

**APORTE DE LOS ESCUDOS VERDES AL CONFORT
TÉRMICO EN VIVIENDAS VIS EN LA CIUDAD DE
MEDELLÍN**

Modalidad: Exploratorio

**FELIPE ARANGO HERNÁNDEZ
DANIELA GUEVARA BETANCUR**

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero/a civil

DR. ING. ENGELBERTH SOTO ESTRADA



**UNIVERSIDAD EIA
INGENIERIA CIVIL
ENVIGADO
2019**

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

TABLA DE CONTENIDO

Lista de tablas	4
Lista de ilustraciones.....	5
Resumen.....	7
Abstract.....	8
INTRODUCCIÓN	9
1. PRELIMINARES	13
1.1. Formulación del problema.....	13
1.2. Objetivos	16
1.2.1. Objetivo general.....	16
1.2.2. Objetivos específicos.....	16
1.3. Marco de referencia	17
1.3.1. Antecedentes.....	17
1.3.1.1. La vivienda VIS Multifamiliar	17
1.3.1.2. Estado del arte sobre confort térmico en VIS.....	17
1.3.1.3. Estado del arte sobre fachadas verdes	18
1.3.1.4 Tipos de fachadas verdes.....	21
1.3.2. Marco metodológico	25
1.3.2.1. Normativa nacional sobre vivienda y confort.....	25
1.3.2.2. Normativa Internacional para la estimación del confort térmico ..	27
1.3.2.3 Indicadores para analizar el buen funcionamiento de una vivienda	38
1.3.2.4 Envoltente de la edificación y su influencia en el confort térmico ..	42
1.3.2.5 Aspectos generales de las viviendas VIS	45
1.3.2.6 Modelación de temperatura	52
1.3.2.7 Validación del modelo.....	57
2. METODOLOGÍA	59
2.1. Establecer beneficios de los escudos verdes.....	59
2.1.1. Actividad 1	59

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2.1.2.	Actividad 2	61
2.1.3.	Actividad 3	61
2.1.4.	Actividad 4	62
2.2.	Alternativas de diseño	62
2.2.1.	Actividad 1	62
2.2.2.	Actividad 2	62
2.3.	Selección alternativa	62
2.3.1.	Actividad 1	62
2.4.	Factibilidad	63
2.4.1.	Actividad 1	63
2.4.2.	Actividad 2	63
3.	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	64
3.1.	Diagnóstico del beneficio de los escudos verdes - Verde Avignon	64
3.1.1.	Primera medición.....	70
3.1.1.1.	Análisis de acuerdo con el Estándar ASHRAE 55	74
3.1.1.2.	Análisis de acuerdo con la norma ISO 7730	77
3.1.1.3.	Amortiguación y desfase térmico	81
3.1.2.	Segunda medición.....	83
3.1.2.1.	Análisis de acuerdo con el Estándar ASHRAE 55	86
3.1.2.2.	Análisis de acuerdo con la norma ISO 7730	87
3.1.2.3.	Amortiguación y desfase térmico.....	91
3.2.	Alternativa de diseño.....	94
3.2.1.	Desarrollo del modelo.....	94
3.2.1.1.	Consideraciones iniciales.....	94
3.2.1.2.	Medidas para el modelo.....	98
3.2.1.3.	Materiales y medidas	100
3.2.1.4.	Consideraciones y características térmicas y energéticas generales del modelo	107
3.2.2.	Condiciones de simulación	114
3.2.3.	Resultados arrojados por el modelo	115
3.2.4.	Instalación de vegetación	117

3.2.4.1. Características de los materiales y desarrollo del modelo con fachada verde.....	118
3.2.5. Validación del modelo.....	121
3.3. Análisis de los resultados del modelo	127
3.3.1. Efectos de los escudos verdes	132
3.3.2. Selección de la alternativa	138
3.4. Factibilidad	144
3.4.1. Materiales de construcción	144
3.4.2. Vegetación.....	144
3.4.3. Construcción fachada de mampostería	145
3.4.4. Evaluación de factibilidad	146
4. Conclusiones.....	148
5. Referencias.....	151

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Lista de tablas

Tabla 1 Tipos de fachadas, ventajas y desventajas (Ottelé, 2011)	24
Tabla 2 Clasificación de sensación térmica.....	30
Tabla 3 Valores de A según Var (ISO 7730)	35
Tabla 4 Cálculo de PMV (ISO, 2009)	37
Tabla 5 Categoría de ambiente térmico. (ISO, 2009).....	38
Tabla 6 Condiciones bioclimáticas para una vivienda de bajo costo (Diaz Reyes & Ramirez Luna, 2011).....	46
Tabla 7 Condiciones mínimas para áreas y espacios (Diaz Reyes & Ramirez Luna, 2011)	49
Tabla 8 Materiales recomendados para viviendas de bajo costo	50
Tabla 9 Factores de cálculo para la temperatura radiante (realización propia con base en ISO 7730)	72
Tabla 10 Resumen ASHRAE 55	76
Tabla 11 Frecuencia de PPD (primera medición).....	78
Tabla 12 Valores máximos y mínimos de amortiguamiento térmico	82
Tabla 13 Cuantificación de datos por fuera de los límites de satisfacción (medición 2)	87
Tabla 14 Frecuencia de PPD (segunda medición)	89
Tabla 15 Resumen resultados antes de implementación Verde Avignon	92
Tabla 16 Resumen resultados antes de implementación Verde Avignon	93
Tabla 17 Medidas mínimas y definitivas de la vivienda (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2011).	99
Tabla 18 Materiales y características definitivas para el modelo en IDA ICE.....	100
Tabla 19 Medidas de puerta y ventanas modelo IDA ICE	101
Tabla 20 Material recomendado para muros (Diaz Reyes & Ramírez Luna, 2011)	102
Tabla 21 Factores de pérdida por puentes térmicos en cada zona.....	113
Tabla 22 Ventajas y desventajas de la vegetación indirecta	117
Tabla 23 Características de las capas de la fachada verde	121
Tabla 24 cuantificación de datos sin escudos verdes del modelo por fuera de los límites	128
Tabla 25 categorías de ambiente térmico (modelo sin escudo verde)	130
Tabla 26 cuantificación de datos con escudos verdes del modelo por fuera de los límites	133

Lista de ilustraciones

Ilustración 1 Vegetación indirecta (Ottelé, 2011).....	23
Ilustración 2 Vegetación directa (Ottelé, 2011).....	24
Ilustración 3 Límites aceptables de temperatura al interior de una vivienda (ASHRAE, 2017)	29
Ilustración 4 Porcentaje Previsto de Insatisfechos (PPD) en relación con el Voto Medio Previsto (PMV). (Fanger, 1982).....	32
Ilustración 5 Ejemplificación del desfase y amortiguamiento térmico.....	41
Ilustración 6 Ejemplificación de capas paralelas de flujo de calor.....	43
Ilustración 7 Ejemplo de diseño con IDA ICE 3D (EQUA Simulation AB, 2018). ..	53
Ilustración 8 Modelación con AUTODESK Insight I (Autodesk Inc, 2018).....	55
Ilustración 9 Uso de CAD y BIM en AECOsim Energy Simulator (BENTLEY SYSTEMS, 2018).....	56
Ilustración 10 Dispositivo KIMO KH50 (Kimo instrumentos, UK).....	60
Ilustración 11 Dispositivo KIMO KTT220 (Kimo instrumentos, UK).....	60
Ilustración 12 Termómetro de globo (realización propia)	61
Ilustración 13 Ubicación Verde Avignon (GOOGLEMAPS, 2019).....	64
Ilustración 14 Planta típica Verde Avignon (Conexoinmobiliario, 2019)	66
Ilustración 15 Plano arquitectónico Verde Avignon con puntos de medición (Conexoinmobiliario, 2019).....	67
Ilustración 16 Sensor de globo Verde Avignon (realización propia)	68
Ilustración 17 Sensor exterior Verde Avignon	69
Ilustración 18 Sensores cuarto principal Verde Avignon	70
Ilustración 19 Fachada Verde Avignon, primera medición	71
Ilustración 20 Software Kilog 2015	72
Ilustración 21 Calculo de temperatura radiante	74
Ilustración 22 Límites de satisfacción según estándar 55 de la ASHRAE	75
Ilustración 23 Valores del índice PPD	77
Ilustración 24. PMV antes de la instalación de las terrazas verdes	80
Ilustración 25 Amortiguamiento y desfase térmico	81
Ilustración 26 Fachada exterior Verde Avignon (medición 2)	83
Ilustración 27 Fachada exterior Verde Avignon 2 (medición 2)	84
Ilustración 28 Temperaturas externas de ambos periodos de medición	85
Ilustración 29 Límites de confort térmico vs temperatura exterior	86
Ilustración 30 Valores de PPD obtenidos (segunda medición).....	88
Ilustración 31. PMV después de terrazas verdes (Verde Avignon)	90
Ilustración 32 Temperatura operativa vs Temperatura externa (segunda medición)	91
Ilustración 33 Ejemplo de VIS	95
Ilustración 34 Definición de clima ciudad de Medellín (resolución 0549 de 2015). 96	
Ilustración 35 Fachada expuesta del modelo	97

Ilustración 36 Modelo arquitectónico de la vivienda	97
Ilustración 37 Designación de áreas de la vivienda.....	98
Ilustración 38 Definición de mampostería en el software IDA ICE	102
Ilustración 39 Ubicación ventana cuarto de ropas.....	103
Ilustración 40 Ubicación de ventanas cuarto principal, cuarto auxiliar y baño.....	104
Ilustración 41 Ventanearía estándar escogida	104
Ilustración 42 Puerta interna (cuarto principal, auxiliar y baño) (HOMECENTER, 2019)	105
Ilustración 43 Puerta metálica, entrada de la vivienda (HOMECENTER, 2019)..	106
Ilustración 44 Temperatura máxima y mínima considerada para el desarrollo del modelo	107
Ilustración 45 Características de vestimenta y actividad de los habitantes	108
Ilustración 46 Horarios de iluminación (Cuarto principal, cuarto auxiliar, sala-comedor)	109
Ilustración 47 Horario de iluminación (Baño).....	110
Ilustración 48 Definición de infiltración en el software	111
Ilustración 49 Puentes térmicos y sus valores.....	112
Ilustración 50 Valor de pérdida por puentes térmicos en el software	113
Ilustración 51 Indicación de uso de sistemas internos de ventilación en el software	114
Ilustración 52 Definición de tiempo y condiciones de simulación en el software .	115
Ilustración 53 Tabla de resultado exhibida por IDA ICE	116
Ilustración 54 Ejemplo del comportamiento de las distintas zonas en determinado punto de la simulación.....	117
Ilustración 55 Desarrollo de fachada con vegetación en IDA ICE	119
Ilustración 56 Fachada vegetal implementada	120
Ilustración 57. Comparación modelo vs caso de estudio - Sin escudos verdes ..	123
Ilustración 58. Comparación modelo vs caso de estudio - Con escudos verdes.	125
Ilustración 59 temperatura operativa vs limites ASHRAE 55 (modelo sin escudos)	127
Ilustración 60 índice de PPD (modelo sin escudos verdes)	129
Ilustración 61. PMV - modelo sin escudos verdes.....	131
Ilustración 62 temperaturas operativas vs limites ASHRAE 55 (modelo con escudos verdes)	132
Ilustración 63 índice de PPD (modelo con escudos verdes)	134
Ilustración 64. PMV - Modelo con escudos verdes.....	136
Ilustración 65 temperatura exterior vs temperaturas operativas (modelo con escudos).....	137
Ilustración 66 Variación de temperatura operativa durante el año vareando orientación (cuarto principal)	140
Ilustración 67 Variación de temperatura mes a mes según tamaño de ventanas	141
Ilustración 68. Temperaturas operativas variando orientación y ventanas.....	143
Ilustración 69 Calificación de eficacia de una inversión (MinVivienda, 2013).....	146

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Resumen

Al hablar de desarrollo sostenible se hace referencia a la gran importancia de asegurar las necesidades del presente sin perjudicar a las generaciones futuras. Dentro de los diferentes problemas que enfrenta la sociedad actual se encuentran el cambio climático y el consumo de energía. Una de las soluciones planteadas para combatir dichos problemas es la arquitectura verde, las envolventes verdes han demostrado mejorar el desempeño térmico de las edificaciones y, en consecuencia, reducir su consumo energético. En Colombia las investigaciones en este tema son escasas. Debido a esto, en este trabajo se investigó el beneficio que tienen los escudos verdes en el confort térmico al interior de una edificación. Se realizó una modelación térmica con base en datos tomados de un caso de estudio en la ciudad de Medellín para exponer cuantitativamente, los beneficios que brindan las fachadas verdes. Finalmente, a partir de los datos obtenidos y el modelo realizado, se propuso una solución de vivienda de interés social para mejorar el confort térmico de sus habitantes. Adicionalmente, se propuso una solución para VIS, ya que gran parte de la población vive en este tipo de vivienda y se ha evidenciado que presentan problemas generalizados de confort térmico.

Palabras clave: Fachada verde, Confort térmico, Resistencia térmica, Vivienda de interés social

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Abstract

Sustainable development refers to the great importance of ensuring the needs of the present without harming future generations. Among the different problems today's society is facing are climate change and high energy consumption. One of the solutions proposed to combat these problems is green architecture. Green envelopes have been shown to improve the thermal performance of buildings and consequently reduce their energy consumption. In Colombia, research on this topic is scarce. This thesis investigates the benefits of green facades regarding the thermal comfort inside a building. A thermal model was developed based on data taken from a case study in Medellín to quantitatively expose the benefits of green facades. Finally, a low-cost housing solution based on the obtained data was proposed, since a large part of the population lives in this type of housing and it has been shown that they have widespread problems of thermal comfort.

Keywords: Green facade, Thermal comfort, Thermal resistance, Low cost housing

INTRODUCCIÓN

Reducir el aumento de la temperatura causado por la industrialización es una de las principales metas de la humanidad en la actualidad y representa uno de los mayores costos sociales en los que se ha incurrido en la historia. Se estima que la temperatura de la Tierra aumentó $0,85^{\circ}\text{C}$ durante el periodo 1880-2012, comparado con las temperaturas de 1850-1900, esto según el quinto informe de evaluación realizado en el 2014 por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. De igual manera, se estima que se generará un aumento en la temperatura mundial de 1.5°C para el periodo de 2030-2052 si se continua con la tasa de crecimiento actual de las actividades industriales (IPCC, 2018).

Según el historial de datos actuales, se ha observado un aumento de $0,2^{\circ}\text{C}$ por década y gran parte se debe al consumo energético en los hogares (Wan, Li, Liu, & Lam, 2011). El incremento se ha visto directamente afectado por el crecimiento acelerado de la población, acompañado por una mayor demanda de confort en las viviendas. El resultado es un crecimiento en la demanda de sistemas de calefacción o uso de aires acondicionados para mantener el confort, pero estos a la vez influyen directamente en el aumento de la temperatura, creando un círculo vicioso (Pérez-Lombard, Ortiz, & Pout, 2008). Hoy en día, alrededor del 48% de la producción de energía mundial es consumida por las edificaciones, tanto en países desarrollados como en vía de desarrollo, y es causante de aproximadamente el 33% de los gases de efecto invernadero (Yau & Hasbi, 2013). El impacto que genera el cambio climático en el consumo de energía es de gran magnitud y viceversa (Li et al., 2018).

Mejorar el confort térmico y, por lo tanto, la eficiencia energética de las edificaciones en ciudades en desarrollo como Medellín es un tema indispensable para su desarrollo sostenible. El calentamiento global es considerado inevitable y lo único que puede hacerse como sociedad es mitigarlo y/o adaptarse a él. Por esto, la necesidad de alternativas amigables con el medioambiente que ayuden a reducir

sus efectos a nivel mundial y permitan a las personas mantener el confort en sus hogares es evidente (Li et al., 2018).

El Sistema de Alerta Temprana (SIATA) registró el 3 de septiembre de 2019 la temperatura atmosférica más alta en la historia de Medellín: 32°C. El director del SIATA afirma que el valor es mayor al 98% de las cifras registradas desde que se monitorea el Valle de Aburrá. También explicó: “El sistema de medición del SIATA toma en cuenta los datos de la temperatura del aire y no la radiación directa, por eso la sensación térmica puede ser superior. El pasado 3 de septiembre esa sensación llegó a ser de 36°C” (El Colombiano, 2019).

Aunque el anterior es un valor excepcional, es normal que la temperatura durante el día llegue a los 28°C. El instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) cuenta con pronósticos donde se indica que Antioquia cambiará su temperatura en 1,4°C para el año 2070, lo que puede traer muchas consecuencias. Entre las que más resaltan se encuentra la presencia de fenómenos climáticos extremos, lo que implicará adaptarse a nuevas circunstancias climáticas para preservar la calidad de vida (Marín Gómez, 2017).

La necesidad de alcanzar temperaturas confortables en viviendas, oficinas y otras edificaciones, ha implicado el uso de aires acondicionados y otros mecanismos eléctricos para la disminución de temperatura, reduciendo así la eficiencia energética de la edificación. El aumento del consumo energético en mayo del 2019 fue del 4,8% en los hogares colombianos en comparación con el mismo período del año pasado (Rojas Pérez, 2018). La revista El Heraldo explica que “mientras un televisor LCD de 22 pulgadas de 60 W con 10 horas diarias de uso al mes consume 18 kWh/mes, un aire acondicionado de ¾ HP con 8 horas diarias de uso consume 144 kWh/mes” (El Heraldo, 2016), y son precisamente 152 kWh/mes lo que las Empresas Públicas de Medellín (EPM) estima como consumo para una familia común (EMP, 2013). Por otro lado, el precio del kW/h estimado es de \$474.14 para

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

la ciudad de Medellín (Empresas publicas de Medellín, 2016), lo que generaría un costo promedio adicional mensual de \$68.276,16 .

Por otra parte, es importante considerar que no todas las personas tienen acceso a estos sistemas para mantener el confort térmico en sus hogares. En Colombia, la vivienda de gran parte de la población es de bajo de costo. Según la operación estadística de vivienda VIS y No VIS derivada del Censo de Edificaciones (CEED) del DANE, del área total censada para vivienda en el segundo semestre del 2019, el 25,5% corresponde a vivienda de interés social (VIS) (DANE, 2019). Por esto, sería interesante proponer una solución aplicable a viviendas de bajo costo que al mismo tiempo pueda implementarse en cualquier tipo de edificación y ayude a mantener el confort térmico sin la necesidad de sistemas centrales de ventilación o aires acondicionados.

El uso de superficies verdes es una de las alternativas que se ha considerado para la disminución de la temperatura en edificaciones. Según Europlastic, empresa española, la temperatura de los techos en un día de verano puede alcanzar hasta los 80°C, mientras que un techo verde no excede los 25°C. Igualmente, la implementación de techos verdes puede aumentar su vida útil, ya que puede disminuir considerablemente la variación de temperaturas (Europlastic, 2014).

Considerando lo anterior, en este trabajo se realizó un estudio sobre los efectos que tienen los escudos verdes en la temperatura al interior de una edificación. Éste se desarrolló mediante el uso de sensores de humedad y temperatura instalados antes y después de la implementación de terrazas verdes en un caso de estudio en la ciudad de Medellín (Edificio Verde Avignon). Se encontró que las terrazas verdes tienen un efecto significativo en la reducción de la temperatura y ayudan a mejorar el confort térmico. Se usaron los resultados para justificar la aplicación de este tipo de solución en una vivienda VIS. Finalmente, se realizó una modelación energética utilizando escudos verdes en este tipo de vivienda para proponer una solución que

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

mejora su confort térmico. De esta manera la investigación no solo mejora el estado del arte en esta área del conocimiento, sino que tiene un beneficio social al mismo tiempo.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

1. PRELIMINARES

1.1. Formulación del problema

La temperatura de confort indicada por varios estudios varía según las condiciones locales. En Medellín, gran parte del año se presentan condiciones que pueden considerarse como “calurosas” (González, 2015). Según el IDEAM, una temperatura se puede considerar “calurosa” cuando se encuentran por encima de los 25°C, esto teniendo en cuenta que a medida que aumenta la humedad puede aumentar la sensación térmica y la incomodidad (IDEAM, 2019).

Las viviendas VIS son un concepto que se ha adoptado en Colombia para brindar el derecho a una vivienda digna a un mayor porcentaje de la población. Éstas son construidas para personas con ingresos menores a 4 salarios mínimos legales vigentes y su valor máximo es de \$124.000.000 COP (Metrocuadrado, 2019). El límite de su presupuesto hace que muchas veces haya falta de planificación y que se implementen materiales inadecuados, lo que puede generar un mal comportamiento térmico (Roux Gutiérrez, 2014).

Maria Claudia Serje Martínez, arquitecta magister en construcción sostenible de la Universidad Nacional de Colombia, da evidencia de esto en su trabajo de investigación: “El comportamiento térmico de las viviendas de interés social, en la zona suroccidente de la ciudad de barranquilla”. Asegura que las viviendas VIS en los períodos de mayor radiación solar exhiben altas temperaturas en su interior, causadas por el tipo de materiales utilizados. También afirma que, en este tipo de vivienda, la temperatura superficial interior de la cubierta puede elevarse hasta 18°C por encima de la temperatura externa, lo que impide la disipación del calor en su interior (Serje Martínez, 2018). Martínez encontró temperaturas de hasta 54°C en las caras internas de la cubierta y la fachada de estas viviendas, en relación con

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

una temperatura externa promedio de 33°C. Por esto, concluye que los materiales de estas viviendas no son adecuados como solución arquitectónica aislante y disminuyen significativamente la calidad del ambiente térmico necesaria para los usuarios en climas tropicales como el de Colombia (Serje Martínez, 2018).

Otro autor que habla del confort térmico en este tipo de viviendas es el Dr. en arquitectura y profesor investigador de la Universidad Autónoma de Coahuila, México, Rubén Salvador Roux Gutiérrez. En su artículo “Confort térmico versus consumo energético en viviendas de interés social en clima cálido húmedo”, afirma: “Los promedios globales de confort, resultan alarmantes para aquellos que residen en dichas viviendas: el 95% del tiempo, las casas se encuentran en condiciones fuera de la zona de confort estándar (27°C), estando solamente el 5% del tiempo dentro de ésta... lo que indica que las casas a pesar de ser de mampostería no tienen alto amortiguamiento térmico” (Roux Gutiérrez, 2014).

Jorge Mario Susunga, ingeniero de la Universidad Católica de Colombia, afirma que factores como la carencia de políticas públicas de sostenibilidad y los bajos ingresos hacen que para el 60% de la población colombiana sea muy difícil adquirir una vivienda digna. El ingeniero dice que es necesaria la construcción de viviendas que minimicen los egresos de las poblaciones vulnerables en cuanto a consumo energético y enfatiza en la necesidad de construir viviendas sostenibles para dichas poblaciones y en la necesidad de climatizarlas para que se encuentren en el rango confort. Para esto propone usar superficies verdes (Muñoz & Torres, 2013).

Por otro lado, en Medellín, no se tiene cuantificado con datos concretos los efectos o beneficios que los muros verdes podrían traer a la ciudad en términos de reducción de temperatura (León & Nariño, 2011). Algo similar sucede en la ciudad de Bogotá. Desde 2009, por medio del acuerdo 418 del 22 de diciembre, la Secretaría Distrital del Medio Ambiente incita la instalación de techos y muros verdes en la ciudad (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C, 2009). A partir de dicho acuerdo surge la “Guía

técnica de techos verdes” con el fin de brindar asesoría a las empresas y personas, pero se concentran más en el aspecto técnico de su implementación y aunque se mencionan superficialmente sus beneficios, éstos tampoco se encuentran cuantificados (León & Nariño, 2011).

Por lo anterior, se considera que la presente investigación brinda beneficios en el sentido de que aumenta el conocimiento del estado del arte, proporciona datos locales y evidencia cómo podrían mejorarse los diseños de las viviendas de interés social utilizando escudos verdes. Tener información cuantificada de cómo se comporta la temperatura de una edificación en la ciudad permite brindar mejores condiciones arquitectónicas a viviendas futuras, encaminadas a optimizar la comodidad ambiental, garantizar ambientes saludables y favorecer la eficiencia energética.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Determinar el potencial de utilizar escudos verdes en viviendas de bajo costo en Medellín, mediante mediciones en un caso de estudio y modelaciones térmicas.

1.2.2. Objetivos específicos

- Establecer el beneficio que brindan los escudos verdes en el confort térmico de viviendas, mediante la medición en un caso de estudio ubicado en la ciudad de Medellín, edificio verde Avignon.
- Proponer una alternativa de diseño de vivienda de bajo costo combinando diferentes diseños con escudos verdes.
- Seleccionar la alternativa de vivienda de bajo costo que brinde las mejores condiciones de confort térmico (según la norma ISO 7730 y el estándar 55 de la ASHRAE) mediante el uso de un software de modelación térmica.
- Realizar un análisis de costos y beneficios para evaluar la factibilidad de la alternativa seleccionada.

1.3. Marco de referencia

Las envolventes verdes se han utilizado a través de la historia en todo tipo de países, culturas y climas. Uno de los primeros proyectos se evidenció en Egipto, Persia y en lo que ahora es Irak, donde se pueden encontrar registros de los famosos jardines colgantes de Babilonia. Otra civilización que da ejemplo de esto son los romanos. Sin embargo, el uso de superficies verdes fue abandonado con el tiempo y se adoptaron otras técnicas constructivas. En la actualidad las superficies verdes han sido retomadas no solo con los fines estéticos que tenían en la antigüedad, sino por todos los beneficios que estas pueden brindar en una vivienda (de Rhodes Valbuena, 2012).

1.3.1. Antecedentes

1.3.1.1. La vivienda VIS Multifamiliar

La vivienda de interés social está definida como aquella construcción realizada para garantizar el derecho a la vivienda a familias de menores ingresos. Esta definición fue dada por el artículo 44 de la ley 9 de 1989, la cual fue sustituida por el artículo 91 de la ley 388 de 1997, pertenecientes a las normas de desarrollo territorial (C. d. Colombia, 1997). Según la RAE, las viviendas de interés social son edificaciones utilizadas para ser habitadas por numerosas familias, las cuales cuentan con varios niveles divididos en muchos apartamentos (RAE, 2016).

1.3.1.2. Estado del arte sobre confort térmico en VIS

Los antecedentes en cuanto a estudios realizados en el confort térmico en viviendas de categoría VIS se remiten a investigaciones que, si bien no profundizan en el control de la transmitancia térmica de los elementos de fachada, si tienen objetivos similares desde el punto de vista del análisis del confort en la vivienda de interés social (VIS), objetivo final del presente trabajo.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Dentro de ellas se encuentran las investigaciones del Dr. Rubén Salvador Roux Gutiérrez y la Magister en construcción sostenible, Maria Claudia Serje Martínez, ya mencionadas anteriormente. Otro ejemplo, es la tesis de maestría propuesta por el arquitecto Helmut Ramos en el 2007, denominada "Propuesta de metodología para el diagnóstico de las condiciones de habitabilidad en VIS en Bogotá D.C.". La tesis realiza una valoración inicial de estudios existentes que, de acuerdo con el concepto del autor, apuntan a una baja calidad en la habitabilidad de las viviendas de interés social desde un enfoque técnico, y por consiguiente tienen consecuencias en el confort de las personas. Por esta razón propone realizar "Un exhaustivo trabajo que dé muestras de la importancia que tienen estos aspectos técnicos para lograr vivienda con calidad y generar así factores óptimos de habitabilidad para sus ocupantes" (Ramos Calonge, 2007). En el año 2011 el arquitecto Helmut Ramos publicó otro artículo en el cual, con base en un estudio de campo, examinó las condiciones higrotérmicas, acústicas y de iluminación de este tipo de viviendas, determinando su habitabilidad. La conclusión del artículo hace énfasis en la necesidad de tener en cuenta la conductividad térmica de los materiales para garantizar el confort (Ramos Calonge, 2011). Igualmente, encontró que las viviendas de clasificación VIS presentan:

- Altas temperaturas
- Alta humedad relativa
- Baja velocidad del viento
- Incumplimiento de las normas RETIE (Reglamento técnico de instalaciones eléctricas)

1.3.1.3. Estado del arte sobre fachadas verdes

Según el ecólogo Mateo de Rhodes Valbuena (2012), actualmente existe una gran cantidad de bibliografía sobre investigaciones de fachadas verdes alrededor del mundo, la cual da evidencia del interés que estas están generando. En Canadá, por

ejemplo, se realizó una investigación donde se evaluaron diferentes variables como la durabilidad de estas superficies y la protección que le brindan a la fachada, su retención de agua lluvia, su aporte a la calidad del aire y la que más se relaciona con este trabajo, su disminución de la temperatura al interior de la edificación y la reducción del efecto de isla de calor (de Rhodes Valbuena, 2012).

En Taiwán se hizo un estudio con más de treinta diferentes especies de plantas y, por medio de modelaciones energéticas y de temperatura, concluyeron que éstas efectivamente ayudan a regular la temperatura y radiación solar en los hogares. Además, se clasificaron las especies que eran más adecuadas para implementarse en las fachadas y techos verdes según su morfología, color, tamaño e índice de área foliar (Liu, et al., 2012).

En el 2004 en una investigación de la Universidad de Tren, se encontró que las superficies verdes podían influir en la regulación de la temperatura en climas templados hasta en 4,7 °C. Dicho efecto se explica por el papel de barrera aislante entre el interior y el exterior que tienen las plantas (de Rhodes Valbuena, 2012)

Muchos otros autores han evidenciado los beneficios de las fachadas verdes en la regulación de la temperatura. El nivel en el que éstas influyen en la sensación térmica depende de las características del lugar concreto donde se vayan a implementar y su orientación respecto a la salida y puesta del sol (Muñoz & Torres, 2013). En climas con temperaturas bajas el uso de superficies verdes hace que se almacene calor al interior de la vivienda y genera un aumento en la temperatura. Por el contrario, en climas cálidos reduce la sensación térmica al actuar como aislante (W. Peck & Callagham, 2001). Diferentes estudios han demostrado que puede llegar a reducirse el flujo de calor en 40% utilizando superficies verdes (Muñoz & Torres, 2013). Todos estos efectos se han atribuido a procesos fisiológicos de las plantas, por medio de los cuales absorben calor del ambiente, como la evapotranspiración y fotosíntesis

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

En noviembre del 2015 se realizó la vigésima primera sesión de la conferencia de las partes de la convención de Naciones Unidas sobre el cambio climático, más conocido como el COP21. Ésta tuvo como objetivo elaborar el Acuerdo de París en donde se definió como objetivo principal evitar que la temperatura media global incremente en 2°C con respecto a los niveles preindustriales. Igualmente, se definió que debe haber un balance entre la producción de gases efecto invernadero y su absorción. El acuerdo compromete a los países participantes a generar políticas para incentivar la reducción en la producción de emisiones de gases de efecto invernadero (Miteco, 2015). Por lo tanto, en la actualidad los países deberían optar por políticas con proyección a la protección del medio ambiente. En países como Argentina se implementó el uso de terrazas verdes como solución para la falta de espacios verdes. Igualmente, países como Alemania, Estados Unidos, el Reino Unido y Japón han implementado políticas para el uso de estos métodos constructivos y en la actualidad cuentan con grandes áreas verdes compuestas por lo que se conoce como terrazas verdes (Hoyos Giraldo, 2014).

Se han realizado diversas investigaciones en el país sobre este método constructivo, cada una con enfoques diferentes. La Universidad Pontificia Bolivariana en Montería usó las fachadas verdes como herramienta para el ahorro de energía. La humedad relativa, la temperatura y la velocidad del viento fueron los principales factores estudiados. Este estudio se realizó para las dos fachadas del edificio de administración de la universidad (Sur y Oeste). Los resultados mostraron que todos los factores disminuyeron sus valores y hubo una reducción máxima de 3°C en la temperatura (Muñoz & Torres, 2013).

De igual manera, Carolina Forero, estudiante de Ecología de la Pontificia Universidad Javeriana, realizó un estudio en varios edificios de Bogotá y sus techos verdes, enfocándose en la disminución de la temperatura en viviendas. Esta investigación arrojó que se presentaba una reducción en la temperatura de

aproximadamente 4°C en el techo. Este estudio se realizó para tres edificios con diferentes características (Forero, 2012).

A pesar de estos esfuerzos, la información sobre cambios en la temperatura de las edificaciones con estos métodos constructivos es aún escasa en Colombia, ya que los estudios realizados no concluyen de manera concreta sus verdaderos efectos para de esta manera ser implementados en diferentes clases de viviendas.

En la actualidad, Colombia hace parte de la Red Mundial de Infraestructura Vegetalizada, también cuenta con numerosas empresas de construcción sostenible capaces de desarrollar proyecto con certificación LEED. A nivel nacional se ha tratado de estimular la aplicación de estos sistemas mediante la disminución de impuestos, sin embargo, las entidades privadas no invierten mucho esfuerzo en la aplicación de estos métodos constructivos a causa de su desconocimiento sobre los innumerables beneficios que pueden traer y el aumento que generan en los costos constructivos (León & Nariño, 2011).

1.3.1.4 Tipos de fachadas verdes

Las fachadas verdes son básicamente un sistema de revestimiento de la fachada de una edificación. Éstas ayudan a moderar la ganancia o pérdida de calor y humedad generando un aumento en la resistencia térmica de la fachada (W. Peck & Callaghan, 2001).

Las fachadas verdes están formadas generalmente por varios tipos de plantas trepadoras, sembradas en masetas ubicadas en las ventanas o en la parte inferior de la edificación, para que de esta manera crezcan entre las irregularidades de la fachada. En caso de que la fachada no sea apropiada para su crecimiento, se ha de usar otros métodos constructivos modulares, los cuales permiten a la vegetación colonizar sin hacer contacto con la fachada (Köhler, 2008).

Las fachadas verdes pueden construirse de diferentes formas y el método constructivo varía según factores como: presupuesto, material de la fachada y altura de edificación. En la Tabla 1 se describen los dos métodos constructivos principales para este tipo de fachada, cada uno con sus ventajas y desventajas más sobresalientes. En la Ilustración 1 y la Ilustración 2 es posible observar la forma en que las plantas se instalan en la fachada con cada uno de los métodos. Estos corresponden a:

- **Vegetación directa:** En este tipo de solución la vegetación se encuentra en contacto directo con la fachada. La fachada debe ser preferiblemente rugosa, similar a un ambiente natural para que las raíces puedan adherirse a la superficie. El tipo de vegetación generalmente usada crece con facilidad contra el concreto o la mampostería, sin embargo, materiales como el metal o el plástico no son viables (Ottelé & Perini, 2017).
Este tipo de fachada puede generar humedades y en caso de tener grietas en la superficie se puede filtrar por allí la vegetación generando daños a la estructura.
- **Vegetación indirecta:** Cuenta con un sistema de apoyo auxiliar que separa la fachada de la vegetación y le permite trepar a las plantas. El sistema de apoyo generalmente se ubica con una separación de 10 a 15 cm de la fachada, la separación se basa en el tipo de vegetación que se desee usar (Ottelé & Perini, 2017).

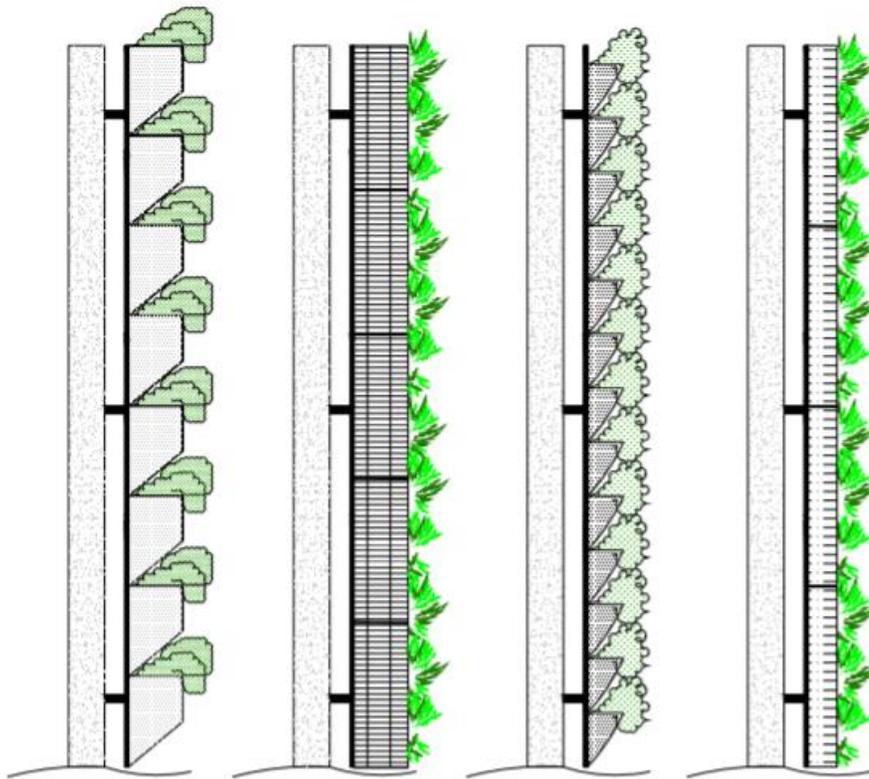


Ilustración 1 Vegetación indirecta (Ottelé, 2011)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

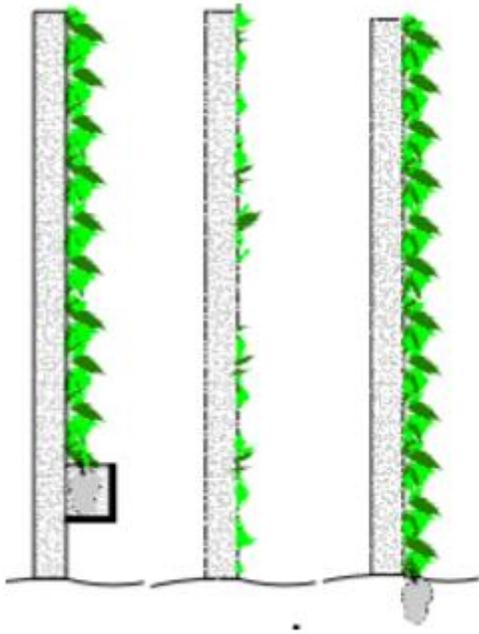


Ilustración 2 Vegetación directa (Ottelé, 2011)

Tabla 1 Tipos de fachadas, ventajas y desventajas (Ottelé, 2011)

Tipo de fachada	Ventajas	Desventajas
Vegetación directa	<ul style="list-style-type: none"> - Bajos costos de instalación. - Poca experiencia técnica necesaria. - No necesita sistema de riego 	<ul style="list-style-type: none"> - Posibilidad de humedad, en construcciones sin espaciamiento interno. - Costos elevados de mantenimiento de la fachada a largo plazo. - Largos periodos para crecimiento de la vegetación

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

		- Máxima altura de 25 metros
Vegetación indirecta	<ul style="list-style-type: none"> - No hay contacto directo entre vegetación y fachada - No genera problemas de humedad. - No necesita sistema de riego - Bajo costo de mantenimiento a largo plazo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Costo de instalación alto. - Necesita alta experiencia técnica para su instalación - Máxima altura de 25 metros

1.3.2. Marco metodológico

La eficiencia térmica de una edificación se basa en el nivel de confort térmico que esta brinda a sus habitantes según las condiciones climáticas presentes en la ciudad. Para evaluar el confort térmico existen diferentes normativas nacionales e internacionales como la NTC 5316, el estándar 55 de la ASHRAE y la norma ISO7730.

Además, normas técnicas como la Serie de Guías de Asistencia Técnica para Vivienda de Interés Social, brindan información sobre los parámetros a tener en cuenta al diseñar una vivienda VIS.

1.3.2.1. Normativa nacional sobre vivienda y confort

En Colombia existen dos tipos de normativas técnicas:

- Reglamentos técnicos → Carácter obligatorio
- Normas técnicas → Carácter voluntario

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Dentro de dichas normas técnicas, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible incluyó 4 guías para proporcionar información sobre la construcción de viviendas de interés social:

- Guía 1. Calidad en la vivienda de interés social.
- Guía 2. Los materiales en la construcción de la vivienda de interés social
- Guía 3. Las normas aplicables en el desarrollo de la vivienda de interés social.
- Guía 4. Procedimientos en vivienda de interés social.

De las anteriores cabe resaltar la segunda guía dónde se exponen criterios climáticos y arquitectónicos a utilizar y se hacen recomendaciones a cerca de los materiales según su comportamiento térmico y las variables ambientales.

1.3.2.1.1. NTC 5316 - Condiciones ambientales térmicas de inmuebles para personas

Esta norma es una traducción del estándar americano ASHRAE 55, publicado en el 2004. En ella se muestran los factores ambientales y personales que influyen e en el confort térmico y se establecen límites para garantizar el confort como mínimo del 80% de los habitantes de una edificación (NTC 5316). Entre algunos de los factores que se evalúan en la norma se encuentran:

- **Vestimenta:** Genera aislamiento.
- **Temperatura operativa:** Define la temperatura de 23°C y 24°C para generar confort en verano e invierno respectivamente.
- **Humedad:** Esta debe estar entre el 30% y el 60%.
- **Velocidad del aire:** en este caso se puede usar para elevar la temperatura de confort, mas no debe generar corrientes directas.
- **Estado no estacionario:** Los cambios de temperatura no deben ser bruscos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- **No uniformidad:** Indica que la temperatura en la parte más alta de la vivienda es diferente a medida que se disminuye la altura y las diferencia no deben ser bruscas.

1.3.2.2. Normativa Internacional para la estimación del confort térmico

Es un hecho que la temperatura de confort es un concepto subjetivo que varía de persona a persona, sin embargo, este se ha intentado objetivar mediante diferentes métodos.

1.3.2.2.1. ESTANDAR 55 DE LA ASHRAE

Actualmente, en Estados Unidos el estándar 55 de la ASHRAE (American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers) es la norma utilizada para establecer los rangos ambientales en interiores que deben satisfacerse para alcanzar un confort térmico aceptable para los ocupantes de un edificio. Su propósito consiste en especificar las combinaciones de factores personales y factores ambientales que producen condiciones térmicas aceptables para la mayoría de los ocupantes. Es aplicable para adultos saludables a presiones atmosféricas de hasta 3.000 msnm y para interiores diseñados para tiempos de ocupación de al menos 15 minutos (ASHRAE, 2004). Este estándar existe desde 1966, es renovado periódicamente por los expertos de la industria de la ASHRAE y ha servido durante años como guía para el diseño de climatización. El estándar hace alusión a cuatro factores ambientales primarios: temperatura, radiación, humedad y velocidad del aire, y a dos factores personales: tasa metabólica y aislamiento de la vestimenta.

El estándar se basa en el modelo adaptativo, el cuál relaciona temperaturas de diseño interiores o rangos aceptables de temperatura interior con parámetros climatológicos exteriores. El modelo adaptativo se basa en el supuesto de que el clima exterior influencia el confort al interior de la edificación y en que las personas pueden adaptarse a diferentes temperaturas durante diferentes períodos del año. El

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

modelo adaptativo predice qué factores contextuales, como tener acceso a controles ambientales o la historia térmica de un individuo, pueden influenciar sus preferencias térmicas (Gutiérrez, 2018). El estándar 55 de la ASHRAE afirma que diferencias en las experiencias térmicas recientes de los individuos y cambios en la vestimenta causan que el punto de confort no sea el mismo para todos los ocupantes de una vivienda por lo que define zonas entre el 80% y 90% de satisfacción.

El modelo adaptativo es aplicable en edificaciones sin central de calefacción, ventilación y aire acondicionado (el cuál es el caso de las viviendas VIS), dónde las tasas metabólicas de los ocupantes corresponden a actividades principalmente sedentarias entre 1.0 y 1.3 met (1 met = 58 W/m²), el aislamiento de la vestimenta se encuentra entre 0.5 y 1.0 clo (1 clo = 0,155 m²×K/W) y la velocidad del aire entre 0.3 y 1.2 m/s. Para este modelo, el estándar 55 de la ASHRAE proporciona una gráfica de límites aceptables de temperatura al interior de una edificación para diferentes valores medios de temperatura exterior. La gráfica es válida para temperaturas medias entre 10 y 33.5 °C. Dicha gráfica se observa en la ilustración 3 a continuación (ASHRAE, 2017).

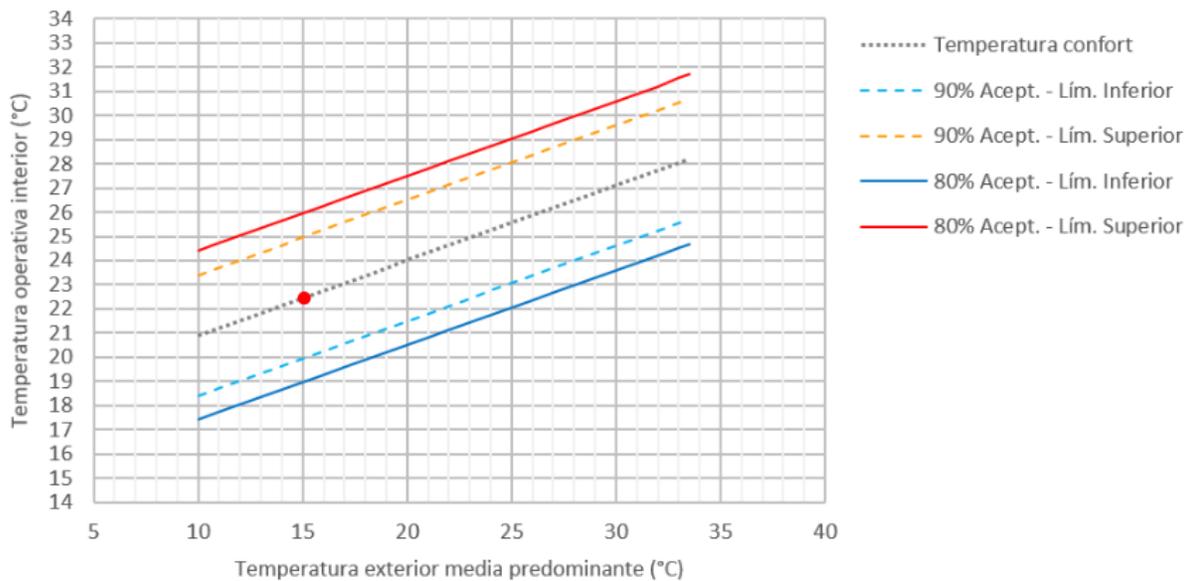


Ilustración 3 Límites aceptables de temperatura al interior de una vivienda (ASHRAE, 2017)

En el eje horizontal de la gráfica se encuentra la temperatura exterior media predominante y en el eje vertical se encuentra la temperatura operativa de la vivienda. La temperatura operativa es una media ponderada de la temperatura radiante media y la temperatura seca del aire, teniendo en cuenta que las dos aportan a la temperatura ambiental con sus coeficientes de transferencia de energía por radiación y convección respectivamente. Más adelante en las ecuaciones 1 y 2, puede observarse el procedimiento para su cálculo.

La gráfica relaciona ambas temperaturas proporcionando unos límites de temperatura operativa de la vivienda para un valor específico de temperatura media exterior predominante. Las líneas punteadas de color amarillo y azul representan los límites dentro de los que el 90% de los individuos se encuentra satisfechos. Las líneas llenas, roja y azul representan los límites para un 80% de satisfacción. Finalmente, la línea punteada de color negro representa el promedio entre el límite superior e inferior, es decir, la temperatura de confort. Según lo anterior, el punto rojo en la gráfica se encuentra dentro de la zona de 90% de satisfacción para una

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

temperatura media exterior de 15° C. La temperatura operativa correspondiente al punto señalado sería de 22,5° C, sin embargo, ésta podría variar entre 20° C y 25° C y aún se consideraría que el 90% de los individuos está satisfecho.

Como el propósito de dicho estándar es asegurar que las condiciones térmicas en una edificación sean aceptables para la mayoría de sus ocupantes, se afirma que demostrar la conformidad de los ocupantes con el diseño es necesario. Para validar el ambiente térmico como aceptable en una edificación existente, se propone determinar estadísticamente la satisfacción de sus ocupantes a través de una encuesta. Para clasificar la sensación térmica se proporciona la Tabla 2, a continuación, donde la sensación del individuo se clasifica dentro de 7 categorías y estas se relacionan con un valor numérico.

Tabla 2 Clasificación de sensación térmica

Puntuación	Sensación térmica
+3	Mucho calor
+2	Bastante calor
+1	Algo de calor
0	Neutra
-1	Algo de frío
-2	Bastante frío
-3	Mucho frío

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

1.3.2.2.2. NORMA ISO 7730

Una de las normas que se encuentra estrechamente relacionada con el estándar 55 de la ASHRAE, es la norma ISO 7730 establecida por la Organización Internacional de Normalización (ISO). Este estándar expone el método para la determinación e interpretación analítica del confort térmico por medio del cálculo de los índices PMV (Voto Medio Estimado), PPD (Porcentaje Estimado de Insatisfechos) y criterios del confort térmico local. El índice PMV corresponde al promedio de los valores de la Tabla 2 (tomada del estándar 55 de la ASHRAE), encontrado por medio de los votos de un gran grupo de individuos que se encuentran expuestos a las mismas condiciones ambientales, llevan una vestimenta similar y están realizando la misma actividad física. El índice PPD se relaciona con el PMV y expresa el porcentaje teórico de individuos insatisfechos térmicamente, es decir, que experimentan incomodidad para un valor concreto de PMV (ISO, 2009).

Por medio de la ISO 7730 se puede establecer entonces cuál es el beneficio de utilizar escudos verdes en los casos de estudio en términos del confort térmico percibido por los habitantes. El cálculo de estos índices se realiza por medio del método de Fanger y los factores ambientales y personales ya mencionados. Povl Ole Fanger fue un experto en el campo del confort térmico y desarrolló este método por medio de la experimentación con un grupo de un poco más de 1300 individuos, donde halló una correlación matemática entre los valores promedio o esperados de los cuatro factores ambientales y los dos personales con la sensación térmica general de las personas (Armend, Nacional, & Technology, 2010). Dicha sensación térmica la expresó por medio de la escala numérica del estándar 55 de la ASHRAE, expuesta anteriormente en la Tabla 2.

Los límites del índice PMV son +3 y -3, valores que explicarían una sensación térmica de diferente intensidad de frío o calor. Para cada una de estas intensidades

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

el PPD estimaría entonces el porcentaje de individuos que experimentan incomodidad térmica dentro de un grupo de muchas personas. Fanger estableció la relación entre ambos índices en la ilustración 2 que se observa a continuación.

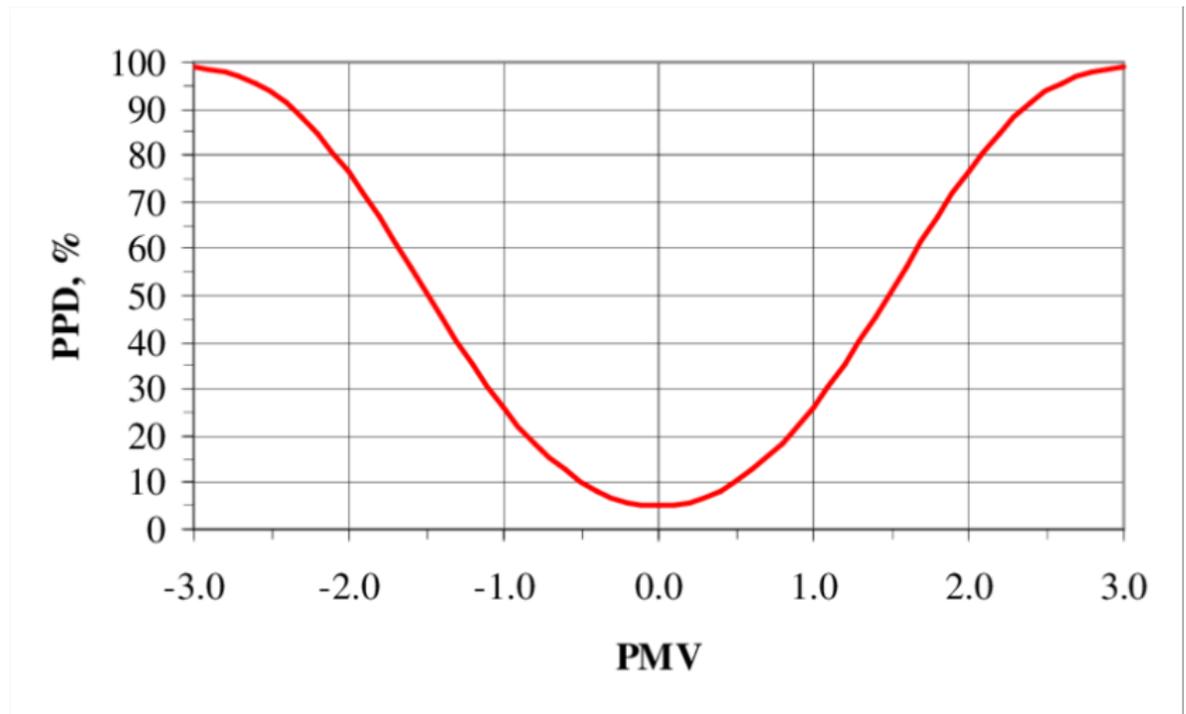


Ilustración 4 Porcentaje Previsto de Insatisfechos (PPD) en relación con el Voto Medio Previsto (PMV). (Fanger, 1982)

Como se observa en la ilustración 2, aunque el PMV tome un valor de cero, correspondiente a una sensación térmica neutra, el índice PPD toma un valor igual al 5%. Esto significa que el 5% de los individuos estarán insatisfechos en un ambiente donde la mayoría reporta una sensación neutra. Por esto se puede concluir que es imposible establecer unas condiciones que satisfagan a todas las personas, pero si es posible establecer unas condiciones que satisfagan a la mayoría (ISO, 2009) (Armend, Nacional, & Tecnolog, 2010).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Las ecuaciones encontradas por Fanger que permiten relacionar los factores ambientales y personales con el confort, y calcular el PMV son complicadas de aplicar, por lo que la norma ISO 7730 propone:

- Utilizar un programa informático para resolverlas (en la norma se incluye una rutina de cálculo).
- Calcular el PMV directamente mediante un equipo con un sensor que integra el valor de las variables ambientales y personales.
- Usar tablas de valores con los índices PMV realizadas por medio de distintas combinaciones de las variables personales, la velocidad relativa del aire y la temperatura operativa.

Los parámetros que actualmente se utilizan en varias normas reglamentarias de edificación y diseño y en normas técnicas estandarizadas sobre confort térmico son los que relacionan el índice PPD con la temperatura operativa (último método mencionado propuesto por la norma ISO 7730). Por lo que para estimar el bienestar térmico en una edificación se deberá:

1. Calcular la temperatura operativa (t_o) y estimar la tasa metabólica (M), el índice de aislamiento de la vestimenta (I_{cl}) y la velocidad relativa del aire (V_{ar})
2. Determinar el índice PPD de acuerdo con la norma (Con la gráfica PPD vs PMV).
3. Comparar los valores de PPD y t_o obtenidos con los rangos establecidos en la norma.

Según la norma ISO 7726: Ergonomía en ambientes térmicos, la t_o está dada por la siguiente expresión:

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Ecuación 1 Temperatura operativa

$$t_0 = \frac{h_c * t_a + h_r * \bar{t}_r}{h_c + h_r}$$

Donde,

- h_c es el coeficiente de intercambio de calor por convección.
- h_r es el coeficiente de intercambio de calor por radiación.
- \bar{t}_r es la temperatura radiante media.
- t_a es la temperatura del aire.

Para mayor precisión la temperatura operativa también puede calcularse como:

Ecuación 2 Temperatura operativa II

$$t_0 = A * t_a + (1 - A) * \bar{t}_r$$

El valor de A puede obtenerse mediante los valores establecidos en la norma ISO 7730 dependiendo la velocidad relativa del aire. Esta última está definida como la velocidad del aire respecto a un cuerpo quieto más la velocidad de movimiento del cuerpo respecto al aire quieto y está dada por las siguientes ecuaciones (ISO, 2009):

- Para una tasa metabólica (M) mayor a 1 met (58,16 W/m²):

Ecuación 3 Velocidad relativa del aire (M>1)

$$V_{ar} = v_a + 0.3 * (M - 1)$$

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Para M menor a 1 met la velocidad relativa causada por el movimiento del cuerpo es 0 por lo que:

Ecuación 4 Velocidad relativa (M<1)

$$V_{ar} = v_a + 0$$

Donde,

- V_{ar} es la velocidad relativa del aire
- v_a es la velocidad del aire
- M es la tasa metabólica

A partir de esta velocidad se puede calcular A con la tabla 3 para luego calcular t_o .

Tabla 3 Valores de A según Var (ISO 7730)

Var	< 0,2	0,2 a 0,6	0,6 a 10
A	0,5	0,6	0,7

La temperatura radiante media de un recinto está definida como una la temperatura uniforme estimada para los cerramientos del recinto (techos, paredes, suelos etc.) y que influye en la pérdida o ganancia de calor por radiación de una persona dentro de éste. Ésta puede medirse utilizando radiómetros, pero estos son equipos sofisticados con un costo elevado, por lo que por lo general se utilizan termómetros de globo estandarizados. Estos son sensores colocados dentro de una esfera de 150 mm de diámetro y con coeficiente de emisión medio (Gutiérrez, 2014). La norma ISO 7726 expone 2 fórmulas para calcular la temperatura radiante media utilizando un termómetro de globo estandarizado, dependiendo si la persona está

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

expuesta a convección natural (no es generada por una fuente externa como un ventilador, calefacción etc.) o forzada (generada por una fuente externa).

- Para convección natural propone:

Ecuación 5 Temperatura radiante (convección natural)

$$\bar{t}_r = \left[(t_g + 273)^4 + 0.4 * 10^8 * |t_g - t_a|^{\frac{1}{4}} * (t_g - t_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273$$

- Para convección forzada propone:

Ecuación 6 Temperatura radiante (convección forzada)

$$\bar{t}_r = \left[(t_g + 273)^4 + 2.5 * 10^8 * v_a^{0.6} * (t_g - t_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273$$

Donde,

- \bar{t}_r es la temperatura radiante media
- t_g es la temperatura de globo medida por el sensor
- t_a es la temperatura del aire
- v_a es la velocidad del aire

Una vez calculadas todas las variables expuestas anteriormente, puede calcularse el índice PMV por medio de las tablas propuestas por la norma ISO 7730 como la que se muestra en la tabla 4. Esta es propuesta para un nivel de actividad de 1,2 met (69,6 W/m²) correspondiente a una actividad sedentaria.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 4 Cálculo de PMV (ISO, 2009)

Vestiment a Clo	Temperatur a operativa °C	Velocidad relativa del aire m/s							
		<0.10	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	1
0.5	18	-2.01	-2.01	-2.17	-2.38	-2.7			
	20	-1.41	-1.41	-1.58	-1.76	-2.04	-2.25	-2.42	
	22	-0.79	-0.79	-0.97	-1.13	-1.36	-1.54	-1.69	-2.17
	14	-0.17	-0.2	-0.36	-0.48	-0.68	-0.83	-0.95	-1.35
	16	0.44	0.39	0.26	0.16	-0.01	-0.11	-0.21	-0.52
	18	1.05	0.98	0.88	0.81	0.7	0.61	0.54	-0.31
	30	1.64	1.57	1.51	1.46	1.39	1.33	1.29	1.14
	32	2.25	2.2	2.17	2.15	2.11	2.09	2.07	1.99
1	16	-1.18	-1.18	-1.31	-1.43	-1.59	-1.72	-1.82	-2.12
	18	-0.75	-0.75	-0.88	-0.98	-1.13	-1.24	-1.33	-1.59
	20	-0.32	-0.33	-0.45	-0.54	-0.67	-0.76	-0.83	-1.07
	22	0.13	0.1	0	-0.07	-0.18	-0.26	-0.32	-0.52
	24	0.58	0.54	0.46	0.4	0.31	0.24	0.19	0.02
	26	1.03	0.98	0.91	0.86	0.79	0.74	0.7	0.58
	28	1.47	1.42	1.37	1.34	1.28	1.24	1.21	1.12
	30	1.91	1.86	1.83	1.81	1.78	1.75	1.73	1.67

Como se observa, los valores de PMV varían según la vestimenta, la temperatura operativa y la velocidad del aire. La vestimenta está dada en clo que se define como el aislamiento térmico que se necesita para mantener la piel a una temperatura confortable y estable durante 8 horas, cuando la persona se encuentra en reposo a una temperatura de 20 °C, sin la presencia de la radiación solar y con una humedad relativa del 50%. Un clo equivale a $0,155 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$ y el aislamiento térmico del vestido en verano está establecido como 0,5 clo y en invierno como 1 clo.

Una vez hallado el PMV puede calcularse el PPD y es posible clasificar la edificación dentro de una de las 3 categorías propuestas por la norma ISO 7730 que se muestran en la tabla 5 a continuación.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 5 Categoría de ambiente térmico. (ISO, 2009)

CATEGORIA	ESTADO TERMICO DEL CUERPO EN SU CONJUNTO	
	PMV	PPD (%)
A	$-0.2 < PMV < 0.2$	< 6
B	$-0.5 < PMV < 0.5$	< 10
C	$-0.7 < PMV < 0.7$	< 15

Según la norma ISO 7730 no es recomendable superar los valores de la categoría B. Esta afirma que para proporcionar un confort térmico global son necesarias unas condiciones que den lugar como mínimo a una categoría B o en lo posible a una categoría A.

1.3.2.3 Indicadores para analizar el buen funcionamiento de una vivienda

Además del modelo adaptativo del estándar 55 de la ASHRAE y la determinación e interpretación analítica del confort propuesta por la ISO 7730. Existen otros indicadores para analizar el buen funcionamiento de una vivienda y garantizar el confort térmico.

Estos indicadores son mencionados en diferentes investigaciones y se utilizan para evaluar la eficiencia térmica de una vivienda. Los doctores Rubén Salvador Roux Gutiérrez y Víctor Manuel García Izaguirre los mencionan en su investigación “Confort térmico versus consumo energético en viviendas de interés social en clima cálido húmedo” (Gutiérrez et. al., 2014). De igual manera, la doctora Silvia Soutullo del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas de Madrid, los menciona en su artículo “Sobre inercia térmica y aislamiento de viviendas en clima cálido-húmedo” (Soutullo, 2018). Estos indicadores corresponden a:

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- **Variaciones de la temperatura en el tiempo:** Este criterio se menciona también en el estándar 55 de la ASHRAE. Cuando los ocupantes no tienen control sobre las variaciones cíclicas de las condiciones ambientales interiores se debe garantizar que la temperatura operativa no varíe más de 1.1°C en el transcurso de 15 minutos o más de 2.2 °C en el transcurso de 1 hora.
- **Horas de excedencia:** Se refiere al número de horas dentro de un período definido de tiempo en las cuales las condiciones ambientales de una vivienda ocupada se encuentran por fuera de la zona de confort. En un caso ideal este valor debería ser cero.
- **Amortiguación de la temperatura:** Es la capacidad de la envolvente para disipar la energía térmica exterior reduciendo así las variaciones de la temperatura operativa al interior de la vivienda. Dicho amortiguamiento depende exclusivamente de las características de la envolvente y se expresa como una reducción en la amplitud (temperatura máxima o mínima) de la gráfica de temperatura vs hora del día. Esta reducción de amplitud favorece el confort, ya que durante días cálidos mantiene a la vivienda a una temperatura más baja que la exterior y durante noches frías la temperatura interior será más alta que la exterior. El amortiguamiento puede expresarse de la siguiente manera:

Ecuación 7 Estimación del amortiguamiento térmico

$$\mu = \frac{Ae - Ai}{Ae}$$

Dónde,

- μ = Amortiguamiento

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- A_e = Amplitud exterior
- A_i = Amplitud interior

- **Desfase térmico:** El desfase térmico se refiere a la diferencia temporal que existe entre la máxima temperatura externa y la máxima temperatura interna en un día, o en su defecto, entre la mínima temperatura externa y la mínima temperatura interna. Esto puede traducirse como la cantidad de horas que tarda la vivienda en enfriarse o calentarse en respuesta a los factores ambientales externos. Cuanto mayor sea el desfase térmico mejor será el confort, ya que el momento de aumento de la temperatura operativa puede coincidir con el descenso de la temperatura exterior y viceversa. Esto garantiza que cuando caiga la temperatura exterior en la noche, la vivienda apenas estará comenzando a calentarse por el efecto de la temperatura exterior en el día y mantendrá dicha temperatura a lo largo de la noche. Por el contrario, en el día, cuando la temperatura exterior comience a aumentar y alcance su valor máximo, la vivienda apenas estará enfriándose por las bajas temperaturas de la noche. Según la doctora Silvia Soutullo un alto desfase térmico se encuentra entre 8 a 12 horas y es una excelente cualidad en la envolvente de una edificación (Soutullo, 2018).

La amortiguación de la temperatura y el desfase térmico pueden observarse de forma más clara en la Ilustración 5 Ejemplificación del desfase y amortiguamiento a continuación.

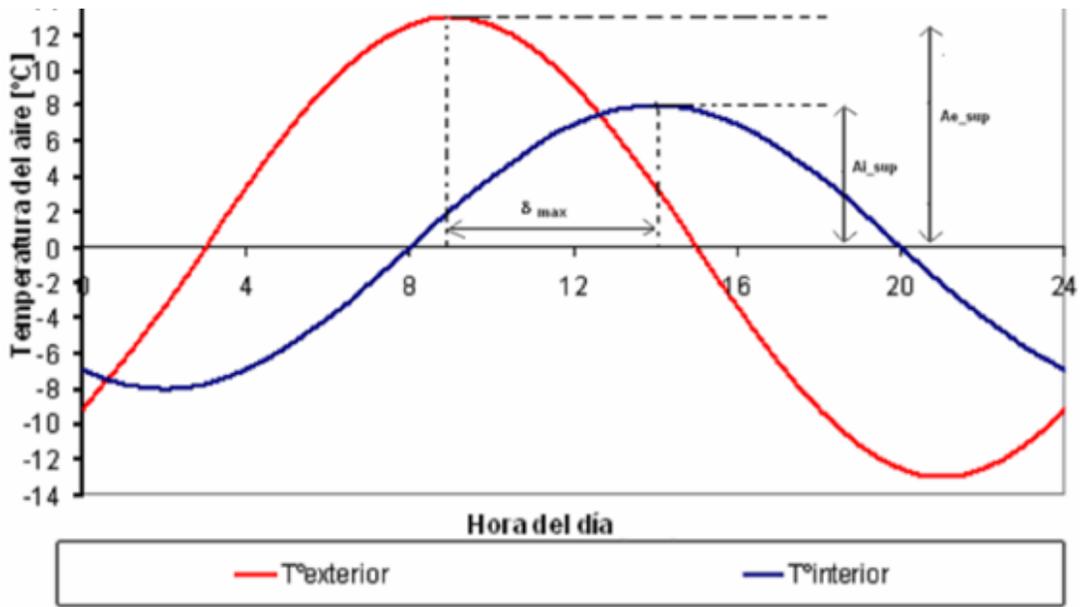


Ilustración 5 Ejemplificación del desfase y amortiguamiento térmico

En el eje horizontal se encuentra la hora del día representada en el sistema de 24 horas y en el eje vertical la temperatura en grados Celsius. La línea roja corresponde a la temperatura al exterior de la vivienda y la azul a la temperatura interior. En la gráfica, δ_{max} hace referencia al desfase térmico y como puede observarse se mide horizontalmente desde el máximo de la temperatura exterior hasta el máximo de la temperatura interior. En este caso el máximo de la temperatura exterior ocurre alrededor de las 9:00 a. m. y el máximo de la temperatura interior alrededor de las 6:30 p. m., lo que significa que en este caso se tiene un desfase de 9 horas y media aproximadamente. Ae_{sup} y Ai_{sup} corresponden a la amplitud de la temperatura exterior e interior, respectivamente. Estos valores se miden verticalmente desde el punto más alto de la gráfica hasta el eje horizontal, es decir, corresponden a los máximos de temperatura. En este caso Ae es igual a 12 °C y Ai es igual a 8 °C, lo que evidencia una reducción del 33,3% en la temperatura máxima al interior de la vivienda del ejemplo.

Estos indicadores junto con lo expuesto por el estándar 55 de la ASHRAE y la norma ISO 7730 son los que se utilizaron como base para evaluar el confort térmico y el buen funcionamiento tanto del caso de estudio como del modelo realizado.

1.3.2.4 Envoltente de la edificación y su influencia en el confort térmico

La envoltente de una edificación está formada por todos aquellos límites tanto laterales como superior e inferior, que delimitan el espacio habitable con el exterior, esta es la definición que brinda el Código Técnico de la Edificación española (CTE, 2006). La envoltente es el elemento que más ayuda a brindar un confort adecuado en la vivienda. Por esto, los métodos constructivos utilizados y el cálculo de la envoltente deben ser consecuentes con el ambiente y adecuarse a él de la mejor manera. El control de factores como los flujos térmicos, de aire y vapor son manejados por la fachada, la cual debe diseñarse como una membrana que se adapte al clima específico y tenga durabilidad, resistencia y rigidez (Pardal & Paricio, 2006).

El confort térmico en una vivienda está condicionado por los materiales con los que fue construida y sus características determinan que tanta temperatura se pierde o gana en su interior (Código Técnico de la Edificación (CTE), 2017).

1.3.2.4.1 Transferencia de calor en elementos constructivos homogéneos

La radiación, la convección o la conducción pueden generar cambios térmicos entre dos elementos. La radiación se da entre la superficie de dos cuerpos, la convección se da entre una superficie y el aire y por último la conducción se da entre dos superficies en contacto (Leandro & Trujillo, 2016).

Cada material maneja de manera independiente su pérdida de calor, por lo tanto, para el cálculo de transferencia de calor de una edificación completa es posible

analizar cada material por separado y luego calcular la resistencia total. Para hacer esto se considera que un muro o fachada está compuesto por capas de flujo de calor como se muestra en la Ilustración 6. (Díaz Regodón & Tenorio Ríos, 2005).

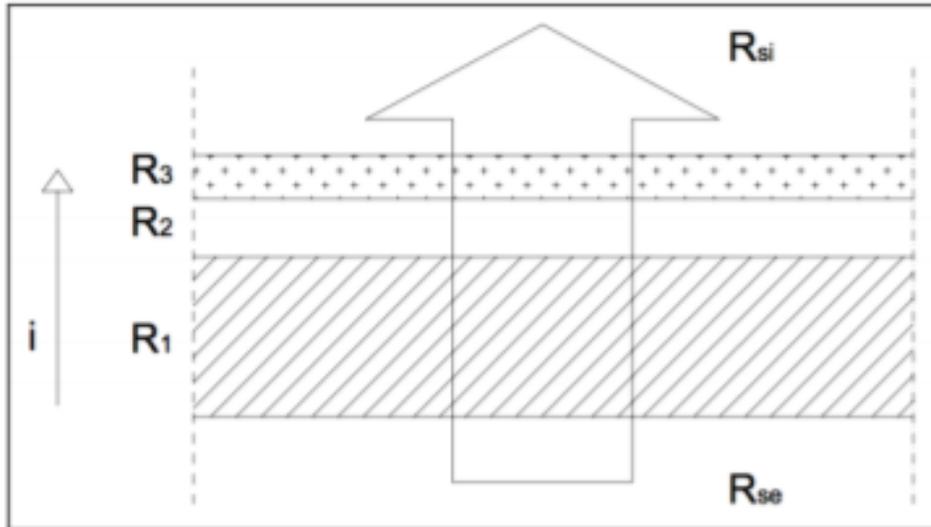


Ilustración 6 Ejemplificación de capas paralelas de flujo de calor

(Código Técnico de la Edificación (CTE), 2017)

Siendo:

- R1, R2 y R3 → Resistencia de cada capa.
- R_{si} y R_{se} → Las resistencias térmicas superficiales correspondientes al aire interior (0,13 [m² ·K/W]) y exterior (0,04 [m² ·K/W]), respectivamente.

Dichas resistencias pueden calcularse como:

Ecuación 9 Cálculo de resistencia de los materiales

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Siendo:

- e es el espesor de la capa [m].
- λ la conductividad térmica de diseño del material, [W/m K]

La transmitancia térmica (U) es la pérdida de calor por unidad de área de cada material (Código Técnico de la Edificación (CTE), 2017), este valor viene dado por la siguiente expresión:

Ecuación 10 Transmitancia

$$U = \frac{1}{R_t}$$

Siendo:

- R_t La resistencia térmica total del componente constructivo [$m^2 \cdot K/W$]

Ecuación 11 Cálculo resistencia total

$$R_t = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}$$

La cantidad de calor transmitido (ft) se calcula según la ecuación 12.

Ecuación 12 Cantidad de calor transmitido

$$ft = U \cdot A \cdot (q_i - q_e)$$

Siendo,

- U transmitancia térmica [$W/m^2 \cdot K$]
- A el área de la superficie del elemento de construcción [m^2]
- $q_i - q_e$ la diferencia de temperatura entre el interior y el ambiente exterior [K]

Mejorar la capacidad aislante de una fachada se puede lograr mediante varios métodos, entre estos es posible aumentar el espesor o el uso de materiales

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

aislantes. El aumento de grosor es un método que aumenta costos y por esto en muchas situaciones no es viable. El uso de materiales aislantes generalmente es más viable y se logra mediante el uso de lana de vidrio, espuma rígida, poliestireno expandido y otros materiales. La implementación de estos métodos puede llevar a generar mejores condiciones en la vivienda (Leandro & Trujillo, 2016).

1.3.2.5 Aspectos generales de las viviendas VIS

Los aspectos generales para la construcción de una vivienda VIS se tomaron de la Serie de Guías de Asistencia Técnica para Vivienda de Interés Social del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Todos los aspectos se exponen a continuación.

1.3.2.5.1 Aspectos generales de calidad

En toda vivienda se debe considerar:

- Área adecuada para dormir, con espacio suficiente para un mueble de almacenamiento de ropa.
- Debe tener espacio y mobiliario necesario para un aseo personal y de ropa adecuado, por lo tanto, debe contar con servicio sanitario, ducha y lavamos. La vivienda deberá tener un espacio designado para lavado y secado y de la ropa.
- Contar con espacio para alimentación en cuanto al almacenamiento, limpieza, consumo y procesamiento.
- Espacio suficiente para el ocio o actividades de trabajo y ganar ingresos.
- Deben tener disponibilidad de agua potable, energía, instalaciones sanitarias y de aseo, drenaje y sistemas de emergencia.
- Los gastos de la vivienda no deben comprometer el logro de otras necesidades básicas del hogar.

- Debe tener área adecuada, proteger del frío, calor, lluvia, viento y otros peligros como enfermedades o riesgos estructurales.
- Debe ser asequible para las personas con desventajas y dar prioridad para aquellos con incapacidades.
- El hogar debe ubicarse en una locación cercana a servicios públicos (salud, escuelas, guarderías, etc.).
- Este no debe estar ubicado a zonas de alto riesgo o contaminados que pongan en riesgo a los habitantes (Diaz Reyes & Ramirez Luna, 2011).

1.3.2.5.2 Condiciones bioclimáticas para la vivienda

En la tabla a continuación se muestran múltiples condiciones constructivas bioclimáticas con las que debería contar una vivienda, para de esta manera favorecer al confort térmico dentro de ella y brindar las mejores condiciones.

Tabla 6 Condiciones bioclimáticas para una vivienda de bajo costo (Diaz Reyes & Ramirez Luna, 2011).

Clima	Implantación de la edificación	Ventilación	Protección (Dimensiones de ventanas y su orientación)	Muros, placas y cubierta	Esquema de ventilación
Frio	De poca o ninguna distancia entre edificaciones	Reducir exposición de superficies a exteriores	Protección de ventanas en horas frías (telas aislantes doble vidrio)	Muros y placas con materiales que permitan conservar el calor	Solo ventilar para renovar el aire al interior
	Menor superficie (NORTE-SUR)	para evitar perdida de calor	Aperturas pequeñas, dimensiones pequeñas de ventanas (25%-	Construcción maciza con fuente de inercia térmica	circulación de aire NO deseada

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

			40% de la superficie)		
	Orientación con mayor captación de radiación solar	Se deben utilizar dispositivos como pantallas para proteger la vivienda del viento frío	Orientación (ESTE-OESTE)		Altura mínima 2,5m Volumen de aire por persona 10m3
Templado	Edificación pequeña evita la salida de calor, se beneficia de radiación solar	Solo se debe ventilar en horas cálidas y guardar refugio en la noche	Protección de vanos con cortinas (vanos medianos de 25%-40% de la superficie)	Materiales que permitan mantener el calor	Solo ventilar para renovar el aire al interior
	Recomienda patio interno, permite ventilación en horas cálidas		Orientación (ESTE-OESTE) permite penetración del sol	Construcción maciza con fuente de inercia térmica	circulación de aire NO deseada
	Menor superficie (NORTE-SUR)				Altura mínima 2.5m Volumen de aire por persona 10m3
Cálido - Seco	Grandes espacios entre viviendas	Los vanos deben orientarse en la dirección	Proteger vanos con vegetación o cubiertas para	Materiales inertes que retardan la	Si no se logra orientación ESTE-

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

		del viento, para permitir ventilación adecuada	disminuir calor por radiación	transmisión de calor	OESTE debe protegerse de la radiación con diseño
		Ventilas la edificación en horas más frescas para evacuar calor	vanos de 20%-35% de la superficie	Los materiales de poca inercia en cubierta como el Zinc, tejas de aluminio, fibra vegetal son recomendables	Al tener menos superficie ESTE-OESTE la vivienda capta menos energía solar
		Mantener temperatura al interior	Orientación NORTE-SUR		Altura mínima 2.7m Volumen de aire por persona 12m3
Cálido - Húmedo	Proteger de la radiación solar directa con estrategia de diseño	Viviendas poco profundas con fachadas abiertas al viento para evacuación de calor	cubierta en aleros, celosía y vegetación reducen calor y la entrada de lluvia	Materiales que retarden la transmisión de calor	Orientación simple que permita circulación constante
	Menor superficie ESTE-OESTE	Velocidad de viento baja se deberá	Vanos de 40%-80% de la superficie en	construcción ligera	Altura mínima 2.7m

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

	menor captación de energía solar, evita calentamiento	ventilar con diferentes presiones utilizando efecto chimenea	fachada NORTE-SUR permite ventilación constante		Volumen de aire por persona 12m ³
	viviendas separadas para no producir barreras para la circulación de aire				

1.3.2.5.3 Condiciones de áreas para cada espacio

En la tabla 7 es posible observar las medidas mínimas, mobiliario y uso que se le dará a cada zona correspondientes en la vivienda para brindar una buena calidad de vida y confort.

Tabla 7 Condiciones mínimas para áreas y espacios (Díaz Reyes & Ramírez Luna, 2011)

ESPACIO	Área por persona (m ²)	LADO MINIMO (m)	CONDICIONES	USO	MOBILIARIO
Dormitorio	1	2.7	Espacio mínimo privado 7.3m ² con espacio para guardar ropa	Dormitorio, descanso, entretenimiento	Cama, guarda ropa, mesa de noche
Cocina	1.16	1.5	La acomodación de cuerpo con accesorios debe tener holgura de 1.01m	Cocinar, alimentar, aseo general	Estufa, lavaplatos, mesón, nevera
Baño	0.9	1.2	Con posibilidad de dos espacios	Aseo personal, área privada	Ducha, inodoro, lavamanos,

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

					papelera, toallero, espejo
Ropas	1	0.8	área mínima integrado cocina y áreas de ropas 1.1m ²	Aseo ropas, secado ropas, aseo general	Lavadero, tendedero de ropas.
Comedor	1	2.8	área mínima para el comedor 15.6m ²	Alimentación, estudio, área social	Mesa, sillas
Salón múltiple	1	2.7	Posibilidad de subdivisión por necesidad de cuarto	Dormitorio, alimentación, estudio	Camas, mesa, sillas, muebles para guardar ropa

1.3.2.5.4 Materiales recomendados según el clima

A continuación, se presenta una lista detallada de los materiales que se pueden usar según el clima en que se ubica la vivienda.

Tabla 8 Materiales recomendados para viviendas de bajo costo

Actividades de construcción	Clima frío 12°-17.5°C		Clima templado 17.5°-24°C	
	Tradicional	Convencional	Tradicional	Convencional
MUROS	Adobe	Unidades de mampostería	Esterilla de guadua con barro	Unidades de mampostería
	Tapia pisada	Pañetes	Adobe	Pañetes
CUBIERTA	Estructura en madera	Teja de fibrocemento	Estructura de madera	Teja de fibrocemento
	Teja de barro	Teja de barro	Teja de zinc	Teja de barro
PISOS	Madera	Alfombra	Madera	Alfombra
		Madera		Madera
		Vinilo		Vinilo, pisos cerámicos

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

VENTANAS	Madera con basculantes verticales	Aluminio	Madera con basculantes verticales de mediana abertura	Aluminio
		Vidrio		Vidrio
		Angulo		Angulo
Actividades de construcción	Clima cálido seco 24<°C		Clima cálido húmedo 24<°C	
	Tradicional	Convencional	Tradicional	Convencional
MUROS	Esterilla de guadua con barro	Unidades de mampostería huecas	Muros en madera y guadua	Unidades de mampostería huecas
		Pañetes		Madera
		Adobe		Bahareque encementado
	Divisiones internas en materiales ligeros	Madera		
				Divisiones internas en materiales ligeros
CUBIERTA	Estructura en madera	Teja de barro	En fibras naturales	Teja de zinc
		Teja de fibrocemento		Teja de fibrocemento
		Teja de zinc		
PISOS	Baldosín	Vinilo	Baldosín	Baldosín de cemento
		Baldosín de cemento		
		Tableta cerámica		Tableta cerámica
VENTANAS	Madera con basculantes verticales de gran abertura	Calados	Calados	Madera
		Madera		Calados
		Lamina		Anjeo
		Anjeo		

(Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2011)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

1.3.2.6 Modelación de temperatura

A continuación, se presentan algunos programas que han sido utilizados para la modelación térmica de edificaciones. IDA ICE, INSIGHT como extensión de REVIT y AECOsim Energy Simulator.

1.3.2.6.1 IDA ICE

En el artículo investigativo “Implementación y validación del modelo simplificado de bomba de calor en el entorno de simulación de energía IDA-ICE” por (Salvalai, 2012) se hace uso de IDA y se explica que “este es confiable, pues es una aplicación de simulación multizonal detallada y dinámica para todo el año para el estudio del clima interior térmico, así como el consumo de energía de todo el edificio” además se establece que “los resultados calculados se comparan bien con los datos medidos por medio de este programa”.

IDA ICE es de los desarrolladores de EQUA, esta entidad hace que el programa IDA ICE sea accesible para cualquier instituto de aprendizaje que otorgue un título o diploma. El software IDA ICE permite trabajar en un modelo 3D y de igual manera manejar todos sus componentes en tablas medibles con características. También permite interconexión con una gran variedad de programas como Revit, AutoCAD Architecture, MagiCAD entre otros. (EQUA Simulation AB, 2018).

En la Ilustración 7 Ejemplo de diseño con IDA ICE 3D (EQUA Simulation AB, 2018). es posible observar cómo IDA ICE muestra los resultados del análisis, analizando cada zona de manera independiente.

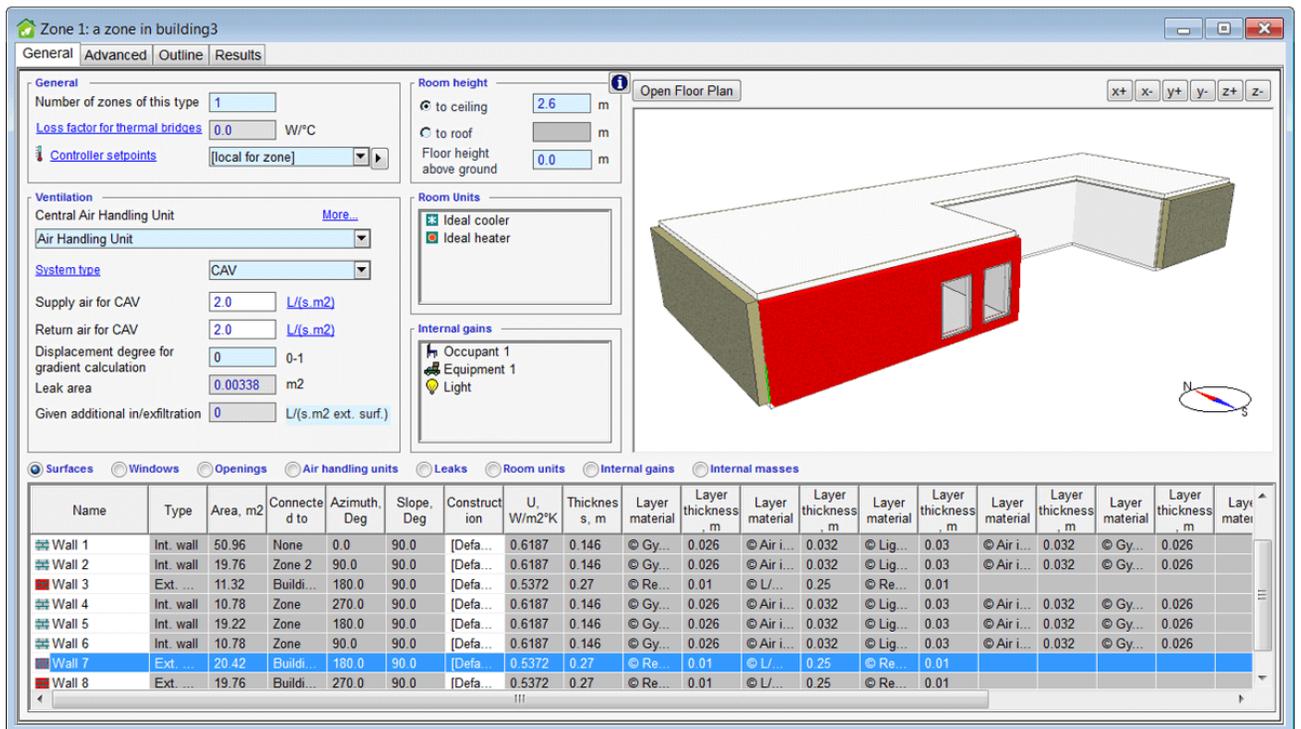


Ilustración 7 Ejemplo de diseño con IDA ICE 3D (EQUA Simulation AB, 2018).

En la Ilustración 7, se puede verificar cómo es la interfaz del software IDA, éste cuenta con 4 pestañas donde la primera es utilizada para definir los parámetros climáticos y constructivos de la edificación, también permite establecer la ubicación, orientar la vivienda de la manera que se desea y establecer medidas de infiltración, presión y más. Dentro de esta misma pestaña se genera, en la parte inferior, un resumen de las zonas creadas dentro del modelo (IDA define zonas para hacer la modelación térmica, donde cada zona es una habitación independiente, la cual se separa de otras por medio de vanos como puertas), lo que resulta muy efectivo, ya que se puede analizar el desempeño térmico de cada una de las habitaciones por separado. En la segunda pestaña se permite crear la arquitectura de la edificación ya sea en planta o en 3D, dejando para las demás la creación de los parámetros de simulación ya sea tiempo de corrido, cargas de calentamiento y enfriamiento, energía, sobre calentamiento, etc. IDA ICE trabaja con la normativa ASHRAE, lo

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

que quiere decir, que en caso de que no se conozca algún valor, ya sea de puentes térmicos, conductividades térmicas, niveles de CO2 y demás, el programa propondrá unos valores de acuerdo con la norma y con el tipo de edificación que se esté creado.

Como restricción, este programa no permite crear la edificación desde la parte estructural, como lo permite REVIT-INSIGHT del cual se discutirá más adelante, esto hace que la tarea de construcción del modelo sea más tediosa. En la página web de “Energy Models” donde se dejan reseñas de softwares, la queja más común a cerca de este programa es que “el proceso de creación de geometría compleja lleva mucho tiempo” (Energy models, 2018), pues el programa no permite creación de zonas o cuerpo de edificación que no tenga por lo menos 4 esquinas. Aunque, por otro lado, se recalca que “IDA tiene muy buena capacidad de importación de IFC. Por lo general, se pueden reutilizar aproximadamente el 70% de los modelos de Revit sin auditar y más si el modelo está bien construido.” (Energy models, 2018). IFC es un tipo de formato de datos que permite el intercambio de un modelo informativo sin la pérdida o distorsión de datos o informaciones.

1.3.2.6.2 AUTODESK Insight 360°

Insight 360° es una de las extensiones de AutoDesk por lo que también cuenta con licencias educativas y licencias gratis por cierto periodo de tiempo.

En el artículo “Diseño de vivienda social sostenible mediante simulación” publicado por (Quarroz & Argüello, 2016) se utiliza el software Insight por medio de REVIT. En él se establece que este programa brinda una guía rápida e intuitiva basada en los resultados para mejorar el rendimiento de la energía y el medio ambiente en todo el ciclo de vida del edificio. También se aclara que “el uso de REVIT para modelar edificaciones resulta muy fácil gracias a su interfaz y su facilidad de importar y exportar archivos IFC”. A pesar de esto, en este artículo se logra verificar que el

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

software está diseñado para calcular energía con acondicionamiento térmico, es decir, con equipos mecánicos, por lo que tiene cierta limitación y no puede aplicarse en el presente trabajo.

En la Ilustración 8 se muestra como AUTODESK insight muestra y simula la modelación.

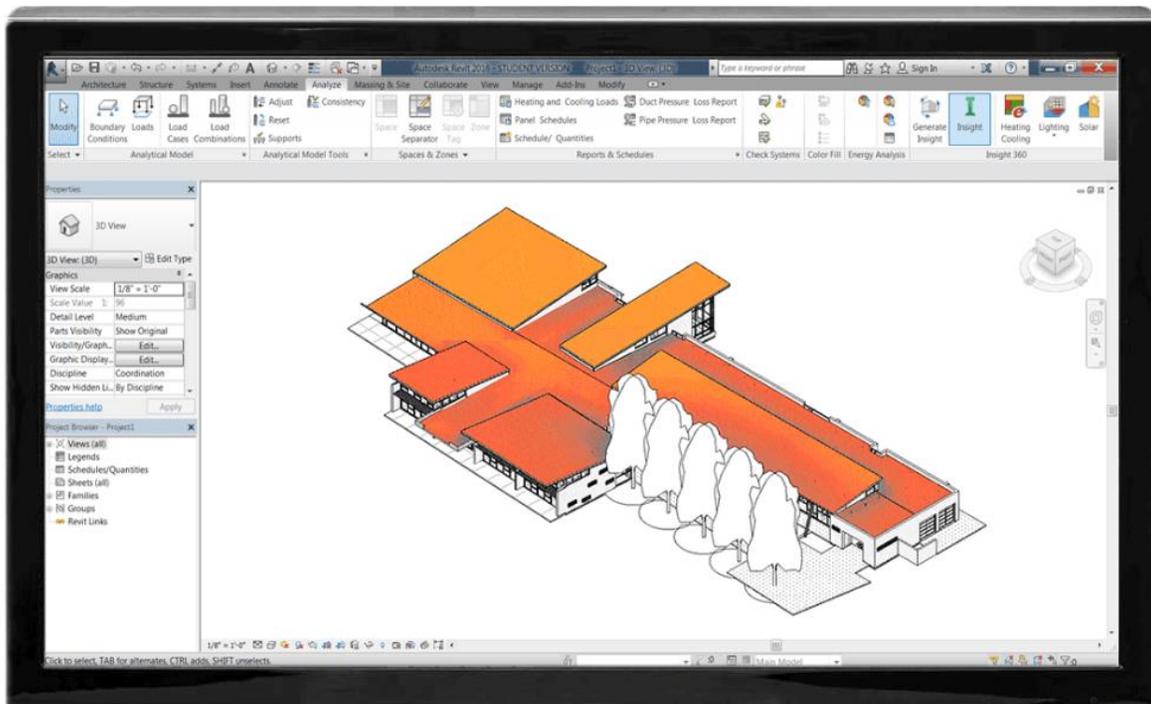


Ilustración 8 Modelación con AUTODESK Insight I (Autodesk Inc, 2018)

1.3.2.6.3 AECOSim Energy Simulator

Por último, como referencia del software AECOSim Energy Simulator está el trabajo de “Análisis de energía de diseño temprano utilizando tecnología de modelado de información de edificios” publicado por (Stumpf, Kim, & Jenicek, 2011). Los operadores afirman que este programa simula y analiza fácilmente sistemas

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

mecánicos de edificios, condiciones ambientales y rendimiento energético. Además, este software al igual que IDA ICE, trabaja con la normativa ASHRAE.

Utilize CAD and BIM data for simulations

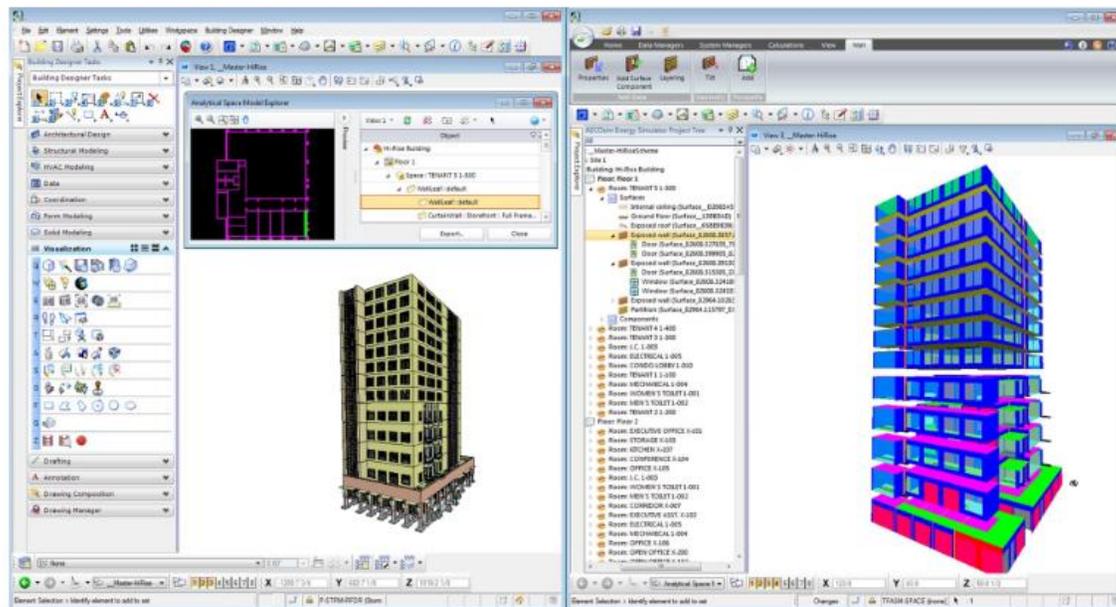


Ilustración 9 Uso de CAD y BIM en AECOsim Energy Simulator (BENTLEY SYSTEMS, 2018).

AECOsim Energy Simulator hace parte de la empresa Bentley, la cual establece que, para la utilización del software por parte de los estudiantes, solo basta con solicitar un código de escuela al profesor o asesor académico y con este acceder a STUDENTserver de Bentley y descargar el software. Según (Yuste, 2017), “AECOsim Energy Simulator HVAC Manager permite al usuario crear sistemas personalizados. Los usuarios pueden comenzar con plantillas que se pueden cambiar y personalizar con todas las opciones de EnergyPlus, además, el

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

administrador de HVAC permite la creación de sistemas híbridos como CHP (calor y energía combinados)”.

Sin embargo, se nota cierta limitación de construcción desde la parte estructural y la importación de archivos IFC es difícil (Cocchi, 2016).

1.3.2.7 Validación del modelo

El software escogido para la simulación fue IDA ICE. Es necesario realizar una validación del modelo antes de analizar la simulación de la vivienda VIS, esto con el objetivo de verificar que los datos que arroja el programa sean coherentes y que el modelo represente adecuadamente la alternativa planteada.

Según Cesar de Prada, profesor de la Universidad de Valladolid y PhD en ingeniería de sistemas y automatización y control de procesos, la validación permite confirmar que el modelo se implementó correctamente con respecto a una hipótesis planteada o un caso de estudio real y que las especificaciones y los supuestos considerados son aceptables para el propósito de la aplicación. Durante la validación el modelo debe ser analizado con el fin de identificar y enmendar posibles errores. Además, un modelo debe construirse para un propósito específico o un conjunto de objetivos y su validez debe determinarse para ese propósito. Prada afirma que existen diferentes técnicas que pueden ser aplicadas para la validación de un modelo de simulación, estas van desde revisiones subjetivas hasta pruebas estadísticas objetivas (Prada, 2009).

En su presentación “Validación de modelos” Cesar de Prada explica que un enfoque comúnmente utilizado es hacer que los constructores del modelo determinen la validez de este por medio de una prueba o un conjunto de pruebas. Entre algunas de ellas se encuentran:

- Hacer que un experto verifique el modelo.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Realizar diagramas de flujo lógicos que incluyan cada acción posible desde el punto de vista lógico.
- Examinar las salidas del modelo para determinar si son razonables en una variedad de configuraciones de los parámetros de entrada (Análisis de sensibilidad = cuánto varía X ante un cambio en Y).
- Comprobación con datos experimentales.
- Test estadísticos (Medida numérica de las discrepancias entre la respuesta del modelo y los datos experimentales).

En 1967 Naylor y Finger establecieron en su artículo “Verification of Computer Simulation Models” un proceso de tres pasos para la validación de modelos de simulación que se continúa usando ampliamente (Thomas H. Naylor, 1967). Proponen seguir el siguiente orden:

1. Construir un modelo que tenga una alta validez facial (validez facial se refiere a la relevancia de los ítems de la prueba y la evaluación de su claridad).
2. Validar las suposiciones hechas en el modelo por medio de bibliografía o datos experimentales.
3. Comparar las transformaciones de entrada-salida del modelo con las transformaciones de entrada-salida correspondientes para un sistema real.

2. METODOLOGÍA

Este proyecto tuvo como objetivo determinar el potencial de utilizar escudos verdes en viviendas de bajo costo en Medellín mediante mediciones en un caso de estudio y proponer una solución de vivienda de bajo costo mediante modelaciones térmicas. Para lograr este objetivo se llevaron a cabo las siguientes actividades.

2.1. Establecer beneficios de los escudos verdes

2.1.1. Actividad 1

Para medir temperatura del aire, humedad y temperatura radiante media en los casos de estudio y evaluar su confort térmico de acuerdo con lo expuesto anteriormente, se utilizaron sensores de la marca KIMO Instruments. Éstos tomaron medidas cada 5 minutos, durante un período de 15 días. Se tomaron datos antes y después de la instalación de las terrazas verdes para observar el efecto que tienen estas en el confort. se instalaron en 4 puntos diferentes: cuarto principal, sala, balcón y cuarto secundario.

Los sensores utilizados fueron:

- KIMO KH50: Responsables de medir tanto la temperatura del aire como la humedad relativa del ambiente.



Ilustración 10 Dispositivo KIMO KH50 (Kimo instrumentes, UK)

- KIMO KTT220: Este puede conectarse al termómetro de globo para medir la temperatura de globo.



Ilustración 11 Dispositivo KIMO KTT220 (Kimo instrumentes, UK)

- Termómetro de globo: Es un sensor colocado dentro de una esfera de 150 mm de diámetro y con coeficiente de emisión medio, utilizado para medir la temperatura radiante media.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Ilustración 12 Termómetro de globo (realización propia)

A partir de las mediciones de dichos sensores es posible obtener la temperatura externa del aire, la humedad relativa y la temperatura radiante media para calcular la temperatura operativa de la vivienda. Esta última se relaciona directamente con los índices PPD y PMV y puede compararse con la temperatura externa para concluir sobre el confort térmico durante el transcurso del día.

2.1.2. Actividad 2

Extracción y organización de datos. Mediante el software KILOG se extrajeron los datos tomados durante el periodo de medición y se organizaron en diferentes tablas para las temperaturas y humedades tomadas para cada zona del apartamento y la temperatura del aire exterior.

2.1.3. Actividad 3

Segunda toma de datos. Se realizaron mediciones por segunda vez, seis meses después, cuando la vegetación de las terrazas había ya crecido. Los datos fueron tomados en los mismos puntos iniciales durante el mismo periodo de tiempo.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2.1.4. Actividad 4

Se calculó de la temperatura operativa según la ISO 7730, para luego estimar el confort térmico en la edificación antes y después de la instalación de las terrazas y cuantificar sus beneficios. Además, se comparó la temperatura operativa con los límites establecidos por la ASHRAE y otros indicadores como el amortiguamiento térmico y el desfase temporal.

2.2. Alternativas de diseño

2.2.1. Actividad 1

Mediante las Guías de Asistencia Técnica para Vivienda de Interés Social se definieron las medidas para el diseño de la vivienda, al igual que sus materiales. Con estos parámetros se diseñó la alternativa de bajo costo.

2.2.2. Actividad 2

Implementando lo aprendido en el caso de estudio y con base en la alternativa diseñada en el numeral anterior se analizaron distintas soluciones variando orientaciones, ventanearía y aislamiento de la fachada (con y sin escudo verde).

2.3. Selección alternativa

2.3.1. Actividad 1

Se utilizó el software de modelación térmica IDA ICE para ver cómo se comportaba la solución propuesta con las diferentes combinaciones de orientación, ventanería y escudo verde y se seleccionó la mejor alternativa.

2.4. Factibilidad

2.4.1. Actividad 1

Se consultaron los costos en el mercado de los materiales seleccionados para la vivienda y se consultó con un experto para cotizar el costo de construcción y mano de obra. También se comparó el costo de los escudos frente a una solución tradicional.

2.4.2. Actividad 2

Se utilizó el Estándar 55 de la ASHRAE para estimar la reducción o aumento de los costos que generaría la alternativa que se propone, comparándola con los gastos en los que se incurriría debido al uso de sistemas de climatización exigidos por dicho estándar para una solución sin escudos verdes.

3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1. Diagnóstico del beneficio de los escudos verdes - Verde Avignon

Para determinar los beneficios se instalaron varios sensores KIMO en el edificio Verde Avignon ubicado en la Cra. 22a #20a Sur-27 en San Lucas en la ciudad de Medellín. El proyecto se encuentra en la comuna 14 (El Poblado) y pertenece al estrato socioeconómico 6. En la Ilustración 13 puede observarse la ubicación del edificio en un mapa de la ciudad.



Ilustración 13 Ubicación Verde Avignon (GOOGLEMAPS, 2019)

Verde Avignon es un proyecto residencial de una sola torre de 11 pisos. Cuenta con un total de 22 apartamentos (2 por piso) con áreas desde 335 hasta 443 m². Cada apartamento cuenta con tres habitaciones, tres baños, cocina, zona de ropas, salón comedor y zona de estar. Se escogió como caso de estudio ya que es de los pocos edificios en la ciudad que cuenta con terrazas verdes en todo el perímetro de su fachada. Por otro lado, se tenía la oportunidad de tomar mediciones antes y después

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

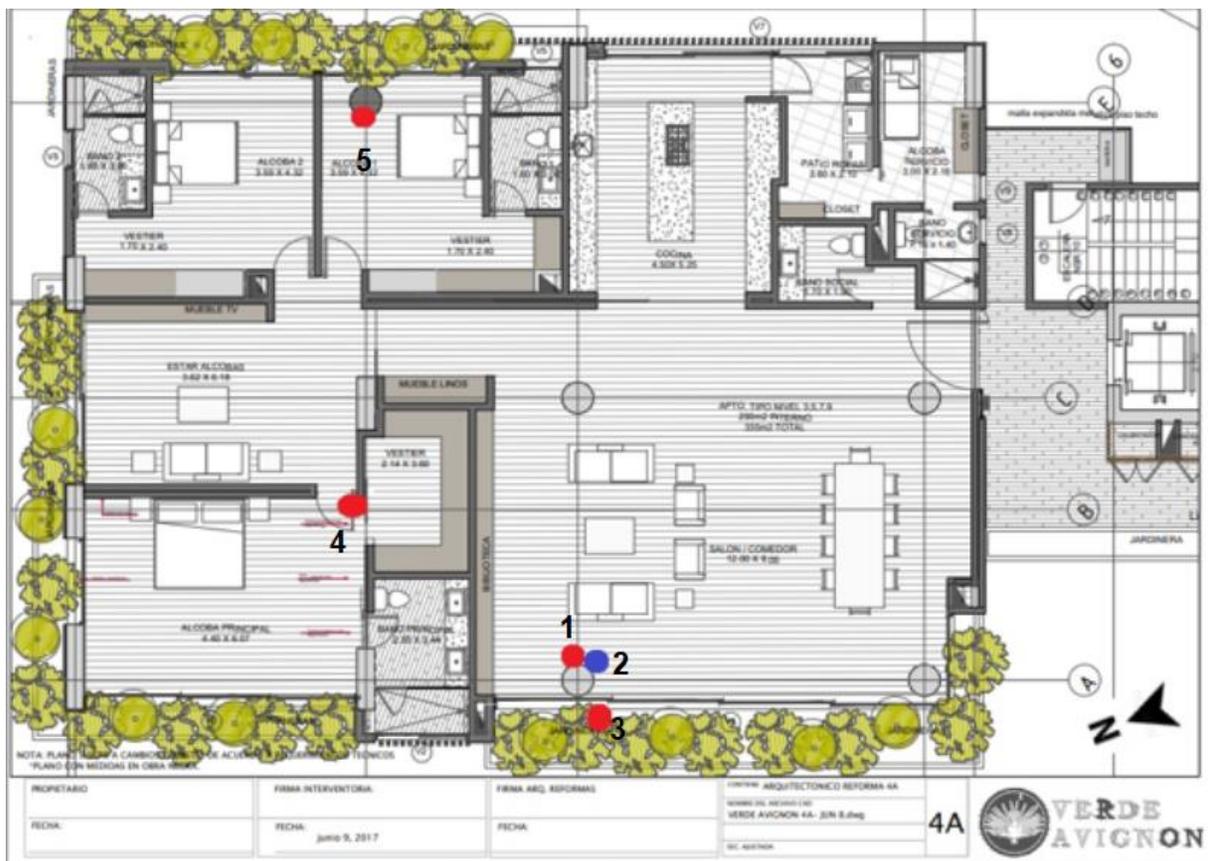
de la instalación de las terrazas verdes, cosa que no era posible en otros proyectos porque ya se encontraban construidas o porque tardarían todavía en construirse. Además, los datos de antes y después podían tomarse cuando la vivienda no estaba habitada, lo que garantiza condiciones iguales al interior de la vivienda para ambas mediciones. Esto significa que los cambios observados se deben únicamente al efecto de las terrazas verdes y la variabilidad del clima en los dos períodos de medición y no fueron afectados por otras variables como la cantidad de personas presentes en un día determinado o su comportamiento para buscar el confort térmico, por ejemplo, abrir o cerrar una ventana. En la Ilustración 14 Planta típica Verde Avignon (Conexoinmobiliario, 2019) se observa la planta típica de un piso entero, dónde se pueden ver ambos apartamentos y su orientación. El apartamento encerrado por el círculo rojo fue en el que se tomaron las mediciones y se encuentra en un piso intermedio. Este cuenta con 335 m² construidos, de los cuales 290 m² pertenecen a las habitaciones y zonas comunes y 45 m² fueron destinados a jardineras para los escudos verdes. La fachada que limita con la cocina y los cuartos secundarios se encuentra orientada hacia el sudeste y la que limita con el comedor la sala y el cuarto principal con el noroeste.



Ilustración 14 Planta típica Verde Avignon (Conexoinmobiliario, 2019)

A continuación, en la Ilustración 15 se puede ver la planta del apartamento de una forma más detallada.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



● Sensor KH50

● Termometro de globo y KT220

Ilustración 15 Plano arquitectónico Verde Avignon con puntos de medición (Conexoinmobiliario, 2019)

Los círculos de color rojo en la Ilustración 15 hacen referencia a los puntos donde los sensores KH50 fueron instalados. El punto azul es donde fue instalado el sensor KTT220 que se conecta al termómetro de globo para medir la temperatura radiante media. Los números hacen referencia a diferentes zonas del apartamento, así:

1. Sensor KH 50 - Sala
2. Sensor KT220 – Sala
3. Sensor KH 50 – Exterior

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

4. Sensor KH 50 – Cuarto principal
5. Sensor KH 50 – Cuarto secundario

En las imágenes a continuación se pueden ver los sensores y como fueron instalados.



Ilustración 16 Sensor de globo Verde Avignon (realización propia)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La Ilustración 16 Sensor de globo Verde Avignon (realización propia) anterior, hace referencia a los puntos 1 y 2. En ella se observa uno de los sensores KH50 y el termómetro de globo conectado al sensor KT220.

En la próxima Ilustración 17 Sensor exterior Verde Avignon puede observarse el punto 3, correspondiente al sensor KH50 instalado en el exterior para medir la temperatura del aire del ambiente. Este se encuentra al interior de la caja que se aprecia en la imagen, la cual se utiliza para protegerlo de la radiación directa del sol para que no se afecten las lecturas de temperatura.



Ilustración 17 Sensor exterior Verde Avignon

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Finalmente, en la Ilustración 18 Sensores cuarto principal Verde Avignon se observan los sensores KH50 correspondientes a los puntos 4 y 5, es decir, cuarto principal y cuarto secundario.



Ilustración 18 Sensores cuarto principal Verde Avignon

3.1.1. Primera medición

Los sensores fueron instalados del 03/10/2018 hasta el 18/10/2018, 15 días durante los cuales se realizaron mediciones cada 5 minutos para obtener un total de 4.070 datos de temperatura y humedad por sensor. Dichas mediciones se realizaron justo cuando acababa de sembrarse la vegetación en las terrazas, pero aún no había crecido. En la Ilustración 19 Fachada Verde Avignon, primera medición se observa la apariencia de la fachada en dicha fecha.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Ilustración 19 Fachada Verde Avignon, primera medición

Los datos fueron extraídos mediante el software Kilog 2015 como se aprecia en la Ilustración 20 Software Kilog 2015. Luego fueron exportados a Excel y se organizaron por fecha y hora de la medición, además de ser separados por la ubicación del sensor.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

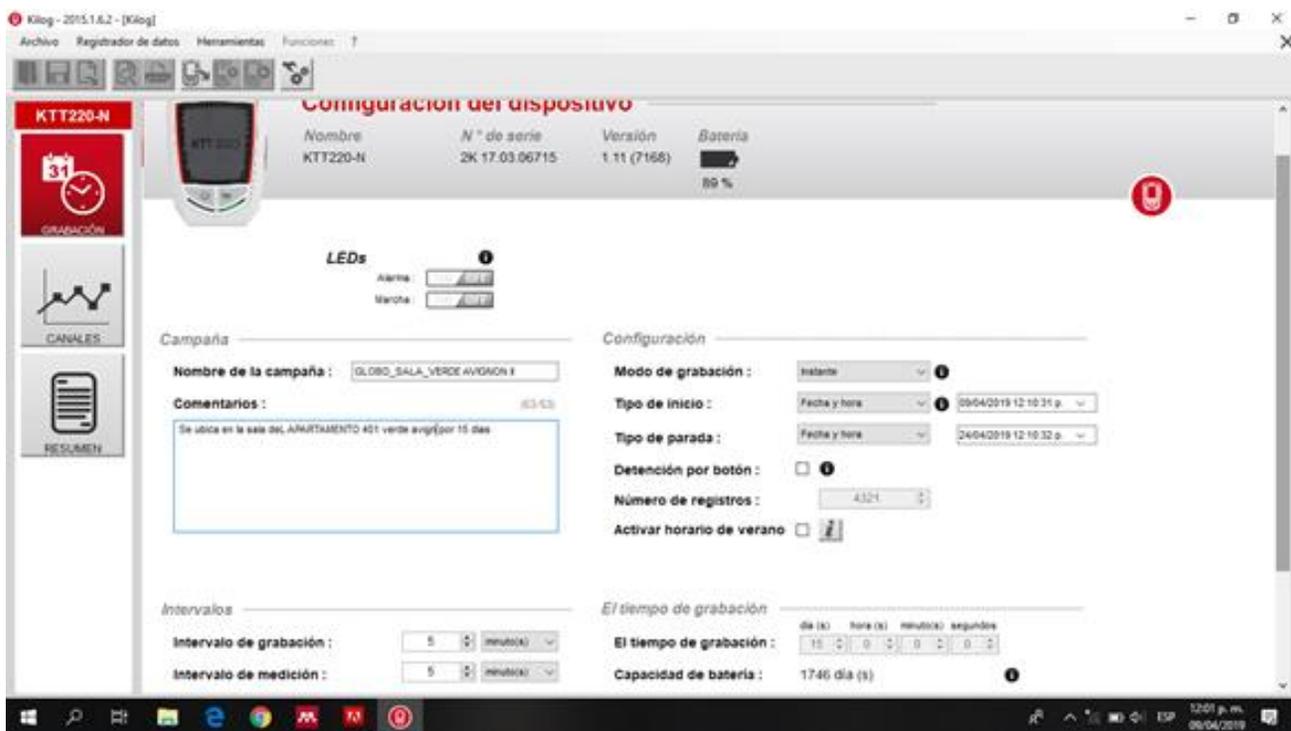


Ilustración 20 Software Kilog 2015

Luego de tener los datos organizados se procedió a calcular la temperatura radiante media y la temperatura operativa de la vivienda por medio de la Ecuación 5 Temperatura radiante (convección natural) y Ecuación 4 Velocidad relativa ($M < 1$) respectivamente, expuestas en el marco de referencia. Es importante mencionar que para el cálculo de estos factores se hizo uso de las constantes expuestas en la Tabla 9.

Tabla 9 Factores de cálculo para la temperatura radiante (realización propia con base en ISO 7730)

Va Velocidad del aire (m/s)	ϵ Emisividad para globo negro	Diámetro del globo (m)	A Coeficiente
0.1	0.95	0.15	0.5

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

A continuación, en la Ilustración 21 se observa una de las tablas realizadas en Excel mediante el proceso descrito. En la primera columna se encuentra numerada cada una de las mediciones tomadas por medio de un índice que va del 1 al 4070. La segunda columna registra la fecha y hora de la medición. La tercera columna corresponde al sensor KH50 ubicado en el exterior y muestra la temperatura del aire al exterior de la vivienda. La cuarta y quinta columna corresponden a las lecturas del sensor KT220 y registran la humedad relativa y la temperatura de globo al interior de la vivienda respectivamente. Finalmente, las columnas I y J muestran la temperatura radiante media y la temperatura operativas calculadas.

	A	B	D	E	H	I	J
1			Sensor externo	Globo			
2	Índice	Fecha y hora	Temperatura Exterior [°C]	Humedad relativa [%RH]	Temperatura de globo [°C]	Temperatura radiante media [°C]	Temperatura operativa [°C]
3	3	3/10/2018 11:06	24.2	57.4	24.1	24.041	24.120
4	4	3/10/2018 11:11	23.8	58.5	24.2	24.436	24.118
5	5	3/10/2018 11:16	23.6	58.2	24.3	24.713	24.156
6	6	3/10/2018 11:21	23.5	59.4	24.5	25.088	24.294
7	7	3/10/2018 11:26	23.5	60.1	24.7	25.404	24.452
8	8	3/10/2018 11:31	23.6	59.6	24.9	25.661	24.630
9	9	3/10/2018 11:36	23.7	60.1	24.8	25.445	24.572
10	10	3/10/2018 11:41	24	57.6	24.9	25.427	24.714
11	11	3/10/2018 11:46	24.3	56.6	25.1	25.568	24.934
12	12	3/10/2018 11:51	24.5	57.1	25	25.293	24.896
13	13	3/10/2018 11:56	24.6	56.1	25.1	25.393	24.996
14	14	3/10/2018 12:01	24.8	56.5	25.3	25.592	25.196
15	15	3/10/2018 12:06	25.7	57.8	25.4	25.224	25.462
16	16	3/10/2018 12:11	27.2	55.2	25.3	24.182	25.691
17	17	3/10/2018 12:16	28.3	48.4	25.2	23.368	25.834
18	18	3/10/2018 12:21	28.2	50.1	25.3	23.589	25.894
19	19	3/10/2018 12:26	27.5	49.6	25.5	24.325	25.913
20	20	3/10/2018 12:31	27.3	51.3	25.7	24.763	26.032
21	21	3/10/2018 12:36	27.8	52.3	26	24.949	26.374
22	22	3/10/2018 12:41	29	50.2	26.1	24.402	26.701
23	23	3/10/2018 12:46	30.4	48.4	25.6	22.760	26.580
24	24	3/10/2018 12:51	30.9	41.7	25.1	21.640	26.270
25	25	3/10/2018 12:56	29.9	41.6	24.6	21.427	25.663
26	26	3/10/2018 13:01	28.8	44.4	24.2	21.440	25.120
27	27	3/10/2018 13:06	27.8	47	23.9	21.558	24.679
28	28	3/10/2018 13:11	27	47.1	23.7	21.718	24.359

Ilustración 21 Cálculo de temperatura radiante

Al obtener la temperatura operativa de la vivienda es posible evaluar el confort térmico según el Estándar 55 de la ASHRAE, la norma ISO 7730 y los indicadores expuestos en el marco de referencia para finalmente determinar el desempeño de la vivienda.

3.1.1.1. Análisis de acuerdo con el Estándar ASHRAE 55

Para evaluar la temperatura operativa obtenida de acuerdo con lo establecido en el estándar 55 de la ASHRAE, se hallaron los límites para una satisfacción del 80% a

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

partir de la temperatura del aire exterior. Estos límites se graficaron con la temperatura operativa obtenida para analizar su comportamiento como se observa en la Ilustración 22 Límites de satisfacción según estándar 55 de la ASHRAE.

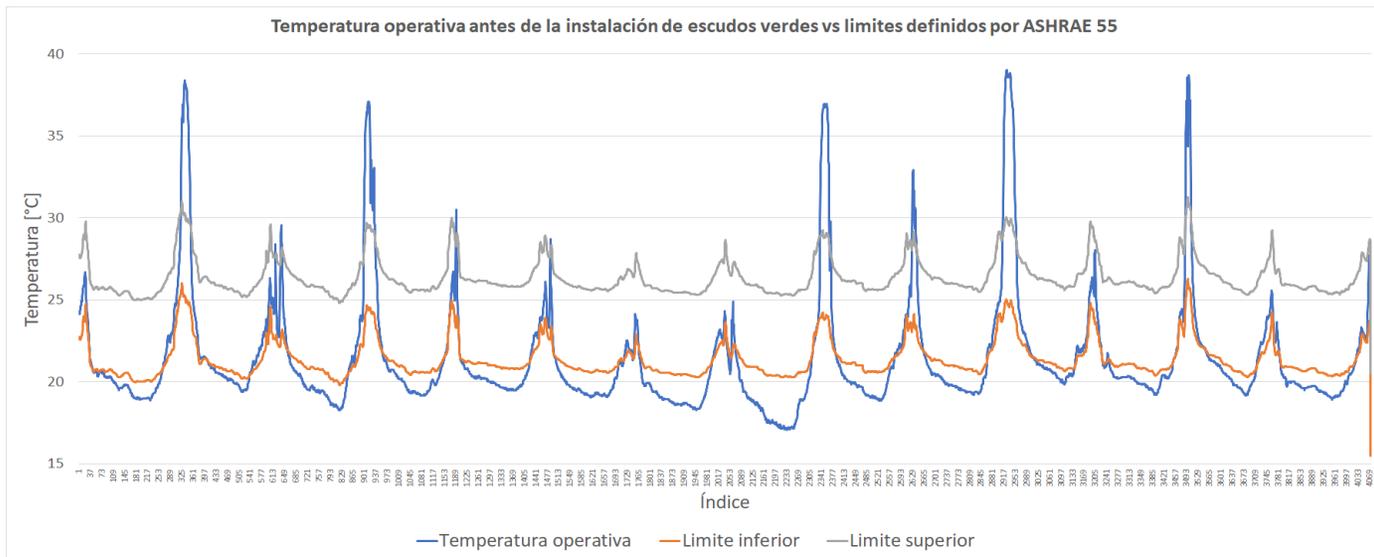


Ilustración 22 Límites de satisfacción según estándar 55 de la ASHRAE

En la gráfica, el eje horizontal es el índice que representa una fecha y hora específicas. En el eje vertical se encuentra representada la temperatura en grados Celsius. Las líneas de color gris y naranja representan los límites superior e inferior, respectivamente, para la temperatura operativa recomendados por ASHRAE. La línea de color azul es la temperatura operativa hallada de la vivienda.

Al observar la gráfica lo primero que resalta son varios picos en la temperatura operativa que sobrepasan el límite superior. Se observan 6 picos en el transcurso de los 15 días que sobrepasan dicho límite. Esto corresponde al 40% de los días medidos. Uno de los picos se presenta en el décimo primer día de medición y registra la temperatura operativa más alta de todo el período y también la mayor diferencia con respecto al límite superior. El pico de temperatura operativa hallado

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

para dicho día es de 38,92°C y se encuentra 7,72°C por encima del límite, es decir, supera al límite en un 25,73%.

Por otro lado, los valles que se generan cuando disminuye la temperatura en la noche se encuentran todos por debajo del límite inferior. Esto quiere decir, según el estándar 55 de la ASHRAE, que siempre habrá inconformidad térmica en la noche. La menor temperatura se presenta al octavo día y su valor es de 17,06°C. Se encuentra 3,94°C por debajo del límite inferior, lo que corresponde a un 18,8%. El comportamiento anterior se debe a la fachada de vidrio del edificio, el vidrio posee una alta transmitancia térmica lo que hace que sea un mal material para amortiguar la temperatura.

En la Tabla 10 se observa un resumen donde se cuantifica el número de datos que se encuentra por fuera de los límites y se expresa en porcentaje.

Tabla 10 Resumen ASHRAE 55

Cumple según ASHRAE	No. de Datos	Porcentaje (%)
NO	3027	74.28
SI	1048	25.72
Total	4075	100

Como se puede ver, el 74.28% de los valores de temperatura operativa hallados se encuentran por fuera de los límites establecidos por el estándar 55 de la ASHRAE y se presentan varios picos y valles con diferencias de hasta un 25,73% con el límite. Por lo anterior puede concluirse, con base en lo expuesto por dicho estándar, que la vivienda presenta un mal funcionamiento térmico.

3.1.1.2. Análisis de acuerdo con la norma ISO 7730

A partir de los datos obtenidos pueden calcularse también los índices PMV y PPD como se explicó ya en el marco metodológico. A continuación se presenta la Ilustración 23 Valores del índice PPD donde se exponen los valores del índice PPD obtenidos en el período de medición correspondientes a un PMV específico.

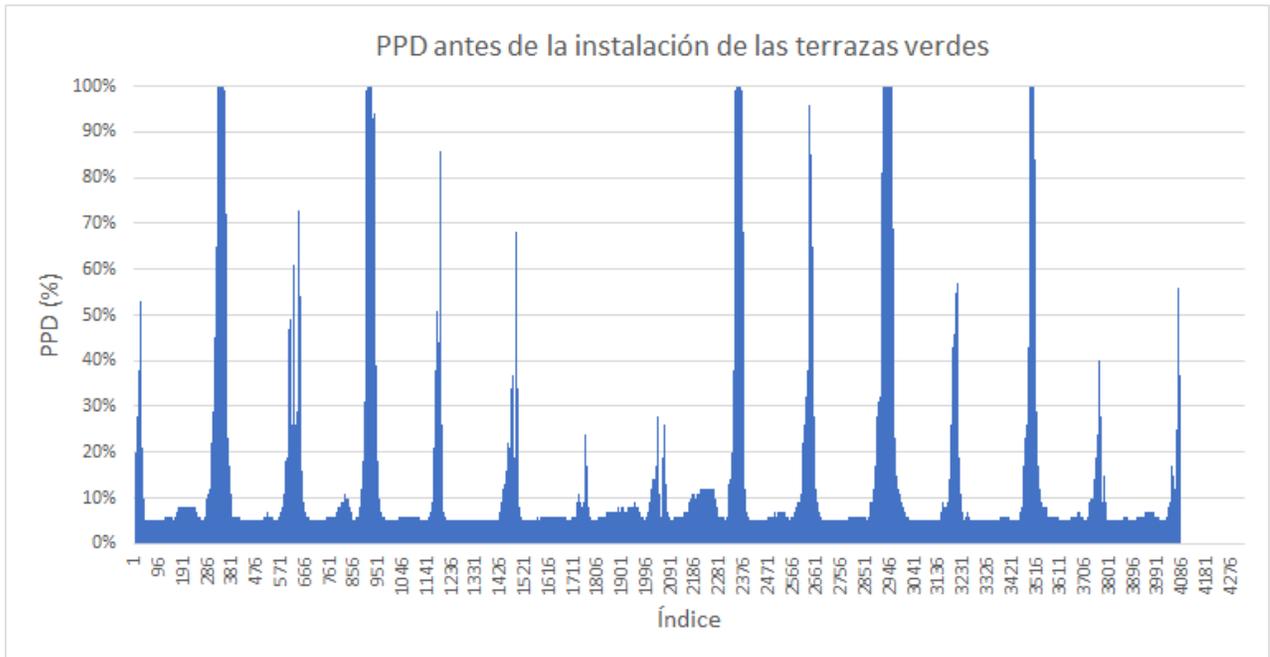


Ilustración 23 Valores del índice PPD

El eje horizontal es el índice que representa una fecha y hora específicas. En el eje vertical se encuentra el índice PPD o porcentaje de individuos insatisfechos.

La gráfica presenta varios picos que superan un PPD del 50% por lo general. Incluso hay 5 días en los que el PPD alcanza un valor del 100%.

Al comparar la gráfica con las temperaturas operativas obtenidas se observa que los altos porcentajes de insatisfacción corresponden con los picos de temperatura operativa. Los picos se dan alrededor de las 2:00 p.m. y las 4:00 p.m., cuando la

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

temperatura operativa de la vivienda alcanza sus mayores valores. El promedio de temperatura operativa en la tarde fue de 26,93°C lo que corresponde a un PMV de +1,2 y un PPD del 40%. Es decir que los individuos reportarán una sensación térmica de algo de calor y el 40% de ellos estarían insatisfechos.

Por otro lado, entre las 12:00 a. m. y las 4:00 a. m. se presentan valles en la temperatura operativa con un promedio de 20,27°C, correspondiente a un PMV de 0 y un PPD del 5%. Es decir, los individuos reportarán una sensación térmica neutra con tan solo el 5% presentando inconformidad térmica.

El comportamiento descrito anteriormente es similar durante todo el período de medición, donde se observan altos porcentajes de inconformidad en la tarde y pequeños en la noche y en la mañana.

Los valores de PPD fueron agrupados en clases y se encontró la frecuencia y porcentaje correspondiente de cada clase como se observa en la Tabla 11 Frecuencia de PPD.

Tabla 11 Frecuencia de PPD (primera medición)

Clase (PPD)	Frecuencia	Porcentaje
0-6%	2468	60.6%
6-10%	743	18.2%
10-15%	274	6.8%
15-100%	588	14.4%

Los datos se dividen en las anteriores clases para poder clasificarlos dentro de las categorías de ambiente térmico definidas por la ISO 7730 en la Tabla 11 Frecuencia de PPD del presente trabajo. La ISO 7730 clasifica un ambiente tipo A para valores de PPD menores al 6%, un ambiente tipo B para valores menores al 10% y un ambiente tipo C para valores menores al 15%. Esta afirma que idealmente debe

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

garantizarse un ambiente tipo A constante al interior de una edificación o como mínimo uno tipo B.

Como se observa en Tabla 11, el 60,6% de los datos se encuentra dentro de la categoría A y el 78,8% dentro de la categoría B. Solo el 21,2% de los datos se encuentra por fuera de estas categorías. Aunque la mayoría de los valores pertenece a la categoría A, la vivienda no puede clasificarse dentro de esta y tampoco puede afirmarse que tiene un buen funcionamiento en general. Muchos de los valores se encuentran por fuera de la categoría B, mínima exigida por la ISO 7730 y como ya se mencionó, en la tarde se alcanzan valores máximos de PPD del 100% y en promedio de 40%.

También se graficaron los valores del índice PMV relacionados con el índice PPD. En la Ilustración 24 se observan los resultados obtenidos. El eje vertical representa el índice PMV que expresa la sensación térmica promedio teórica experimentada por los individuos y el eje horizontal corresponde al tiempo.

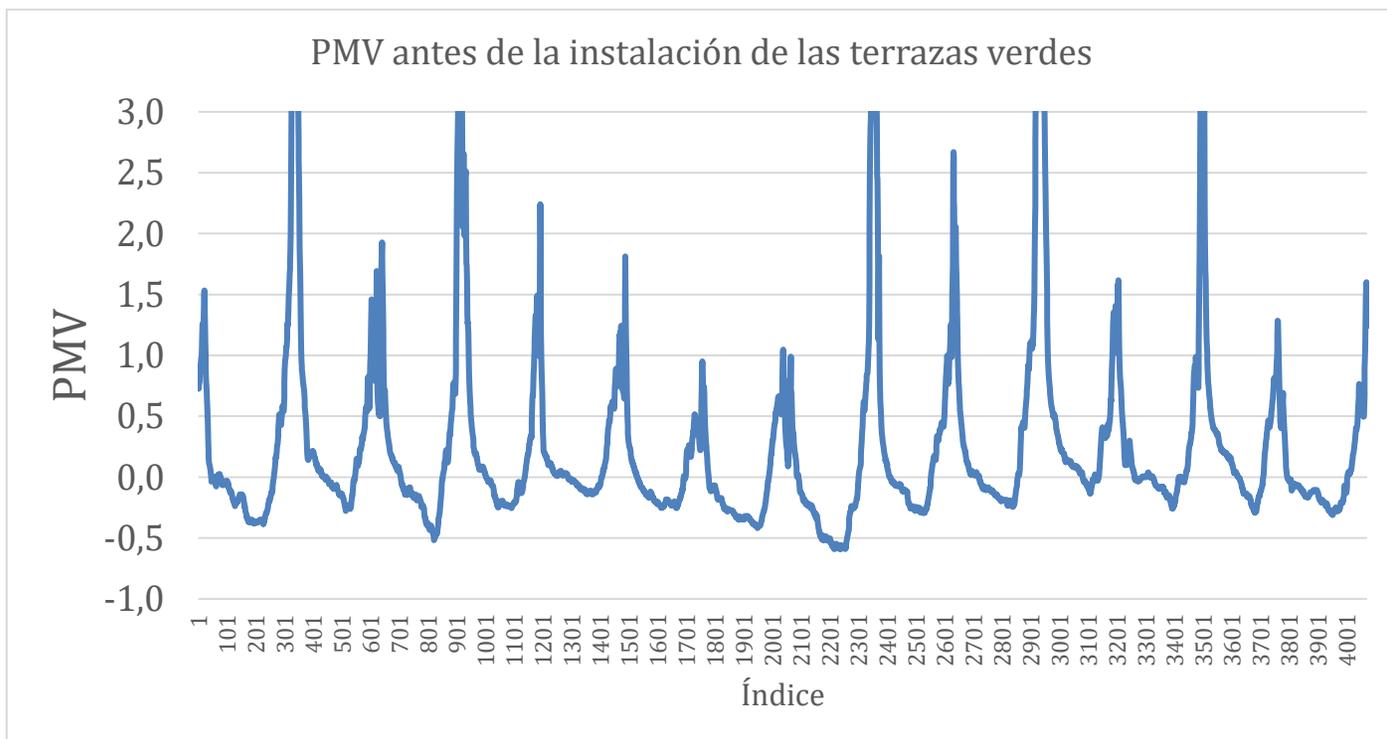


Ilustración 24. PMV antes de la instalación de las terrazas verdes

Se observa que en la tarde los picos siempre superan un PMV de 1 y varios días alcanzan valores de 2 y 3, correspondientes a una sensación térmica de calor y mucho calor respectivamente. Solo en la noche se alcanzan valores correspondientes a una sensación térmica neutra. El promedio de PMV en la noche fue de -0,32, sin embargo, en la tarde se tiene un PMV promedio de 2,1. Este último valor corresponde a una sensación térmica de calor y se encuentra por fuera de los límites establecidos por la norma para una categoría B ($-0,5 < PMV < 0,5$).

Por lo anterior, puede afirmarse, con base en la ISO 7730, que el comportamiento de la vivienda no es bueno. Aunque en la noche y la mañana los valores de PPD son aceptables, esto puede deberse más al valor de la temperatura externa del aire que a las propiedades aislantes de la vivienda. Cuando comienza a subir la temperatura, la vivienda se calienta inmediatamente y exhibe altos porcentajes de incomodidad.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.1.1.3. Amortiguación y desfase térmico

La temperatura operativa puede ser comparada con la temperatura del aire exterior para entender cómo se comporta la temperatura de la vivienda durante el día con relación a la temperatura del ambiente, es decir, si la vivienda es fresca en días calurosos o si mantiene su temperatura durante días o noches con temperaturas bajas. Dicha gráfica puede observarse en la

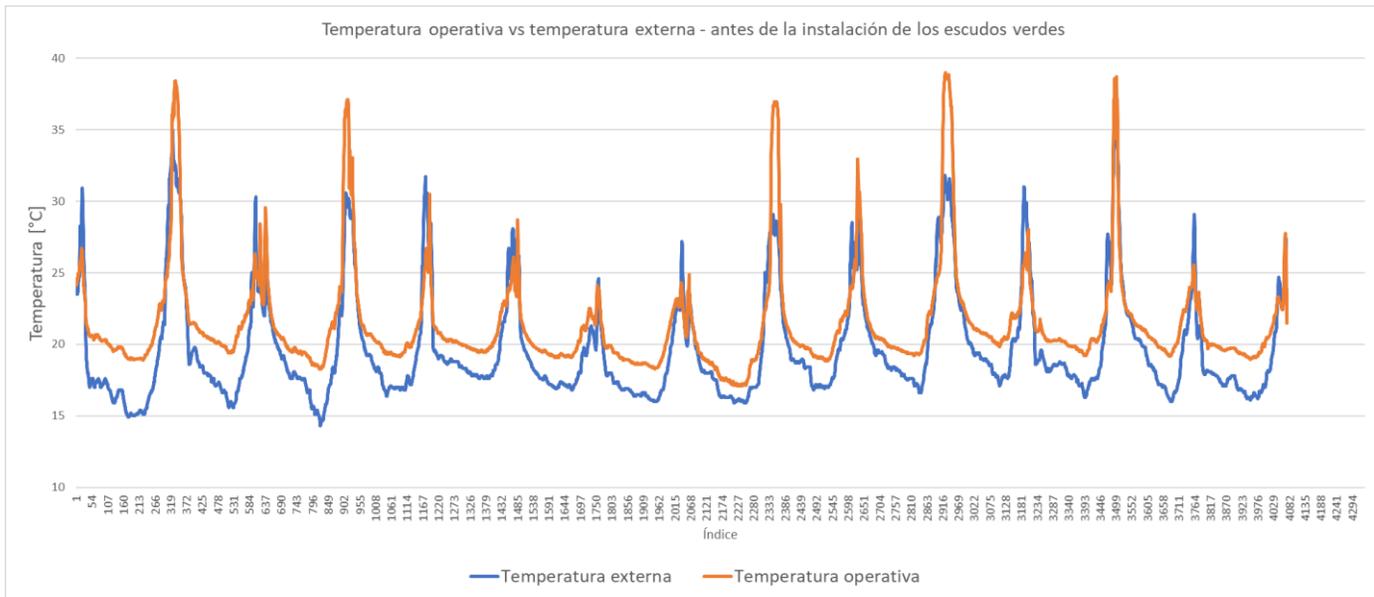


Ilustración 25.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

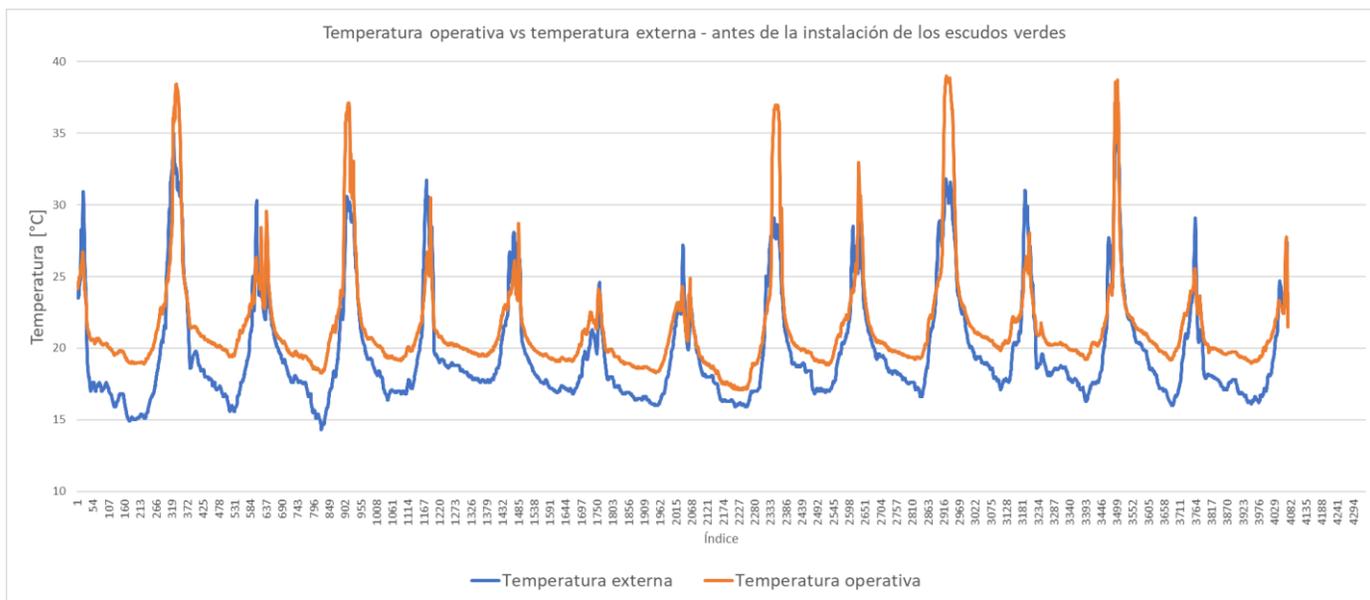


Ilustración 25 Amortiguamiento y desfase térmico

En la imagen anterior el eje vertical corresponde a la temperatura en grados Celsius y el horizontal al índice relacionado con una fecha y hora. La línea de color azul corresponde a la temperatura externa y la naranja a la temperatura operativa de la vivienda. Al analizar la gráfica se percibe inmediatamente que el desfase térmico es prácticamente nulo. Cuando se presenta un cambio en la temperatura externa se percibe inmediatamente en la temperatura operativa al interior de la vivienda. Se observa que los picos y valles para ambas temperaturas se dan en los mismos puntos y no existe traslapo alguno entre ellos. Los picos se presentan entre la 1:00 pm y las 4:00 pm y los valles entre las 8:00 pm y 4:00 am para ambas temperaturas.

De igual manera, se identifica que la temperatura operativa de la vivienda es por lo general mayor a la temperatura externa. Se encontró que la temperatura operativa se encuentra $1,76^{\circ}\text{C}$ por encima de la externa en promedio, sin embargo, durante los picos de temperatura esta diferencia puede aumentar hasta un valor de $6,65^{\circ}\text{C}$. Se concluye entonces que en los picos la amortiguación es inexistente y, por el contrario, se presenta un incremento de la temperatura.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

En los valles, por otro lado, sí se presenta amortiguación y la temperatura operativa se mantiene por encima de la exterior. Esto quiere decir que en la noche la vivienda conserva la temperatura. La temperatura operativa se mantiene en promedio 3,4°C por encima de la exterior alcanzando un amortiguamiento máximo de 4,7°C.

Tabla 12 Valores máximos y mínimos de amortiguamiento térmico

Amortiguamiento	Picos (adimensional)	Valles (adimensional)
Mínimo	-0,258	-0,117
Máximo	0	-0,267
Promedio	-0,086	-0,176

Los valores de amortiguamiento negativos representan un incremento de la temperatura operativa respecto a la temperatura exterior. En este caso, tanto para los picos como los valles el amortiguamiento es negativo, lo que significa que la temperatura operativa se encuentra por encima de la exterior. Dicho incremento puede expresarse en porcentaje sacando el valor absoluto del amortiguamiento y multiplicándolo por 100. Así, para los picos se tendría que el incremento máximo en la temperatura operativa con respecto a la exterior es de 25,8% y que ésta se encuentra en promedio 8,6% por encima de la exterior. Para los valles el incremento máximo es del 26,7% y en promedio la temperatura operativa se encuentra un 17,6% por encima de la exterior.

De lo anterior puede concluirse que el funcionamiento de la vivienda no es bueno ya que no presenta ningún tipo de desfase temporal y durante el día no se presenta un amortiguamiento sino un incremento de la temperatura. Esto causa altos valores de PPD y PMV y hace que se excedan los límites propuestos por el estándar 55 de la ASHRAE y la norma ISO 7730.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.1.2. Segunda medición

Seis meses luego de la toma de los datos inicial se realizó una segunda medición, luego del crecimiento de la vegetación en las terrazas verdes. Los sensores se instalaron exactamente en los mismos lugares y la vivienda permaneció desocupada durante ambas mediciones. En la Ilustración 26 e Ilustración 27 puede observarse la apariencia de la fachada al realizar la segunda medición.



Ilustración 26 Fachada exterior Verde Avignon (medición 2)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Ilustración 27 Fachada exterior Verde Avignon 2 (medición 2)

Al igual que en la primera medición, se tomaron datos durante un período de 15 días. Los sensores fueron instalados del 09/04/2019 hasta el 24/04/2019, realizando mediciones cada 5 minutos para obtener un total de 4.071 datos de temperatura y humedad por sensor. Los resultados fueron organizados siguiendo el mismo procedimiento usado en la primera medición y se realizó el cálculo de la temperatura operativa y los factores PMV y PPD, utilizando las mismas constantes de la norma ISO 7730. Una vez organizados los datos se realizaron nuevamente las gráficas expuestas anteriormente para evaluar el comportamiento de la edificación luego del crecimiento de la vegetación.

Sin embargo, antes de continuar con el análisis de los datos debe garantizarse que estos sean comparables. Como se tomaron mediciones en diferentes épocas del año es probable que los resultados se vean influenciados por variaciones en la temperatura externa. Por esto, primero es importante analizar ambos períodos de medición y ver si hay días comparables. En la Ilustración 28 se observan las temperaturas externas de ambos períodos de medición.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

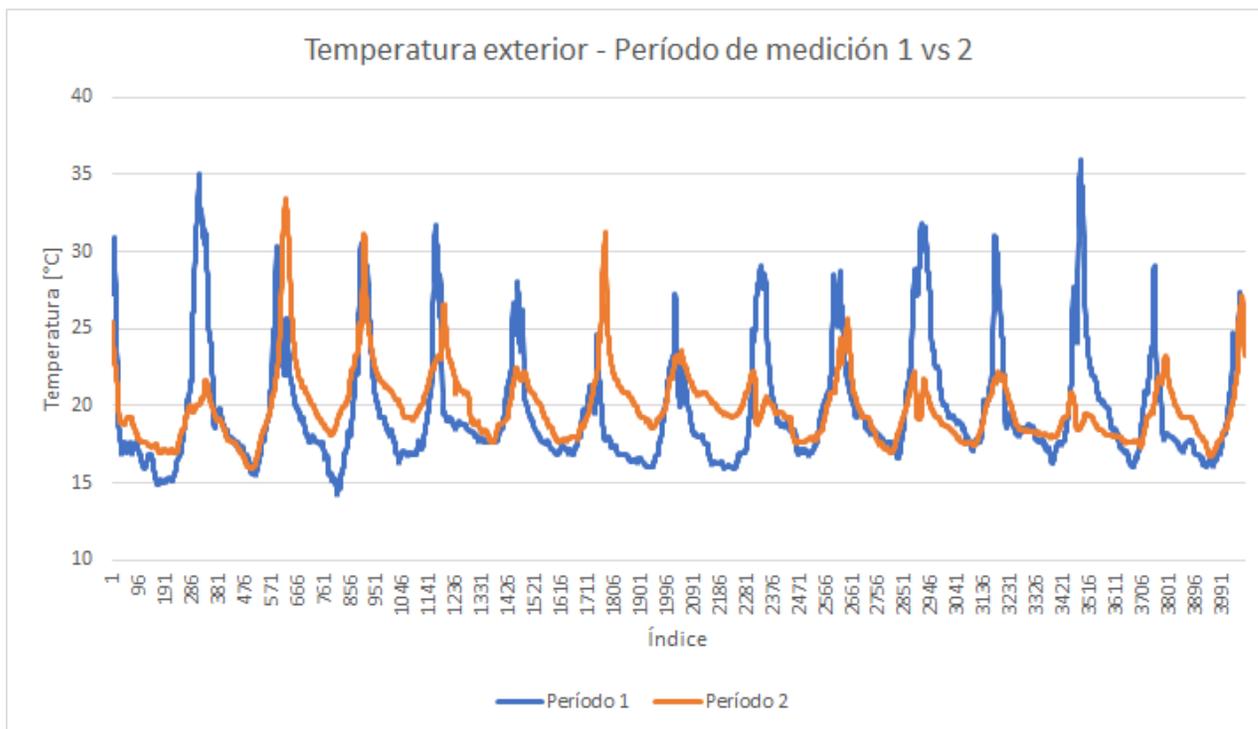


Ilustración 28 Temperaturas externas de ambos periodos de medición

El eje horizontal corresponde a un índice que representa la hora del día. En el eje vertical se encuentra representada la temperatura en grados Celsius. La línea de color azul representa la temperatura externa del primer período de medición y la línea naranja corresponde a la temperatura exterior del segundo periodo.

Se puede ver que durante el segundo período de medición se presentaron menores temperaturas exteriores en el día que en el primer período. Por el contrario, en la noche la temperatura exterior fue mayor en varios casos. A pesar de estas diferencias, en ambos períodos de medición se observa que existen temperaturas máximas y mínimas similares y que hay varios días que se parecen entre sí. Por ejemplo, las temperaturas de los días 3, 4 y 7 de la segunda medición son similares a las temperaturas de la mayoría de los días en la primera medición. Es más, los días 3 y 4 de ambos períodos de medición presentan temperaturas casi idénticas.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Por esto se concluye que a pesar de que se presenten temperaturas exteriores diferentes los resultados si pueden ser comparados basándose en días similares.

3.1.2.1. Análisis de acuerdo con el Estándar ASHRAE 55

Para evaluar la temperatura operativa obtenida de acuerdo con lo establecido en el estándar 55 de la ASHRAE se hallaron los límites para una satisfacción del 80% a partir de la temperatura del aire exterior. Estos límites se graficaron con la temperatura operativa obtenida para analizar su comportamiento como se observa en la Ilustración 29.

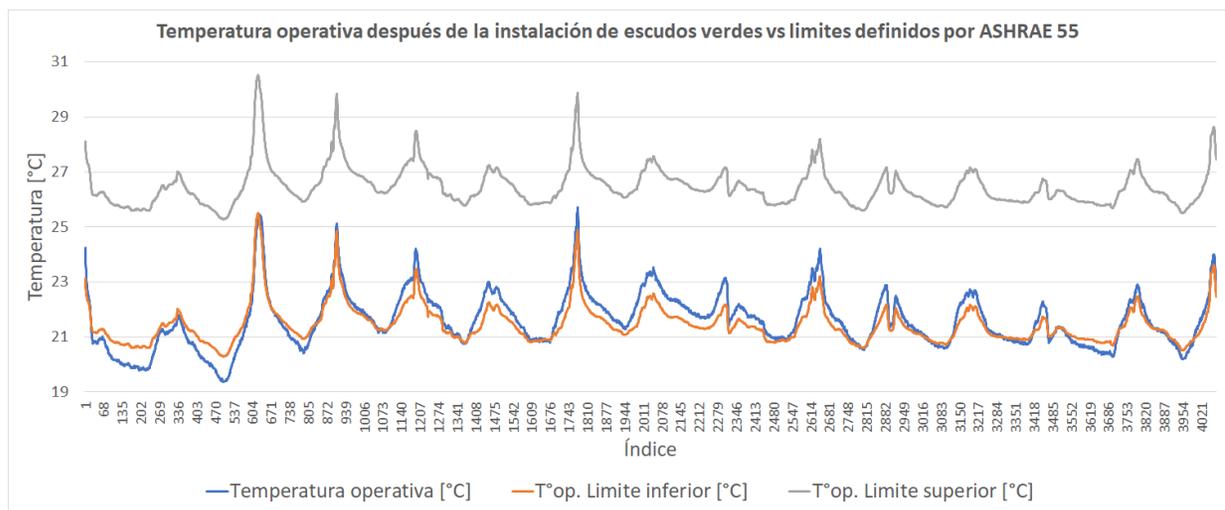


Ilustración 29 Límites de confort térmico vs temperatura exterior

En la gráfica, el eje horizontal es el índice que representa la fecha y hora de medición. En el eje vertical se encuentra representada la temperatura en grados Celsius. Las líneas de color gris y naranja representan los límites superior e inferior, respectivamente, para la temperatura operativa según el Estándar 55. La línea de color azul es la temperatura operativa hallada de la vivienda.

Inmediatamente se observa una gran diferencia en comparación con la gráfica obtenida en la primera medición (ver Ilustración 22). La temperatura operativa nunca pasa el límite superior y es casi idéntica al límite inferior, por lo general se encuentra

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

un poco por encima del límite inferior y solo en algunos valles es ligeramente menor. Incluso en los días con temperaturas externas máximas similares a las de la primera medición se observa que la temperatura operativa ni siquiera se acerca al límite superior.

En la Tabla 13 se presenta un resumen donde se cuantifica el número de datos que se encuentra por fuera de los límites y se expresa en porcentaje.

Tabla 13 Cuantificación de datos por fuera de los límites de satisfacción (medición 2)

Cumple según ASHRAE	No. de Datos	Porcentaje (%)
NO	1453	35,66
SI	2622	64,4
Total	4075	100

El porcentaje de datos que no se encontraba dentro de los límites pasó de 74,28% a 35,66%, esto junto con la reducción observada en la temperatura operativa máxima evidencia la gran influencia que tuvieron los escudos verdes en los resultados.

3.1.2.2. Análisis de acuerdo con la norma ISO 7730

A partir de los datos obtenidos pueden calcularse también los índices PMV y PPD como se explicó ya anteriormente. A continuación, se observa la Ilustración 30 donde se exponen los valores del índice PPD obtenidos en el período de medición.

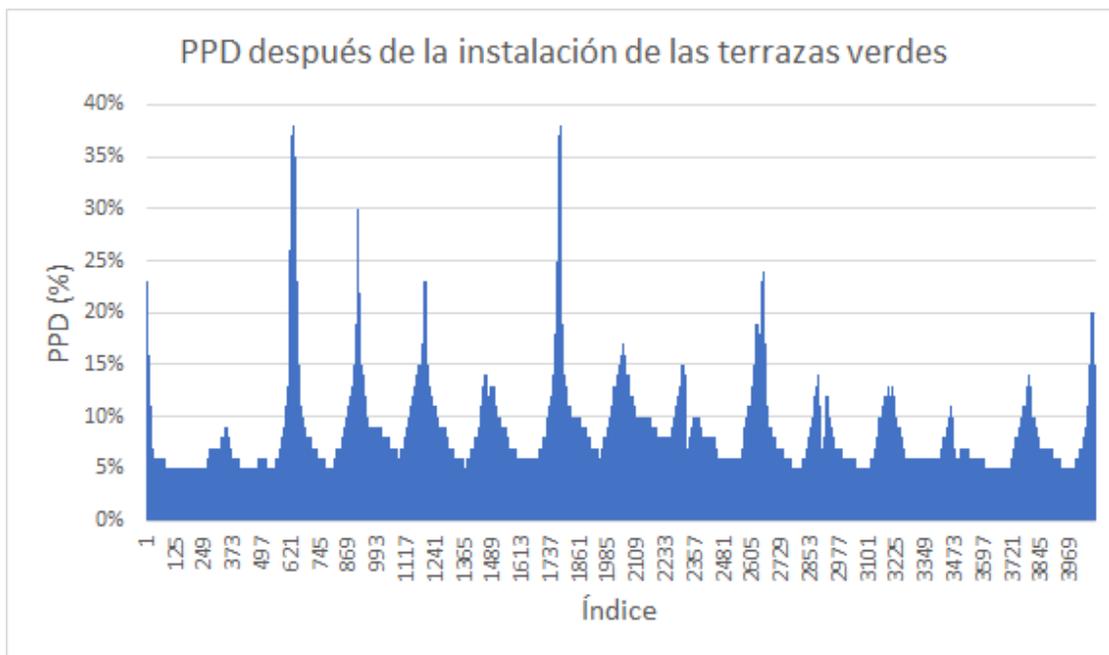


Ilustración 30 Valores de PPD obtenidos (segunda medición)

El eje horizontal es el índice que representa una fecha y hora específicas. En el eje vertical se encuentra el índice PPD o porcentaje de individuos insatisfechos. Se presenta un cambio significativo en los índices PMV y PPD durante la tarde. El valor máximo de PPD pasó a 38% luego de la instalación de los escudos verdes. Este valor corresponde a un PMV de 1, lo que significa que los individuos reportarán sentir algo de calor y 38% de ellos sentirán alguna incomodidad térmica. Antes de la instalación de los escudos verdes se encontró un PPD máximo del 100%, correspondiente a un PMV de 3, es decir que los habitantes reportarían mucho calor y el 100% de ellos sentiría incomodidad.

Los resultados durante la noche permanecieron similares luego de la instalación de los escudos verdes. Se observa que el PPD aumentó a un máximo de 7%, lo que significa que los habitantes continuarán reportando una sensación térmica neutra con un aumento entre 1% y 2% de los inconformes.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Los valores de PPD fueron agrupados en clases y se encontró la frecuencia y porcentaje correspondiente de cada clase como se observa en la Tabla 14.

Tabla 14 Frecuencia de PPD (segunda medición)

Clase	Frecuencia	Porcentaje
0 - 6%	1641	40.3%
6 - 10%	1648	40.5%
10 - 15%	594	14.6%
15 - 100%	190	4.7%

Los datos se dividen en las anteriores clases para poder clasificarlos dentro de las categorías de ambiente térmico definidas por la norma ISO 7730 como se hizo en la primera medición. Se observa que el porcentaje de datos en la categoría A se redujo de 60,6% a 40,3%, esto se debe al pequeño incremento de temperatura durante la noche, que causó el aumento del PPD a un máximo de 7%. Sin embargo, el porcentaje de datos dentro de la categoría B aumentó de 78,8% a 80,8%, lo que evidencia una mejora de confort. Además, el porcentaje de valores mayores a un PPD del 15% disminuyó de 14,4% a 4,7%.

En la Ilustración 31, a continuación, se encuentran graficados los valores del índice PMV obtenidos para los valores de PPD expuestos anteriormente. En el eje vertical de la gráfica se encuentra el valor del PMV, relacionado con una sensación térmica específica y en el eje horizontal se representa el tiempo.

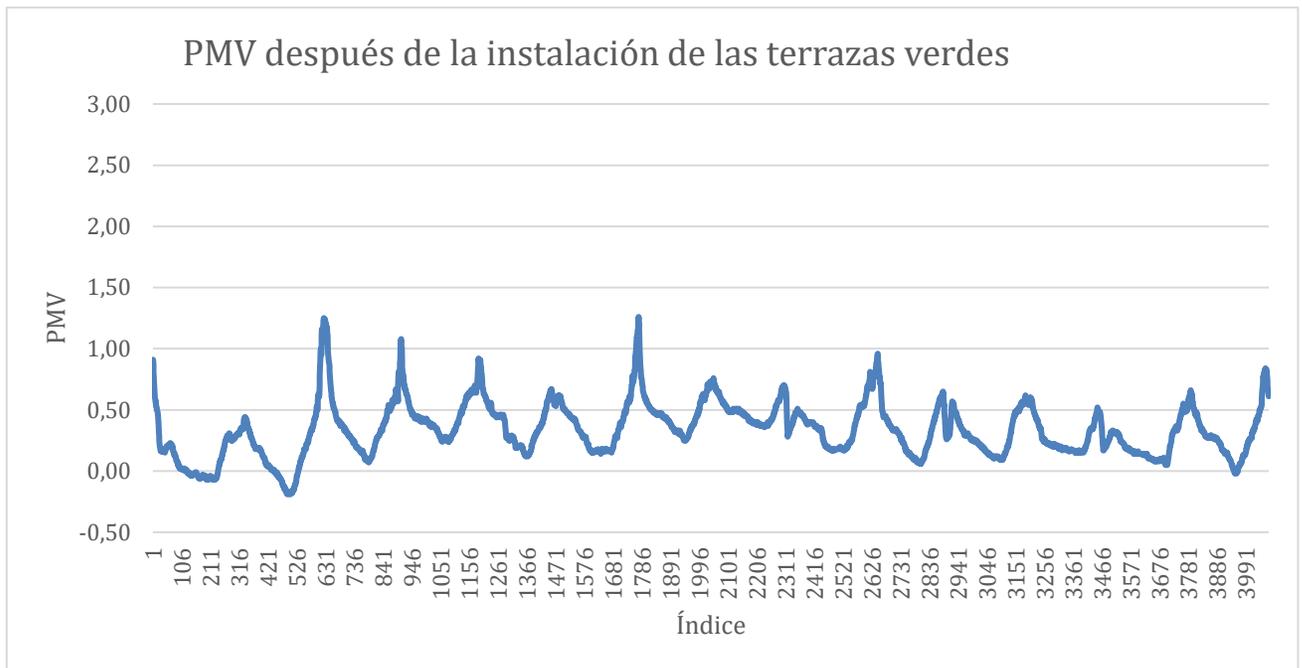


Ilustración 31. PMV después de terrazas verdes (Verde Avignon)

Se observa que los valores de PMV también se reducen. Antes, el PMV en la tarde siempre superaba 1, ahora tan solo se registran tres días dónde se supera dicho valor y nunca se supera un PMV de 1,5. La sensación térmica en la tarde pasó a ser de calor y mucho calor a neutra o algo de calor. El promedio de PMV en la tarde pasó a 0,47, el cual se encuentra dentro de la categoría de ambiente térmico B.

Según lo anterior, no puede afirmarse que los escudos verdes brindan un comportamiento térmico perfecto a la vivienda, pero sin duda ayudan a mejorar significativamente las condiciones de confort.

3.1.2.3 Amortiguación y desfase térmico

La comparación de la temperatura operativa con la temperatura externa del aire se observa en la Ilustración 32.

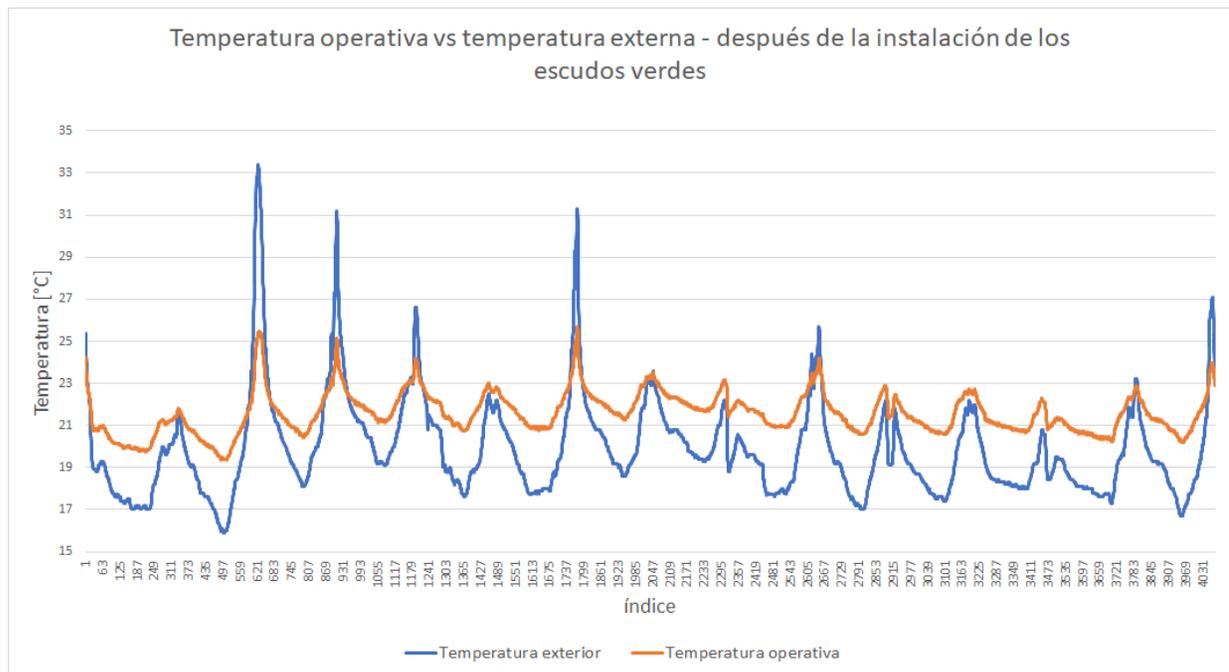


Ilustración 32 Temperatura operativa vs Temperatura externa (segunda medición)

Al igual que en la gráfica de la primera medición, puede observarse que no hay desfase térmico. Por esto puede concluirse que los escudos verdes no ayudan mucho a retardar el calentamiento o enfriamiento de la vivienda. Sin embargo, al analizar la gráfica se observan tres cambios principales en comparación con la primera medición. La temperatura operativa presenta picos y valles mucho menos pronunciados y permanece más constante durante el día, aún en los días donde la temperatura externa presenta picos con altas temperaturas. En la noche, cuando ocurren los valles, la temperatura operativa se mantiene por encima de la externa pero aumenta su valor en comparación con la primera medición. Durante la primera medición se observó que, en los valles, la temperatura operativa se encontraba siempre por debajo de los 20°C, mientras que en la segunda medición se observa

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

que nunca baja de los 20°C. Durante los picos, al contrario, se había observado que la temperatura operativa sobrepasaba a la externa alcanzando valores de hasta 38,92°C. Ahora, luego de la implementación de las terrazas verdes se observa que en días calurosos la vivienda se mantiene por debajo de la temperatura externa, alcanzando un valor máximo de 25,71°C en el día más caluroso, cuya temperatura externa estuvo tan solo 2,5°C por debajo del día más caluroso de la primera medición. En tardes más frías la temperatura operativa se mantiene un poco por encima de la externa, conservando valores cercanos al máximo hallado en el día más caluroso. Esto sugiere que, sin importar la temperatura externa en la tarde, la temperatura operativa de la vivienda conserva un valor más o menos constante.

Con variaciones de hasta 10°C de la temperatura externa en la tarde se observan cambios de tan solo 3°C en la temperatura operativa, mientras que antes de la instalación de las terrazas verdes se observaron variaciones de hasta 13°C en la temperatura operativa en la tarde. Lo anterior indica que las terrazas verdes ayudan a conservar la temperatura durante la noche y permiten mantener la vivienda fresca en días calurosos.

A continuación, en la Tabla 15 y

Tabla 16 se encuentra un resumen de los resultados obtenidos en cada medición, donde es posible observar los valores máximos y mínimos y la desviación estándar de la temperatura exterior y la operativa.

Tabla 15 Resumen resultados antes de implementación Verde Avignon

Verde Avignon-Antes							
T. Exterior (°C)				T. Operativa (°C)			
Max.	Min.	Promedio	D. estándar	Max.	Min.	Promedio	D. estándar

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

35,90	14,30	19,63	3,23	38,92	17,06	21,39	3,51
-------	-------	-------	------	-------	-------	-------	------

Tabla 16 Resumen resultados antes de implementación Verde Avignon

Verde Avignon-Después							
T. Exterior (°C)				T. Operativa (°C)			
Max.	Min.	Promedio	D. estándar	Max.	Min.	Promedio	D. estándar
33,40	15,90	19,87	2,84	25,71	19,37	22,03	0,990

Al comparar las temperaturas exteriores de ambas mediciones no logra identificarse un cambio significativo. Se observa que en el período de la segunda medición hubo tardes un poco más frescas y noches más cálidas, sin embargo, al comparar el promedio de temperatura encontramos una diferencia de 0,24°C y una desviación estándar similar con una diferencia de tan solo 0,39°C. Por otro lado, si se comparan las temperaturas operativas de ambas mediciones se encuentra un promedio similar con una diferencia de 0,64°C, pero se presenta una gran diferencia entre los valores máximos y la desviación estándar de los datos. Se observa que los valores máximos presentan una diferencia de 13,21°C y la desviación estándar de 2,52°C. Esto significa que la amplitud de la temperatura operativa después de implementar los escudos verdes se reduce significativamente, es decir, que las plantas brindan un buen amortiguamiento térmico y ayudan a mantener la temperatura constante a lo

largo del día, lo que demuestra que las terrazas verdes efectivamente tienen un efecto positivo en la regulación de la temperatura y en el confort térmico.

3.2. Alternativa de diseño

3.2.1. Desarrollo del modelo

3.2.1.1. Consideraciones iniciales

Para el desarrollo del diseño se tomo como ejemplo el modelo mostrado en la Ilustración 33. Este diseño de vivienda corresponde a un edificio VIS ubicado en el sector de Bello. Este proyecto en particular cuenta con dos tipos de vivienda, una de ellas es considerada familiar, la cual se tomo como ejemplo o base para el diseño. Esta cuenta con 40 m², dos cuartos, principal y auxiliar, baño, sala-comedor, cocina y pequeño cuarto de ropas. Estas son áreas basicas para garantizar una habitabilidad digna.



PLANTA B
40.00 m² area construida
36.80m² area privada

* Las áreas ofrecidas corresponden a la suma de las áreas cubiertas y descubiertas, más el área que ocupan los muros internos y de cerramiento del bien inmueble. En el desarrollo de la obra puede haber cambios sugeridos por diseños hidráulicos, estructurales, sanitarios, de gas y ambientales. * Estas son ilustraciones, no comprometen al constructor

Ilustración 33 Ejemplo de VIS

En la Ilustración 34 se observa el mapa geográfico de Colombia utilizado por la Serie de Guías de Asistencia Técnica para Vivienda de Interés Social para definir el tipo de clima correspondiente a cada región. Según esta fuente, Medellín se ubica en una región donde la temperatura se considera templada. Esto se tendrá en cuenta durante el desarrollo del modelo para la definición de diferentes parámetros, tales como materiales y orientación.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

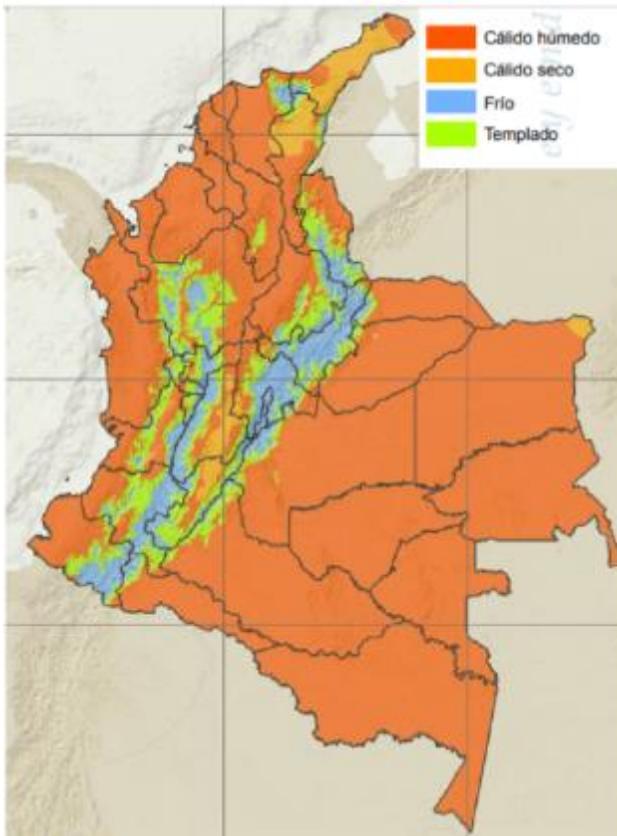


Ilustración 34 Definición de clima ciudad de Medellín (resolución 0549 de 2015)

Es importante considerar que el modelo corresponde a una edificación VIS, por lo tanto, se tendrán numerosas viviendas por piso, por lo que se decidió modelar el caso considerado más frecuente con una sola de las fachadas expuesta al exterior.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La fachada expuesta es posible observarla en la Ilustración 35.

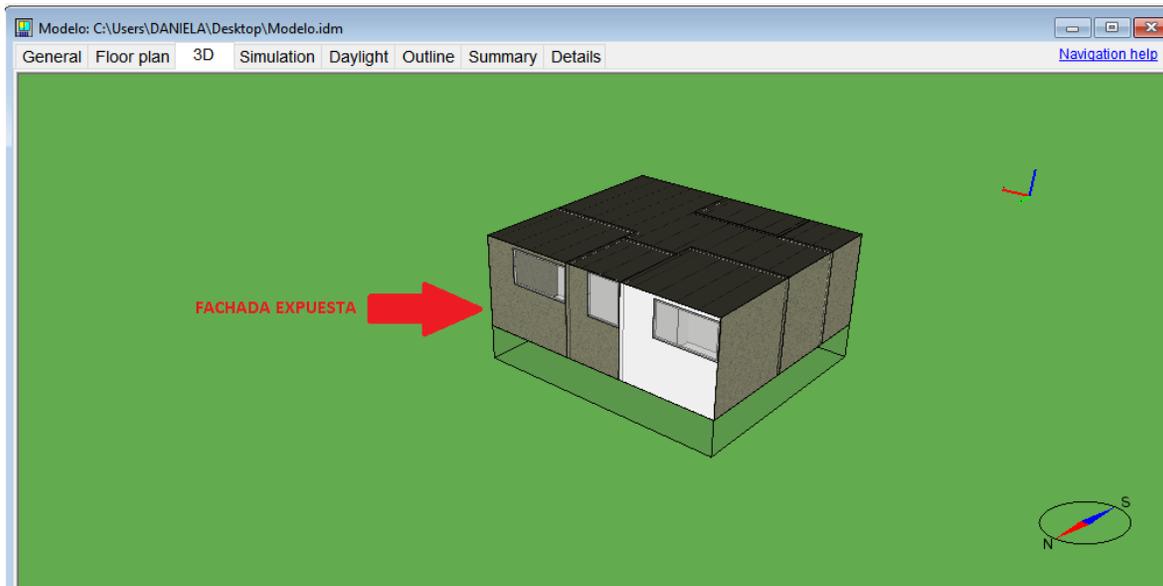


Ilustración 35 Fachada expuesta del modelo

En la Ilustración 35 se evidencia el modelo terminado en el software de IDA ICE. En éste se muestra la distribución de la vivienda, al igual que en la Ilustración 37.

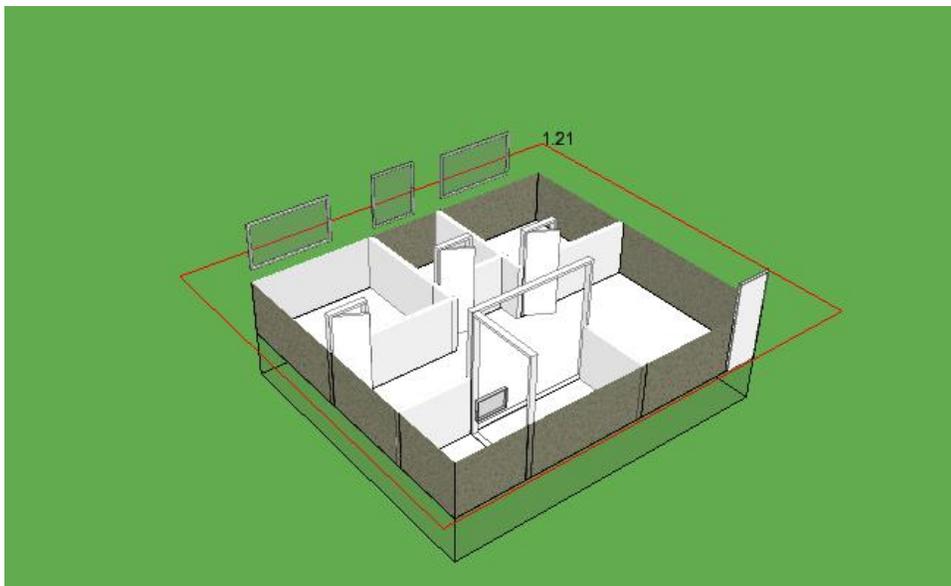


Ilustración 36 Modelo arquitectónico de la vivienda

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

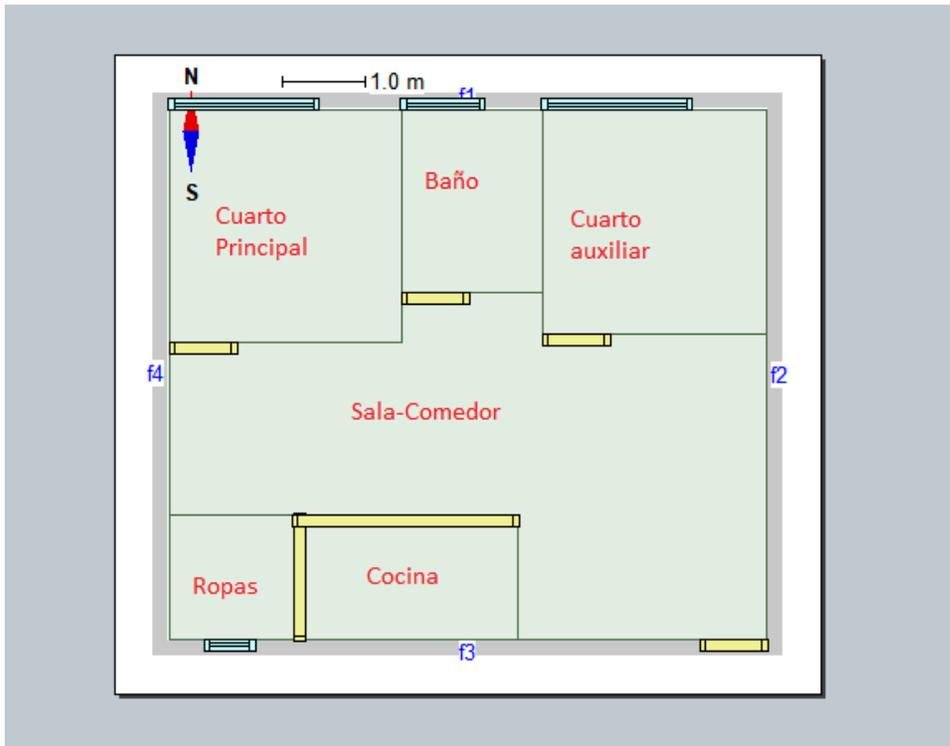


Ilustración 37 Designación de áreas de la vivienda

La fachada expuesta en la Ilustración 37 es la que mira hacia el norte.

3.2.1.2. Medidas para el modelo

El diseño de la vivienda se hizo con base en la Serie de Guías de Asistencia Técnica para Vivienda de Interés Social (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2011)". En las guías es posible encontrar las medidas mínimas requeridas para una vivienda digna que asegura habitabilidad, estándares de calidad y de diseño. Las dimensiones expuestas en la guía se resumen en la Tabla 17 mismas que fueron mostrados en la Tabla 8 Materiales recomendados para viviendas de bajo costo. En estas guías también se presentan las dimensiones mínimas para la vivienda, las cuales se presentan a continuación en la Tabla 17.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 17 Medidas mínimas y definitivas de la vivienda (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2011).

	MEDIDAS				
	LADO MIN. POR NORMA	ANCHO MODELO	LARGO MODELO	AREA MIN. POR NORMA	AREA TOTAL MODELO
HABITACIÓN PRINCIPAL	2,7	2,8	2,8	7,3	7,84
HABITACIÓN 2	2,7	2,7	2,7	7,3	7,29
COCINA	1,5	1,5	2,7	3,6	4,05
ROPAS	0,8	1,5	1,5	1,1	2,25
BAÑO	1,6	1,7	2,2	2,88	3,74
SALA-COMEDOR	2,7	20,71		7,29	20,71
TOTAL				29,47	45,88

Aunque la norma y las guías establecen unos valores mínimos se decidió usar unos valores mayores a estos tomando como ejemplo varios modelos de vivienda que pertenecen a la misma categoría ya construidas, de esta manera se le brinda mayor comodidad al habitante y sigue estando dentro de los estándares de costos de construcción. Los valores tomados y definidos como definitivos para el desarrollo del modelo son aquellos correspondientes a las columnas de ancho modelo, largo modelo y área total modelo de la tabla 17.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.2.1.3. Materiales y medidas

A continuación, en la Tabla 18, se muestran los materiales utilizados en cada zona de la vivienda en el desarrollo del modelo con sus respectivas características.

Tabla 18 Materiales y características definitivas para el modelo en IDA ICE

Características de los materiales						
Elemento	Material	Espesor (m)	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (W/m*K)	Calor específico (J/kg k)	Transmitancia térmica (W/m ² *K)
Muros externos	Concreto	0,12	2300	1,7	880	4,057
Muros internos	Mampostería	0,12	1000	0,58	840	2,653
Suelo	Concreto	0,12	2300	1,7	880	4,156
Techo	Concreto	0,12	2300	1,7	880	4,156
Vidrios	Vidrio sencillo					5,88
Puerta	Madera MDF	0,036	500	0,14	2300	2,341
Puerta entrada	Metal	0,022	7800	60	460	5,87

En la Tabla 19, se exponen las medidas tomadas para los diferentes elementos que componen cada zona, las medidas fueron tomadas de diferentes catálogos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 19 Tabla 19 Medidas de puerta y ventanas modelo IDA ICE

Dimensiones			
	Ancho	Alto	Área
Ventana interior (cuarto de ropas)	0,6	0,4	0,24
Ventana cuarto principal	1,8	1	1,8
Ventana cuarto auxiliar	1,8	1	1,8
Ventana baño	1	1,2	1,2
Puertas internas	0,8	2	1,6
Puerta entrada (metálica)	0,9	2,1	1,89

3.2.1.3.1. Fachada

En la Tabla 6 se definieron los materiales recomendados según la serie de guías para la construcción de viviendas de interés social para cada tipo de ambiente. Como ya se había mencionado, Medellín se encuentra en una zona considerada como clima templado, por lo que se definió usar mampostería estructural para la fachada con ladrillo de 0,12 metros de espesor. En la Tabla 20 se puede observar de manera detallada la recomendación de la guía para construcción, el cuadro rojo en la tabla encierra el material escogido para los muros, que corresponde a una solución convencional para clima templado.

Tabla 20 Material recomendado para muros (Díaz Reyes & Ramírez Luna, 2011)

Actividades de construcción	Clima frío 12°-17.5°C		Clima templado 17.5°-24°C	
	Tradicional	Convencional	Tradicional	Convencional
MUROS	Adobe	Unidades de mampostería	Esterilla de guadua con barro	Unidades de mampostería

En la Ilustración 38 en la parte inferior es posible observar cómo se definió este material para la fachada y sus características en el software IDA ICE.

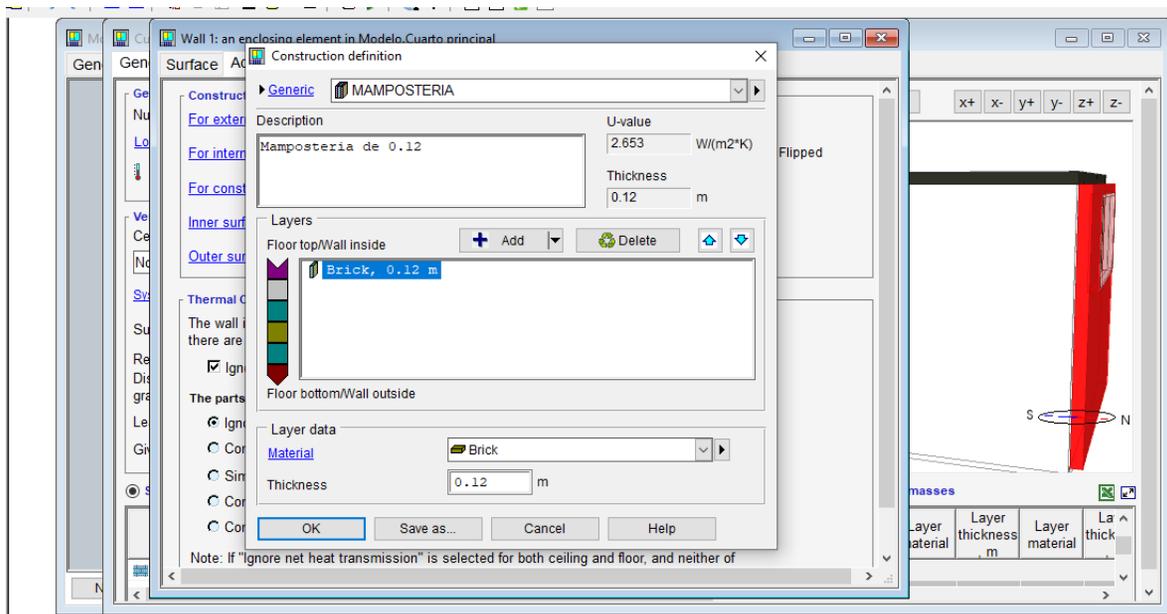


Ilustración 38 Definición de mampostería en el software IDA ICE

3.2.1.3.2. Ventanearía

Para el diseño del cuarto de ropas, el cual tiene conexión con la cocina, se tomó la decisión de usar una ventana tradicional con las características mencionadas

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

anteriormente, ya que éste posiblemente dé a un corredor interno del edificio. Esta ventana por norma tiene un ancho máximo de 800 mm. Se definió usar una ventana con medidas y propiedades ya definidas por ALCO (empresa especializada en diseño de ventanearía y marcos), la cual corresponde a una ventana de 600 mm*400 mm. En la Ilustración 39 se puede observar la ubicación de la ventana correspondiente al cuarto ropas, la cual cuenta con las características mencionadas anteriormente en la Tabla 18 Materiales y características definitivas para el modelo en IDA ICE.

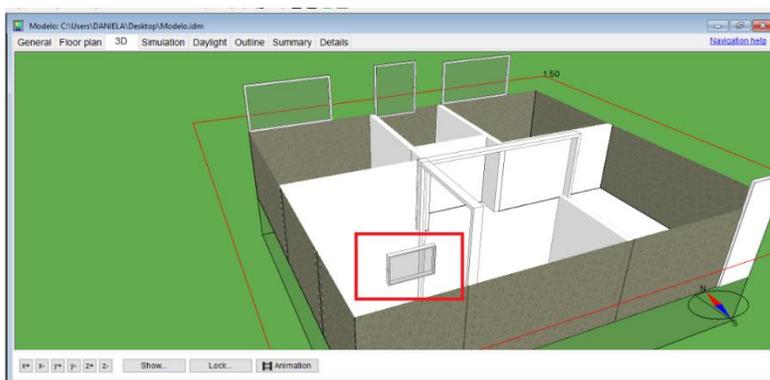


Ilustración 39 Ubicación ventana cuarto de ropas

En el cuarto principal se decidió usar un modelo de ALCO en aluminio que cuenta con las medidas mencionadas en la Tabla 19 y las características de la Tabla 18. El cuarto auxiliar y baño se equiparon con una ventana con la misma descripción, pero diferentes dimensiones como se muestra en las tablas 19 y 18. La ubicación de las

ventanas se observa en la Ilustración 40.

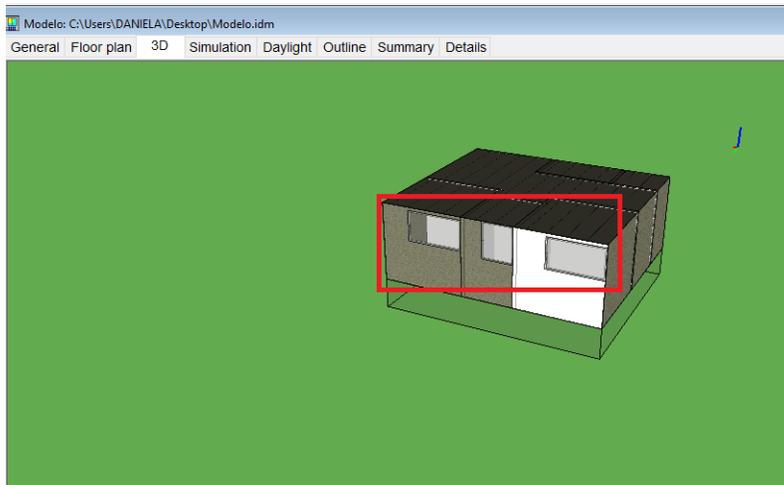


Ilustración 40 Ubicación de ventanas cuarto principal, cuarto auxiliar y baño

La Ilustración 41 muestra la ventana de la empresa ALCO seleccionada para el diseño de la vivienda.

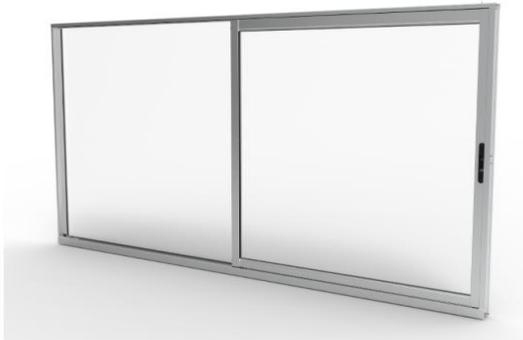


Ilustración 41 Ventanearía estándar escogida

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.2.1.3.3. Puertas

Las puertas internas y de entrada fueron tomadas de catálogos ya definidos con características definidas (ver Tabla 18 y Tabla 19). En la Ilustración 42 es posible observar la puerta utilizada para las habitaciones.

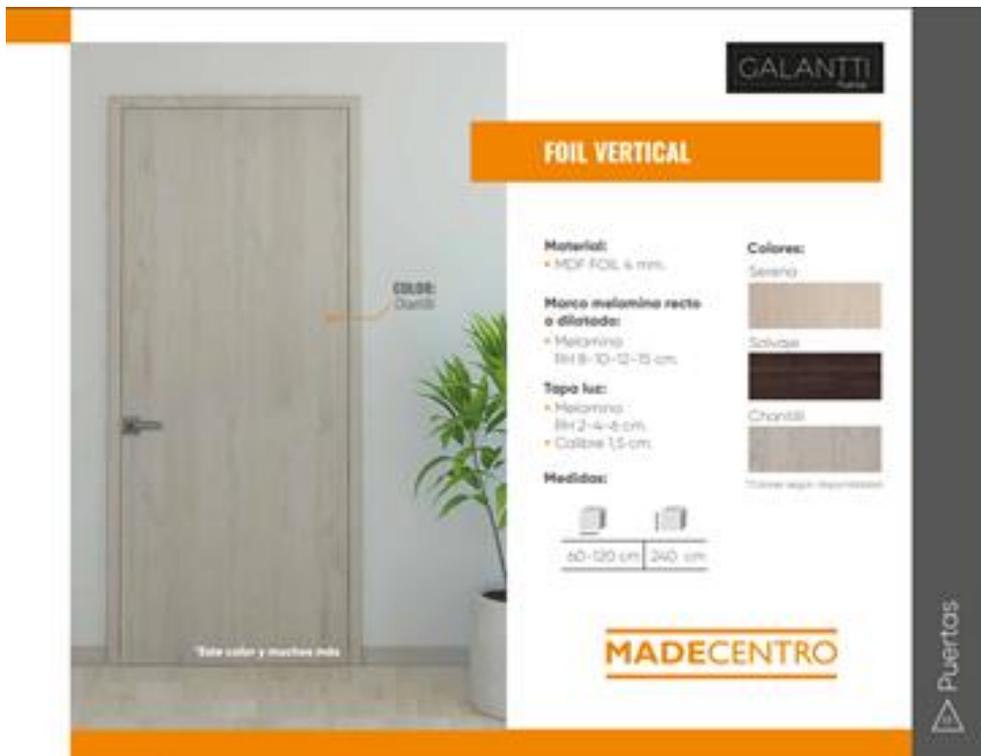


Ilustración 42 Puerta interna (cuarto principal, auxiliar y baño) (HOMECENTER, 2019)

Para la puerta de la entrada se decidió usar una metálica para brindar mayor seguridad a la vivienda, calibre 22, como se muestra en la Ilustración 43 Puerta metálica, entrada de la vivienda.

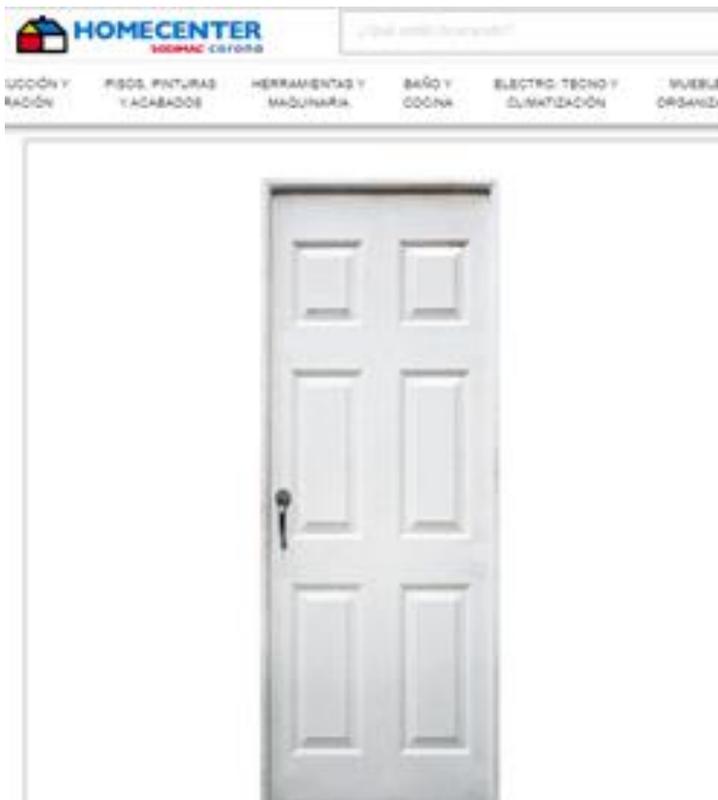


Ilustración 43 Puerta metálica, entrada de la vivienda (HOMECENTER, 2019)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.2.1.4. Consideraciones y características térmicas y energéticas generales del modelo

3.2.1.4.1. Temperaturas extremas

Para la vivienda se tomaron valores de temperatura máximos y mínimos basados en el estudio realizado en Verde Avignon, ya que corresponden a dos épocas del año con condiciones climáticas diferentes. El mínimo fue de 14°C y el valor máximo fue de 36°C, como se muestra en la Ilustración 44.

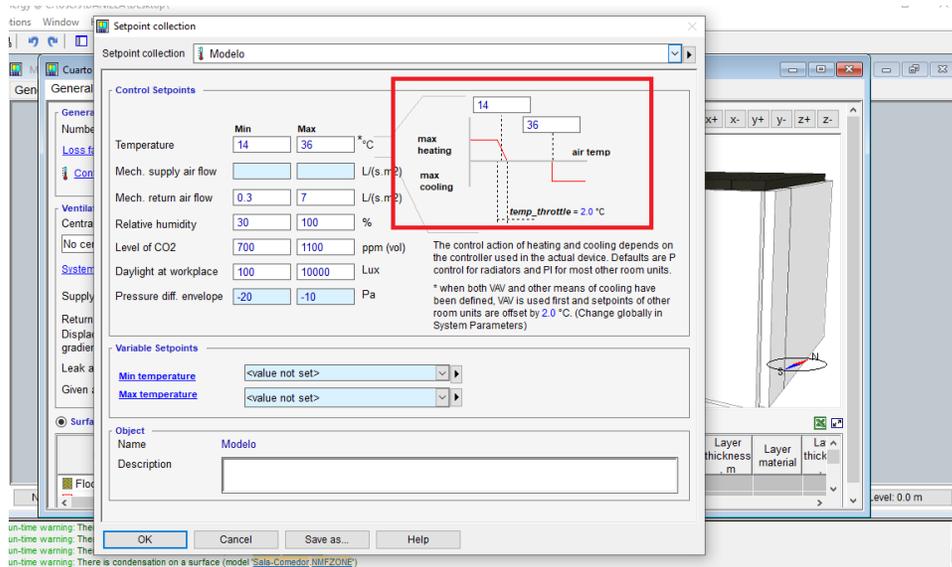


Ilustración 44 Temperatura máxima y mínima considerada para el desarrollo del modelo

3.2.1.4.2. Habitantes

Se consideró una tasa metabólica (MET) de 1,2 y una vestimenta promedio con un valor de $0,5 \pm 0,0$, este valor fue tomado de la ASHRAE (ver Ilustración 45).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

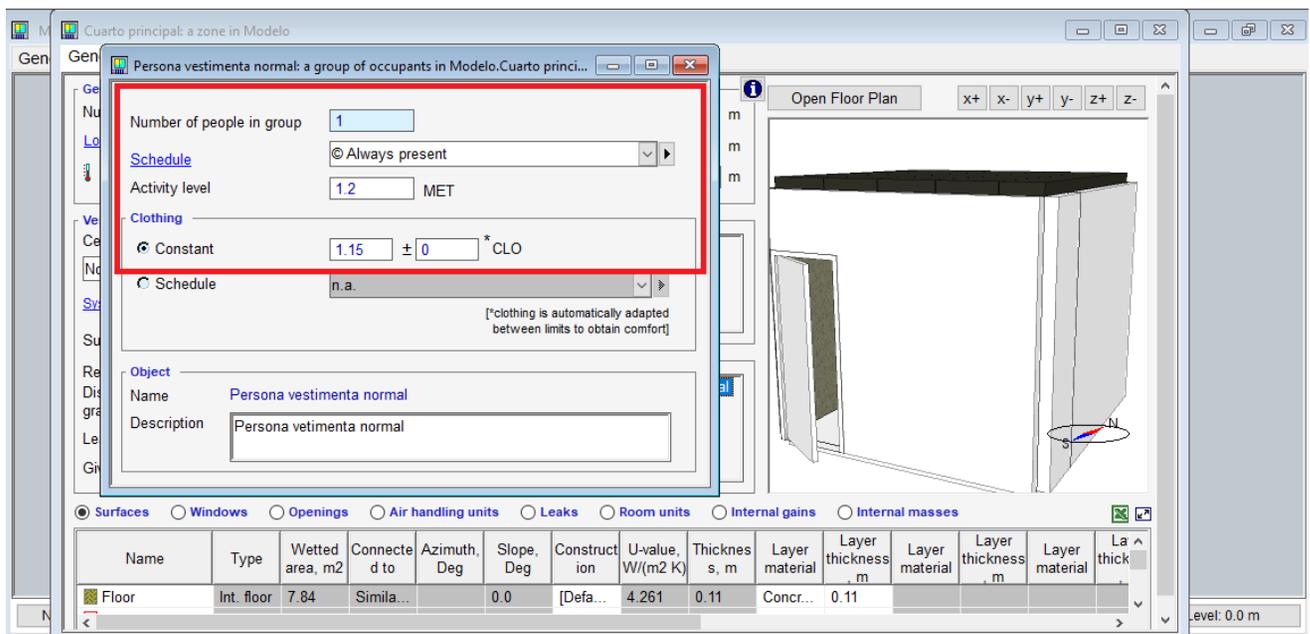


Ilustración 45 Características de vestimenta y actividad de los habitantes

3.2.1.4.3. Iluminación

La iluminación interna de la vivienda fue modelada según el horario. En la Ilustración 46 si la barra se encuentra en la parte inferior significa que permanece apagada, mientras que si permanece en la parte superior la luz estará encendida. Se consideró que la luz se utilizaría en las horas de la mañana y noche, como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Sin embargo, esto es algo incierto ya que podría depender de la iluminación natural del día y el gusto personal de cada habitante, por esto se toman unos valores básicos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

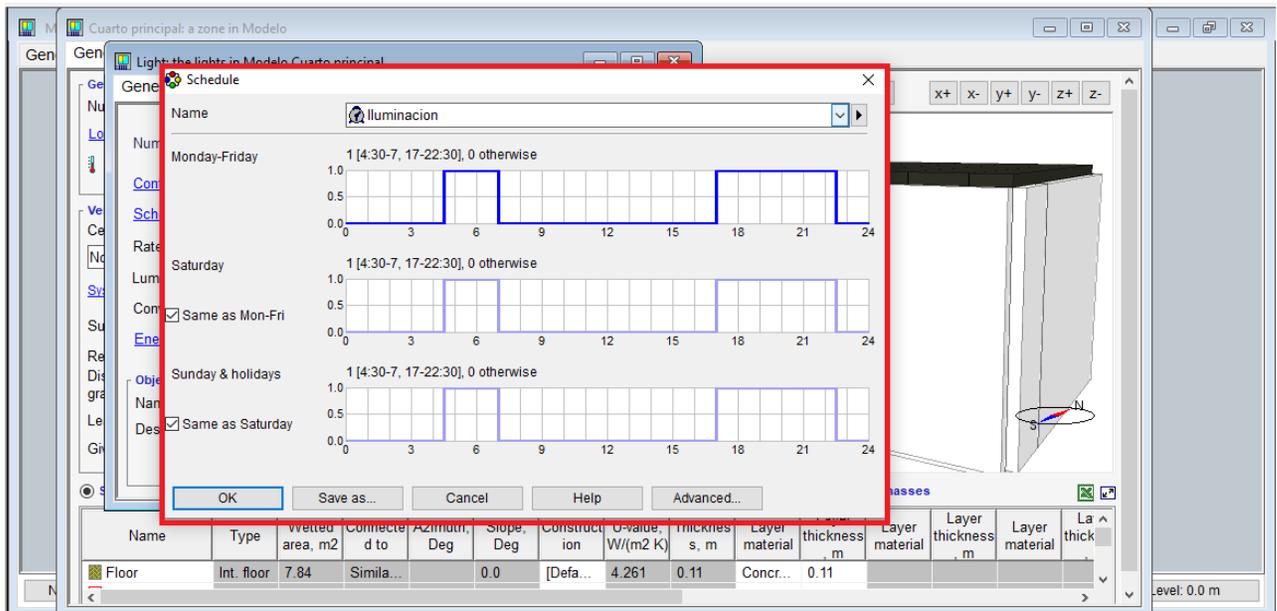


Ilustración 46 Horarios de iluminación (Cuarto principal, cuarto auxiliar, sala-comedor)

Para el área del baño se definieron varios intervalos para el encendido de la iluminación, ya que esta generalmente no es usada durante todo el día. A continuación, en la Ilustración 47 Horario de iluminación (Baño), se muestra su horario en intervalos de pocos minutos.

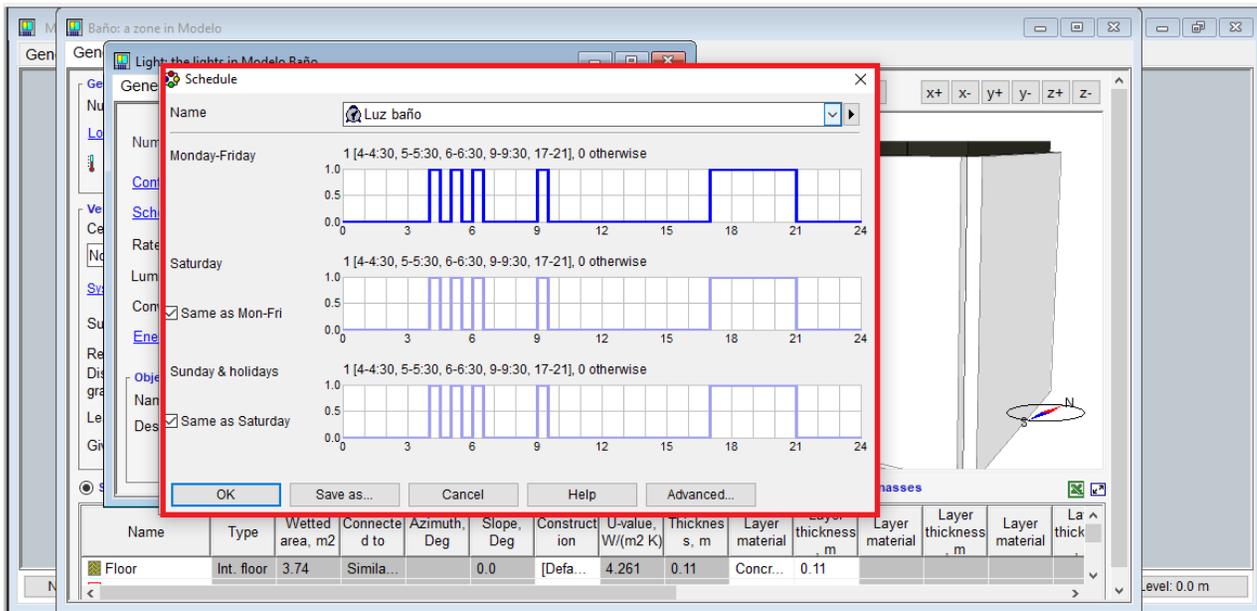


Ilustración 47 Horario de iluminación (Baño)

3.2.1.4.4. Infiltración

La infiltración de aire es un factor que debe ser considerado en el diseño de la vivienda ya que afecta directamente el confort térmico, al igual que la eficiencia energética, sobre todo en aquellas viviendas que necesitan sistemas auxiliares de calefacción o aire acondicionado para alcanzar un confort. Esto sucede ya que estos sistemas requieren más energía para mantener la temperatura interna (Maratum, 2015). En el modelo se consideró un valor fijo de 0,3 ACH (cambios de aire por hora) para viviendas sin ventilación, de acuerdo con ASHRAE 62-2001. Para las viviendas de este tipo, sin ningún sistema de ventilación, los cambios de aire por hora alcanzan un 30% del volumen de la vivienda, lo que corresponde al valor asignado (Beaton et al., 2004). En la Ilustración 48 se puede observar la configuración de este parámetro en el software.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

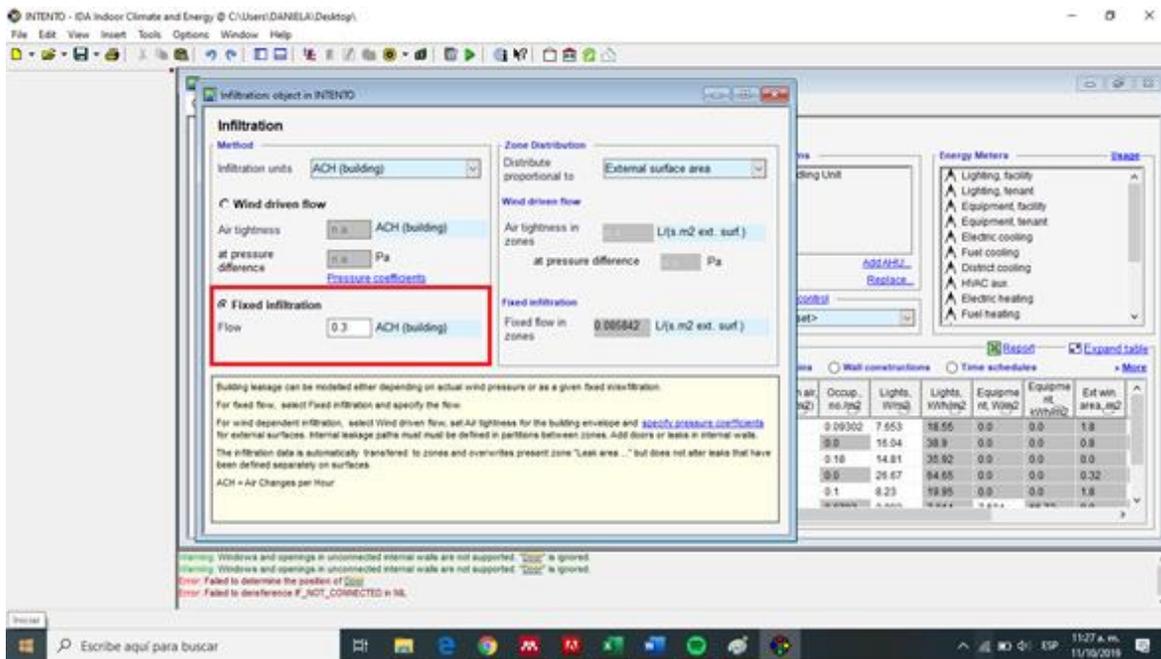


Ilustración 48 Definición de infiltración en el software

3.2.1.4.5. Puentes térmicos

Los puentes térmicos son aquellos puntos en los que se puede transmitir calor más fácilmente que en otros sectores de la vivienda y se presentan cuando hay un cambio en la geometría de la envolvente o un cambio de materiales o resistencia térmica. A través de estos puentes es posible perder del 5% al 10% del calor de la vivienda y en caso de que alberguen agua pueden llegar a generar humedades debido a la condensación (Maratum, 2015). Por ello debe tenerse en cuenta dónde se pueden presentar. A continuación, en la Ilustración 49 Puentes térmicos y sus

valores, se muestran los puntos indicados por el software y sus valores, éstos fueron calculados directamente por el software.

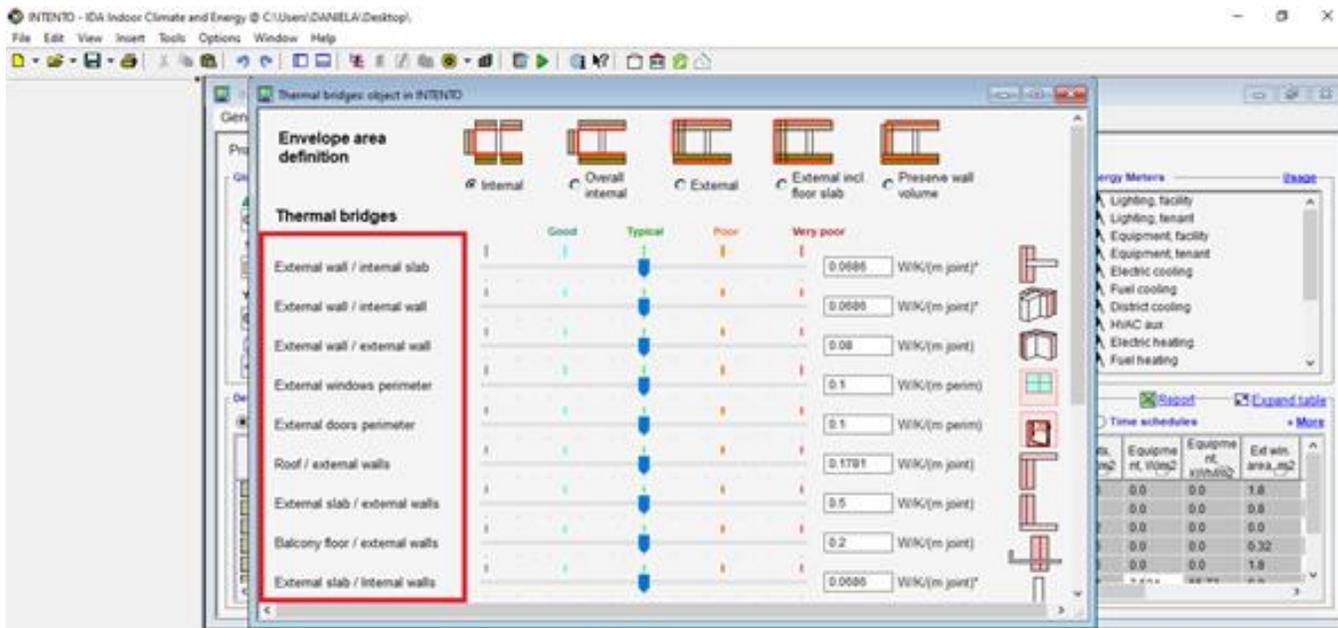


Ilustración 49 Puentes térmicos y sus valores

Con base en los puentes térmicos definidos, el programa calculó un factor de pérdida para cada área, es importante tener en cuenta que éste varía según sus componentes y materiales. En la Ilustración 50 se observa cómo el software IDA ICE entrega los valores de pérdida por puentes térmicos. En la Tabla 21 se muestran los valores correspondientes a pérdidas por puentes térmicos de cada área de la vivienda del modelo.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

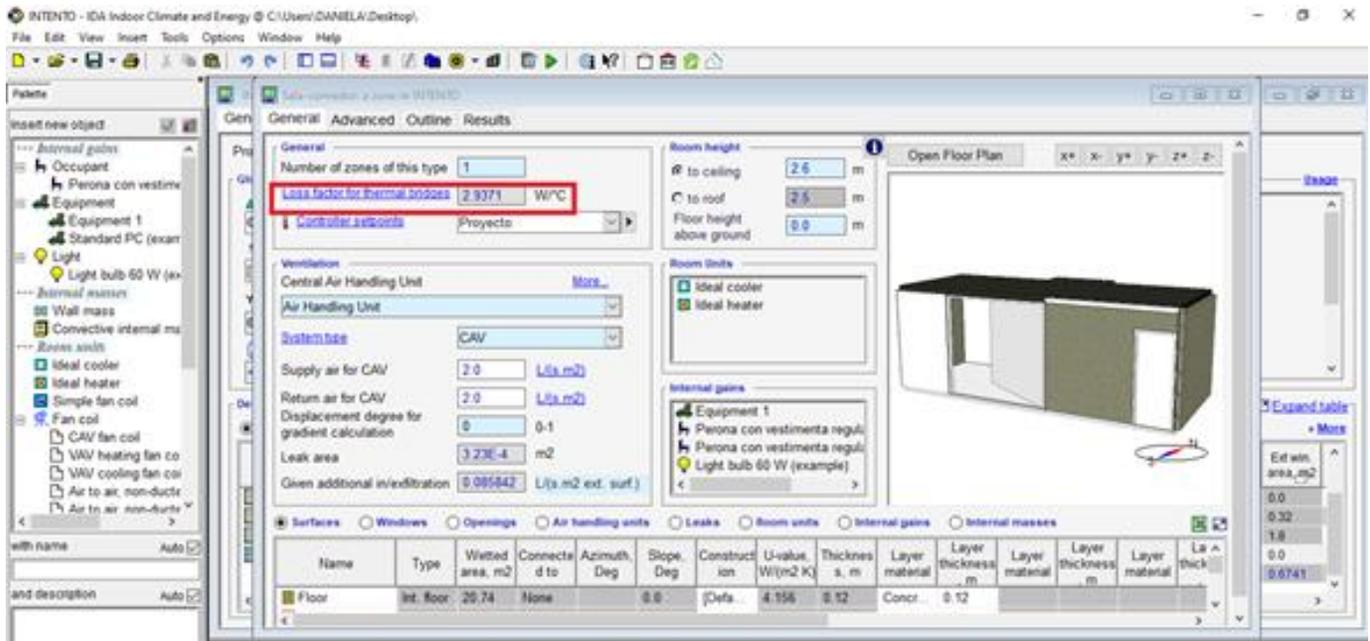


Ilustración 50 Valor de pérdida por puentes térmicos en el software

Tabla 21 Factores de pérdida por puentes térmicos en cada zona

	Factor de pérdida por puentes térmicos
Habitación principal	2,3402
Habitación 2	2,2904
Cocina	0,95989
Ropas	1,3582
Baño	1,3331
Salón	3,4929

3.2.1.4.6. Sistemas internos de ventilación

El software permite hacer una modelación para sistemas de calefacción y aire acondicionado, sin embargo, como la modelación se supone para una vivienda típica de característica VIS ubicado en la ciudad de Medellín no se consideró

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

ninguno de estos sistemas como se muestra en la Ilustración 51.

Modelo: C:\Users\DANIELA\Desktop\Modelo.idm (Zones)

Name	Group	Floor height, m	Room height, m	Floor area, m2	Heat setp., °C	Cool setp., °C	AHU	System	Supply air, L/(s.m2)	Re...
Cuarto principal		0.0	2.6	7.84	14.0	36.0	No central AHU	n.a.	n.a.	n.a.
Baño		0.0	2.6	3.74	14.0	36.0	No central AHU	n.a.	n.a.	n.a.
Cuarto princip...		0.0	2.6	7.29	14.0	36.0	No central AHU	n.a.	n.a.	n.a.
Ropas		0.0	2.6	2.25	14.0	36.0	No central AHU	n.a.	n.a.	n.a.
Cocina		0.0	2.6	4.05	14.0	36.0	No central AHU	n.a.	n.a.	n.a.
Sala-Comedor		0.0	2.6	20.71	14.0	36.0	No central AHU	n.a.	n.a.	n.a.
Total/m2										

Ilustración 51 Indicación de uso de sistemas internos de ventilación en el software

3.2.2. Condiciones de simulación

El software IDA ICE cuenta con varias metodologías para simular una situación, sin embargo, se queda corto en información climática para Colombia. Por esta razón se decidió hacer uso de un archivo con base en temperaturas tomadas en la zona de Rionegro, donde se encuentra la única estación meteorológica de Antioquia reconocida por el software. Con estos registros de temperatura el software modeló el comportamiento de la vivienda durante el periodo elegido, el cual fue de un año desde: 1 de junio de 2018 a 30 de junio de 2019, como se aprecia en la Ilustración 52.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

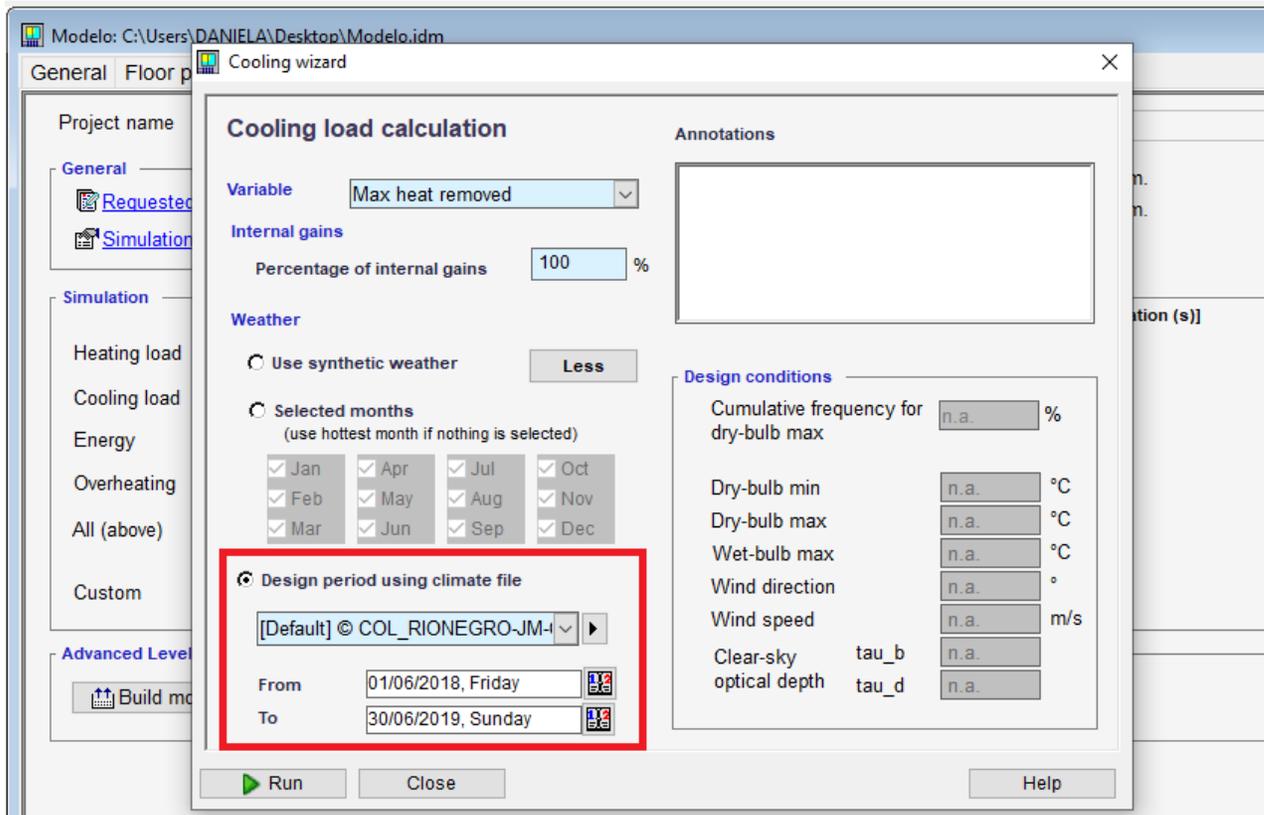


Ilustración 52 Definición de tiempo y condiciones de simulación en el software

3.2.3. Resultados arrojados por el modelo

El software IDA ICE (Ilustración 53 arroja los siguientes resultados:

- Temperatura operativa
- Humedad relativa
- Temperatura radiante media
- Temperatura exterior del aire
- Índice de PPD

El software igualmente permite visualizar cómo se comporta cada zona de la vivienda a lo largo del período de análisis (ver Ilustración 54 Ejemplo del comportamiento de las distintas zonas en determinado punto de la simulación).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

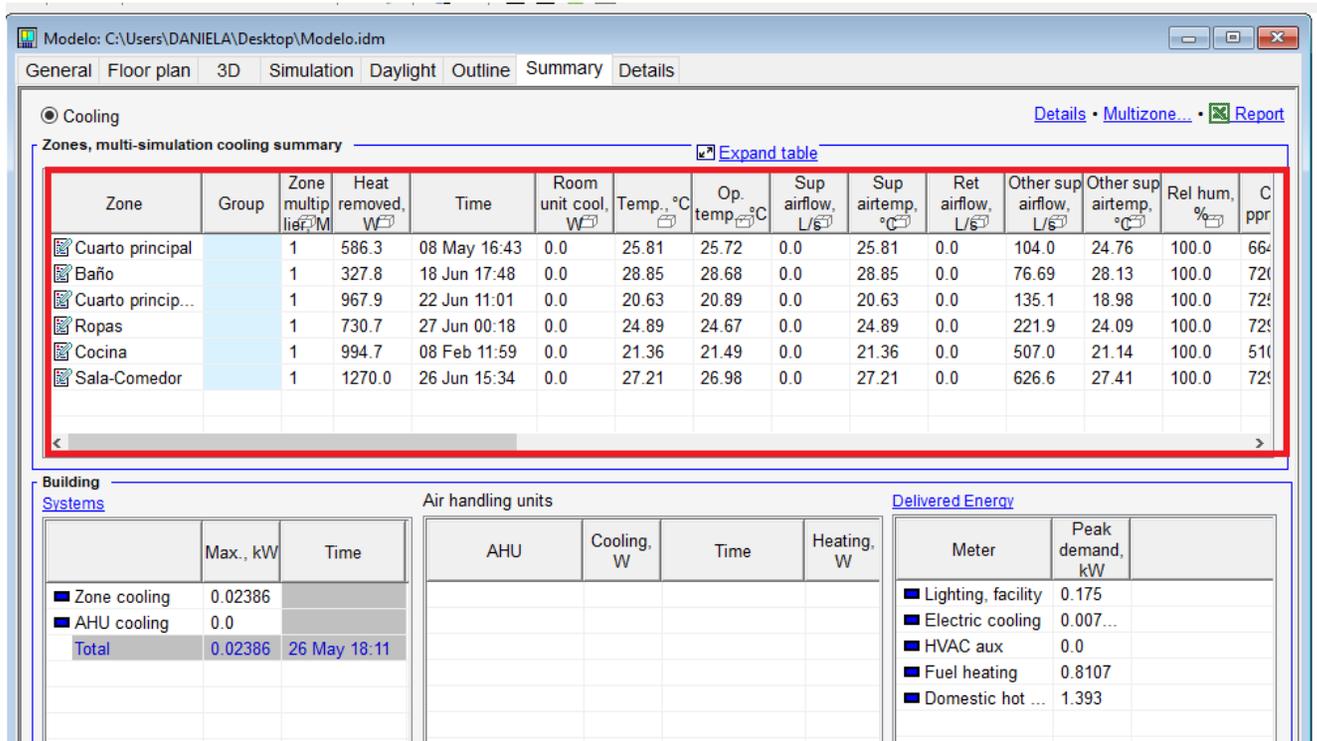


Ilustración 53 Tabla de resultado exhibida por IDA ICE

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

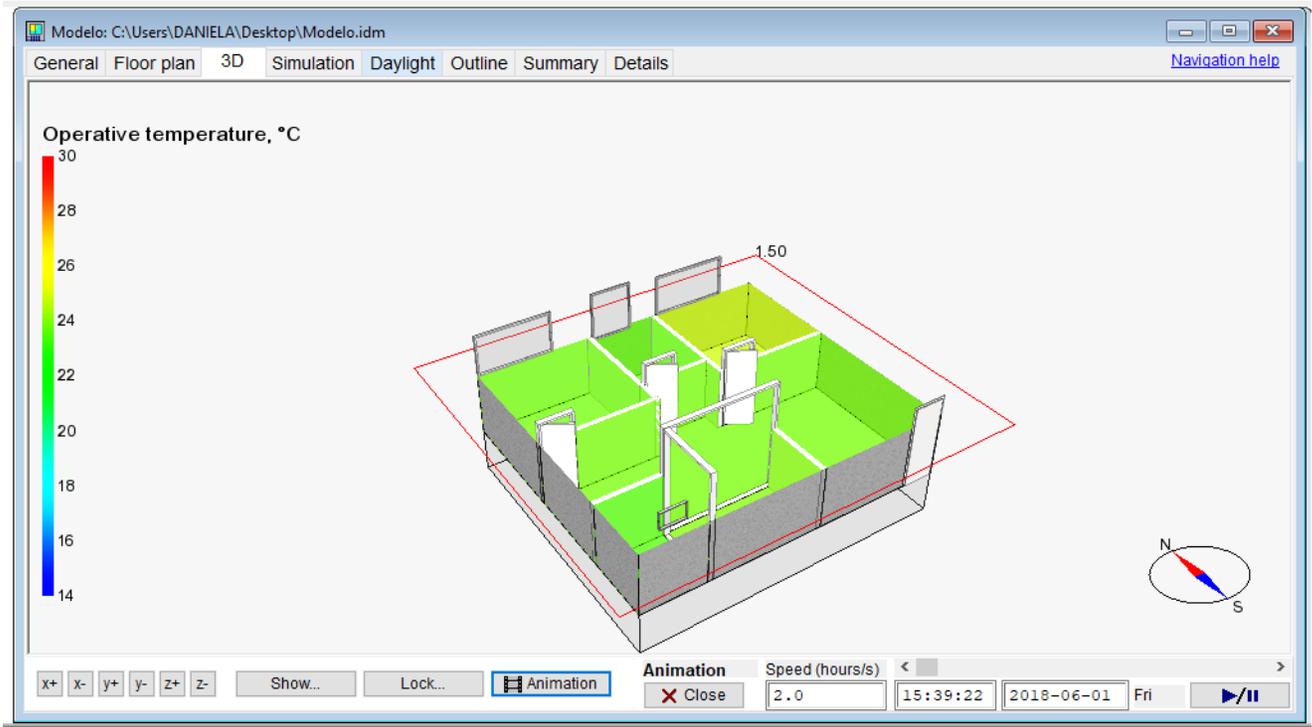


Ilustración 54 Ejemplo del comportamiento de las distintas zonas en determinado punto de la simulación

3.2.4. Instalación de vegetación

Como se mencionó en secciones previas, existen varios tipos de fachadas verdes. Para la construcción del modelo se decidió seleccionar la vegetación indirecta. Se escogió este método constructivo por los beneficios mencionados en el marco metodológico. En la Tabla 22 se exponen nuevamente las ventajas y desventajas de este método constructivo.

Tabla 22 Ventajas y desventajas de la vegetación indirecta

Método constructivo	Ventajas	Desventajas
Vegetación indirecta	- No hay contacto directo entre vegetación y fachada	- Costos más elevados de mantenimiento

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

	<ul style="list-style-type: none"> - Adecuando para proyecto de modernización. - Apto para construcciones antiguas sin problemas de humedad. - Incrementa la biodiversidad - Posibilidad de mejor calidad de vida - No necesita sistema de riego - Reducción de temperatura al interior y exterior de la vivienda por sombra y evapotranspiración. - Genera valor agregado a vivienda por estética 	<ul style="list-style-type: none"> - Largos periodos de crecimiento de la vegetación - Máxima altura de 25 metro
--	---	--

3.2.4.1. Características de los materiales y desarrollo del modelo con fachada verde

Para simular la fachada verde se ingresaron valores de espesor y de resistencia térmica como lo expone Papadopoulou, G. I. (2013) en “Green Walls as element of bioclimatic design in Mediterranean Urban Buildings” y la Growing Green Guide (2016). En la Ilustración 55 e Ilustración 56 es posible observar cómo se implementó la fachada que cuenta con 3 capas correspondientes a:

- Mampostería → 0.12m
- Espaciamiento → 0.05m
- Vegetación → 0.15m

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

El software simula las capas correspondientes y modela el diseño deseado con los espesores y resistencias asignadas.

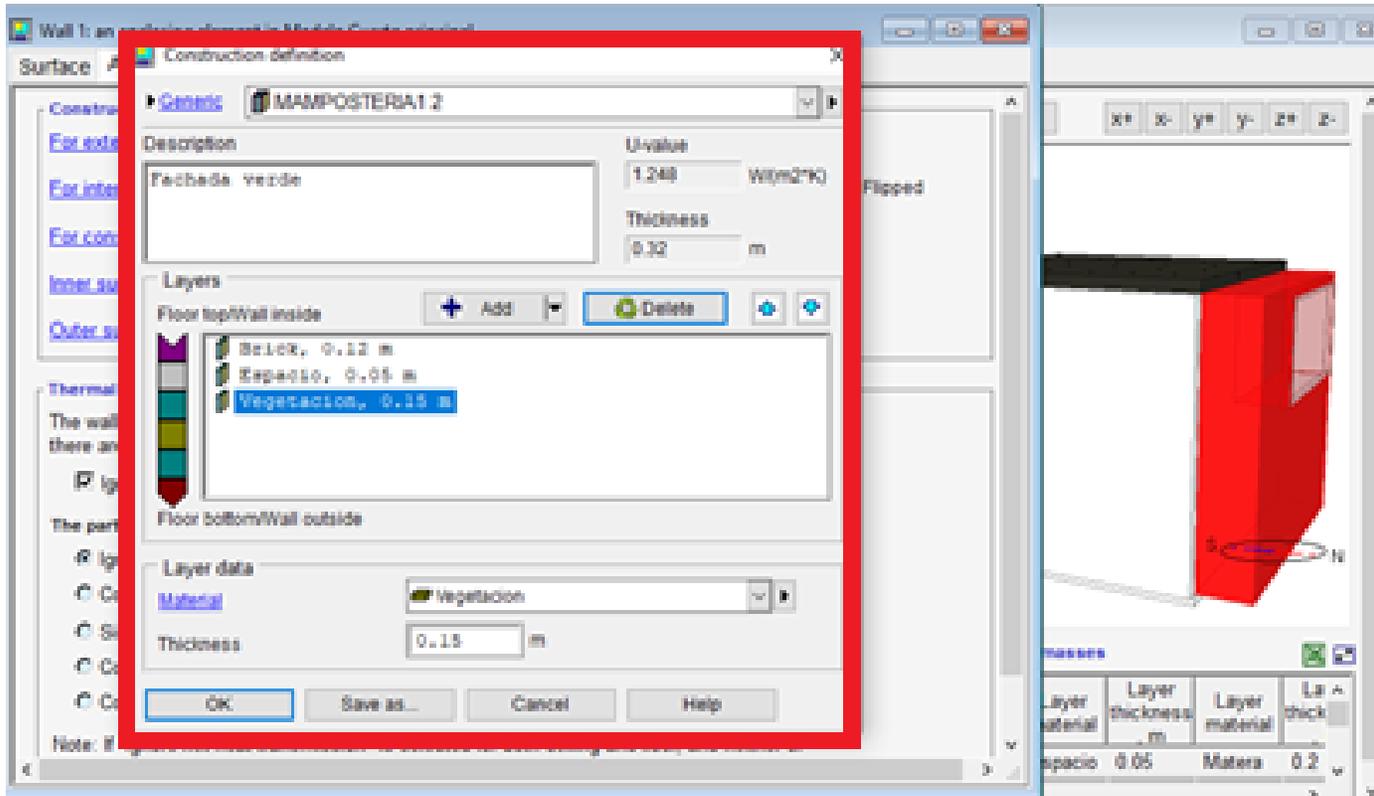


Ilustración 55 Desarrollo de fachada con vegetación en IDA ICE

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

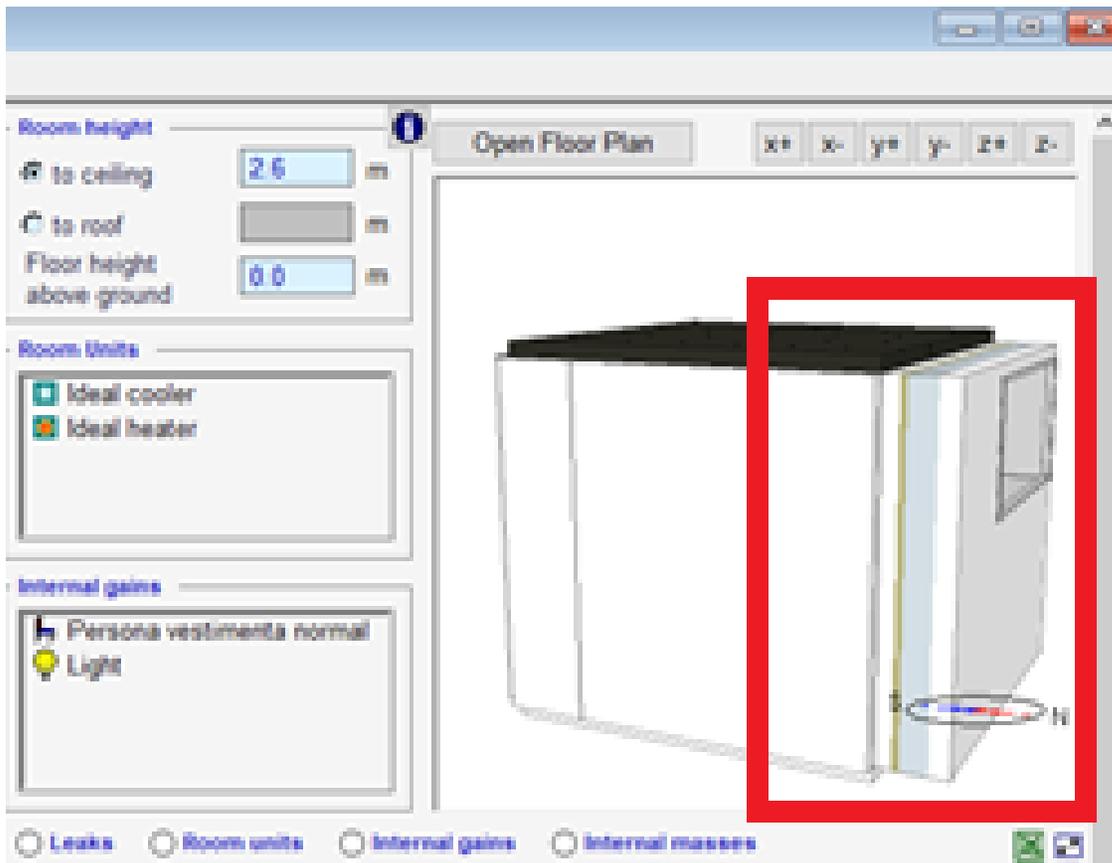


Ilustración 56 Fachada vegetal implementada

En la Tabla 23 se exhiben las características de cada capa usada para el diseño de la fachada en software, estas son las características que condicionan el comportamiento del modelo y la temperatura al interior de la vivienda.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 23 Características de las capas de la fachada verde

Características de los materiales						
Elemento	Material	Espesor (m)	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (W/mK)	Calor específico (J/kg k)	Transmitancia térmica (W/m ² *K)
Muros internos	Mampostería	0,12	1000	0,58	840	2,653
Espaciamiento	Aire	0,05	1,2	0,17	1006	2,155
Vegetación	Vegetación	0,15	1,15	1600	800	3,329

3.2.5. Validación del modelo

Para la validación del modelo se siguió el proceso propuesto por Naylor y Finger expuesto en el marco metodológico.

1. Construir un modelo que tenga una alta validez facial:

La validez facial se refiere a la relevancia de los ítems de la prueba y el grado de efectividad en términos del objetivo final. La validez facial, también llamada validez lógica es una forma simple para valorar si el modelo mide lo que se supone que debe medir. Consta de una valoración superficial y subjetiva y por lo general no incluye medidas objetivas (Prada, 2009).

Puede afirmarse que el modelo construido tiene una alta validez facial, ya que se utilizó un software especialmente diseñado para modelaciones térmicas y lo que quiere medirse es la temperatura. El software arroja valores de temperatura exterior del aire, temperatura operativa de la vivienda e índice PPD, los cuales fueron los utilizados para evaluar el confort en el caso de estudio. Por medio de estos valores arrojados por el software puede realizarse el mismo análisis para la solución propuesta y se pueden comparar los resultados con los obtenidos en Verde

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Avignon. Por esto se concluye que los resultados que arroja el modelo son relevantes y efectivamente miden lo que se quiere medir.

2. Validar las suposiciones hechas en el modelo por medio de bibliografía o datos experimentales:

Como acaba de exponerse en los numerales anteriores, todas las suposiciones hechas para construir el modelo parten de la Serie de Guías de Asistencia Técnica para VIS, el Estándar 55 de la ASHRAE y los datos experimentales obtenidos en el caso de estudio. Además, las temperaturas exteriores utilizadas por el software para modelar el comportamiento de la vivienda parten de registros de temperatura reales tomados de una estación meteorológica ubicada en Rionegro.

3. Comparar las transformaciones de entrada-salida del modelo con las transformaciones de entrada-salida correspondientes para un sistema real:

En este punto, aunque el caso de estudio y el modelo presentan materiales, áreas y temperaturas exteriores diferentes, puede analizarse su comportamiento y observar si se encuentran similitudes. En la Ilustración 57 se observa la comparación entre los resultados experimentales obtenidos en el caso de estudio y los resultados arrojados por el modelo, antes de la instalación de los escudos verdes en ambos casos. En la ilustración se observan dos gráficas diferentes, en la gráfica superior se exponen los resultados del caso de estudio y en la parte inferior los obtenidos en el modelo. En ambas gráficas el eje vertical corresponde a la temperatura operativa y el horizontal al tiempo. Las líneas gris y naranja son los límites para la temperatura operativa definidos por la ASHRAE y la línea azul es la temperatura operativa de la vivienda.

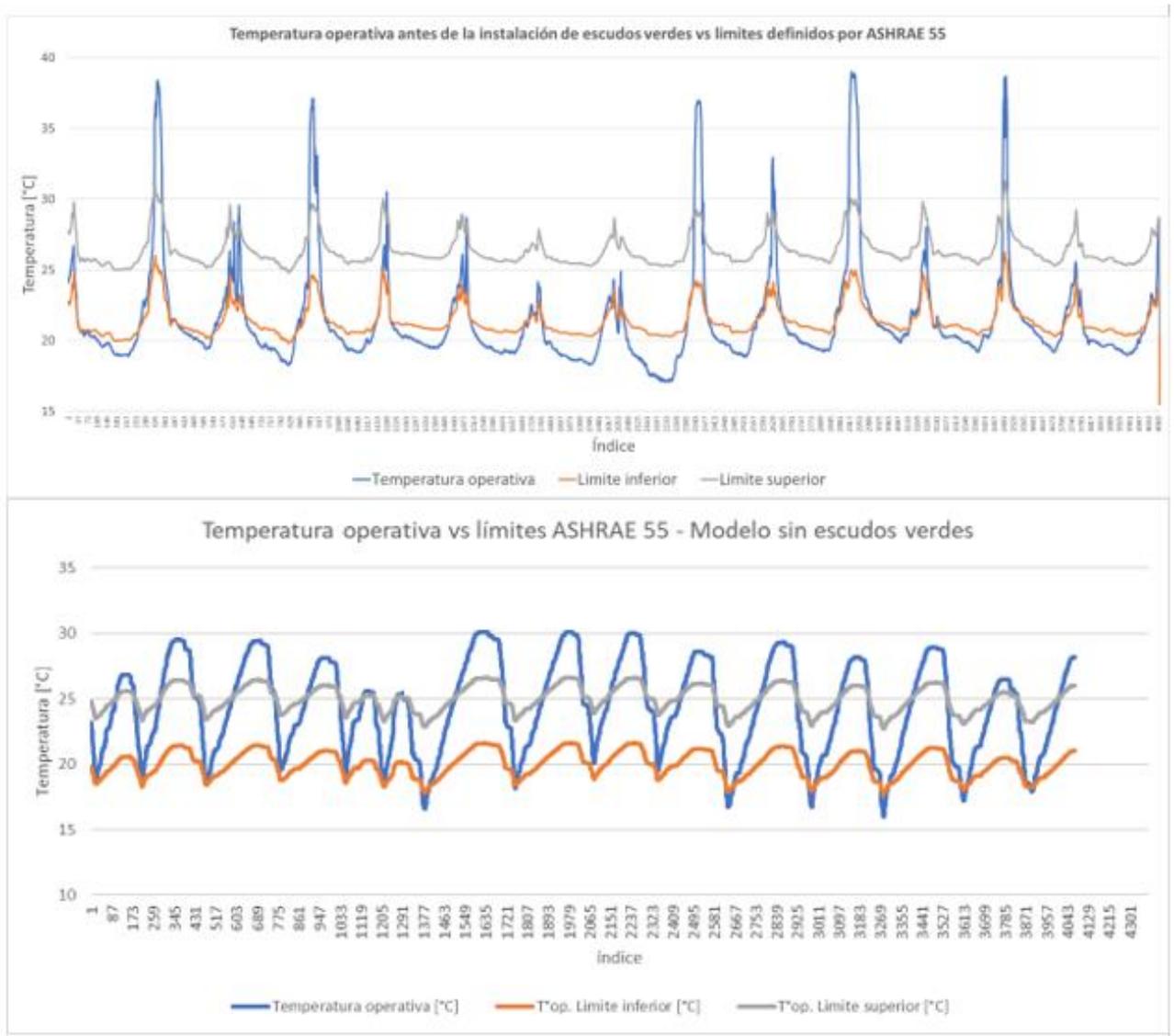


Ilustración 57. Comparación modelo vs caso de estudio - Sin escudos verdes

A pesar de las diferencias entre el modelo y el caso de estudio se observan comportamientos similares. No se presenta amortiguamiento o desfase térmico en ninguno de los casos y en ambos la temperatura operativa de la vivienda supera el límite superior de la ASHRAE la mayoría de los días. En el caso de estudio, la temperatura operativa durante la tarde se encuentra 4,3°C por encima del límite superior en promedio. En el modelo se encuentra 3,89°C por encima. En el modelo

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

se observa que se tienen valles menos pronunciados, sin embargo, existen 7 días en los que la temperatura operativa es menor el límite inferior como sucede en el caso de estudio. Aunque los comportamientos de la temperatura operativa para ambos casos no son exactamente iguales (debido a diferentes materiales, áreas y temperaturas exteriores) se observan muchas similitudes.

En la Ilustración 58, a continuación, se observa la comparación entre los resultados experimentales obtenidos en el caso de estudio y los resultados arrojados por el modelo, después de la instalación de los escudos verdes. En la ilustración se exhiben dos gráficas diferentes, en la gráfica superior se exponen los resultados del caso de estudio y en la parte inferior los obtenidos en el modelo. En ambas gráficas el eje vertical corresponde a la temperatura operativa y el horizontal al tiempo. La línea naranja representa la temperatura operativa de la vivienda y la línea azul es la temperatura exterior del aire.

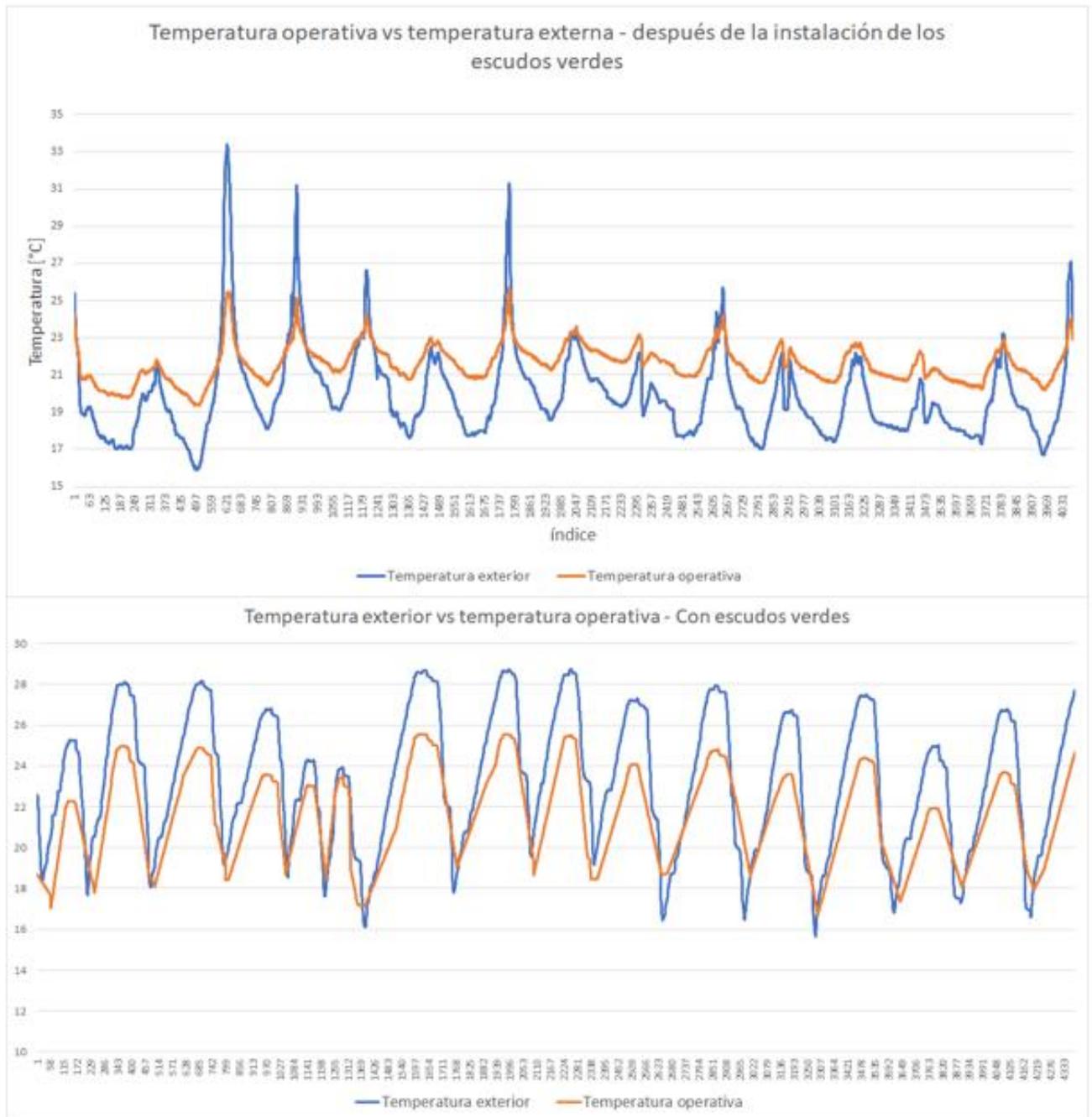


Ilustración 58. Comparación modelo vs caso de estudio - Con escudos verdes

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

De nuevo se observa un comportamiento similar entre el caso de estudio y el modelo. No se presenta desfase térmico en ninguno de los casos, pero se evidencia un amortiguamiento en la temperatura operativa. Tanto en el caso de estudio como en el modelo, la temperatura operativa reduce su amplitud y en las tardes los picos se encuentran debajo de la temperatura exterior por lo general. Cuando se presentan grandes picos en la temperatura exterior, no se observan variaciones significativas en la temperatura operativa y en ninguno de los casos supera los 26°C. En el caso de estudio la temperatura operativa es igual o un poco mayor a la exterior en las tardes más frías, esto sucede cuando la temperatura exterior es igual a 24°C o menor. Dicho comportamiento se evidencia también en el modelo. En el modelo, en el quinto y sexto pico se observa que la temperatura exterior se encuentra alrededor de los 24°C y en estos dos días la temperatura operativa no presenta un amortiguamiento tan grande como en el resto de los días. En los valles se observa que la temperatura operativa en el modelo presenta un amortiguamiento menor a la del caso de estudio, sin embargo, al igual que en el caso de estudio, se encuentra por encima de la temperatura exterior la mayoría de los días, sobre todo en las noches más frías.

Con base en lo anterior puede afirmarse que el comportamiento de ambos casos no es idéntico, pero presenta similitudes significativas. Se puede concluir que el modelo presenta un comportamiento coherente, similar al observado en el caso de estudio.

3.3. Análisis de los resultados del modelo

A partir de los resultados de la modelación y con base en los mismos parámetros con los que se evaluó el caso de estudio, se realizó el análisis del modelo simulando con y sin superficies verdes. Se compararon los resultados con los criterios definidos por el estándar 55 de la ASHRAE, la norma ISO 7730 y los indicadores expuestos en el marco metodológico para determinar su desempeño.

Para evaluar la temperatura operativa obtenida de acuerdo con lo establecido en el estándar 55 de la ASHRAE, se hallaron los límites para una satisfacción del 80% a partir de la temperatura del aire exterior. Estos límites se graficaron con la temperatura operativa obtenida para analizar su comportamiento como se observa en la Ilustración 59.

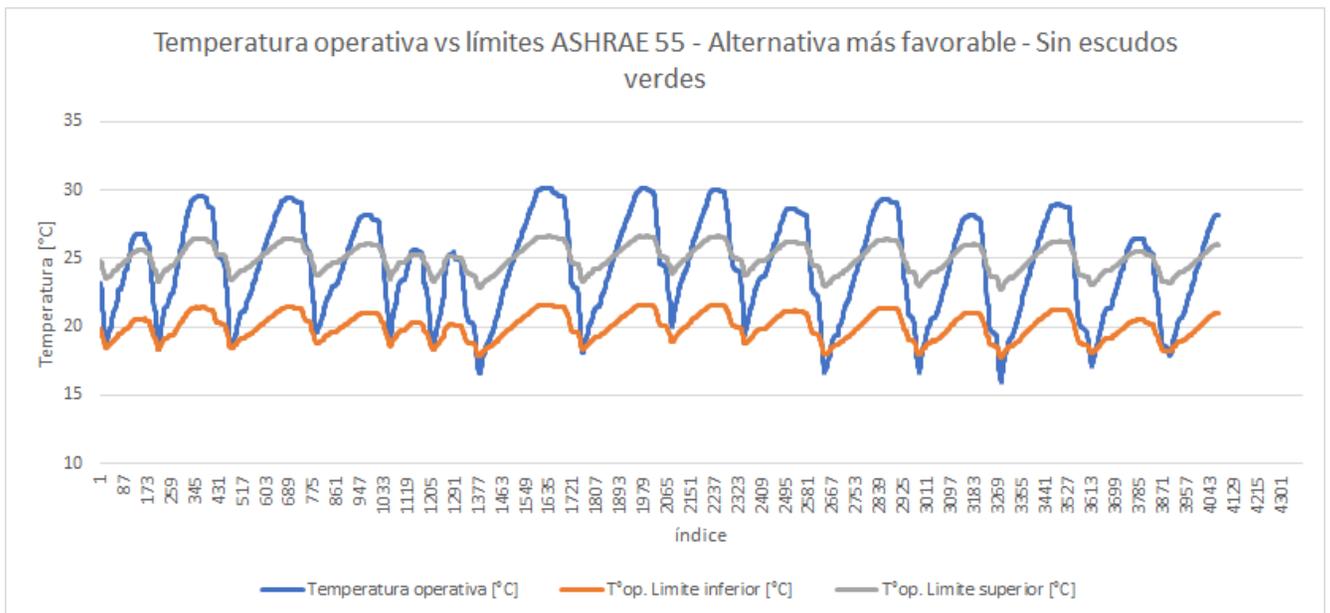


Ilustración 59 temperatura operativa vs límites ASHRAE 55 (modelo sin escudos)

En la gráfica, el eje horizontal es el índice que representa una fecha y hora específicas. En el eje vertical se encuentra representada la temperatura en grados Celsius. Las líneas de color gris y naranja representan los límites superior e inferior,

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

respectivamente, para la temperatura operativa. La línea de color azul es la temperatura operativa hallada de la vivienda.

Se observa que la temperatura operativa sobrepasa el límite superior en las horas de la tarde la mayoría de los días. Esto quiere decir, según el estándar 55 de la ASHRAE, que se presentará inconformidad térmica en la tarde. Se observan 13 picos que sobrepasan el límite en el transcurso de la tarde de los 15 días simulados, esto corresponde al 86,6% de los días. La temperatura operativa más alta es de 30,1°C y se encuentra 3,92°C por encima del límite, es decir, lo supera en un 13,06%.

Por otro lado, los valles que se generan cuando disminuye la temperatura en la noche se encuentran en su mayoría dentro del límite inferior. La menor temperatura es de 15,92°C y se encuentra 1,08°C por debajo del límite, lo que corresponde a un 6.3%.

En la Tabla 244 se observa un resumen donde se cuantifica el número de datos que se encuentra por fuera de los límites y se expresa en porcentaje.

Tabla 244 cuantificación de datos sin escudos verdes del modelo por fuera de los límites

Cumple con ASHRAE	No. de Datos	Porcentaje (%)
NO	1983	48,66
SI	2092	51,34

Como se puede ver en la tabla, cerca del 50% de los valores de temperatura operativa hallados se encuentran por fuera de los límites establecidos por el estándar 55 de la ASHRAE. Por lo anterior puede concluirse, con base en lo expuesto por dicho estándar, que la temperatura al interior de la vivienda genera inconformidad a sus habitantes la mitad del día.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Además de los límites de la temperatura operativa establecidos por la ASHRAE, se comparó el índice PPD arrojado por el software con los de las categorías de ambiente térmico definidas por la norma ISO 7730. A continuación, se observa la Ilustración 60 donde se exponen los valores del índice PPD obtenidos en la simulación.

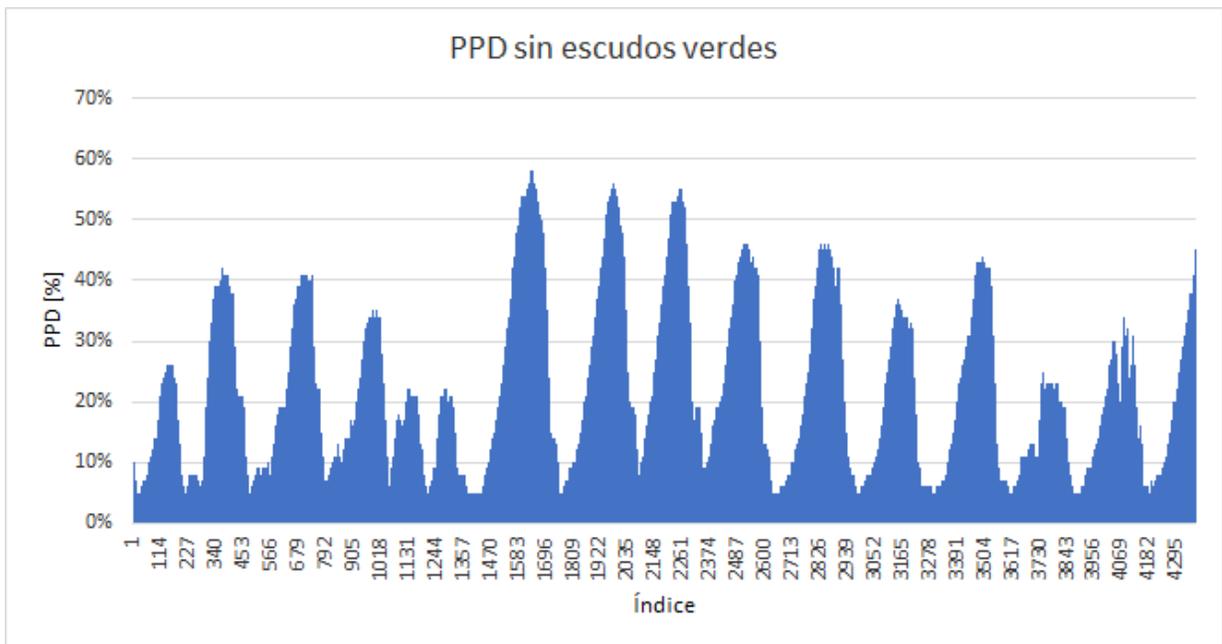


Ilustración 60 Índice de PPD (modelo sin escudos verdes)

El eje horizontal es el índice que representa una fecha y hora específicas. En el eje vertical se encuentra el índice PPD o porcentaje de individuos insatisfechos.

Se observa que se presentan varios picos que superan un PPD del 40%, al comparar la gráfica con las temperaturas operativas obtenidas en la simulación, se evidencia lo mismo encontrado mediante el estándar 55 de la ASHRAE. Se presentan altos porcentajes de insatisfacción cercanos al 50% en las horas de la tarde. El promedio del PPD en la tarde fue de 35% lo que corresponde a un PMV

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

de +1,2. Esto significa que los individuos reportarán una sensación térmica de algo de calor y el 35% de ellos estarán insatisfechos.

Se agruparon los valores de PPD por clases como se hizo anteriormente para compararlos con las categorías de ambiente térmico. Esto se observa en la Tabla 255.

Tabla 255 categorías de ambiente térmico (modelo sin escudo verde)

Clase (PPD)	Frecuencia	Porcentaje
0 - 6%	587	13%
6 - 10%	775	18%
10 - 15%	571	13%
15 - 100%	2443	56%

Según la tabla, el 13% de los datos se encuentra dentro de la categoría A, el 31% dentro de la categoría B y el 44% en la categoría C. La norma ISO 7730 afirma que como mínimo debe garantizarse una categoría B para asegurar el confort térmico. En este caso el 69% de los valores de PPD se encuentra por fuera de esta categoría por lo que según la norma ISO 7730 puede afirmarse que no presenta un ambiente confortable térmicamente la mayor parte del día.

En la Ilustración 61, a continuación, se encuentran graficados los valores del índice PMV obtenidos para los valores de PPD expuestos anteriormente. En el eje vertical de la gráfica se encuentra el valor del PMV, relacionado con una sensación térmica específica y en el eje horizontal se representa el tiempo.

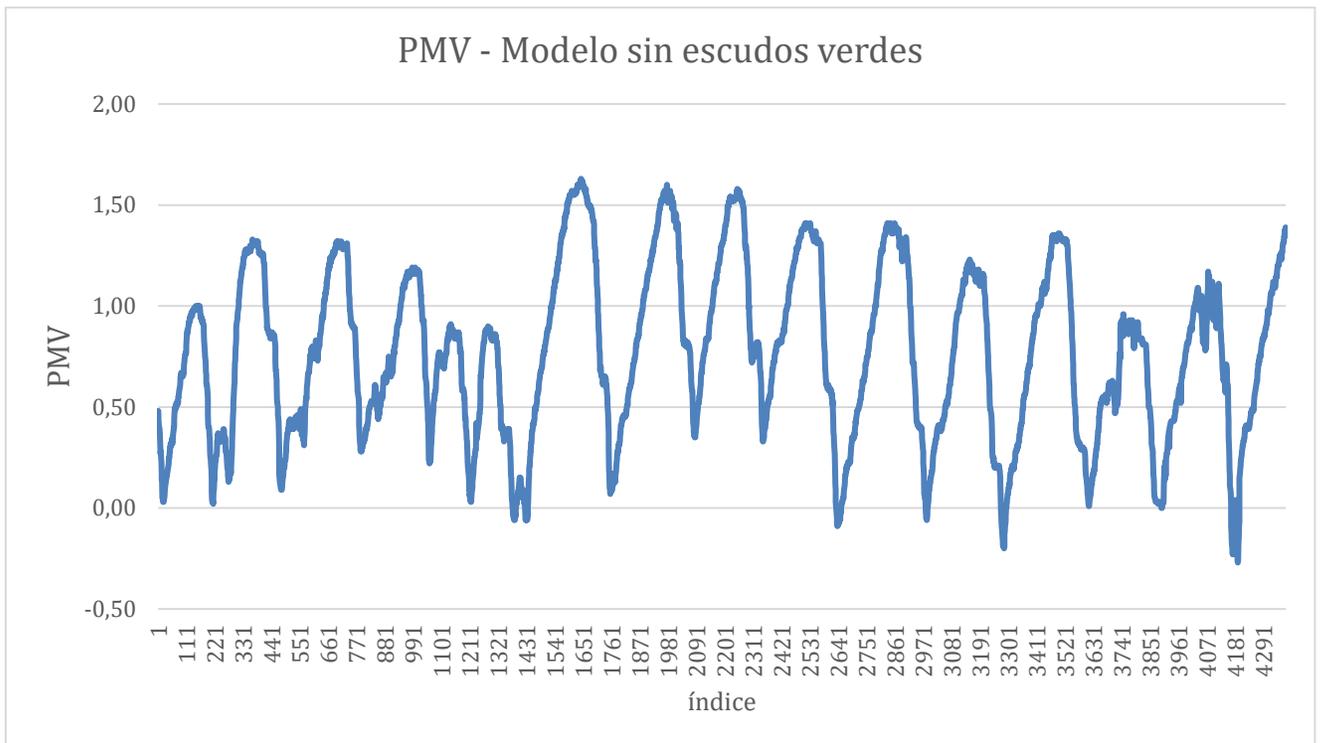


Ilustración 61. PMV - modelo sin escudos verdes

Se observa que los valores de PMV en la tarde se encuentran entre 1 a 1,5 y nunca superan un valor de 2. La sensación térmica corresponde a algo de calor. En la noche y la mañana se tiene un PMV entre -0,3 y 0,5 lo que corresponde a una sensación térmica neutra. El promedio de PMV es de 0,77, lo que se encuentra por fuera de la categoría de ambiente térmico B.

3.3.1. Efectos de los escudos verdes

Luego del análisis anterior se simuló nuevamente la alternativa, pero usando escudos verdes en la fachada expuesta. Al igual que en el caso de estudio y en el numeral anterior, los datos fueron analizados mediante lo expuesto por el estándar 55 de la ASHRAE, la norma ISO 7730 y los indicadores expuestos en el marco metodológico.

La temperatura operativa comparada con los límites de la ASHRAE se muestra en la Ilustración 62.

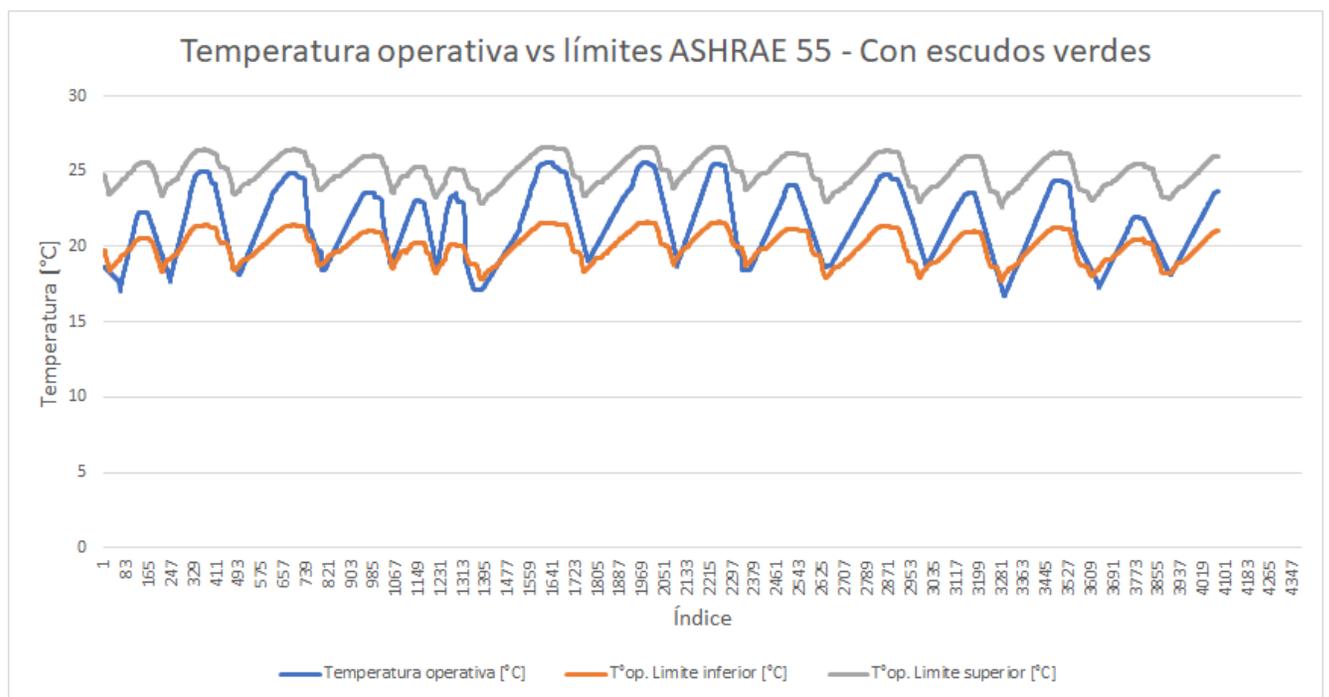


Ilustración 62 temperaturas operativas vs límites ASHRAE 55 (modelo con escudos verdes)

En la gráfica, el eje horizontal es el índice que representa una fecha y hora específicas. En el eje vertical se encuentra representada la temperatura en grados Celsius. Las líneas de color gris y naranja representan los límites superior e inferior para la temperatura operativa, respectivamente. La línea de color azul es la

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

temperatura operativa hallada de la vivienda luego de simular la alternativa con una fachada verde.

Se observa una gran diferencia en la amplitud de la temperatura operativa en la tarde luego de la simulación con escudos verdes. Al simular sin escudos verdes la temperatura operativa sobrepasaba el límite la mayoría de los días y luego de implementar los escudos verdes no lo sobrepasó ninguno. Los valles permanecen similares a los de la simulación sin escudo y rara vez cruzan el límite inferior.

En la Tabla 26 se cuantifica el número de datos que se encuentra por fuera de los límites.

Tabla 26 cuantificación de datos con escudos verdes del modelo por fuera de los límites

Cumple con ASHRAE	No. de Datos	Porcentaje (%)
NO	627	15,39
SI	3448	84,61

Se pasó de tener tan solo el 50% de los datos dentro de los límites a tener el 84.61%. Esto evidencia la gran influencia que tienen los escudos verdes sobre los resultados.

Se graficó nuevamente el índice PPD para estimar de nuevo la insatisfacción de los habitantes y la categoría de la vivienda. Los valores de PPD obtenidos con escudos verdes se observan en la Ilustración 63, a continuación.

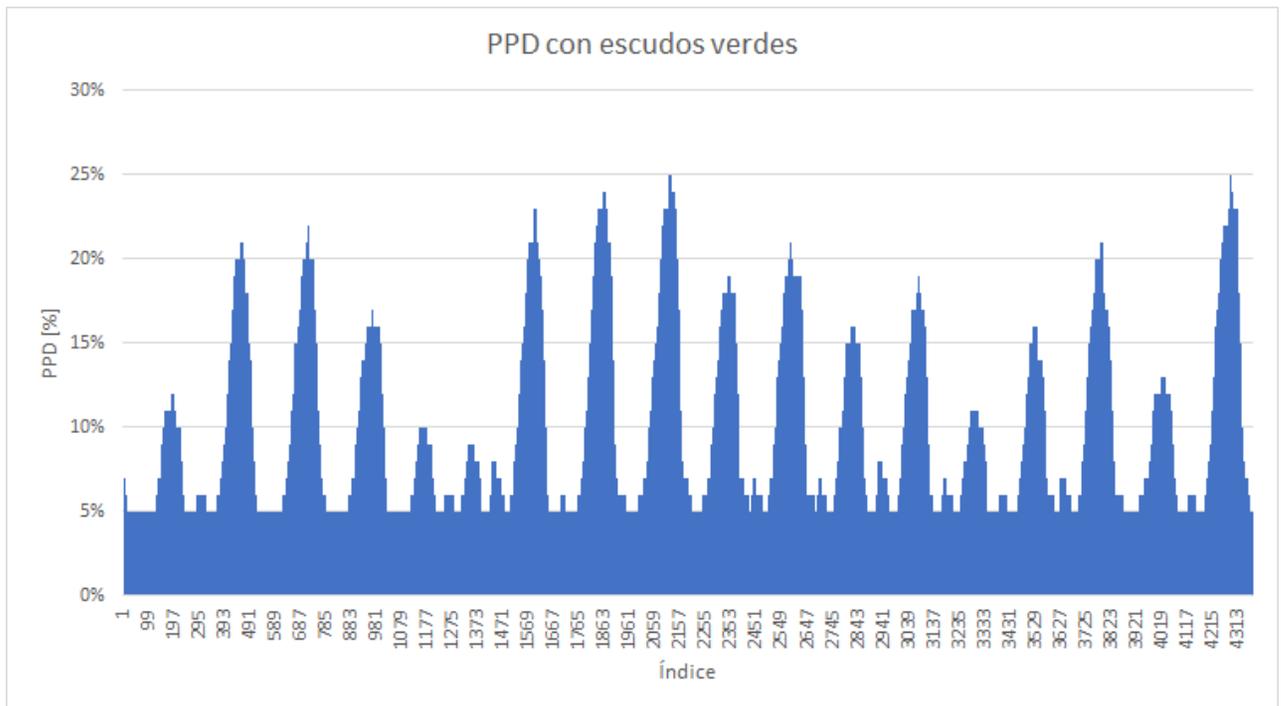


Ilustración 63 índice de PPD (modelo con escudos verdes)

El eje horizontal es el índice que representa una fecha y hora específicas. En el eje vertical se encuentra el índice PPD o porcentaje de individuos insatisfechos.

Se presenta un cambio significativo en los índices PPD durante la tarde. El valor promedio de PPD en la tarde pasó de 35% a 14% luego de la instalación de los escudos verdes. Este valor corresponde a un PMV de 0,65, lo que significa que la sensación térmica se encuentra entre neutra y algo de calor. Antes de la instalación de los escudos verdes se encontró un PPD máximo era de 58%, luego de la simulación con escudos pasó al 25%. Los resultados durante la noche permanecieron similares luego de la instalación de los escudos verdes. Se observa que el PPD permaneció cercano al 5%.

Los valores de PPD agrupados por clases se observan en la Tabla .

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 27 categorías de ambiente térmico (modelo con escudo verde)

Clase (PPD)	Frecuencia	Porcentaje
0-6%	2106	48%
6-10%	877	20%
10-15%	604	14%
15-100%	789	18%

Se observa que el porcentaje de datos en la categoría A aumentó, al igual que los datos en la categoría B. Ahora el 48% de los valores se encuentra en la categoría A y el 68% en la B. Esto evidencia una gran mejora en el confort. Sin los escudos verdes solo se encontraba el 31% de los datos dentro de la categoría mínima sugerida por la ISO 7730, ahora cerca del 70% cumple con los requisitos mínimos. Además, el porcentaje de valores mayores a un PPD del 15% (categoría C), pasó de ser más de la mitad (56%) a 18%. Según lo anterior es posible afirmar que los escudos verdes no garantizan una vivienda dentro de la categoría de ambiente térmico A, pero brindan una mejora significativa en el confort de hasta el 37%.

En la Ilustración 64 se observan los valores del índice PMV luego de modelar con los escudos verdes.

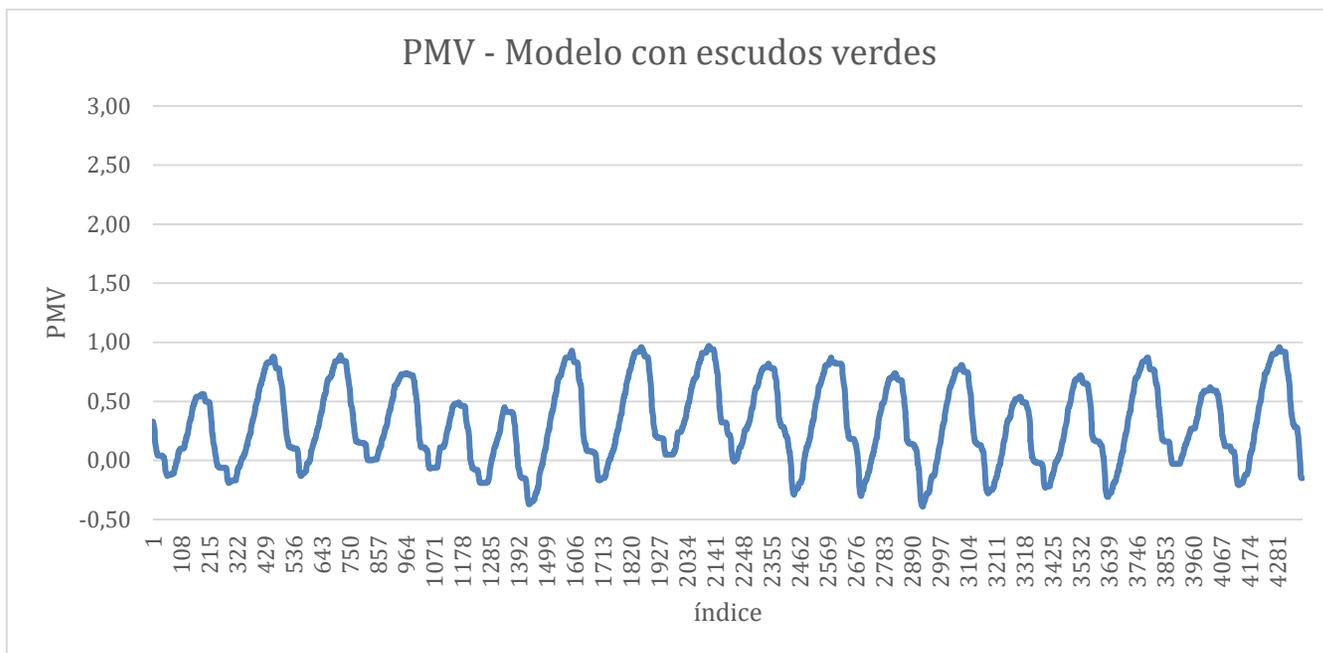


Ilustración 64. PMV - Modelo con escudos verdes

Se observa que el índice PMV se reduce con respecto a la solución sin escudos verdes. Los valores no pasan de 1 en la tarde y el promedio pasó de 0,77 a 0,31, valor que se encuentra dentro de la categoría de ambiente térmico B.

Por último, se comparó la temperatura operativa obtenida mediante el uso de escudos verdes con la temperatura del aire exterior. Dicha comparación se observa en la Ilustración 65.

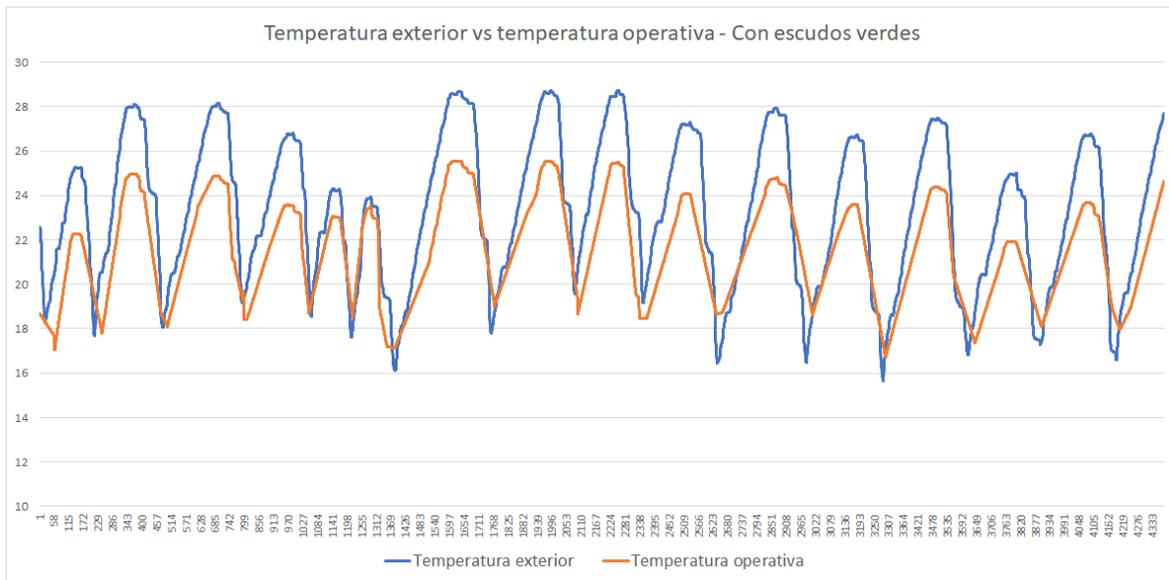


Ilustración 65 temperatura exterior vs temperaturas operativas (modelo con escudos)

Al igual que en la gráfica de la primera medición y que en el caso de estudio, puede observarse que no hay desfase térmico. Por esto puede concluirse que los escudos verdes no ayudan a retardar el calentamiento o enfriamiento de la vivienda. Sin embargo, al igual que en el caso de estudio, se observa una reducción en la amplitud de la gráfica y los picos se encuentran por debajo de la temperatura exterior. Se había observado que la temperatura operativa sobrepasaba a la externa alcanzando valores de 30°C. Después de la simulación con escudos verdes se observa que con los mismos valores de temperatura exterior se alcanza una temperatura operativa máxima de 25,56°C.

Los resultados obtenidos mediante la simulación se encuentran resumidos en la Tabla 8, donde se observan los valores máximos, mínimos, el promedio y la desviación estándar de la temperatura operativa para ambos casos. La temperatura exterior fue igual en ambos casos por lo que no se expresa en la tabla.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 28 resultados obtenidos del modelo

Modelo							
T. Operativa [°C] - Sin escudos verdes				T. Operativa [°C] - Con escudos verdes			
Max.	Min.	Promedio	D. estándar	Max.	Min.	Promedio	D. estándar
30.10	16.01	23.49	3.61	25.56	16.73	22.38	1.74

Si se comparan las temperaturas operativas de ambas mediciones, se encuentra un promedio similar con una diferencia de $1,1^{\circ}\text{C}$, pero se presenta una mayor diferencia entre los valores máximos. La temperatura operativa máxima se redujo $4,54^{\circ}\text{C}$ mediante el uso de escudos verdes, además la desviación estándar también disminuyó en $1,87^{\circ}\text{C}$. Lo anterior indica que, como se evidenció en el caso de estudio, las plantas brindan un buen amortiguamiento térmico y ayudan a mantener una temperatura más constante a lo largo del día. A diferencia del caso de estudio donde las temperaturas mínimas aumentaban con la implementación de las terrazas verdes, en la simulación, los valores mínimos de temperatura operativa que se presentan en la noche no se ven muy afectados y solo se observa un cambio significativo durante la tarde cuando se reduce la temperatura.

Con base en los resultados de la simulación discutidos anteriormente y en el caso de estudio, puede afirmarse que las fachadas verdes efectivamente ayudarían a regular la temperatura de una edificación en la ciudad de Medellín y mejorarían su confort térmico.

3.3.2. Selección de la alternativa

Inicialmente, en la metodología, se había planteado que se diseñarían diferentes alternativas con escudos verdes para escoger la que presentara el mejor comportamiento. Sin embargo, luego de revisar la Serie de Guías de Asistencia Técnica para VIS y varios ejemplos de proyectos ya construidos en la ciudad, se identificó que las áreas y materiales para este tipo de viviendas están ya muy bien

definidos. No hay mucho que pueda cambiarse en términos de diseño o materiales para mejorar su comportamiento térmico, sin salirse de los presupuestos establecidos.

Sin embargo, se encontró que hay otros factores que influyen el confort térmico en la vivienda como la relación ventana-pared y la orientación. Estos factores tienen un impacto despreciable en el costo, por lo que además de evaluar las temperaturas operativas antes y después de la implementación de los escudos verdes, también se analizará el efecto que tienen estos dos factores en la temperatura para encontrar la mejor alternativa.

El cambio en la temperatura operativa debido a la orientación de la fachada que se encuentra expuesta a la radiación solar fue el primer factor a evaluar. Para esto se tomaron 4 orientaciones diferentes como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y se simuló para el transcurso de un año.

Tabla 29 Dirección de fachada expuesta según orientación

Orientación (°)	Dirección fachada
0	Norte
90	Oriente
180	Sur
270	Occidente

Los valores encontrados de temperatura operativa para cada orientación se graficaron como puede verse en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** para analizar la variación de uno respecto al otro durante todo el año.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

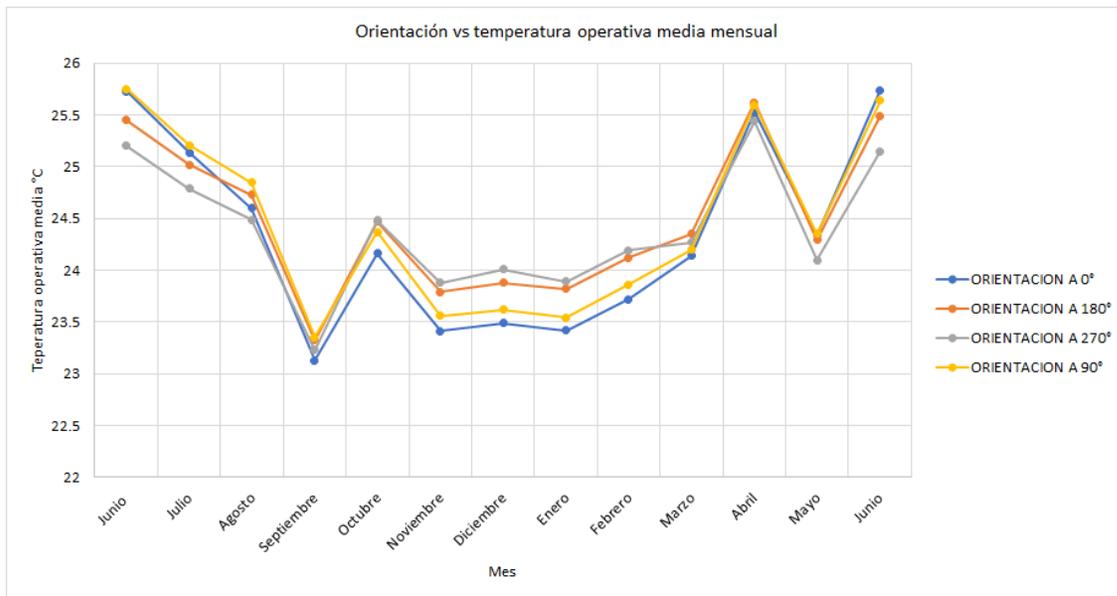


Ilustración 66 Variación de temperatura operativa durante el año vareando orientación (cuarto principal)

En la gráfica anterior el eje horizontal representa los meses del año y el vertical la temperatura operativa media de la vivienda en grados Celsius. Cada una de las líneas simboliza una orientación diferente de la fachada expuesta.

Se observa claramente el efecto de la orientación de la fachada en la temperatura operativa media de la vivienda. Entre septiembre y marzo se evidencia la mayor diferencia entre las temperaturas con una disminución de hasta 0,5°C de la temperatura operativa en promedio. La orientación de la fachada con la que se consiguen las menores temperaturas operativas la mayor parte del año es la de 0°, es decir, mirando hacia al norte. Con la fachada en esta orientación la vivienda tendrá menor exposición a la radiación solar en la mañana y la tarde por lo que es lógico la disminución evidenciada en la temperatura. Las mayores temperaturas se consiguen con la orientación a 270°, es decir, cuando la fachada mira al occidente.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Luego de encontrar la orientación que genera la mayor reducción en la temperatura operativa se pasó a analizar la variación debido al tamaño de las ventanas. Se simuló con la orientación de 0°(Norte) y se tomaron dos tamaños de ventanas para ver como la relación ventana-pared afectaba la temperatura. Las dimensiones escogidas para las ventanas se definieron según lo expuesto en el marco metodológico y corresponden a los valores máximo (80% del área del muro) y mínimo (20% del área del muro) de la relación ventana-pared expuesta en la serie de guías de asistencia técnica para vivienda de interés social en Colombia del Ministerio de Vivienda y Desarrollo.

Se simuló para estos dos casos y los resultados se graficaron igual que los anteriores para analizar la variación de la temperatura a lo largo del año. Los resultados se observan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

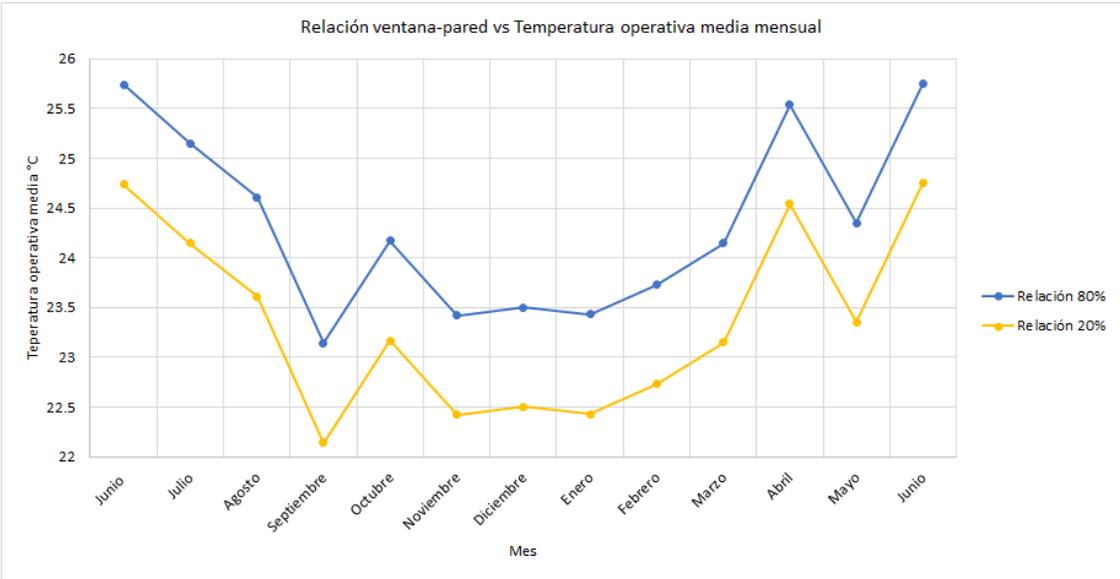


Ilustración 67 Variación de temperatura mes a mes según tamaño de ventanas

En la gráfica el eje horizontal representa los meses del año y el vertical la temperatura operativa media de la vivienda en grados Celsius. La línea de color azul

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

representa la mayor relación ventana-pared permitida y la línea de color amarillo representa la menor relación.

Se evidencia que al reducir la dimensión de las ventanas de la máxima a la mínima permitida, se genera también una reducción en la temperatura operativa de 1°C en promedio.

Por esto se decidió utilizar la menor relación permitida para el diseño de la alternativa. Los valores definidos se encuentran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 30 Tamaño de ventanas del modelo

MEDIDAS DE VENTANAS				
	Ancho	Altura	Área total	Área min. por norma (m2)
Habitación principal	2,8	2,6	7,28	1,82
Habitación 2	2,7	2,6	7,02	1,76
Ropas	1,5	2,6	3,9	0,98
Baño	1,7	2,6	4,42	1,11

Una vez definidas las dimensiones de las ventanas y la orientación de la vivienda, se realizó una gráfica para comparar la temperatura operativa obtenida del caso más desfavorable (Máxima dimensión de ventanas y orientación de la fachada al occidente) con la del caso más favorable (Mínima dimensión de ventanas y orientación de la fachada al norte). Los resultados se observan en la Ilustración 68.

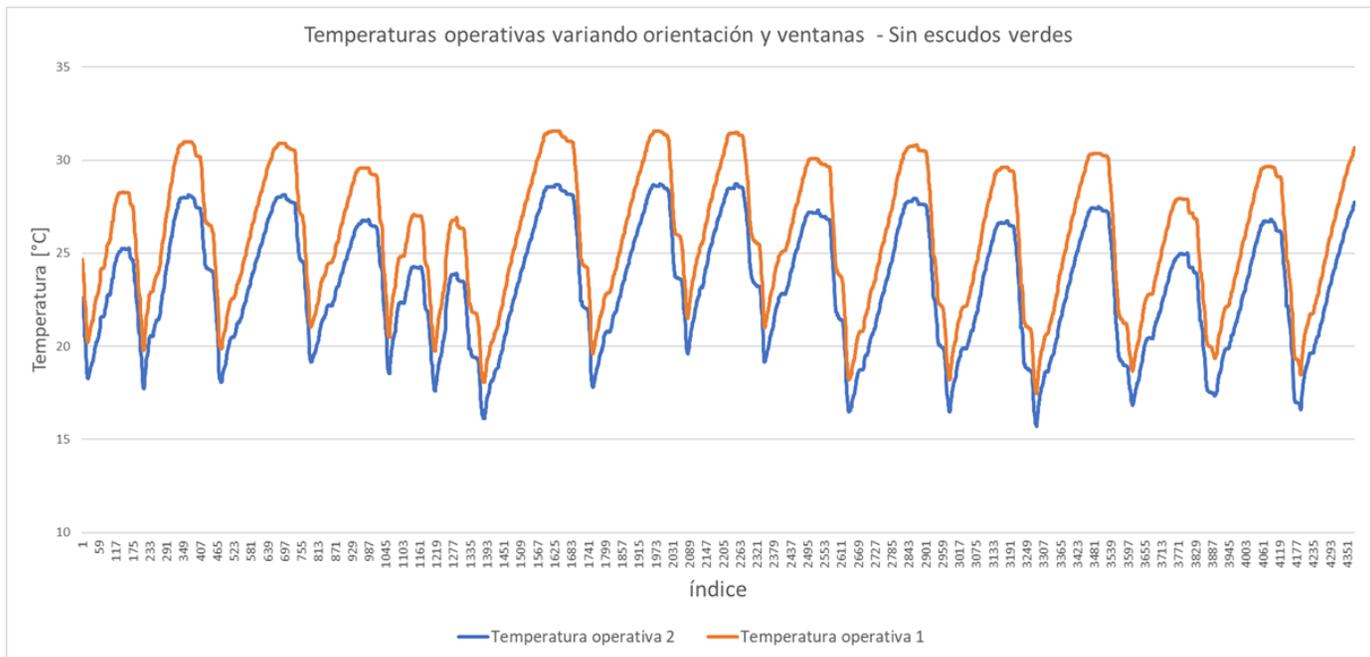


Ilustración 68. Temperaturas operativas variando orientación y ventanas

En la gráfica, el eje horizontal representa una fecha y hora específicas en el transcurso de los 15 días con la mayor temperatura promedio del año. En el eje vertical se encuentra representada la temperatura en grados Celsius. Las líneas de color naranja y azul representan la temperatura operativa para el caso más favorable y desfavorable, respectivamente.

La temperatura operativa de ambas alternativas se comporta de manera idéntica, pero la alternativa con menor tamaño de ventanas y orientada al norte presenta menores temperaturas todo el tiempo. En la noche y la mañana se presentan valles con variaciones de 1,72°C en promedio entre ambas alternativas. En la tarde, la temperatura operativa aumenta en ambos casos y los máximos valores se presentan entre las 3:00 pm y 5:00 pm, alcanzando un máximo de 32,2°C para el caso desfavorable y 30,1°C para la alternativa escogida.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Al comparar ambas alternativas, se observa una reducción en la amplitud de la temperatura operativa en la tarde de un caso con respecto al otro. Se observa una reducción de 1,46°C en promedio con respecto a la alternativa más desfavorable.

3.4. Factibilidad

3.4.1. Materiales de construcción

Como materiales se tuvo en cuenta la vegetación y la mampostería ya que fueron los materiales considerados para el diseño.

3.4.2. Vegetación

Se decidió utilizar vegetación indirecta, ya que no genera infiltraciones o humedades en la estructura, lo que evita daños a largo plazo y mayores inversiones en el mantenimiento de la fachada en el futuro (Ekren, 2017).

Durante el transcurso de los años han surgido cada vez más opciones de diseño para realizar la instalación de fachadas verdes. Un sistema sencillo de fachada verde indirecta puede costar entre 100,000 a 170,000 COP/m², mientras que otras opciones pueden superar los 550,000 COP/m² (Perini & Rosasco, 2013). A continuación, se pueden observar los precios en pesos correspondientes a los dos tipos de fachada verde expuestos en el marco metodológico.

Tabla 31 Costo de instalación de fachada verde (Perini & Rosasco, 2013)

	Precio (COP/m ²)
Fachada natural	\$ 112.543,50
Sistema de enredadera + vegetación	\$ 150.058,00
	\$ 281.358,75
Precio promedio	\$187,572.5

Como no se cuenta con un precio exacto y la literatura acerca del tema es tan variada, se tomó un precio promedio correspondiente a \$187.572,5 COP/m².

3.4.3. Construcción fachada de mampostería

La construcción de una estructura en ladrillo (Lego-ladrillo de obra limpia) puede permitir un ahorro del 45% en precios con respecto a estructuras realizadas en concreto o metal. El costo de esta estructura oscila entre \$950.000 - \$ 1'200.000 COP/m², lo único que podría variar este precio es el transporte de material que se requiera (Riveros, 2015).

La experiencia en la construcción de viviendas indica que el valor de construcción en mampostería se encuentra alrededor de \$1'000.000 - \$1'300.000 COP/m², este valor no incluye honorarios por administración delegada. Igualmente este valor puede variar según el tipo de acabados y ubicación de la obra (Asesoría & construcción, 2015)

Según los valores exhibidos por los autores mencionados anteriormente, se decidió tomar un valor medio de \$1'112.500 COP/m².

3.4.4. Evaluación de factibilidad

La resolución 0549 del 2015 reglamenta los parámetros de lineamiento y construcción sostenible. En el anexo 1 de esta resolución se encuentra la matriz de implementación donde se evalúa el potencial de una inversión con relación a los costos de implementación y su potencial de ahorro de recursos (MinVivienda, 2013).

Las medidas se califican según su eficacia de la siguiente manera:

- **Altamente recomendable:** Generan un efecto mínimo en los costos de construcción (<1%) y brindan un alto potencial de ahorro (>5%).
- **Moderadamente recomendable:** Costos un poco más elevados no asequibles a todo el público, pero con buenos potenciales de ahorro (>3%).
- **Poco o no recomendable:** Estas son medidas de costos elevados y que generan poco impacto (ahorro < 3%).

En la Ilustración 69 se exponen los porcentajes correspondientes a cada nivel de eficacia y su impacto.

	Altamente recomendable	Moderadamente recomendable	Poco / no recomendable
Potencial de ahorro de recursos	> 5%	> 3% y < 5%	< 3%
Impacto en el costo	< 1%	> 1% y < 5%	> 5%

Ilustración 69 Calificación de eficacia de una inversión (MinVivienda, 2013)

En la tabla 32 se observa el impacto que tienen los escudos verdes en el costo de una vivienda VIS por metro cuadrado y se expone el resultado porcentual de influencia por la instalación de los escudos verdes con relación al costo sin ellos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 32 porcentaje de eficacia de la instalación de los escudos verdes

Costo construcción de fachada (\$/m2)	\$ 1´112.500
Costo instalación fachada verde (\$/m2)	\$ 187.572,5
Costo total con fachada	\$1´300.072,5
Porcentaje con relación al costo original	16,86%

Como se observa en la tabla anterior, el aumento de los costos debido al uso de superficies verdes corresponde a un 16,86%. De acuerdo con la resolución 0549 del 2015 esta solución se clasifica como no recomendable.

Por otro lado, el potencial en el ahorro de energía que pueden tener es alto. Si se asume que con la implementación de escudos verdes los individuos dejarán de usar aires acondicionados o ventiladores para mantener el confort, puede reducirse el consumo energético de la edificación. Un aire acondicionado consume aproximadamente 144 kWh/mes, lo que corresponde al 94,7% del consumo estimado por E.P.M para una familia promedio. Un ventilador tiene un consumo aproximado de 12 kWh/mes, este consumo es mucho menor al de un aire acondicionado, pero representa el 7,9% del consumo estimado para una familia promedio (El Heraldó, 2016) (EPM, 2019). Este 7,9% ubica a la solución en la categoría de altamente recomendable en términos de potencial de ahorro de recursos.

4. Conclusiones

Por medio de la instalación de sensores para medir temperatura, humedad y temperatura radiante en el edificio Verde Avignon ubicado en San Lucas, en la ciudad de Medellín, se pudo establecer experimentalmente el beneficio que brindan las terrazas verdes en el confort térmico al interior de una vivienda. Se identificó que las terrazas verdes no ayudaron a retardar el calentamiento o enfriamiento de la vivienda (desfase térmico) respecto a la temperatura exterior, pero sí ayudaron de manera significativa a amortiguar la temperatura externa. Con grandes variaciones en la temperatura externa se producían cambios menores en la temperatura operativa del interior de la vivienda, luego de la instalación de las terrazas. Se obtuvo un promedio de temperatura operativa similar para ambas mediciones, pero se presentó una gran diferencia entre los valores máximos y la desviación estándar de los datos. Se encontró que los valores máximos de la primera y la segunda medición presentan una diferencia de $13,21^{\circ}\text{C}$ y su desviación estándar tiene una diferencia de $2,52^{\circ}\text{C}$. Se concluyó que la amplitud de la temperatura operativa después de la implementación de terrazas verdes se reduce significativamente y que las plantas brindan un buen amortiguamiento térmico, ayudando a mantener la temperatura constante a lo largo del día.

Por medio de la serie de guías de asistencia técnica para vivienda de interés social del Ministerio de vivienda y desarrollo de Colombia se definieron las características para el diseño de la alternativa. A partir del modelo realizado puede concluirse que los materiales elegidos según las guías no son adecuados y presentan un mal comportamiento térmico.

Se simuló la alternativa mediante el software IDA ICE y se evaluaron diferentes aspectos como los efectos que la orientación, la relación ventana-pared y los escudos verdes tenían en la temperatura operativa de la vivienda. Se concluyó que, con una orientación de la fachada expuesta, hacia el norte y con la menor relación ventana-pared propuesta por la Guía de Asistencia Técnica para Vivienda de Interés Social se tenían los mayores beneficios en términos del confort térmico. Se evidenció que tan solo cambiando la orientación y el tamaño de las ventanas puede obtenerse una reducción de 1,46°C en la temperatura operativa. Sin embargo, al comparar este resultado con los límites expuestos por la ASHRAE se identificó que no basta con variar estos dos factores para conseguir el confort térmico en la vivienda y que esta no presenta un buen funcionamiento en las horas de la tarde. Cerca del 50% de los resultados se encontraron por encima de los límites establecidos por la ASHRAE y se obtuvo un índice del 35% de individuos insatisfechos en las horas de la tarde. Luego de simular la alternativa con los escudos verdes se evidenció un gran cambio en los valores máximos de la temperatura operativa. Al igual que en el caso de estudio, no se presenta un desfase térmico, sin embargo, se observa un gran amortiguamiento de la temperatura. La cantidad de resultados por fuera de los límites de la ASHRAE disminuyó de manera significativa, pasando del 50% a tan solo el 15,4%. El porcentaje de individuos insatisfechos se redujo también del 35% al 10% en promedio, valor que se encuentra dentro de la categoría de ambiente térmico B (mínima para garantizar el confort durante el día) según la ISO 7730. Se encontró que por medio de los escudos verdes la temperatura operativa máxima se redujo 4,54°C y disminuyó su desviación estándar en 1,87°C. Por esto se concluyó que las superficies verdes brindan un buen amortiguamiento térmico y son una buena solución para mantener la temperatura operativa de la vivienda más constante durante el día y mejorar su confort. Con base en los resultados obtenidos en el caso de estudio, junto con los resultados de la modelación, es posible afirmar que las fachadas verdes

pueden representar una buena alternativa para regular la temperatura de las edificaciones en Medellín y mejorar su confort térmico en un futuro.

Se recomienda el uso de fachadas verdes indirectas debido a las ventajas que brindan a largo plazo. Este tipo de fachada evita que se presenten problemas de humedad y tiene bajos costos de mantenimiento, además, no necesita de sistemas de riego.

Al analizar los costos de las fachadas verdes en relación con la alternativa VIS seleccionada, se encontró que se incrementarían en un 16,86%. Según lo establecido por la resolución 0549 del 2015, esta solución no es recomendable para este tipo de viviendas. En proyectos de mayor presupuesto pueden representar una alternativa altamente recomendable en términos de impacto en el costo. A pesar de que económicamente no son viables para VIS, los escudos verdes presentan un gran potencial de ahorro de recursos en cualquier tipo de edificación. Se sugiere extender el análisis y evaluar los beneficios sociales que podrían traer. Es necesario preguntarse: ¿Cuánto vale el beneficio que tienen los escudos verdes en el confort para la población trabajadora?, ¿Pueden causar mayor productividad o mejora en la salud? También hay que tener en cuenta los otros beneficios que podrían brindarle a la ciudad en conjunto, como pueden ser: mejora de la calidad del aire, disminución del estrés en la población y disminución de gases de efecto invernadero. Si la implementación de este tipo de fachadas para viviendas VIS se deja en manos de empresas constructoras, no será viable, pero si se evidencian mayores beneficios podría ser viable a través del gobierno o subsidios e incentivos.

5. Referencias

Armend, P., Nacional, C. C., & Tecnolog, N. (2010). Evaluación del Bienestar térmico en locales de trabajo cerrados mediante los índices térmicos PMV y PPD ., 1–16.

Asesoría & construcción, T. Vargas. (2015). Pide cotizaciones para... | habitissimo. Retrieved November 7, 2019, from https://www.habitissimo.com.co/cotizacion/nuevo/en-obra-ingenieria-construccion-s-a-s?source_page=qna-question#1

ASHRAE. (2017). *ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*.

Autodesk Inc. (2018). Insight | Building Performance Analysis Software | Autodesk. Retrieved October 2, 2018, from <https://www.autodesk.com/products/insight/overview>

BENTLEY SYSTEMS, I. (2018). Building Energy Analysis and Simulation Software. Retrieved October 2, 2018, from <https://www.bentley.com/en/products/product-line/building-design-software/aecosim-energy-simulator>

Código Técnico de la Edificación (CTE). (2017). Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE). Retrieved from <https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/ahorroEnergia/DBHE.pdf>

CTE. (2006). Inicio. Retrieved November 5, 2019, from <https://www.codigotecnico.org/>

de Rhodes Valbuena, M. (2012). *Implementación de un modelo de techo verde y su beneficio térmico en un hogar de Honda, Tolima (Colombia)*. Pontificia Universidad Javeriana.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Díaz Regodón, M. I., & Tenorio Ríos, J. A. (2005). Pérdidas de calor y formación de condensaciones en los puentes térmicos de los edificios. *Instituto de Ciencias de La Construcción Eduardo Torroja*, 1131–1153. Retrieved from http://digital.csic.es/bitstream/10261/5864/1/Diaz_Regodon_IETCC.pdf
- Díaz Reyes, C. A., & Ramírez Luna, J. A. (2011). *Calidad en la Vivienda de Interés Social. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial* (Vol. 1).
- Empresas publicas de Medellín. (2016). Tarifas y costo de Energía -Mercado regulado, 1–2. <https://doi.org/10.1177/0884533612446706>
- EPM. (2019). Tarifas, solicitud del servicio, usos inteligente del Servicio Publico de Aguas, Acueducto y Alcantarillado de EPM por parte de usuarios de hogares. Retrieved October 28, 2019, from https://www.epm.com.co/site/clientes_usuarios/clientes-y-usuarios/hogares-y-personas/agua/tips-para-el-uso-inteligente
- EQUA Simulation AB. (2018). IDA ICE - Simulation Software | EQUA. Retrieved October 2, 2018, from <https://www.equa.se/en/ida-ice#movie>
- Growing Green Guide. (2016). Green facade plants | Growing Green Guide. Retrieved November 6, 2019, from <https://www.growinggreenguide.org/technical-guide/design-and-planning/plant-selection/construction-and-installation-of-green-facades/>
- HOME CENTER. (2019). Puerta Tule 65x235 cm - Interdoors - 379319. Retrieved November 4, 2019, from <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/379319/Puerta-Tule-65x235-cm/379320>
- IPCC. (2018). Summary for Policymakers — Global Warming of 1.5 °C. Retrieved October 18, 2019, from <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>

ISO. (2009). International Standard Iso, 2009.

Köhler, M. (2008). Green facades-a view back and some visions. *Urban Ecosystems*, 11(4), 423–436. <https://doi.org/10.1007/s11252-008-0063-x>

Leandro, J., & Trujillo, V. (2016). Investigación pre-normativa de control termico en fachadas de edificios multifamiliares tipo VIS en la ciudad de Bogota D.C.

Liu, T. C., Shyu, G. S., Fang, W. T., Liu, S. Y., & Cheng, B. Y. (2012). Drought tolerance and thermal effect measurements for plants suitable for extensive green roof planting in humid subtropical climates. *Energy and Buildings*, 47, 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.043>

Maratum. (2015). Infiltraciones de aire en una vivienda - MARATUM. Retrieved October 27, 2019, from <https://blogrehabilitacionedificios.com/infiltraciones-de-aire-en-una-vivienda/>

Metrocuadrado. (2019). Vivienda VIS. Retrieved November 1, 2019, from <https://www.metrocuadrado.com/noticias/actualidad/que-es-una-vivienda-de-interes-social-1421>

Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2011). *Los materiales en la construcción de vivienda de interés social. Serie Guías de Asistencia Técnica para Vivienda de Interés Social* (Vol. 2).

MinVivienda. (2013). Anexo Técnico Inicial, (1), 1–85. Retrieved from http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioVivienda/ANEXO_1_0549_2015.pdf

Ottelé, M. (2011). *The Green Building Envelope Vertical Greening. Department of Materials and Environment*.

Ottelé, M., & Perini, K. (2017a). Comparative experimental approach to investigate

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

the thermal behaviour of vertical greened façades of buildings. *Ecological Engineering*, 108(August), 152–161.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.016>

Ottelé, M., & Perini, K. (2017b). Comparative experimental approach to investigate the thermal behaviour of vertical greened façades of buildings. *Ecological Engineering*, 108(September), 152–161.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.016>

Papadopoulou, G. I. (2013). Green Walls as element of bioclimatic design in Mediterranean Urban Buildings, (November).

Pardal, C., & Paricio, ignacio. (2006). Cristina Pardal e Ignacio Paricio: La fachada Ventilada y Ligera. Cristina Pardal e Ignacio Paricio. | PROYECTOS 7 / PROYECTOS 8. Retrieved November 5, 2019, from <https://proyectos4etsa.wordpress.com/2013/06/29/lafachadaventiladayligera/>

Riveros, E. (2015). Cual es el valor del metro cuadrado para construcción en Colombia? - habitissimo. Retrieved November 7, 2019, from <https://preguntas.habitissimo.com.co/pregunta/proyecto-y-construccion-edificio-1#1>

W. Peck, S., & Callagham, C. (2001). esearch Highlights, (00), 0–3.

Weatherspark. (2019). Average Weather in Medellín, Colombia, Year Round - Weather Spark. Retrieved November 4, 2019, from <https://weatherspark.com/y/22535/Average-Weather-in-Medellín-Colombia-Year-Round>

Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. Acuerdo 418 de 2009 Concejo de Bogotá D.C., Pub. L. No. 418, Registro distrital 3 (2009). Régimen Legal de Bogotá D.C.

Europlastic. (2014). Green terraces.

González, O. C. (1998). Metodología para el Cálculo del Confort Climático en Colombia.

IPCC. (2013). Summary for Policymakers. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 33. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>

León, M. P. M., & Nariño, E. H. (2011). Guía de techos verdes en Bogotá. Secretaria Distrital De Ambiente.

Li, M., Cao, J., Guo, J., Niu, J., & Xiong, M. (2016). Response of energy consumption for building heating to climatic change and variability in Tianjin City, China. *Meteorological Applications*, 23(1), 123–131. <https://doi.org/10.1002/met.1537>

Li, M., Cao, J., Xiong, M., Li, J., Feng, X., & Meng, F. (2018). Different responses of cooling energy consumption in office buildings to climatic change in major climate zones of China. *Energy and Buildings*, 173, 38–44. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.037>

Marin Gomez, A. (2017, February). Temperatura de Colombia aumentará en los próximos años. *El Colombiano*, p. 2.

Ortiz, J. D. (2017, March). Obra de Hidroituango aportará 35% de energía en el país - Medellín - Colombia - ELTIEMPO.COM. *El Tiempo*, p. 2.

Ospina Zapata, G. (2018, April). Medellín entra en la onda de las fachadas verdes. *El Colombiano*, p. 2.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Ottelé, M., & Perini, K. (2017). Comparative experimental approach to investigate the thermal behaviour of vertical greened façades of buildings. *Ecological Engineering*, 108(September), 152–161. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.016>
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394–398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>
- Rojas Perez, G. T. (2018, February). 3.5% creció la demanda de energía en enero de 2018 en Colombia | El Mundo. *El Mundo*, p. 2.
- Semana, S. (2017, February). Bogotá registra la temperatura más alta en su historia. *Semana*, 1.
- US EPA, OAR,OAP, C. (2015). *Using Green Roofs to Reduce Heat Islands*, 2.
- Wan, K. K. W., Li, D. H. W., Liu, D., & Lam, J. C. (2011). Future trends of building heating and cooling loads and energy consumption in different climates. *Building and Environment*, 46(1), 223–234. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.07.016>
- Yau, Y. H., & Hasbi, S. (2013). A review of climate change impacts on commercial buildings and their technical services in the tropics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 430–441. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.035>
- Gutiérrez, R., Salvador, R., Izaguirre, G., & Manuel, V. (2014). Redalyc.CONFORT TÉRMICO VERSUS CONSUMO ENERGÉTICO EN VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL EN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.
- Mart, C. S. (2018). VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL , EN LA ZONA BARRANQUILLA.