

Resilient Design Aspects Applied to the Envelope that Determine Thermal Comfort in Social Housing

Aspectos de diseño resiliente aplicados a la envolvente que determinan el confort térmico en las viviendas sociales

V. Nieto ¹* <https://orcid.org/0000-0003-0067-3769>, R. Cubillos * <https://orcid.org/0000-0002-9019-961X>,
R. Barrios * <https://orcid.org/0000-0002-2844-1241>

* Universidad Católica de Colombia – Bogotá D.C, COLOMBIA

Fecha de Recepción: 25/03/2021
Fecha de Aceptación: 16/07/2021
PAG 197-209

Abstract

City dwellers in South America suffer thermal discomfort inside the buildings because of climate change, a situation that directly affects their health. Resilient design addresses this issue as a response thereto. The objective of the article is to evaluate resilient design characteristics responding to the need for thermal comfort in social housing with regard to the effect of climate change. This was carried out through a theoretical and an empirical stage in two South American cities with opposite characteristics: Passo Fundo in Brazil and Tunja in Colombia. As a result, it was found that CEB is a viable option only in climates with specific conditions given its thermal and environmental properties, according to direct heat gain strategies that tend to be resilient and fit a bioclimatic urban design better. Considering the above, it was concluded that the envelope plays a key role in resilient design in terms of thermal comfort.

Keywords: Climate change adaptation, thermal comfort, resilient design, strategies, affordable housing

Resumen

Los habitantes de las ciudades en Sur América enfrentan un disconfort térmico al interior de las edificaciones como consecuencia del cambio climático, situación que afecta directamente su salud. Como respuesta a este tema se considera el Diseño Resiliente. El objetivo del artículo es evaluar las características de diseño resiliente que responden a la necesidad de confort térmico en la vivienda social en atención al efecto del cambio climático. Esto se realizó a través de una fase teórica y una empírica en dos ciudades suramericanas con características climáticas opuestas: Passo Fundo en Brasil y Tunja en Colombia. Como resultado se encontró que el BTC es una opción viable solo para climas con condiciones particulares debido a sus propiedades tanto térmicas como ambientales según estrategias de ganancia directa de calor que tienden a ser resilientes y se ajustan mejor a un diseño bioclimático en las ciudades. Teniendo en cuenta lo anterior se concluyó que la envolvente juega un papel fundamental en el diseño resiliente en función del confort térmico.

Palabras clave: Adaptación al cambio climático; confort térmico, diseño resiliente, estrategias, vivienda social

1. Introducción

Algunos autores (Blight and Coley, 2013); (Rodríguez et al., 2019) observan que los habitantes en las ciudades sur americanas presentan un disconfort térmico al interior de las viviendas relacionado al aumento del fenómeno de cambio climático, consecuencia del acelerado crecimiento de las ciudades (IEA y UNEP, 2018). En este sentido, resulta necesario diseñar para abordar los efectos de la variación del clima sobre los ocupantes en el ambiente interior, pero también para minimizar el impacto del entorno construido.

Visto desde la salud, además de no contar con una infraestructura óptima para la vivienda, no contar con las temperaturas adecuadas en los espacios puede traer consecuencias altamente negativas. Las actividades metabólicas del cuerpo producen calor que debe ser regulado constantemente para el confort y la salud (Abushakra et al., 2017). En el caso de Passo Fundo, la principal causa de hospitalización está directamente relacionada con bajas condiciones de infraestructura de alcantarillado en ciertas zonas de la ciudad (Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, n.d.). Mientras que para Tunja, la principal fuente de morbilidad y mortalidad durante la última década viene de enfermedades cardiovasculares y cardiopulmonares seguido de infecciones respiratorias agudas (Ministerios de Salud, 2018).

De esta manera, según algunos autores, el sector de la vivienda social se caracteriza por una alta vulnerabilidad frente a realidades como el cambio climático (Barrios y Lazarevski, 2009); (Makantasi & Mavrogianni, 2016). Adicionalmente, este tipo de vivienda se presenta en aproximadamente el 80% de la población total en las ciudades sur americanas (DANE, 2019) y se prevé que los países de zonas tropicales y subtropicales serán los más afectados con la situación de cambio climático (Hashemi, 2019). En este sentido, debido a su alta demanda en la ciudad contemporánea, la vivienda se convierte en un instrumento a través del cual se pueden satisfacer las necesidades de confort (Espinosa Cancino and Fuentes, 2015).

¹ Autor de correspondencia:

Universidad Católica de Colombia – Bogotá D.C, COLOMBIA
E-mail: vnieto37@ucatolica.edu.co



Como respuesta a lo mencionado, se contempla el *Diseño Resiliente*, el cual en este caso busca la adaptación y flexibilidad con el fin de garantizar el confort, respecto a un clima en constante cambio. Según el Instituto de Diseño Resiliente (Resilient Design Institute, 2020), este concepto consiste en el diseño intencional de edificios, comunidades y regiones para responder a desastres y perturbaciones naturales y provocados por el hombre, así como a los cambios a largo plazo resultantes. De forma que, el rendimiento de los edificios depende del clima al que están expuestos, su vida útil (50 a 100 años) corresponde a la escala de tiempo en la que se espera que el clima muestre un cambio sustancial. Esto implica que los edificios construidos hoy, necesitan estar diseñados para funcionar con éxito tanto en el presente como en el futuro (Coley, 2012).

Desde esta perspectiva, surge la pregunta que guía esta investigación: ¿cuáles son las características de diseño resiliente que responden a la necesidad de confort térmico en la vivienda social? Dicho esto, el objetivo de la investigación es evaluar las características de diseño resiliente que responden a la necesidad de confort térmico en la vivienda social. En este contexto, el cambio climático se convierte en una oportunidad, ya que permite reconsiderar la visión negativa del proceso de urbanización de las ciudades latinoamericanas a una que sea sostenible y resiliente (Cubillos Gonzales, 2017); (GGGI, 2020).

De acuerdo a lo expuesto, la hipótesis del estudio plantea que: si se evalúan las características de diseño resiliente en la vivienda social, entonces se responde a la necesidad de confort térmico en sus habitantes. Para ello, el proceso metodológico consistió en una fase teórica y una empírica con un caso de estudio en las ciudades de Passo Fundo y Tunja. A continuación, la estructura del artículo es la siguiente: primero se expone la metodología. En segundo lugar, se describen los resultados del estudio. En tercer lugar, se presenta la discusión y por último se muestran conclusiones y referencias.

2. Método

Para cumplir con el objetivo establecido, el marco metodológico de la presente investigación se desarrolló en dos fases principales: fase teórica y fase empírica.

2.1 Fase Teórica

Durante esta primera fase, se realizó una revisión sistemática de datos estructurados y no estructurados a través del método PRISMA (Moher et al., 2009). La revisión tuvo el fin de constituir los constructos confort térmico y diseño resiliente previos a la identificación de los rangos de confort térmico existentes y las estrategias de diseño.

2.1.1 Revisión sistemática PRISMA

Este método consiste en una lista de 27 elementos y 1 diagrama de flujo de 4 fases que permiten una revisión rigurosa sobre un tema específico, disminuyendo el riesgo de sesgo en la revisión (Moher et al., 2009). De esta forma, la revisión se realizó con un total de tres palabras clave: confort térmico, diseño resiliente y vivienda social como se muestra en la (Tabla 1), en un período de tiempo de los últimos 5 años.

Table 1. Systemic Review

Diseño Resiliente, confort térmico, vivienda social
1. Identificación: En primer lugar, los registros se identificaron mediante la búsqueda en la base de datos (n = 133). Segundo, se reconocieron registros adicionales a través de otras fuentes (n = 40)
2. Investigación: Se eliminaron los registros conocidos después de los duplicados (n = 172). Luego, los registros fueron examinados (n = 100). Finalmente, los reconocidos fueron excluidos (n = 0).
3. Elegibilidad: Se evaluaron los artículos de texto completo cuidadosamente seleccionados para su elegibilidad (n = 45). Luego se excluyeron algunos artículos de texto completo (n = 7).
4. Por último, se incluyeron los estudios designados en la síntesis cuantitativa (n = 1), cualitativa (n = 12) y mixta (n = 7).



2.2 Fase Empírica

Se realizó un estudio de caso en la ciudad de Passo Fundo con un apartamento tipo de 42.5 m² y en la ciudad de Tunja con un apartamento tipo de 56.42 m². La (Figura 1), presenta los modelos de los apartamentos estudiados, los cuales pertenecen a proyectos de vivienda social. El primero es un proyecto de 2 torres, 9 pisos cada una, que consta de 1 habitación, 1 baño, sala-comedor, cocina y área de ropas. El segundo, es un proyecto de 4 torres, 5 pisos cada una. A su vez, consta de 3 habitaciones, 2 baños, sala-comedor, cocina y área de ropas. Durante esta fase se hizo una recolección de datos climáticos e identificación de las características de materiales y sistemas constructivos existentes en las ciudades.

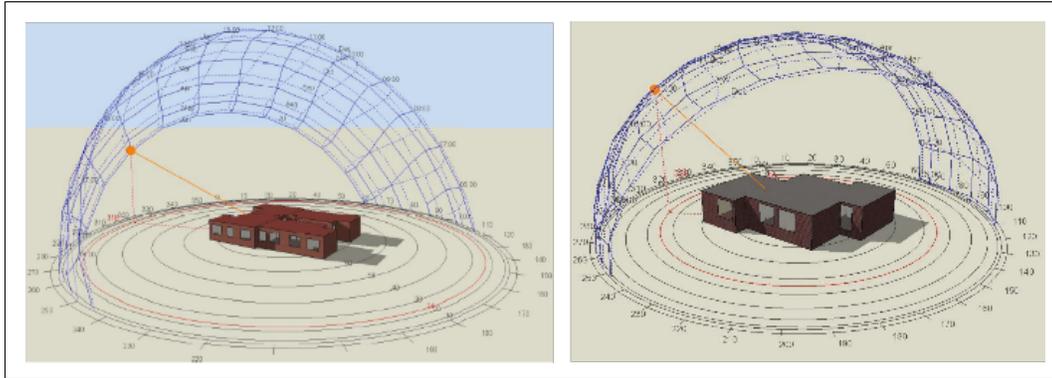


Figure 1. Standard apartment models in Passo Fundo and Tunja, respectively.
Source: Architect Luis Edgardo Fonseca

2.2.1 Obtención de datos

Se revisaron los datos de temperatura y humedad relativa de las ciudades estudiadas en un período de 30 años -1988-2018- denominado *Año Típico Climático*. Para ello, se utilizó información hidrometeorológica obtenida de entidades como el Instituto Nacional de Meteorología de Brasil- INMET, y del catálogo de estaciones meteorológicas del IDEAM (Instituto de hidrología y meteorología y estudios ambientales, Gobierno de la República de Colombia) (Ideam, 2019). Las estaciones meteorológicas usadas en ambos lugares son la no. 839140 ubicada en Passo Fundo y la no. 24035130 ubicada en Tunja. En los dos contextos, se tuvo en cuenta la clasificación del clima según Köppen. Para el caso de Passo Fundo es (A)Ca(fm) (e)w'', es decir, semicálido extremo no es tipo ganges canícula. Para este caso de Tunja es Cb (x')(w1)igw'', es decir, templado isotermal tipo ganges canícula.

2.2.2 Simulaciones

Análisis general del clima: Como primera instancia se revisaron las estrategias bioclimáticas del clima tanto de Passo Fundo como de Tunja con ayuda de la herramienta Climate Consultant 6.0 (UCLA Energy Design Tools Group & California Energy Commission PIER Program, 2020), bajo el modelo PMV (Voto Medio Predicho), el Modelo Adaptativo y la Guía de Diseño planteados en el estándar ASHRAE 55 (Turner et al., 2010). Para ello se utilizó el Año Típico Climático de cada caso. En este proceso se identificó y seleccionó el tipo de estrategia más acorde a la necesidad de cada ciudad.

Análisis de la envolvente: Una vez determinadas las estrategias, se ejecutaron 5 procesos de simulación para cada apartamento tipo en el software Open Studio 2.8 (National Renewable Energy Laboratory, 2019). Cabe resaltar que, el enfoque en este caso fue únicamente la envolvente para determinar mejoras en las condiciones de transmitancia térmica de los materiales. En este sentido, según revisión de materiales, se seleccionó el bloque en BTC o *Bloque de Tierra Comprimida*, un material que puede ser fabricado en sitio u obtenerse en lugares cercanos a las ciudades estudiadas (Andr et al., 2019). Situación que implica una reducción en los costos de transporte. Y por tanto una reducción en el impacto hacía el ambiente (Barrera Martínez, 2014). Los procesos de simulación fueron los siguientes:

Estado actual de materiales de la envolvente (fachada) frente al clima.

- Mejora 1: Muro con bloque BTC de 0.15m
- Mejora 2: Muro con bloque BTC de 0.20m
- Mejora 3: Muro compuesto con ladrillo macizo
- Mejora 4: Muro compuesto con bloque BTC

Seguido a ello, se realizó una simulación de validación de los resultados anteriores bajo el software Design Builder 6.1.0.006 (Design Builder Software Ltd., n.d.). Adicionalmente, en este paso se evaluaron las temperaturas externas e internas en la edificación.

2.2.3. Evaluación

Se evaluaron los resultados de las simulaciones y se propone la alternativa más viable para el contexto estudiado.

3. Resultados

3.1 Resultados Fase Teórica

A continuación, se presentan los resultados de la fase teórica en donde se definen los constructos diseño resiliente y confort térmico adaptativo.

3.1.1 Diseño Resiliente

Las estrategias de adaptación toman la estructura actual y su evolución futura, entendiendo como cede y cómo reacciona a las oportunidades (Courtney et al., 1997). Es decir, el ambiente se vuelve menos incierto desde el diseño resiliente, lo que implica un grado de conformidad por un tiempo mayor. Por esta razón, en el caso del confort térmico visto desde la resiliencia, es necesario considerar además del rango actual, un escenario con características extremas a las cuales se deben responder.

Por otra parte, se identificó que la envolvente es un área clave al hablar de diseño resiliente, pues tiene un alto valor "U" debido a su ganancia de calor del exterior (Bhikhoo y Hashemi, 2017); (Osman and Sevinc, 2019); (Perez-Fargallo et al., 2018). Consecuentemente, se deben contemplar sus efectos sobre el ambiente interior de los apartamentos en los últimos pisos, por lo cual debe tenerse especial cuidado en su diseño y adaptarse a la necesidad de los diferentes niveles.

Asimismo, es significativo referirse al diseño bioclimático (Moore et al., 2017), porque la optimización de la relación hombre-clima se da mediante la forma arquitectónica (Rubio-Bellido et al., 2015). Por consiguiente, este sería un primer paso para una adaptación sensible hacia el cambio climático. Dicho esto, una estrategia de diseño resiliente implicaría llevar a cabo acciones bioclimáticas para disminuir la vulnerabilidad de una población en un lugar determinado y en este caso garantizar el confort térmico en escenarios de cambio climático.

3.1.2 Confort térmico adaptativo

Como primera instancia, se identificó que la mayoría de metodologías utilizadas para evaluar el confort térmico, se basan en modelos adaptativos (Bhikhoo et al., 2017); (Mahar et al., 2019); (Sánchez et al., 2019); (Silva et al., 2016); (Trebilcock et al., 2017); (Vellei, 2015) como el expuesto en la norma ASHRAE 55 (Turner et al., 2010). De esta manera, entendiendo que la teoría del confort adaptativo menciona que el confort depende tanto del contexto como del comportamiento de los ocupantes y su percepción, se podría llegar a aproximaciones más reales en escenarios de cambio en las condiciones climáticas.

No obstante, el modelo adaptativo surge como complemento del modelo PMV (Voto Medio Predicho), el cual cuenta con un 34% de efectividad (Abushakra et al., 2017). El modelo PMV se desarrolla bajo condiciones estáticas, mientras que el adaptativo funciona bajo condiciones dinámicas. De forma que, se determinó que es necesario recurrir a ambos modelos al evaluar el confort térmico en función de la resiliencia, pues reducen el grado de incertidumbre en su evaluación.

Además de esto, en el caso de edificios como la vivienda, donde los ocupantes tienen la posibilidad de ajustar sus condiciones modificando los niveles o capas de ropa y abriendo o cerrando ventanas, la temperatura preferida está mejor representada por la teoría del confort térmico adaptativo (Coley et al., 2017). Esto no significa que responda completa y efectivamente a las necesidades de confort de los ocupantes contemplando el fenómeno de cambio climático y su aumento progresivo en el tiempo.



3.2 Resultados Fase Empírica

3.2.1 Análisis general del clima

Simulación Modelo Estático: La (Figura 2) corresponde a la simulación por medio del diagrama psicrométrico que el software Climate Consultant, determina por defecto al introducir los datos climáticos de cada ciudad utilizando el modelo estático del estándar ASHRAE 55. Este diagrama indica que la zona de confort térmico está ubicada entre los 22°C y 28°C. Para el caso de Passo Fundo, responde al 20% de confort al año. Es decir, logra estar en este rango 1757 horas de las 8760 anuales. Así mismo, el diagrama expone que el solo uso de estrategias pasivas aumentaría considerablemente los niveles de confort en esta ciudad.

Por otro lado, a diferencia de Passo Fundo, Tunja solo el 3% del año se encuentra en dicha zona ver (Figura 3). Esto significa que, de 8760 horas al año, en 26 horas la ciudad está en confort según los criterios del programa. Del mismo modo, para contrarrestar esta situación, el software plantea el uso de estrategias tanto activas como pasivas y su respectivo porcentaje de mejora en el año en términos de confort.

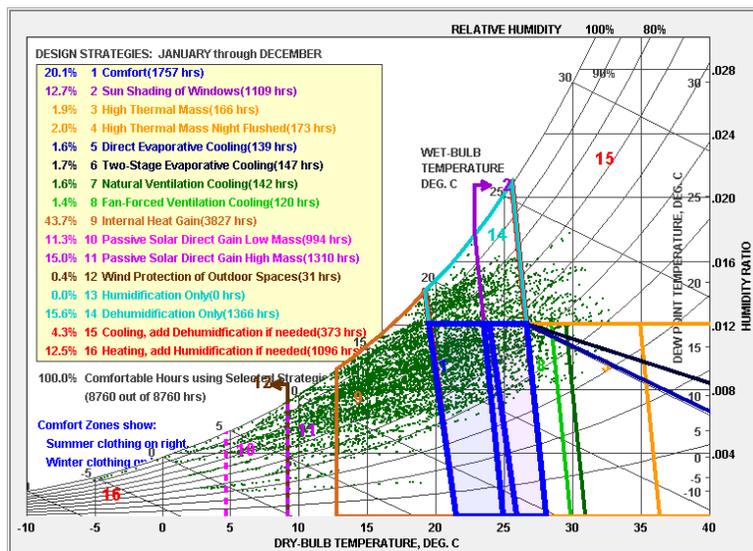


Figura 2. Diagrama psicrométrico para Passo Fundo usando el Modelo de Confort Estático.
Fuente: Tomado de Climate Consultant versión 6.0

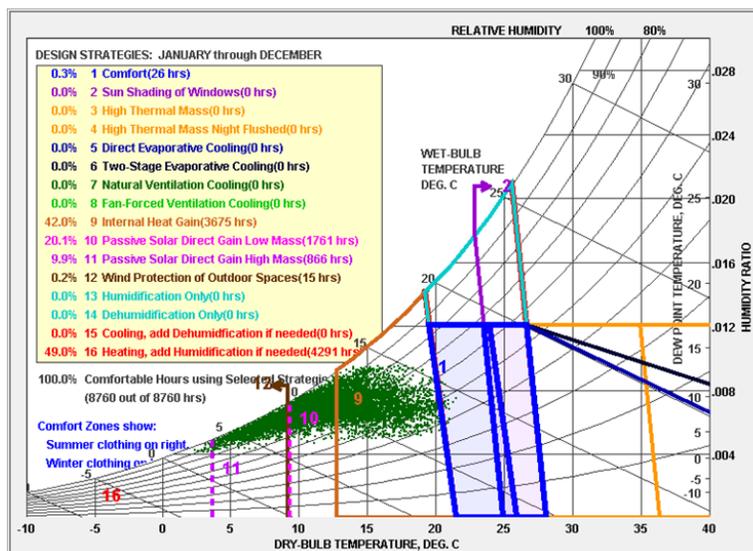


Figura 3. Diagrama psicrométrico para Tunja usando el Modelo de Confort Estático.
Fuente: Tomado de Climate Consultant versión 6.0



Una vez revisadas las estrategias propuestas por el programa, se determinó cuales pueden o no aplicar en el contexto local de cada ciudad y pueden ser resilientes en la misma. En el caso de la primera ciudad estudiada, se encontró que, del total de estrategias presentadas en Climate Consultant, las que cumplen con las características mencionadas son:

- ✓ Ganancia de calor de luces, personas y equipos.
- ✓ Construcción liviana y paredes operables, espacios al aire libre sombreados.
- ✓ Techos de poca pendiente con amplios voladizos.
- ✓ Chimenea que proporciona masa superficial para almacenar la ganancia solar diurna de invierno y nocturna de verano.
- ✓ Orientación para que el sol de invierno penetre en espacios de uso diurno.
- ✓ Material en la envolvente para que acumule energía.
- ✓ Vegetación cerca este – oeste.

Para el caso de la segunda ciudad, las estrategias seleccionadas fueron:

- ✓ Ganancia de calor de luces, personas y equipos.
- ✓ Chimenea que proporciona masa superficial para almacenar la ganancia solar diurna de invierno y nocturna de verano.
- ✓ Orientación para que el sol de invierno penetre en espacios de uso diurno
- ✓ Material en la envolvente para que acumule energía.
- ✓ Vegetación cerca este – oeste.
- ✓ Aislamiento adicional en la cubierta.
- ✓ Ventanas sin sombras.
- ✓ Usar elementos operables (Ventanas operables) (Black outs, cortinas).
- ✓ Aislamiento en sótanos.

De este modo, teniendo en cuenta que las estrategias en común para ambas ciudades son: 1. Ganancia de calor de luces, personas y equipos; 2. Chimenea que proporciona masa superficial para almacenar la ganancia solar diurna de invierno y nocturna de verano; 3. Orientación para que el sol de invierno penetre en espacios de uso diurno; 4. Material en la envolvente para que acumule energía y 5. Vegetación, se observó que desde el modelo estático las soluciones están orientadas más hacia el uso solar pasivo y la ganancia de calor.

Así mismo, se verificó la relación de las estrategias con la Paleta 2030. Esta paleta, es un recurso para el diseño de ambientes cero carbono, adaptables y resilientes (Architecture 2030, n.d.). Además de ello se encuentra integrada en softwares como *Sefaira*, *Insight 360* y *Climate Consultant*, e incluye herramientas de diseño de EDGE y ejemplos de proyectos certificados por EDGE.

Dicho esto, las estrategias identificadas en este modelo para ambas ciudades, que a su vez responden al proyecto de la Paleta 2030 son: 1. Orientación para que el sol de invierno penetre en espacios de uso diurno; 2. Chimenea que proporciona masa superficial para almacenar la ganancia solar diurna de invierno y nocturna de verano y 3. Ventanas sin sombras.

Simulación Modelo Adaptativo: Para la simulación del modelo adaptativo, el diagrama psicrométrico muestra que la zona de confort responde a un rango de 19°C a 24°C aproximadamente. Para lo cual el software plantea el uso de estrategias de ventilación para el control de la temperatura. Según lo anterior, la aplicación de dichas estrategias constituye un porcentaje de confort del 21%, para Passo Fundo, lo que significa 1849 horas de confort al año ver (Figura 4). Para Tunja, indica un porcentaje del 1.8%, es decir, de 8760 horas en el año, los ocupantes estarían 162 horas en confort adaptativo ver (Figura 5).



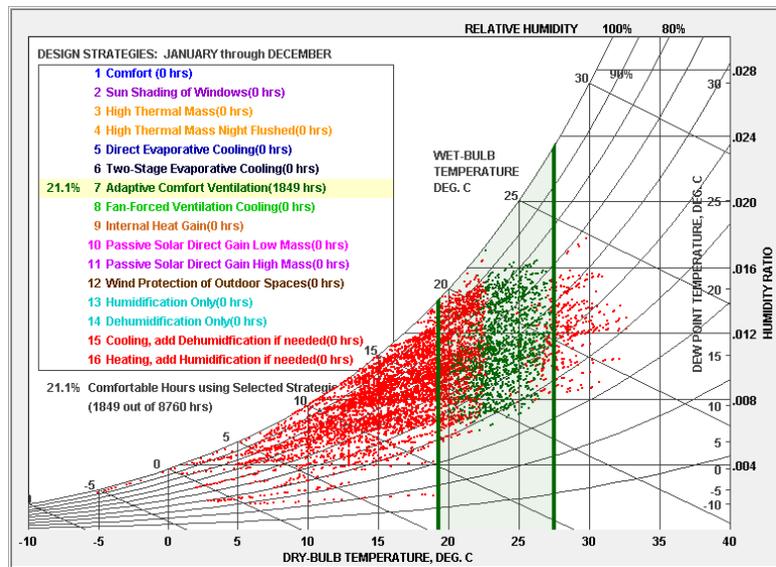


Figura 4. Diagrama psicrométrico para Passo Fundo usando el Modelo de Confort Adaptativo. Fuente: Tomado de Climate Consultant versión 6.0

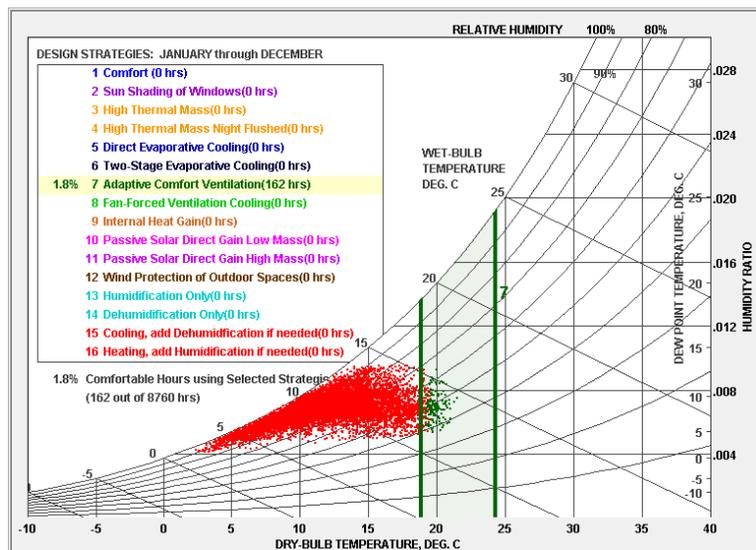


Figura 5. Diagrama psicrométrico para Tunja usando el Modelo de Confort Adaptativo. Fuente: Tomado de Climate Consultant versión 6.0

Seguido a ello, al igual que con el modelo anterior, se reconoció cuáles de las estrategias propuestas por el programa pueden o no aplicar y llegar a ser resilientes en cada ciudad. En este caso, se evidenció que tanto para Passo Fundo como para Tunja, funcionan las mismas estrategias. Estas son:

- ✓ Ventilación natural, con dirección del viento de hasta 45° hacia el edificio por muros exteriores y barreras naturales.
- ✓ Ventiladores en techo.



SPANISH VERSION.....

- ✓ Sombreado para prevenir brisas en verano y ganancia solar pasiva en invierno.
- ✓ Construcciones de peso ligero con muros operables.
- ✓ Casas pasivas tradicional en climas húmedos y cálidos con techos altos y ventanas altas.
- ✓ Zona de transición entre exterior-interior (porche, patio, pérgola sombreada, etc).
- ✓ Acristalamiento lado norte para la ventilación cruzada.
- ✓ Techos bajos inclinados climas templados (aleros).
- ✓ Ubicación de plantas en el costado este para la ganancia de calor.
- ✓ Áticos bien ventilados para proteger porches, áreas de trabajo.
- ✓ Elevar la edificación para minimizar humedad y maximizar la ventilación natural.
- ✓ Radiación solar indirecta con voladizos, aleros, operables etc.

De manera similar, se detectó que, de las estrategias expuestas en el modelo adaptativo, las que también hacen parte de la Paleta 2030 son: 1. sombreado para prevenir brisas en verano y ganancia solar pasiva en invierno; 2. ubicación de plantas en el costado este para la ganancia de calor; y 3. áticos bien ventilados para proteger porches, áreas de trabajo; 4. Radiación solar indirecta con voladizos y aleros.

Simulación Guía de Diseño del Modelo de Confort (ASHRAE 2005): Finalmente, se realizó el mismo procedimiento de simulación, pero esta vez se utilizó la Guía de Diseño del Modelo de Confort. Esta guía reúne características de ambos modelos y plantea la zona de confort para invierno entre los 20°C y 25°C y para verano de los 24°C a los 28°C. Para este modelo, como se expone en la (Figura 6), Passo Fundo estaría 2133 horas al año en confort (24% anual), en donde el software sugiere el uso de estrategias en su mayoría pasivas. Por otra parte, Tunja estaría en la zona de confort 44 horas al año, es decir el 5% anual y para llegar a un 100% sugiere el uso de estrategias mixtas ver (Figura 7).

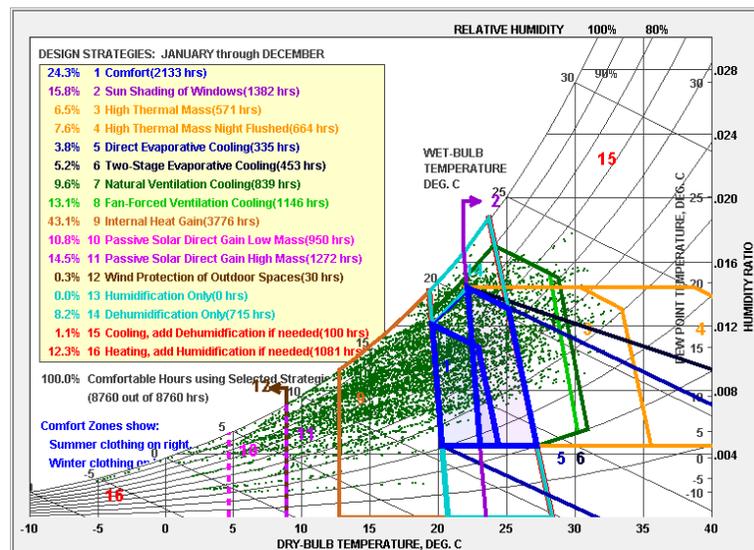


Figura 6. Diagrama psicrométrico para Passo Fundo usando la Guía de Diseño del Modelo de Confort.

Fuente: Tomado de Climate Consultant versión 6.0



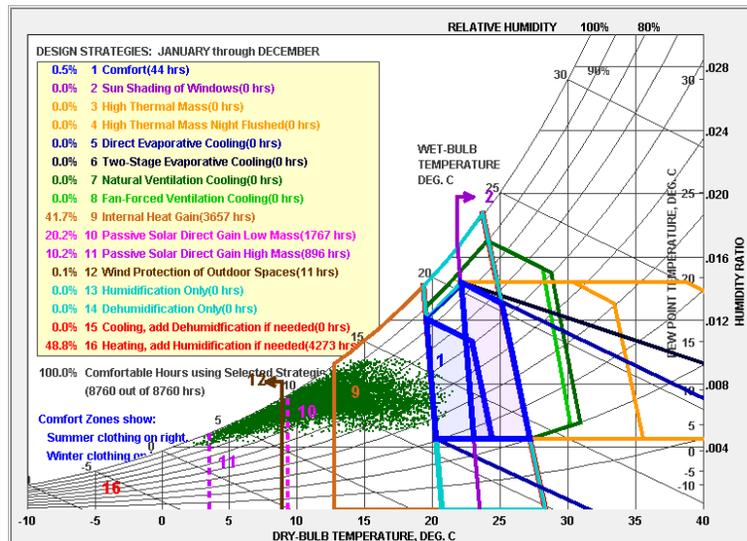


Figura 7. Diagrama psicrométrico para Tunja usando la Guía de Diseño del Modelo de Confort. Fuente: Tomado de Climate Consultant versión 6.0

Al revisar las estrategias, se halló que en el caso de Passo Fundo, las que aplican y tienen el potencial de resiliencia son:

- ✓ Construcción liviana y paredes operables, espacios al aire libre sombreados.
- ✓ Voladizos de las ventanas o parasoles operables.
- ✓ Facilitar ventilación cruzada localizando puertas y ventanas en el lado opuesto del edificio.
- ✓ Ganancias solares por orientación. Maximizar exposición en verano.
- ✓ Ganancia de calor de luces, personas y equipos.
- ✓ Orientación para que el sol de invierno penetre en espacios de uso diario.

Para Tunja, las estrategias elegidas son:

- ✓ Ganancias solares por orientación. Maximizar exposición en verano.
- ✓ Ganancia de calor de luces, personas y equipos.
- ✓ Orientación para que el sol de invierno penetre en espacios de uso diario.
- ✓ Vegetación cerca (a 45°) este – oeste.
- ✓ Ventanas sin sombras.
- ✓ Aislamiento en sótanos.
- ✓ Usar elementos operables (Ventanas operables) (Black outs, cortinas).
- ✓ Garajes o áreas de almacenamiento en el lado del edificio que enfrenta el viento más frío para aislar.

En cuanto a su relación con la Paleta 2030, las estrategias vinculadas son: 1. voladizos de las ventanas o parasoles operables; 2. Facilitar ventilación cruzada localizando puertas y ventanas en el lado opuesto del edificio; 3. ganancias solares por orientación; 4. ganancia de calor de luces, personas y equipos; 5. orientación para que el sol de invierno penetre en espacios de uso diario; 6. vegetación; 7. ventanas sin sombras; 8. aislamiento en sótanos; 9. usar elementos operables y 10. garajes o áreas de almacenamiento en el lado del edificio que enfrenta el viento más frío para aislar.

3.2.2 Análisis de la envolvente

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se determinó que el tipo de estrategias que mejor se adaptan para el caso de estudio son las de ganancia interna de calor para ambos casos y no las de la forma arquitectónica. Por tanto, se procedió a estudiar mejoras en el material de la envolvente, puntualmente en la fachada. Para ello como primera instancia, se realizó un promedio ver (Tabla 2) para observar la variabilidad térmica en los días extremos teniendo en cuenta las temperaturas exteriores máximas y mínimas en cada ciudad y poder comparar los datos observados en el Año Típico Climático -1989-2019- en cada caso. Esto con el fin de evidenciar la situación de cambio climático y determinar las temperaturas externas a las cuales la envolvente debe responder.

Tabla 2. Temperaturas exteriores máximas y mínimas durante el año climático estándar

Época del año	Lugar	Temperatura de bulbo seco °C	
6 de julio (Día más frío)	Passo Fundo	Temp. Mínima	Temp. Máxima
	Tunja	6,46	20,20
17 de marzo (Día más caliente)	Passo Fundo	6,30	14,92
	Tunja	22,68	36,6
	Passo Fundo	10,04	17,86
	Tunja		

De esta forma, entendiendo que la vivienda social en Brasil y Colombia presenta una problemática asociada a la selección y el uso de una materialidad consecuente con el cambio climático desde las condiciones de confort térmico (Medina-Patrón and Escobar-saiz, 2019), se encontró que el Bloque de Tierra Comprimida o BTC, es una opción viable debido a sus características tanto térmicas como ambientales (Barrera Martínez, 2014; Gutiérrez, 2015).

Teniendo en cuenta lo anterior, en la (Figura 8), se registraron las variaciones en la temperatura interior del apartamento estudiado en Passo Fundo y en Tunja respectivamente con cada una de las mejoras respecto al estado actual. Para la mejora 1, se planteó el uso de muros sencillos con BTC de 0,145 m de espesor, mientras que para la mejora 2 se propone el aumento de la sección del muro de BTC a 0,2 m. Por otro lado, para la mejora 3, se presentan muros compuestos de ladrillo macizo y para la mejora 4, muros compuestos con BTC.

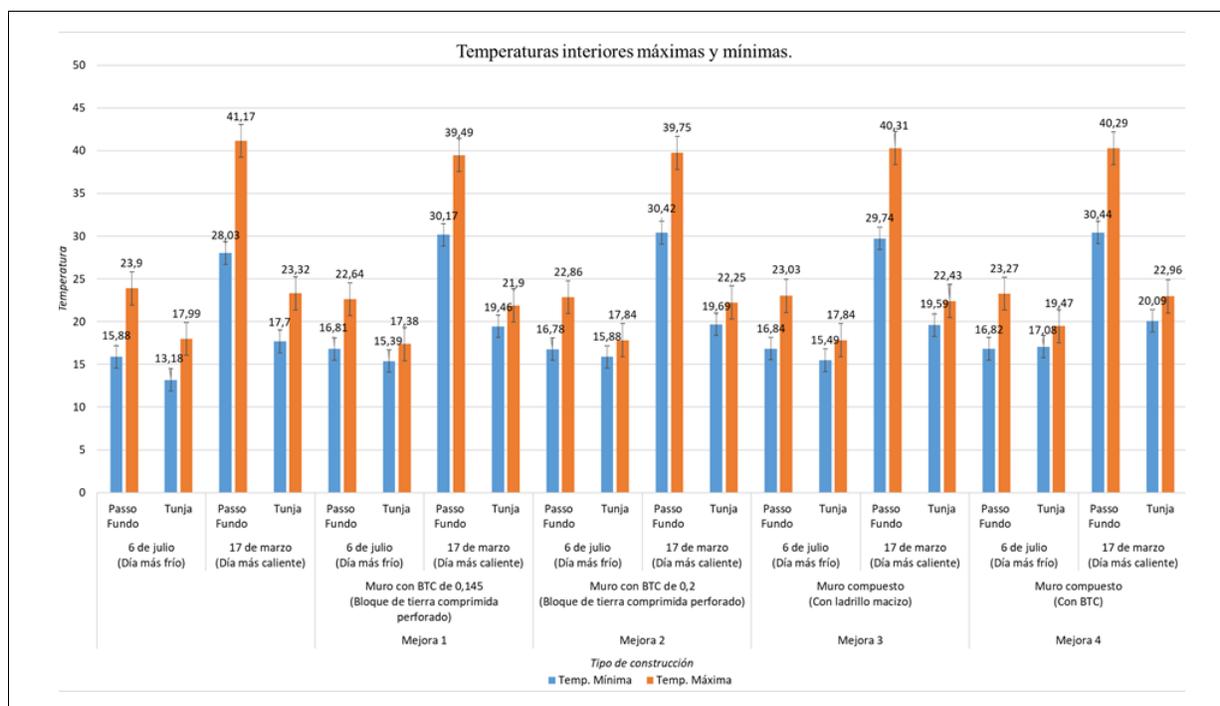


Figura 8. Temperaturas interiores máximas y mínimas



De esta manera, se encontró que la temperatura mínima actual al interior de la vivienda en Passo Fundo, aumenta 12,18 °C respecto a la temperatura exterior y la máxima aumenta 11,47°C. En Tunja, la temperatura mínima interior aumenta 6,88 °C y la máxima aumenta 5,46 °C respecto al exterior. Una vez realizada la mejora 1, la temperatura mínima interior para la ciudad brasileña aumentaría en 13,11 °C mientras que la máxima en 9,79 °C. En la ciudad colombiana, la temperatura mínima interior aumento 9,09 °C y la máxima 4,04 °C. En cuanto a la mejora 2, para la primera ciudad, el aumento de la temperatura mínima sería de 13,08 °C y la máxima de 10,05 °C. Mientras para la segunda ciudad, el aumento de la temperatura mínima es de 9,58 °C y de la máxima 4,39 °C.

Por otra parte, para el caso de la mejora 3 en Passo Fundo, los valores serían de 13,14 °C y 10,61 °C respectivamente. Del mismo modo, para Tunja, estos valores son de 9,19 °C y 4,57°C. Finalmente para la mejora 4 el aumento de la temperatura mínima y máxima al interior en Passo Fundo es de 13,15 °C y 10,59 °C. En cuanto a la ciudad colombiana, estas temperaturas son de 10,78 °C y 5,10°C, siendo esta última la mejor opción para Tunja en términos de aislamiento térmico hacía el interior. Finalmente, se realizó un costo estimativo de las mejoras propuestas. Se presentan los valores en dólares para facilitar la comprensión de manera global. Estos costos están referidos a los valores locales del año 2019. En la (Tabla 3), se exponen dichos valores.

Tabla 3. Costos estimados de materiales por m²

Estado	Material	Costo en dólares por m2
Estado actual	Ladrillo macizo	15,01
Mejora 1	Bloque BTC	17,55
Mejora 2	Bloque BTC -0,20	22,78
Mejora 3	Muro compuesto con ladrillo macizo	30,03
Mejora 4	Muro compuesto con BTC	35,09

4. Discusión

Diversos autores (Andr et al., 2019); (Barrera Martínez, 2014); (Gutiérrez, 2015) afirman que el BTC es un material sostenible para la vivienda social en contextos Latino Americanos porque además de ser efectivo como regulador natural de la temperatura, genera un bajo impacto ambiental. Sin embargo, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las simulaciones, para la ciudad de Passo Fundo en Brasil este material genera un sobrecalentamiento dentro de la vivienda haciendo que la temperatura interior salga de los rangos de confort establecidos.

A diferencia del primer caso, en Tunja, el material propuesto muestra un mejor comportamiento térmico permitiendo mantener la zona de confort al interior de la vivienda por un tiempo mayor. En este sentido, se analizaron los costos por m² de cada uno de los materiales propuestos. Se encontró que, pese a que el muro compuesto con bloque BTC es la mejor opción para Tunja desde el punto de vista térmico, este representa un aumento de 2.3 veces el valor respecto al ladrillo macizo usado actualmente en este tipo de construcción.

No obstante, si para esta ciudad solo se cambia el material actual de ladrillo macizo a bloque en BTC de 0,15m (mejora 1) ya se presenta un beneficio térmico y los costos aumentarían solo en 0,16 veces respecto al valor actual. Este beneficio se debe a que el muro con bloque BTC de 0,15m tiene un aumento significativo de aislamiento térmico hacía el interior (2°C), respecto al muro con ladrillo macizo y además garantiza 6144 horas de confort al año (70% del año). Mientras que aplicando las mejoras 2, 3 y 4 las temperaturas al interior no cambian significativamente respecto a la mejora 1, pero si implican un costo mayor.



5. Conclusiones

Teniendo en cuenta lo anterior, la envolvente juega un papel fundamental en el diseño resiliente en función del confort térmico, pues es el elemento a través del cual se da la ganancia y pérdida de calor hacia el interior. Cabe resaltar, que, aunque el cambio de material representa una mejora significativa dentro de los rangos de confort térmico para el caso colombiano, para la ciudad en Brasil este cambio tiende a empeorar las condiciones de confort en las temporadas cálidas del año. Esto significa que la resiliencia considera ciertos límites y existe el riesgo de que en algún momento se requiera de alguna estrategia activa que permita garantizar más horas de confort al año.

Así mismo, se puede concluir que el material seleccionado se comporta mejor para climas que no muestran cambios de estación significativos. Esto implica que los estudios de evaluación del impacto del cambio climático deben adaptarse a las necesidades específicas de cada lugar. Adicionalmente, se observa que los estándares y normas que abordan asuntos de confort térmico, en algunas ocasiones no son implementados correctamente a los contextos locales. Por ejemplo, en Colombia, el reglamento 0549 de construcción sostenible (el cual no es de uso obligatorio), solo utiliza el modelo PMV en términos de confort (Giraldo et al., 2021). Pero como se presentó en los resultados, es necesario tener en cuenta los dos modelos: el PMV o modelo estático y el modelo adaptativo, el cual considera la adaptación térmica como un proceso que integra las expectativas térmicas de los ocupantes y sus acciones adaptativas.

En este sentido, se plantea que el papel de los ocupantes en la resiliencia también es un desafío a la hora de diseñar. Los modelos utilizados para simular las condiciones climáticas ya tienen en cuenta la actividad del habitante. Sin embargo, resultaría útil evaluar su percepción para así contrastar los efectos de sus decisiones y entender mejor la relación con su espacio. Para ello se sugiere la aplicación de la encuesta propuesta en el estándar ASHRAE 55 (Turner et al., 2010) como complemento de los procesos de simulación.

Por otro lado, también se evidencia que una limitación constante para diseñar con respecto a condiciones de cambio climático es la recolección de información y acceso a datos climáticos de cada lugar. Para el caso puntual de esta investigación, sería importante verificar los datos obtenidos de temperatura y humedad relativa con mediciones en sitio y en tiempo real apoyados en el uso de equipos especializados con el fin de reducir el riesgo de incertidumbre. Finalmente, como paso a seguir, es preciso cuestionarse cómo este tipo de mejoras impacta el ámbito productivo local y cómo esto sería viable desde la perspectiva industrial. Pues a partir de ello, se puede aproximar a ejercicios de transición en las ciudades desde el diseño y la construcción con fines de atender los impactos de cambio climático de carácter tanto ambiental como económico y social.

6. Agradecimientos

Este trabajo fue posible gracias al apoyo financiero de la Universidad Católica de Colombia a través del programa de Jóvenes Investigadores. Así mismo, los autores agradecen: al Arq. Luis Edgardo Fonseca Granados por su aporte en los procesos a los modelos de simulación. A la Arq. Vanusa Tebaldi y la PhD Grace Cardoso del programa de posgrado en Arquitectura y Urbanismo (PPGARQ) de la Escuela Politécnica IMED – Passo Fundo, Brasil por su contribución con los datos climáticos de la ciudad de Passo Fundo, Brasil. También, al proyecto Estrategias de diseño resiliente aplicando tecnologías limpias a la Vivienda de Interés Social en Brasil y Colombia, al CIFAR y a la Facultad de Diseño de la Universidad Católica de Colombia por su respaldo para el desarrollo del proyecto.

7. Referencias

- Abushakra, B.; Akers, L. W.; Baxter, V. D.; Hayter, S. J.; Paranjpey, R. P. (2017). ASHRAE Handbook Fundamentals.
- Andr, J.; Herrera, Q.; Casta, G.; Calder, A. J. G.; Gonz, E. (2019). Vivienda Social y Cooperativismo : Acercamiento de una Propuesta de Vivienda Alternativa. *Revista de Arquitectura IMED*, 8, 95–110. <https://doi.org/10.18256/2318-1109.2019.v8i1.3299>
- Architecture 2030. (n.d.). 2030 Palette. Architecture 2030. <http://www.2030palette.org/>
- Barrera Martínez, L. G. (2014). Fabricación y reforzamiento de bloques de tierra compactada (BTC) en Bogotá bajo la reutilización de las fibras de la poli sombra [Universidad La Gran Colombia]. <http://repository.ugc.edu.co/handle/11396/5182>
- Barrios, R. A.; Lazarevski, S. (2009). Bogotá: Social housing versus actors. *Gestión y Ambiente*, 12, 91–106.
- Bhikhoo, N.; Hashemi, A.; Cruickshank, H. (2017). Improving thermal comfort of low-income housing in Thailand through passive design strategies. *Sustainability*, v.9 (8). <https://doi.org/10.3390/su9081440>
- Bhikhoo, N.; Hashemi, A. (2017). Improving Thermal Comfort of Low-Income Housing in Thailand through Passive Design Strategies. *Sustainability*, 1–23. <https://doi.org/10.3390/su9081440>



ENGLISH VERSION.....

- Blight, T.; Coley, D. (2013).** Sensitivity analysis of the effect of occupant behaviour on the energy consumption of passive house dwellings. *Energy and Buildings*, 66. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.06.030>
- Coley, D. (2012).** The implications of a changing climate for buildings. *Building and Environment*, v.55, pp. 1-7, septiembre. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.03.014>
- Coley, D.; Herrera, M.; Fosas, D.; Liu, C.; Vellei, M. (2017).** Probabilistic adaptive thermal comfort for resilient design. *Building and Environment*, v.123, pp. 109-118. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.050>
- Courtney, H.; Kirkland, J.; Viguier, P. (1997).** Strategy under uncertainty. *Harvard Business Review*.
- Cubillos-Gonzales, R. (2017).** Principios para el diseño de vivienda social resiliente frente al cambio climático. In *Los retos en la vivienda del siglo XXI*. Universidad Autónoma de Coahuila.
- DANE. (2019).** Vivienda VIS y no VIS. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/vivienda-vis-y-no-vis>
- Design Builder Software Ltd. (n.d.).** Design Builder (6.1.0.006). Design Builder Software Ltd.
- Espinosa Cancino, C. F.; Fuentes, A. C. (2015).** Confort higro-térmico en vivienda social y la percepción del habitante. *Invi*, 30(85). <https://doi.org/10.4067/S0718-83582015000300008>
- Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (n.d.).** IBGE.
- GGGI. (2020).** The Global Green Growth Institute and Green Climate Fund.
- Giraldo, W.; Czajkowski, J. D.; Gómez, A. F. (2021).** Confort térmico en vivienda social multifamiliar de clima cálido en Colombia. *Revista de Arquitectura*, 23(1). <https://doi.org/10.14718/RevArq.2021.2938>
- Gutiérrez, R. S. R. (2015).** CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLE, ANÁLISIS DE RETRASO TÉRMICO A BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDOS. *Revista de La Facultad de Arquitectura de La Universidad Autónoma de Nuevo León*, IX(11). <http://contexto.uanl.mx/index.php/contexto/article/view/49>
- Hashemi, A. (2019).** Assessment of solar shading strategies in low-income tropical housing: the case of Uganda. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability*, 172, 293–301. <https://doi.org/10.1680/jensu.17.00072>
- Ideam. (2019).** IDEAM. Ministerio de Ambiente. http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/variacion-diaria-de-condiciones-meteorologicas-altiplano-cundiboyacense?p_p_id=110_INSTANCE_wzTuoGKvoqZT&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&_110_INSTANCE_wzTuoGKvoq
- IEA and UNEP (2018).** International Energy Agency and the United Nations Environment Programme - Global Status Report 2018: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construct. <https://www.worldgbc.org/news-media/2018-global-status-report-towards-zero-emission-efficient-and-resilient-buildings-and>
- Mahar, W. A.; Verbeeck, G.; Singh, M. K.; Attia, S. (2019).** An investigation of thermal comfort of houses in dry and semi-arid climates of Quetta, Pakistan. *Sustainability*, 11. <https://doi.org/10.3390/su11195203>
- Makantasi, A.; Mavrogianni, A. (2016).** Advances in Building Energy Research Adaptation of London's social housing to climate change through retrofit: a holistic evaluation approach. *Advances in Building Energy Research*, 10, 99–124. <https://doi.org/10.1080/17512549.2015.1040071>
- Medina-Patrón, N.; Escobar-saiz, J. (2019).** Envoltantes eficientes. Relación entre condiciones ambientales, espacios confortables y simulaciones digitales. *Revista de Arquitectura*, 21(1), 90–109. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2019.21.1.2140>
- Ministerios de Salud. (2018).** Análisis de la situación departamental y municipal en Boyacá 2018. Ministerio de Salud. <https://www.boyaca.gov.co/secretariasalud/category/direcciones/direccion-de-salud-publica/asis-analisis-de-la-situacion-en-salud/>
- Moher, D.; Liberati, A.; Tetzlaff, J.; Altman, D. G.; Group, T. P. (2009).** Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *PLoS Med*, 6(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Moore, T.; Ridley, I.; Strengers, Y.; Maller, C.; Horne, R.; Moore, T.; Ridley, I.; Strengers, Y.; Maller, C.; Horne, R. (2017).** Dwelling performance and adaptive summer comfort in low-income Australian households. *Edificio de Investigación e Información*, 45, 443–456. <https://doi.org/10.1080/09613218.2016.1139906>
- National Renewable Energy Laboratory (2019).** Open Studio (2.8).
- Osman, M. M.; Sevinc, H. (2019).** Adaptation of climate-responsive building design strategies and resilience to climate change in the hot / arid region of Khartoum , Sudan. *Sustainable Cities and Society*, 47(October 2017), 101429. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101429>
- Perez Fargallo, A.; Pulido-Arcas, J.; Rubio Bellido, C.; Trebilcock, M.; Piderit, B.; Attia, S. (2018).** Predicting the Impact of Climate Change on Thermal Comfort in A Building Category : The Case of Linear-type Social Housing Stock in Southern Spain. *Energy and Buildings*, 178, 94–106. <https://doi.org/10.3390/en12122238>
- Resilient Design Institute (2020).** Resilient Design Buildings. Resilient Design Institute. <https://www.resilientdesign.org/>
- Rodríguez, C. M.; Medina, J. M.; Pinzón, A.; García, A. (2019).** A post-occupancy strategy to improve thermal comfort in social housing in a tropical highland climate: A case study in Bogotá, Colombia. *Informes de La Construcción*, 71(555). <https://doi.org/10.3989/ic.61006>
- Rubio-Bellido, C.; Pulido-Arcas, J. A.; Ureta-Gragera, M. (2015).** Aplicabilidad de estrategias genéricas de diseño pasivo en edificaciones bajo la influencia del cambio climático en Concepción y Santiago, Chile. *Hábitat Sustentable*, 5, 33–41. <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/2106>
- Sánchez-García, D.; Bienvenido-Huertas, D.; Trisancho-Carvajal, M.; Rubio-Bellido, C. (2019).** Adaptive comfort control implemented model (ACCIM) for energy consumption predictions in dwellings under current and future climate conditions: A case study located in Spain. *Energies*, 12. <https://doi.org/10.3390/en12081498>
- Silva, A. S.; Ghisi, E.; Lamberts, R. (2016).** Performance evaluation of long-term thermal comfort indices in building simulation according to ASHRAE Standard 55. *Building and Environment*, 102. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.004>
- Trebilcock, M.; Soto Muñoz, J.; Figueroa San Martín, R.; Piderit-Moreno, B. (2017).** Metodología para el diseño de edificios educacionales confortables y resilientes. *AUS [Arquitectura / Urbanismo / Sustentabilidad]*. 20, pp. 77-76. <https://doi.org/10.4206/aus.2016.n20-11>
- Turner, S. C.; Paliaga, G.; Lynch, B. M.; Arens, E. A.; Aynsley, R. M.; Brager, G. S.; Deringer, J. J.; Ferguson, J. M.; Filler, J. M.; Hogeling, J. J.; Int-hout, D.; Kwok, A. G.; Levy, H. F.; Sterling, E. M.; Stoops, J. L.; Taylor, S. T.; Tinsley, R. W.; Cooper, K. W.; Dean, K. W.; ... Peterson, J. C. (2010).** ASHRAE STANDARD. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy Vol. 55. www.ashrae.org
- UCLA Energy Design Tools Group, & California Energy Commission PIER Program. (2020).** Climate Consultant (6.0).
- Vellei, M. (2015).** A field study of indoor thermal comfort in the subtropical highland climate of Bogota, Colombia. *Journal of Building Engineering*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2015.10.003>

