resultado del calentamiento global, la implicación en las bases de datos para simular, y las limitaciones propias de los *softwares* para elaboración de simulaciones digitales proporcionan cierta incertidumbre acerca de la confiabilidad de los datos obtenidos.

Aun así, los resultados de las simulaciones podrían evaluarse según sus tendencias, lo que mostraría un buen comportamiento generalizado de los materiales innovadores frente a altas temperaturas, y menores fluctuaciones frente a condiciones de frío. Los materiales tradicionales, por su parte, establecen mejor cobijo ante situaciones de frío, pero esta condición se ve opacada por los amplios deltas térmicos que se observan en las Figuras 12 a 20. Si bien el vidrio de baja especificación seleccionado en este grupo posibilita buena cantidad de luz, no ocurre lo mismo en lo que a confort térmico se refiere.

Los materiales no convencionales, por su parte, evidencian sus propiedades aislantes en los resultados, aportan un comportamiento estable en las simulaciones y generan un escenario balanceado en términos de confort térmico e iluminación.

En conclusión, se identifica que los materiales de envolvente que mejor se comportan frente a las condiciones climáticas de los siguientes 55 años de vida útil de la edificación son los pertenecientes al grupo de materiales tradicionales e innovadores; sin embargo, es importante reconocer que se encuentran por fuera del rango de confort establecido de 18 a 24°C por el Ashrae 55.1 de 2010 para climas fríos, y, por lo tanto, sería conveniente realizar una siguiente fase que contemple acciones pasivas para aumentar el confort térmico y lumínico. Subsecuentemente, es recomendable una nueva investigación que involucre mediciones de prototipos a escala en el sitio, con el fin de comparar y corroborar los datos simulados y reales.

Referencias

- ASHRAE 55.1 (2010). *Thermal environmental conditions for human occupancy*. Recuperado de <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>
- Auliciems, A., de Dear, R., Fagence, M., Kalkstein, L., Kevan, S. y Szokolay, S. (2011). *Human Bioclimatology*. Brisbane: Springer.
- Autodesk (2011). Ecotect Analysis. Recuperado de: <http://latinoamerica.autodesk.com/>
- Autodesk knowledge network. (2016) Recuperado de: <https://knowledge.autodesk.com/es/support/ecotect-analysis/learn-explore/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/ESP/Ecotect-Analysis-Discontinuation-FAQ.html>
- Bedoya, C. M. (2011). Viviendas de interés social y prioritario sostenibles en Colombia – VISS y VIPs. *Revista internacional de sostenibilidad, tecnología y humanismo*, 6(3), 27-36. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2099/11911>
- Belcher, S., Hacker, J. y Powell, D. (2005). Constructing design weather data for future climates. *Building Services Engineering Research and Technology*, 26(1), 49-6. Doi: <https://doi.org/10.1191/0143624405bt1120a>
- Boutet, M. L., Alias, H. M., Jacobo, G., Busso, A. J., Sogari, N. y Baranda, L. D. (2007). Verificación del comportamiento térmico de un prototipo de vivienda familiar de madera mediante “ECOTECT” y “QUICK II”. *Revista Averma: avances en energías renovables y medio ambiente*, 11(5), 73-80. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/305575005_VERIFICACION_DEL_COMPORTAMIENTO_TERMICO_DE_UN_PROTOTIPO_DE_VIVIENDA_FAMILIAR_DE_MADERA_MEDIANTE_ECOTECT_Y_QUICK_II
- Crawley, D., Hand, J., Kummert, M. y Griffith, B. (2006). Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*, 43(4), 231-238. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.027>
- Erbaa, S., Causone, F. y Armani, R. (2017). The effect of weather datasets on building energy simulation outputs. *Energy Procedia*, 134, 545-554. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.561>
- Flórez, L. y Castro-Lacouture, D. (2013). Optimization model for sustainable materials selection using objective. *Materials & Design*, 46, 310-321. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.10.013>
- Fuentes Freixanet, V. A. (2004). *Clima y arquitectura*. Azcapotzalco: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Giraldo Castañena, W. y Herrera, C. A. (2017). Ventilación pasiva y confort térmico en vivienda de interés social en clima ecuatorial. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(1), 77-101. Doi: <http://dx.doi.org/10.14482/inde.35.1.8944>
- Giraldo, C., Bedoya, C. y Alonso, L. (2015). Eficiencia energética y sostenibilidad en la vivienda de interés social en Colombia. En *Greencities & Sostenibilidad*. Inteligencia aplicada a la sostenibilidad urbana (pp. 155-180). Málaga: Ayuntamiento de Málaga. Recuperado de http://greencities.málaga.eu/opencms/export/sites/greencities/.galeria-descargas/Greencities.-Convocatoria-de-Comunicaciones-Científicas_2015.pdf
- Goia, F., Chaudhary, G. y Fantucci, S. (2018). Modelling and experimental validation of an algorithm for simulation of hysteresis effects in phase change materials for building components. *Energy and Buildings*, 174, 54-67. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.001>
- ISO 13786 (2007). *Thermal Performance of Building Components-Dynamic Thermal Characteristics-Calculation Methods*. Recuperado de <https://www.iso.org/standard/65711.html>
- Jentsch, M. F., James, P. A. B., Bourikas, L. y Bahaj, A. (2013). Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates. *Renewable Energy*, 55, 514-524. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.049>
- Kershaw, T., Eames, M. y Coley, D. (2010). Comparison of multi-year and reference year building simulations. *Building Services Engineering Research and Technology*, 31(4), 357-369. Doi: <https://doi.org/10.1177/0143624410374689>
- Mehta, G., Mehta, A. y Sharma, B. (2014). Selection of materials for green construction: A review. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 11(6), 80-83. Doi: <https://doi.org/10.9790/1684-11638083>
- Ministerio de Minas y Energía (2010). Resolución 180540. Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (Retilap). Recuperado de https://www.minminas.gov.co/documents/10180/23931303/RES180540_2010.pdf/a8e7e904-dc75-41a3-be82-9b990dd6ddb6
- Ogunkah, I. y Yang, J. (2012). Investigating factors affecting material selection: The impacts on green vernacular building materials in the design-decision making process. *Buildings*, 2(1), 1-32. Doi: <https://doi.org/10.3390/buildings2010001>
- Prashant, A., Chirag, D. y Ramachandraiah, A. (2017). A simplified tool for building layout design based on thermal comfort simulations. *Frontiers of Architectural Research*, 6(2), 218-230. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2017.03.001>
- United Nations (2015). *World Population Prospects. The 2015 Revision*. New York: Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas. Recuperado de <http://www.un.org/en/development/desa/publications/world-population-prospects-2015-revision.html>
- Vahid, M. N. y Jesper, A. (2017). Using typical and extreme weather files for impact assessment of climate change on buildings. *Energy Procedia*, 132, 616-621. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.686>
- Velasco, R. y Robles, D. (2011). Diseño de envolventes. Modelo para la exploración, el diseño y la evaluación de envolventes arquitectónicas para climas tropicales. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 13(1), 92-105. Recuperado de https://editorial.ucatolica.edu.co/ojsucatolica/revistas_ucatolica/index.php/RevArq/article/view/773
- Wilby, R. L. (2007). A review of climate change impacts on the built environment. *Built Environment*, 33(1) 31-45. Doi: <https://doi.org/10.2148/benv.33.1.31>