

Universidad Nacional de La Plata  
Facultad de Arquitectura y Urbanismo  
Maestría en Arquitectura y Hábitat Sustentable



**TESIS DE MAESTRÍA EN ARQUITECTURA Y HABITAT SUSTENTABLE**

**SISTEMAS DE CAPTACIÓN SOLAR PARA CLIMA ECUATORIAL  
FRÍO**

Presentado por:  
Juan David Giraldo Gallego

Director:  
Dr. Alejandro Hernández

Abril de 2021

## **DEDICATORIA**

A mi mamá por llenarme de amor y apoyarme en todas las locuras que quiero hacer en la vida. A mi papá por enseñarme cómo caminar en la vida, por convencerme de que puedo hacer lo que me proponga y por hacerme saber el valor de la dedicación y la honestidad. A mi hermano por ser el apoyo anímico, académico y económico a lo largo de mi formación académica. Y finalmente a Claudia Olmos, la persona que con su amor incondicional siempre estuvo apoyando este proceso y me dio fuerzas de continuar aun cuando el panorama esta nublado. Todos ustedes logran sacar la mejor versión de mí.

## Tabla de contenido

PARTE I Tema de Investigación .....	11
1.1 INTRODUCCIÓN.....	12
Arquitectura sustentable.....	12
El plano normativo Colombiano .....	14
Cultura constructiva en Colombia .....	21
Área de estudio .....	24
1.1 ANTECEDENTES.....	33
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	35
1.3 OBJETIVOS.....	37
PARTE II Metodología.....	38
2.1 ESQUEMA METODOLÓGICO .....	39
2.2 ETAPA 1 .....	41
2.3 ETAPA 2 .....	42
2.3 ETAPA 3 .....	44
PARTE III Marco conceptual .....	45
3.1 CALEFACCIÓN SOLAR PASIVA .....	46
Ubicación del Proyecto.....	48
Disponibilidad del recurso solar y movimiento del sol .....	49
Orientación.....	49
Materialidad.....	50
Autonomía de funcionamiento.....	55
3.2 PROYECTOS CON SISTEMAS DE CALEFACCIÓN SOLAR.....	56
PARTE IV Desarrollo.....	66
4.1 ANÁLISIS.....	67
Análisis Climático .....	67

Cuantificación de la ganancia solar en las 5 fachadas para clima ecuatorial .....	77
Análisis de viviendas ubicadas en zona de estudio .....	84
4.2 ANÁLISIS DE IMPORTANCIA RELATIVA DE LAS DIFERENTES VARIABLES QUE INFLUYEN EN UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN SOLAR PASIVO .....	94
Análisis de Sensibilidad.....	94
Simulaciones dinámicas – Análisis de sensibilidad de sistema de calefacción solar pasivo .....	97
Resultados análisis de sensibilidad.....	104
4.3 PROCESO DE OPTIMIZACIÓN .....	112
Algoritmo de optimización .....	112
4.3 RESULTADOS .....	116
Resultados algoritmo de optimización.....	116
CONCLUSIONES.....	125
REFERENCIAS .....	129
ANEXOS .....	135
ANEXO 1 .....	136
ANEXO 2 .....	143
ANEXO 3 .....	161

## Índice de figuras

Figura 1 Casa típica de la antigua Grecia. (González Couret, 2006) .....	13
Figura 2 Construcciones en diferentes zonas climáticas colombianas. Fuente: Conferencia Jorge Ramírez. Cali, noviembre 2005.....	14
Figura 3. Distribución de sistemas constructivos usados para VIS desde el segundo trimestre de 2012 hasta el cuarto trimestre de 2015, según cifras de CAMACOL (2016). Fuente: García López, Stand Villareal, Gómez Cabrera, & Nuñez Moreno (2016). .....	21
Figura 4. Distribución del uso de sistemas constructivos en Colombia. (Construdata, .....	2018)
<a href="http://www.construdata.com/Bc/Otros/Archivos/como_se_construye_en_colombia.asp">http://www.construdata.com/Bc/Otros/Archivos/como_se_construye_en_colombia.asp</a> .....	22
Figura 5. Ubicación zona de estudio propuesta. Recuperado de <a href="https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81rea_metropolitana_de_Bogot%C3%A1#/media/Archivo:Mapa_del_%C3%A1rea_metropolitana_de_Bogot%C3%A1.svg">https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81rea_metropolitana_de_Bogot%C3%A1#/media/Archivo:Mapa_del_%C3%A1rea_metropolitana_de_Bogot%C3%A1.svg</a>	25
Figura 6. Clasificación climática zona de estudio. (IDEAM, 2015) .....	26
Figura 7. Muro exterior planteado para proyecto de vivienda en Bogotá. (Hernández et al, 2014).....	27
Figura 8. Muro exterior planteado para proyecto de vivienda en Bogotá. (Hernández et al, 2014).....	27
Figura 9. Vidrio utilizado para proyecto de vivienda en Bogotá. (Hernández et al, 2014).....	28
Figura 10. Evolución temperatura interior en vivienda ubicada en Bogotá. (Hernández et al, 2014).....	28
Figura 11. Evolución temperatura interior en vivienda ubicada en Bogotá. (Hernández et al, 2014).....	29
Figura 12. Evolución temperatura interior en vivienda ubicada en Bogotá. (Hernández et al, 2014).....	29
Figura 13. (a) Temperaturas medias según la orientación del apartamento en Relación con la temperatura exterior y (b) Temperaturas medias según Nivel del apartamento en relación con la temperatura exterior. (Rodríguez et al, 2019)	31

Figura 14. Insatisfacción según análisis de las tablas de calificación: (a) Según la orientación del apartamento y (b) según el nivel del apartamento. (Rodríguez et al, 2019) .....	31
Figura 15. Temperatura media exterior e interior entre las 17:00 y las 5:00 horas. (Calderón Uribe, 2019).....	32
Figura 16. Energía en las diferentes longitudes de onda. Fuente: El libro de la energía solar pasiva. (Mazria, 1983) .....	47
Figura 17. Factor de transmisión en relación al ángulo de incidencia solar. (Mazria 1983) .....	51
Figura 18. Relación de disponibilidad y demanda del recurso solar. (Hernández, 2017) .....	51
Figura 19. Aislamiento térmico en la envolvente. Fuente: Climate consultant. 2016 .....	54
Figura 20. Esquemas de calefacción solar pasiva. Fuente: Climate consultant. 2016 .....	54
Figura 21. Casa solar Sloan, diseñada por George Keck. Fuente: <a href="https://es.slideshare.net/SebastianGaviorno/tecn-altern-arq-solar">https://es.slideshare.net/SebastianGaviorno/tecn-altern-arq-solar</a> .....	56
Figura 22. Sección funcionamiento de sistema de calefacción solar en Escuela Secundaria de San Jorge, en Wallasey, Inglaterra. Fuente: El libro de la energía solar pasiva. (Mazria, 1983) .....	57
Figura 23. Evolución de la temperatura interior y exterior proyecto Escuela Secundaria de San Jorge, en Wallasey, Inglaterra. Fuente: El libro de la energía solar pasiva. (Mazria, 1983) .....	58
Figura 24. Sección esquema de funcionamiento y evolución de temperaturas al interior en invierno – Restaurante Maximillians. Fuente: El libro de la energía solar pasiva. (Mazria, 1983).....	59
Figura 25. Aporte energético indirecto - muro trombe. Fuente: El libro de la energía solar pasiva. (Mazria, 1983) .....	60
Figura 26. Aportes energéticos indirectos. Invernaderos adosados. Fuente: El libro de la energía solar pasiva. (Mazria, 1983).....	61
Figura 27. Sección de la vivienda Trombe. Fuente: El libro de la energía solar pasiva. (Mazria, 1983).....	62

Figura 28. Fachada norte Estación experimental del INTA. Fuente: Seminario Estrategias arquitectónicas de climatización pasiva, UNLP. Hernández 2017.	63
Figura 29. Evolución de temperatura Estación experimental de INTA. Fuente: Seminario Estrategias arquitectónicas de climatización pasiva, UNLP. Hernández 2017.	63
Figura 30. Comportamiento térmico del edificio aislado térmicamente, con muros Trombe al norte y colectores solares calentadores de aire. (Hernández, 2007)	64
Figura 31. Ubicación estación meteorológica en relación a la zona de trabajo propuesta. Modificado a partir imagen de Wikipedia	67
Figura 32. Rango de temperatura. Fuente: Climate consultant. 2016	68
Figura 33. Zona de convergencia intertropical. Fuente: <a href="https://es.wikipedia.org/wiki/Zona_de_convergencia_intertropical">https://es.wikipedia.org/wiki/Zona_de_convergencia_intertropical</a>	69
Figura 34. Temperatura de Bulbo seco. Fuente: Climate consultant. 2016	70
Figura 35. Humedad Relativa. Fuente: Climate consultant. 2016	71
Figura 36 Radiación solar. Fuente: Climate consultant. 2016	72
Figura 37. Precipitación ciudad de Bogotá. Fuente IDEAM (2016)	73
Figura 38. Precipitación zona altiplano cundiboyacense. Fuente IDEAM (2016)	73
Figura 39. Rosa de los vientos Bogotá. Fuente IDEAM (2016)	74
Figura 40. Dirección y velocidad de los vientos en Bogotá. Fuente IDEAM (2016)	75
Figura 41. Cuadro Psicométrico - Confort adaptativo. Fuente: Climate Consultant. 2016	76
Figura 42. Cuadro Psicométrico - Estrategias a aplicar. Fuente: Climate Consultant. 2016	76
Figura 43. Análisis fachada norte mediante diagrama de sombras. Elaboración propia	79
Figura 44. Análisis fachada sur mediante diagrama de sombras. Elaboración propia	79
Figura 45. Análisis fachada este mediante diagrama de sombras. Elaboración propia	80

Figura 46. Análisis fachada oeste mediante diagrama de sombras. Elaboración propia .....	80
Figura 47. Datos utilizados en software GEOSOL. Elaboración propia.....	81
Figura 48. Datos de cálculo utilizados en el método de Liu-Jordan, software GEOSOL.....	82
Figura 49. Radiación solar incidente en plano vertical en cada una de las 4 orientaciones cardinales en MJ/m <sup>2</sup> día .....	83
Figura 50. Ubicación general de las viviendas encuestadas en el altiplano cundiboyacense. Elaboración propia a partir de plano de Cortés Vecino et al (2010).....	85
Figura 51. Percepción térmica de las viviendas según sus habitantes. ....	86
Figura 52. Sistemas de calefacción utilizados en la zona estudiada.....	86
Figura 53. Material de cubierta predominante en viviendas de la zona estudiada .....	87
Figura 54. Material de muros exteriores predominante en viviendas de la zona estudiada.....	87
Figura 55. Material de puertas exteriores predominante en viviendas de la zona estudiada.....	88
Figura 56. Ventanas utilizadas en viviendas de la zona estudiada .....	88
Figura 57. Aislamiento térmico utilizado en viviendas de la zona estudiada ....	88
Figura 58. Vivienda monitoreada 1. Ubicada en Zipaquirá, Cundinamarca .....	89
Figura 59. Resultados de mediciones de temperatura interior en vivienda ubicada en Zipaquirá. ....	90
Figura 60. Vivienda monitoreada 2. Ubicada en Cota, Cundinamarca.....	90
Figura 61. Resultados de mediciones de temperatura interior en vivienda ubicada en Cota.....	91
Figura 62. Vivienda monitoreada 3. Ubicada en Bogotá, Cundinamarca .....	92
Figura 63. Resultados de mediciones de temperatura interior en vivienda ubicada en Bogotá.....	93
Figura 64. “Representación de varias clases de métodos para el análisis de sensibilidad de acuerdo con dos propiedades: ‘información’, es decir, la cantidad de información producida en términos de la sensibilidad del modelo (a lo largo de la abscisa) y ‘costo’” (Campolongo et al, 1999).....	95

Figura 65. Metodología general para el análisis de sensibilidad R, Python, Grasshopper y EnergyPlus .....	97
Figura 66. Algoritmo de simulación en plataforma Grasshopper.....	99
Figura 67. Modelo 3d habitación típica con invernadero adosado .....	100
Figura 68. Ejemplo de resultados de simulaciones térmicas de acuerdo a variables parametrizadas .....	105
Figura 69. Resultado análisis de sensibilidad por método de Morris en relación al porcentaje de confort interior en horario nocturno.....	106
Figura 70. Resultado análisis de sensibilidad por método de Morris en relación a la temperatura operativa del espacio interior.....	108
Figura 71. Resultado análisis de sensibilidad por método de Morris en relación a la temperatura mínima del espacio interior.....	109
Figura 72. Metodología general de integración de motores térmicos con software de análisis de optimización.....	113
Figura 73. Algoritmo de análisis en la plataforma Rhino / Grasshopper. Líneas entre componentes representan el flujo de los datos. ....	114
Figura 74. Resultados últimas 4 simulaciones – Algoritmo de optimización del sistema solar pasivo.....	119
Figura 75. Visualización de resultados de optimización con selección específica de espacios con sistema de captación solar con orientación sur y simulaciones realizadas en proceso de optimización en orientación sur. ....	121
Figura 76. Escenarios simulados en orientación sur ordenados de mayor porcentaje de confort a menor porcentaje de confort interior. ....	122
Figura 77. Detalle de parámetros y resultados de un caso particular.....	122
Figura 78. Detalle de parámetros y resultados de un caso particular.....	122
Figura 79. Detalle de parámetros y resultados de un caso particular.....	123
Figura 80. Detalle de parámetros y resultados de un caso particular.....	123
Figura 81. Detalle de parámetros y resultados de un caso particular.....	123

## Índice de tablas

Tabla 1. Políticas sectoriales sobre desarrollo urbano. Fuente: Arquitectura y urbanismo sostenible en Colombia. Una mirada al marco reglamentario. (Potes, L et al, 2018). .....	17
Tabla 2. Iniciativas en materia de sostenibilidad y ecourbanismo. Fuente: Arquitectura y urbanismo sostenible en Colombia. Una mirada al marco reglamentario. (Potes, L et al, 2018). .....	18
Tabla 3. Porcentaje de ahorros de energía exigidos en la normativa. (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2015) .....	19
Tabla 4. Ahorros de agua exigidos en la normativa. (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2015).....	19
Tabla 5. Línea base de consumo energético. (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2015).....	20
Tabla 6. Línea base de consumo de agua. (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2015).....	20
Tabla 7. Los materiales en la construcción de vivienda de interés social. Fuente: Guía de Asistencia Técnica para Vivienda de Interés Social. Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio (2011).....	23
Tabla 8. Objetivos y universo de análisis de la investigación .....	37
Tabla 9. Objetivos y actividades específicas a desarrollar .....	40
Tabla 10. Calor específico y capacidad específica de distintos materiales. (Mazria, 1983) .....	52
Tabla 11. Variables que afecta un sistema de calefacción solar .....	55
Tabla 12. Niveles de radiación solar sobre superficie horizontal por hora en Bogotá. Fuente IDEAM (2016) .....	77
Tabla 13. Características físicas de los materiales del caso base. ....	101
Tabla 14. Descripción y rango de las variables trabajadas para el sistema de captación solar .....	103
Tabla 15. Órdenes de clasificación de parámetros de diseño basados en el Análisis de sensibilidad por método de Morris. Los parámetros en <b>negrita</b> y <i>cursiva</i> son identificados como los parámetros altamente sensibles. ....	110
Tabla 16. Datos de salida utilizados en la simulación térmica .....	114

# **PARTE I**

## **Tema de Investigación**

## 1.1 INTRODUCCIÓN

### **Arquitectura sustentable**

La arquitectura proyectada antes del auge energético y tecnológico mundial, debía considerar la variabilidad climática de acuerdo a su localización. El edificio mismo tenía que garantizar el mejor comportamiento higrotérmico al interior de los espacios, debido a que no se contaba con tecnologías de refrigeración y/o calefacción que pudieran contrarrestar los efectos de malas decisiones proyectuales. Es por esto, que a lo largo de la historia los diferentes asentamientos humanos, han practicado la integración de sus construcciones con la naturaleza.

Desde las primeras preocupaciones del hombre primitivo de generar un espacio de cobijo, la vivienda, se plantearon construcciones muy rudimentarias, sin embargo, esta arquitectura primitiva es muy racional y responde perfectamente a las necesidades ecológicas (Buigas 1976). Se hace evidente un entendimiento del lugar donde se ubicaban para adaptarse de la mejor manera posible, pues en una vivienda no se debe pensar únicamente en el factor estético de las formas, sino en las estrategias para garantizar el máximo de confort y salubridad interior posible.

Un buen ejemplo del aprovechamiento de las condiciones naturales en la arquitectura ha podido encontrarse en numerosas ciudades de la antigua Grecia, las cuales “se ordenaban en cuadrícula, donde los espacios habitables eran orientados al sur y relacionados con un patio a través de un pórtico que los protegía del sol alto del verano, a la vez que dejaba penetrar en ellos el sol bajo del invierno” (González Couret, 2006), demostrando la respuesta dada a la necesidad térmica interior de los edificios, con un buen análisis y entendimiento de la mecánica solar.

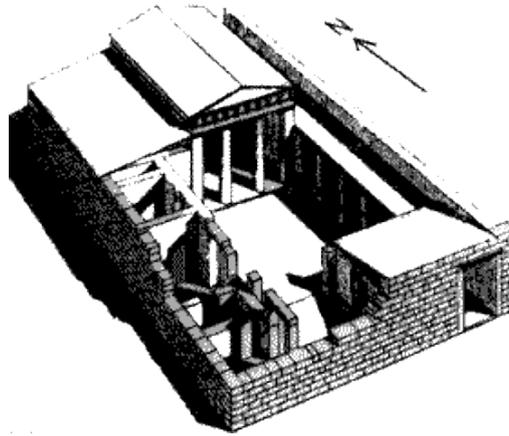


Figura 1 Casa típica de la antigua Grecia. (González Couret, 2006)

La arquitectura vernácula, que basa sus intervenciones en los conocimientos transmitidos de generación en generación y habitualmente es realizada sin arquitectos, refleja una clara postura de las construcciones hacia su entorno ambiental, debido a la necesidad de aprovechamiento de los recursos naturales presentes para brindar construcciones de calidad y espacios confortables.

En el contexto Colombiano, cuando se analizan las construcciones vernáculas en varias regiones se observa el aprovechamiento de la inercia térmica en climas con gran amplitud climática, variabilidad de materiales de acuerdo a la disponibilidad del lugar, circulaciones exteriores cubiertas que a su vez brindan protección solar (zona cafetera y valle del cauca), construcciones palafíticas para alejarse de la humedad del terreno o de los mismos cuerpos de agua, techos en paja o barro, etc. Todas las decisiones en este tipo de arquitectura son en respuesta al clima, disponibilidad de materiales y determinantes ambientales del lugar (Ramírez, 2005).



Figura 2 Construcciones en diferentes zonas climáticas colombianas. Fuente: Conferencia Jorge Ramírez. Cali, noviembre 2005.

Los estilos arquitectónicos del siglo XX, generaron un largo periodo de tiempo en que la arquitectura se alejó del clima y su entorno, concibiendo el mismo tipo de edificios en la gran variedad de climas mundiales, sin ser consciente del consumo energético que producía. “El movimiento moderno dio origen al estilo internacional, planteando el concepto de vivienda típica, repetitiva y estandarizada que se basaba en un ideal de industrialización de la construcción que nunca logró alcanzarse. Partía del modelo productivista y mecanicista del desarrollo que ha sido ampliamente cuestionado desde las últimas décadas del siglo XX” (González Couret, 2006), aunque continúa siendo un modelo común en los desarrollos inmobiliarios contemporáneos.

### **El plano normativo Colombiano**

En el contexto Colombiano se percibe un interés histórico por la problemática ambiental, lo cual se evidencia en el Código Nacional De Recursos Naturales Renovables Y De Protección al Medio Ambiente con el Decreto Ley 2811 de 1974,–y en la Constitución Nacional, en el artículo 79, que dice “Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines”

Como respuesta a las dinámicas internacionales, el congreso de Colombia en 1994 mediante la Ley 164, aprobó la “Convención Marco De Las Naciones Unidas Sobre El Cambio Climático”. Adicionalmente con la Ley 629 de 2000 y el Decreto 1546 de 2005, se ratificó el Protocolo de Kioto. Igualmente se adoptó la Agenda 21, un programa con objetivos globales pero que se lleva a la práctica de manera local. Estos objetivos están relacionados con la construcción, la aplicación de estrategias sostenibles y la mejora del medio ambiente para garantizar una mejor calidad de vida de los habitantes (Naciones Unidas, 2002)

Actualmente, se cuenta en el país con diversos documentos para promover un mejor accionar frente al medio ambiente. En la Tabla 1 podemos observar las políticas sobre el desarrollo urbano catalogadas de acuerdo a su afectación directa.

Ambiente	<p>Política de Gestión Ambiental Urbana (2008).</p> <p>Política de Producción y Consumo Sostenible (2010).</p> <p>Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos (2012).</p> <p>Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas (POMCAs).</p>
Agua	<p>CONPES 3343 de 2005. Lineamientos y estrategias de desarrollo sostenible para los sectores de agua, ambiente y desarrollo sostenible.</p> <p>CONPES 3383 de 2005. Plan de desarrollo del acueducto y el alcantarillado.</p> <p>CONPES 3550 de 2008. Lineamientos para la formulación de política integral de salud ambiental con énfasis en los componentes de calidad de aire, calidad de agua y seguridad química.</p> <p>Política Nacional de Gestión Integral de Recurso Hídrico (2010).</p>

Aire	<p>CONPES 3343 de 2005. Lineamientos y estrategias de desarrollo sostenible para los sectores de agua, ambiente y desarrollo territorial.</p> <p>CONPES 3344 de 2005. Lineamientos para la formulación de la política de prevención y control de la contaminación de aire.</p> <p>CONPES 3550 de 2008. Lineamientos para la formulación de la política integral de salud ambiental con énfasis en los componentes de la calidad del aire, del agua y la seguridad química.</p>
Energía	<p>CONPES 3343 de 2005. Lineamientos y Estrategias de desarrollo sostenible para los sectores de agua, ambiente y desarrollo territorial.</p>
Residuos líquidos y sólidos	<p>CONPES 3343 de 2005. Lineamientos y Estrategias de desarrollo sostenible para los sectores de agua, ambiente y desarrollo territorial.</p> <p>CONPES 3177 de 2002. Acciones prioritarias y lineamientos para la formulación del Plan Nacional de manejo de aguas residuales.</p> <p>CONPES 3383 de 2005. Plan de desarrollo del acueducto y el alcantarillado.</p> <p>CONPES 3530 de 2008. Lineamientos y estrategias para el fortalecimiento del servicio público de aseo en el marco de la gestión integral de residuos sólidos.</p> <p>CONPES 3874 de 2016. Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos.</p>
Clima	<p>CONPES 3242 de 2003. Establece la estrategia institucional para la venta de servicios ambientales de mitigación del cambio climático.</p>

	<p>CONPES 3700 de 2011. Estrategia institucional para la articulación de políticas y acciones en materia de cambio climático en Colombia.</p> <p>Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (2012).</p>
--	--

Tabla 1. Políticas sectoriales sobre desarrollo urbano. Fuente: Arquitectura y urbanismo sostenible en Colombia. Una mirada al marco reglamentario. (Potes, L et al, 2018).

Además, se han presentado algunas iniciativas entorno a la arquitectura y urbanismos sostenible, algunas de ellas con iniciativa gubernamental y otras con iniciativa desde diferentes vertientes del sector productivo. En la Tabla 1 se pueden observar estas iniciativas y quienes las lideraron.

<b>Acciones desde el Estado</b>
Política Pública de Urbanismo y Construcción Sostenible. Departamento Nacional de Planeación (DNP) y Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS).
Política Pública de Construcción Sostenible de la ciudad de Bogotá. Secretaria Distrital de Planeación de Bogotá (SDP) y Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá (SDA).
Reglamento Técnico de Eficiencia Energética en la Vivienda de Interés Social. Ministerio de Minas y Energía y Unidad de Planeación Energética (UPME).
Reglamento Técnico de Agua y Energía. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Departamento Nacional de Planeación (DNP), Sociedad Colombiana de Arquitectos (SCA), Cámara Colombiana de la Construcción (CAMACOL) y Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS).
Política Pública de Construcción Sostenible para el Valle de Aburrá. Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Colegio Mayor de Antioquia.
Sellos de Vivienda con Calidades Ambientales. Fondo Nacional de Ahorro (FNA).
<b>Acciones de iniciativa mixta</b>

Código de Construcción Sostenible. Ministerio de Vivienda, con el apoyo de la Cámara Colombiana de la Construcción (CAMACOL) y la Internacional Finance Corporation (IFC) del Banco Mundial.
Norma Técnica NTC Colombiana 6112. Etiquetas ambientales tipo I. Sello Ambiental Colombiano (SAC). Criterios ambientales para diseño y construcción de edificaciones sostenibles para uso diferente a vivienda. Ministerio de Medio Ambiente e Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).
Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDBC). Ministerio de Vivienda y el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS).
Ciudades Sostenibles. Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Financiera de Desarrollo Territorial (FINDETER) y Departamento Nacional de Planeación (DNP).

Tabla 2. Iniciativas en materia de sostenibilidad y ecourbanismo. Fuente: Arquitectura y urbanismo sostenible en Colombia. Una mirada al marco reglamentario. (Potes, L et al, 2018).

Como normativa final para regular la actividad constructiva, en el 2015 con el Decreto 1285 y la Resolución 0549, se establecen los lineamientos de construcción sostenible en Colombia, enfocando esfuerzos en el ahorro de agua y energía en las edificaciones.

La resolución clasifica las medidas de ahorro como pasivas y activas, y determina los niveles mínimos de ahorro en relación al clima y al uso final de la edificación. En la Tabla 3 y la Tabla 4 se observan los porcentajes de ahorro exigidos en la normativa.

Energía	Porcentajes de ahorro con respecto a la línea base			
	Frío	Templado	Cálido seco	Cálido húmedo
Hoteles	20	35	25	45
Hospitales	35	25	35	30
Oficinas	30	30	40	30
Centros comerciales	25	40	35	30
Educativos	45	40	40	35
Vivivenda NO VIS	25	25	25	45
Vivienda VIS	20	15	20	20
Vivienda VIP	15	15	20	15

Tabla 3. Porcentaje de ahorros de energía exigidos en la normativa. (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2015)

Agua	Porcentajes de ahorro con respecto a la línea base			
	Frío	Templado	Cálido seco	Cálido húmedo
Hoteles	25	10	35	45
Hospitales	10	40	10	40
Oficinas	30	35	45	20
Centros comerciales	25	15	45	20
Educativos	45	40	40	40
Vivivenda NO VIS	25	25	20	20
Vivienda VIS	10	15	10	15
Vivienda VIP	10	15	10	15

Tabla 4. Ahorros de agua exigidos en la normativa. (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2015)

Los porcentajes de ahorro presentados están dados en relación a una línea base que fue creada por medio de relevamientos, encuestas, revisión de factura de servicios públicos y simulaciones dinámicas de diferentes proyectos a nivel nacional. En la Tabla 5 y la Tabla 6 se presentan las líneas base para los diferentes usos y climas.

	Frío	Templado	Cálido seco	Cálido húmedo
Hoteles	96.1 kWh/m <sup>2</sup> -año	151.3 kWh/m <sup>2</sup> -año	132.5 kWh/m <sup>2</sup> -año	217.8 kWh/m <sup>2</sup> -año
Hospitales	249.6 kWh/m <sup>2</sup> -año	108.3 kWh/m <sup>2</sup> -año	344.1 kWh/m <sup>2</sup> -año	344.1 kWh/m <sup>2</sup> -año
Oficinas	81.2 kWh/m <sup>2</sup> -año	132.3 kWh/m <sup>2</sup> -año	318.2 kWh/m <sup>2</sup> -año	221.3 kWh/m <sup>2</sup> -año
Centros comerciales	403.8 kWh/m <sup>2</sup> -año	187.8 kWh/m <sup>2</sup> -año	187.8 kWh/m <sup>2</sup> -año	231.5 kWh/m <sup>2</sup> -año
Educativos	40.0 kWh/m <sup>2</sup> -año	44.0 kWh/m <sup>2</sup> -año	72.0 kWh/m <sup>2</sup> -año	29.8 kWh/m <sup>2</sup> -año
Vivienda NO VIS	46.5 kWh/m <sup>2</sup> -año	48.3 kWh/m <sup>2</sup> -año	36.9 kWh/m <sup>2</sup> -año	50.2 kWh/m <sup>2</sup> -año
Vivienda VIS	44.6 kWh/m <sup>2</sup> -año	44.0 kWh/m <sup>2</sup> -año	34.6 kWh/m <sup>2</sup> -año	49.3 kWh/m <sup>2</sup> -año
Vivienda VIP	48.1 kWh/m <sup>2</sup> -año	53.3 kWh/m <sup>2</sup> -año	44.9 kWh/m <sup>2</sup> -año	50.6 kWh/m <sup>2</sup> -año

Tabla 5. Línea base de consumo energético. (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2015)

	Frío	Templado	Cálido seco	Cálido húmedo
Hoteles	188.5 lt/pers/día	564.0 lt/pers/día	242.0 lt/pers/día	278.9 lt/pers/día
Hospitales	620.2 lt/pers/día	600.0 lt/pers/día	438.0 lt/pers/día	800.0 lt/pers/día
Oficinas	45.0 lt/pers/día	45.0 lt/pers/día	52.0 lt/pers/día	45.8 lt/pers/día
Centros comerciales	6 lt/m <sup>2</sup>	6 lt/m <sup>2</sup>	6 lt/m <sup>2</sup>	6 lt/m <sup>2</sup>
Educativos	50.0 lt/pers/día	50.0 lt/pers/día	50.0 lt/pers/día	24.8 lt/pers/día
Vivienda NO VIS	145.4 lt/pers/día	145.3 lt/pers/día	189.8 lt/pers/día	174.9 lt/pers/día
Vivienda VIS	105.7 lt/pers/día	113.9 lt/pers/día	156.7 lt/pers/día	125.4 lt/pers/día
Vivienda VIP	78.1 lt/pers/día	98.3 lt/pers/día	189.8 lt/pers/día	110.6 lt/pers/día

Tabla 6. Línea base de consumo de agua. (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2015)

La normativa se centra en los ahorros posibles en energía y agua pero no evalúa de ninguna manera el confort interior de las edificaciones, además de no contar con un proceso claro de verificación de su cumplimiento.

## Cultura constructiva en Colombia

A pesar de que la diversidad de los climas en Colombia hace necesario dar una respuesta diferente desde el diseño y la materialidad para cada localidad, la cultura constructiva en Colombia usualmente no hace empleo de materiales acumuladores de calor y aislantes térmicos, como indican las estadísticas de la Cámara Colombiana de la Construcción (CAMACOL, 2016). Además solo tres sistemas constructivos acapararon el área de construcción de VIS iniciada durante el segundo trimestre del 2012 y el cuarto trimestre del año 2015 en las 16 principales ciudades colombianas. Estos fueron: los sistemas industrializados con un 40,37%, la mampostería confinada con un 30,99% y la mampostería estructural con un 27,58%. El 1,01% restante se lo llevaron otros sistemas como la construcción liviana o los sistemas híbridos (Giraldo, 2018).

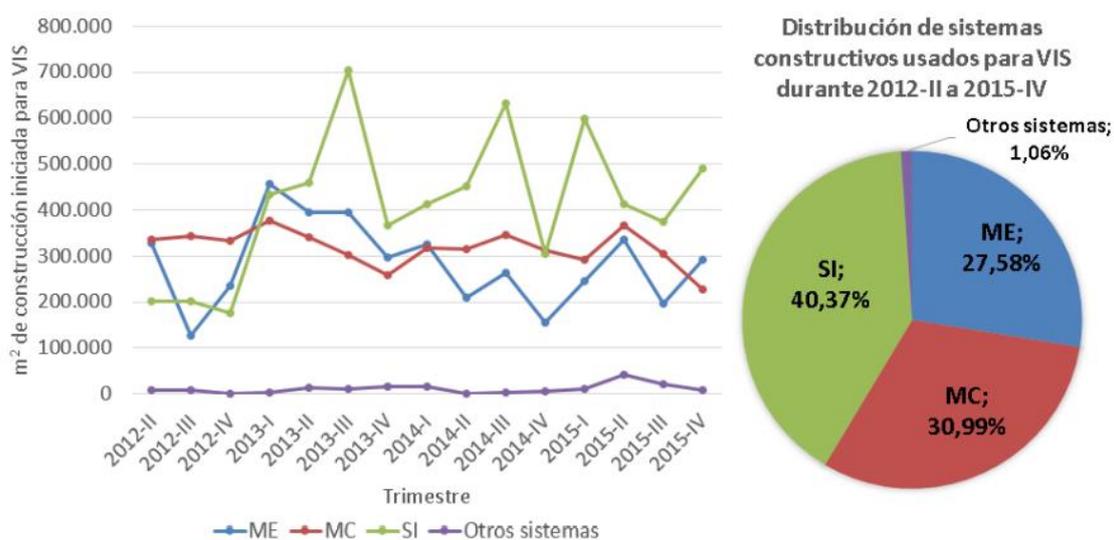


Figura 3. Distribución de sistemas constructivos usados para VIS desde el segundo trimestre de 2012 hasta el cuarto trimestre de 2015, según cifras de CAMACOL (2016). Fuente: García López, Stand Villareal, Gómez Cabrera, & Nuñez Moreno (2016).

Las últimas estadísticas presentadas por la base de datos de la Construcción en Colombia, Construdata (2018), en la Figura 4, se observa que solo tres sistemas constructivos acaparan la construcción de viviendas en el mercado, con un mayor número la mampostería confinada, la cual suele hacerse con bloque hueco de 12 cm con revoque de 1.5 cm en ambas caras.

**Distribución en (%) del uso de los sistemas constructivos en Colombia para VIS y No VIS**

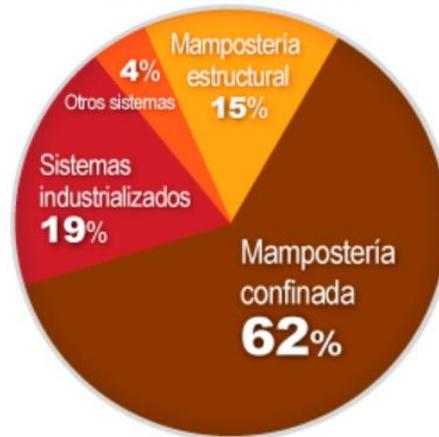


Figura 4. Distribución del uso de sistemas constructivos en Colombia. (Construdata, 2018)  
[http://www.construdata.com/Bc/Otros/Archivos/como\\_se\\_construye\\_en\\_colombia.asp](http://www.construdata.com/Bc/Otros/Archivos/como_se_construye_en_colombia.asp)

La Guía de Asistencia Técnica para Vivienda de Interés Social (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2011), presenta una serie de recomendaciones de materiales desde una perspectiva muy general, sin desarrollar elementos técnicos sobre el aporte térmico de los materiales, lo que puede direccionar a la selección del mismo material en diversidad de climas. Ver Tabla 7.

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 en 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
VENTANAS	Madera con basculantes verticales	Aluminio	Madera con basculantes verticales de mediana abertura	Aluminio
		Vidrio		Vidrio
		Ángulo		Ángulo

Actividades de construcción	Clima cálido seco 24-<sup>°</sup>c		Clima cálido húmedo 24-<sup>°</sup>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	Divisiones internas en materiales ligeros		Bahareque encementado
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
		Lámina		Anjeo
		Anjeo		

Tabla 7. Los materiales en la construcción de vivienda de interés social. Fuente: Guía de Asistencia Técnica para Vivienda de Interés Social. Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio (2011)

Estudios han demostrado que esta manera de construir ha generado espacios construcciones con déficit de confort al interior de los espacios (Hernández et al, 2014; Agudelo, 2014; Cerquera et al, 2016; Latorre, 2017; Calderón Uribe, 2019; Rodríguez et al, 2019), obteniendo espacios muy fríos en los climas ecuatoriales de alta montaña en donde sus ocupantes presentan sensación de insatisfacción.

## **Área de estudio**

“Colombia se encuentra ubicada entre las latitudes 17° norte y 4° sur, lo cual corresponde a la zona tropical. Adicionalmente ciudades con más de 100.000 habitantes como, Rionegro, Manizales, Pasto, Sogamoso, Bogotá y Tunja, se encuentran situadas a más de 2120 metros de altitud sobre el nivel del mar y con una humedad relativa promedio anual de aproximadamente un 70%. Razones por las cuales es fundamental conocer, entender y analizar el confort térmico en zonas frías-húmedas ubicadas en zonas tropicales” (Trujillo et al, 2016)

Como zona de estudio de este trabajo, se planteó el área de la ciudad de Bogotá ya que como ciudad capital de Colombia, se cuenta con mayor información climática y es la zona donde se han realizado más estudios de los comportamientos térmicos de las viviendas construidas (Hernández et al, 2014; Agudelo, 2014; Cerquera et al, 2016; Latorre, 2017; Calderón Uribe, 2019; Rodríguez et al, 2019), además Bogotá y su región metropolitana representan una población de 10 millones de habitantes (DANE, 2012).

La zona propuesta para el análisis se ubica en la cordillera oriental de los Andes. Esta zona presenta gran extensión de territorio con topografía relativamente plana con los prominentes Cerros Orientales en su costado. El área metropolitana de la Sabana de Bogotá incluye: Bogotá, Soacha, Mosquera, Funza, Madrid, Chía, Cajicá, Cota, La Calera, Tenjo, Tabio, Sibaté, Zipaquirá, Facatativá, Bojacá, Gachancipá, Tocancipá y Sopó) con un total de 17 municipios y el Distrito Capital. Ver Figura 5.

Las coordenadas geográficas estimadas son Latitud: 4°35" N Longitud: 74°05' O y la altitud media de la zona es de 2640 msnm, con una clasificación climática según Caldas – Lang, de clima frío semiárido (IDEAM, 2015). Ver Figura 6.



Figura 5. Ubicación zona de estudio propuesta. Recuperado de [https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81rea metropolitana de Bogot%C3%A1#/media/Archivo:Mapa del %C3%A1rea metropolitana de Bogot%C3%A1.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81rea_metropolitana_de_Bogot%C3%A1#/media/Archivo:Mapa_del_%C3%A1rea_metropolitana_de_Bogot%C3%A1.svg)

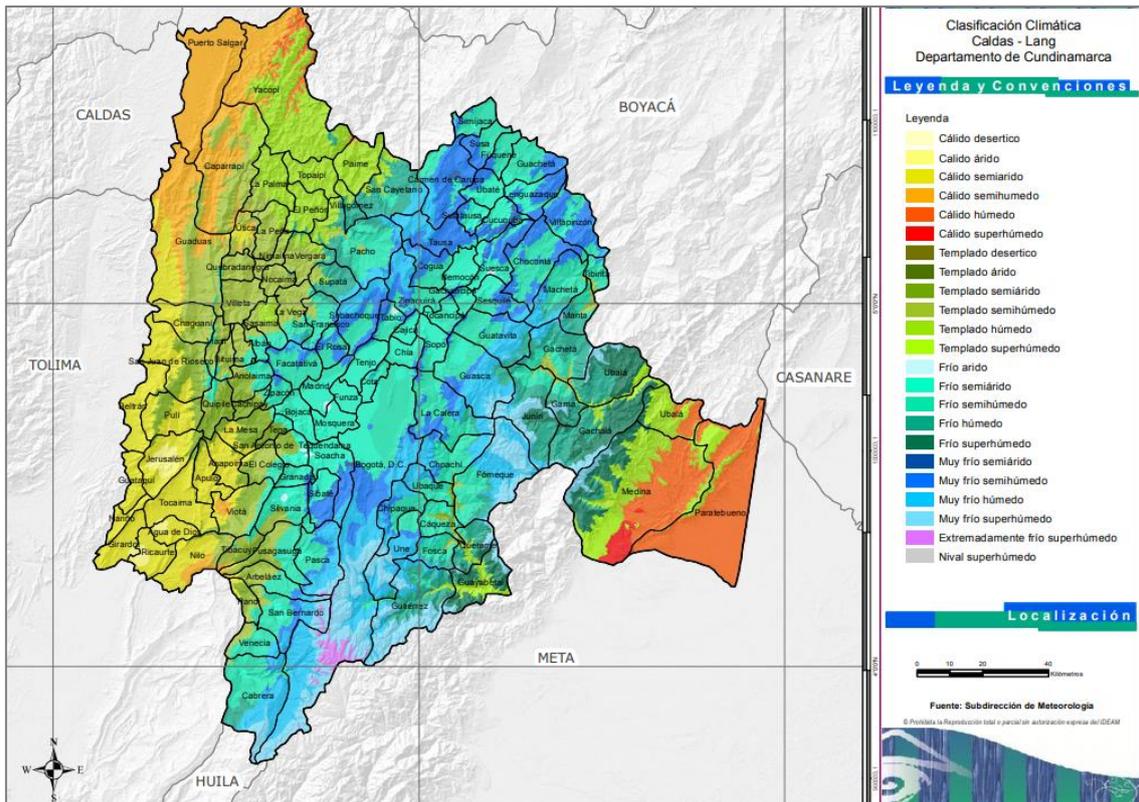


Figura 6. Clasificación climática zona de estudio. (IDEAM, 2015)

## Estudios previos de confort térmico en viviendas en zona de estudio

El confort térmico es una sensación de neutralidad de la persona respecto al ambiente térmico en el que se encuentra. Según la norma ISO 7730 (2005) el confort térmico “es una condición mental en la que se expresa la satisfacción con el ambiente térmico”

Para evaluar el confort térmico dentro de los espacios arquitectónicos, el ASHRAE 55 de 2017 propone un método de cálculo mediante confort adaptativo, el cual considera la temperatura media anual del clima trabajado. Para el área de estudio propuesta se define un rango de confort entre 19,6°C y 24,6°C.

En la zona propuesta para el desarrollo de esta investigación los materiales de mayor uso son el concreto, arcilla, madera, aluminio, vidrio sencillo, teja en fibrocemento o en chapa de zinc (Hernández et al, 2014).

En el estudio realizado por Hernández et al, se verificaron varios proyectos de diferentes constructoras en la ciudad de Bogotá, encontrando en ellos una definición de orientación, materiales o diseño de fachadas sin considerar el clima

del lugar de implantación, lo que genera en su mayoría, espacios con una evolución de temperatura por debajo de la zona de confort térmico.

En las Figura 7 y Figura 8 se evidencia la poca búsqueda diversidad en materialidad, utilizando únicamente bloque de 12 cm o concreto de 12 con pañete en ambas caras. El vidrio sencillo es la respuesta común de diseñadores y constructores para el planteamiento de cerramiento transparente de viviendas en la zona de estudio.

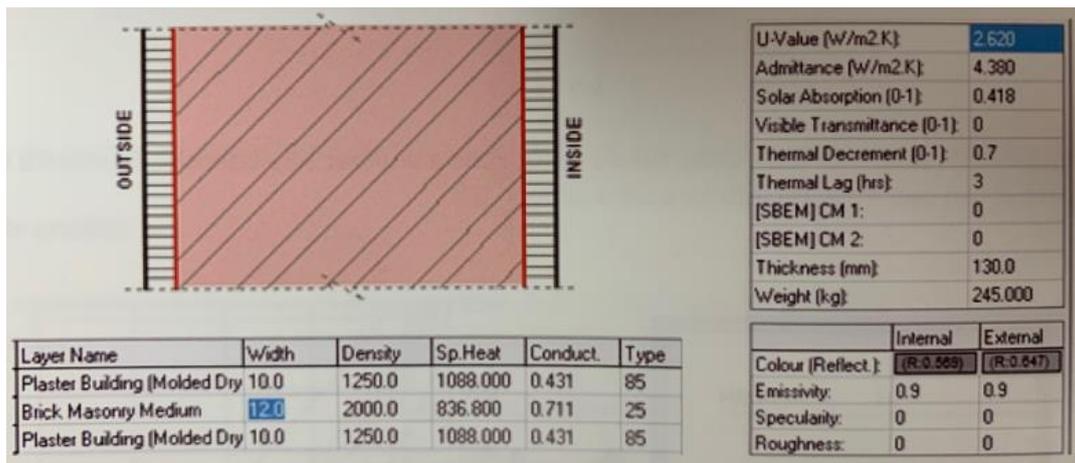


Figura 7. Muro exterior planteado para proyecto de vivienda en Bogotá. (Hernández et al, 2014)

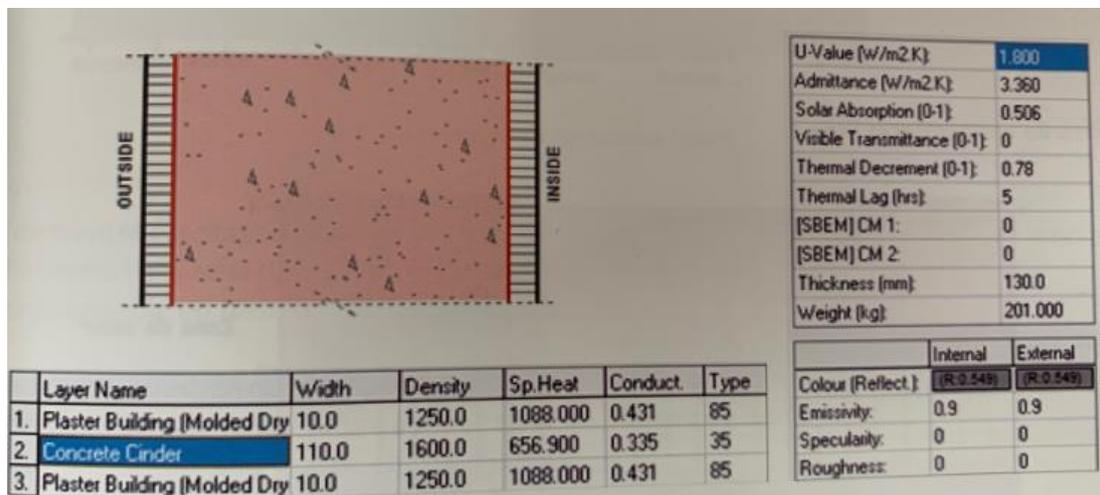


Figura 8. Muro exterior planteado para proyecto de vivienda en Bogotá. (Hernández et al, 2014)

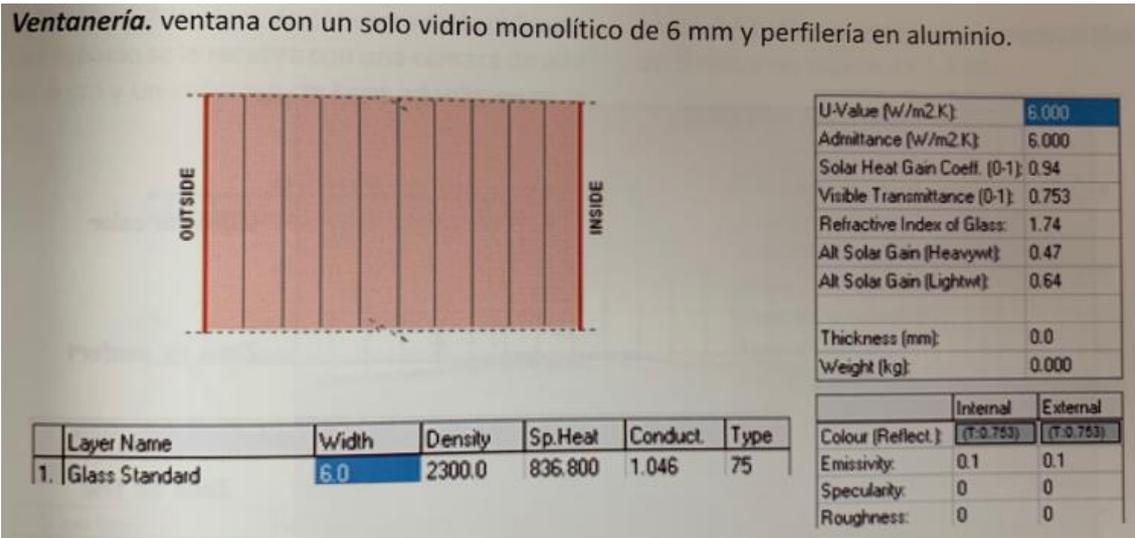


Figura 9. Vidrio utilizado para proyecto de vivienda en Bogotá. (Hernández et al, 2014)

Los resultados obtenidos en las simulaciones térmicas realizadas por Hernández et al (Figuras 10 a 12), nos muestran evolución de las temperaturas interiores de las viviendas cercanas a los 10°C en la noche y madrugada, logrando unos máximos de 18°C en los momentos más cálidos del día. En algunos espacios la oscilación térmica es menos, mostrando temperaturas cercanas a los 15°C durante todo el día.

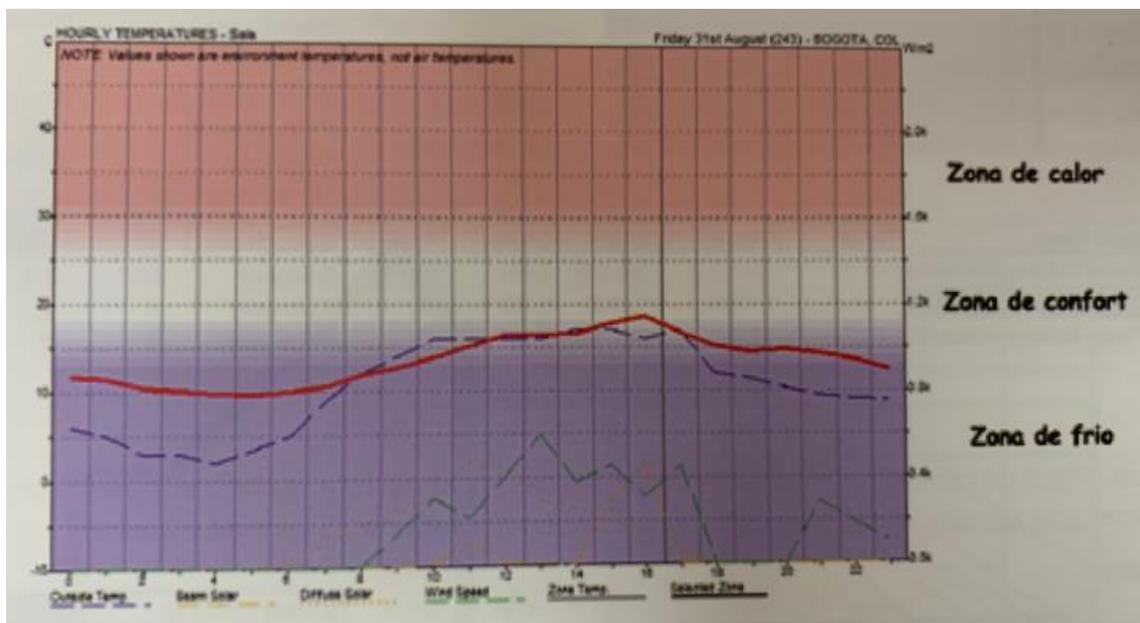


Figura 10. Evolución temperatura interior en vivienda ubicada en Bogotá. (Hernández et al, 2014)

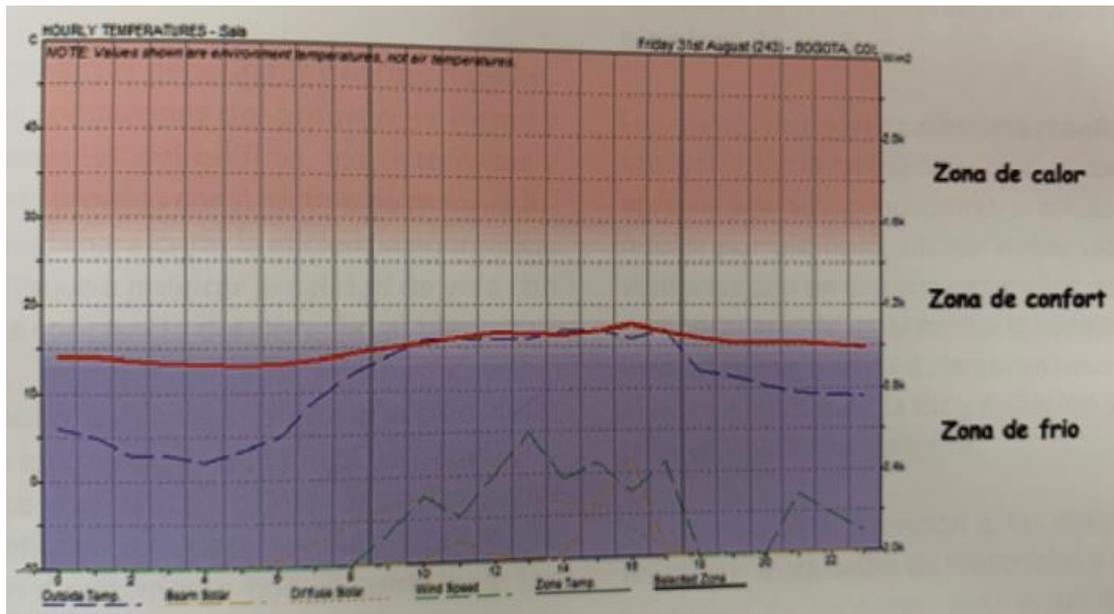


Figura 11. Evolución temperatura interior en vivienda ubicada en Bogotá. (Hernández et al, 2014)

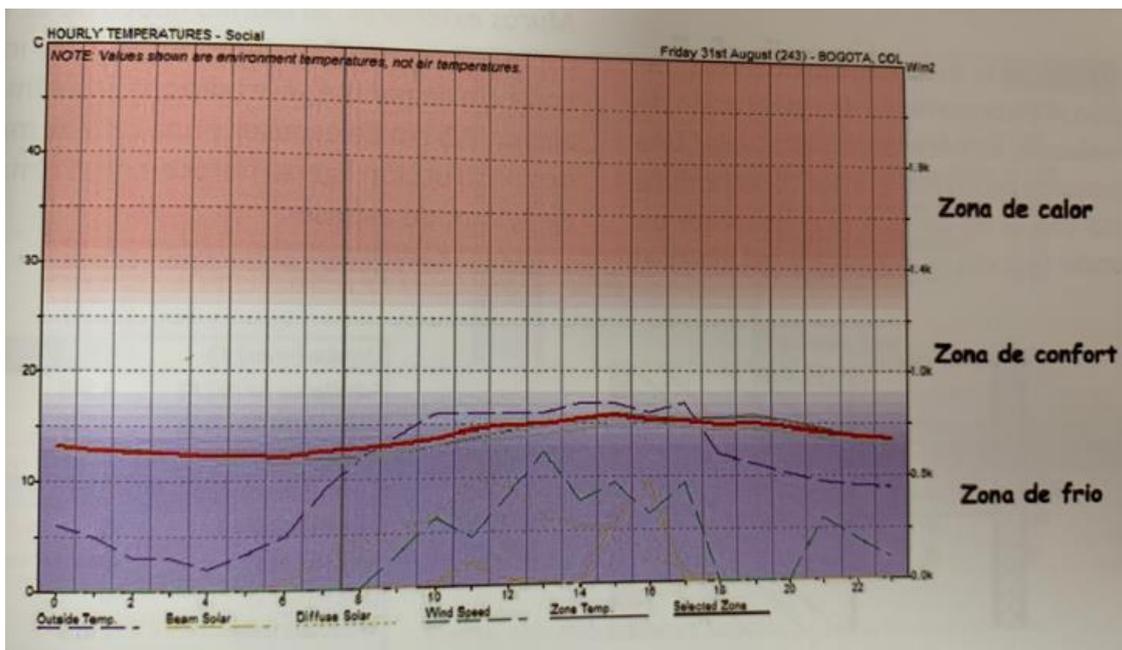


Figura 12. Evolución temperatura interior en vivienda ubicada en Bogotá. (Hernández et al, 2014)

Otras investigaciones han realizado monitoreo de espacios de vivienda construidos en la sabana de Bogotá, en los cuales “un significativo 72,1% de los ocupantes entrevistados informaron que las temperaturas eran frías en sus hogares. 66.6% sintió más frío durante la tarde y la noche, mientras que el 48,9% cree que esto interfiere con sus ocupaciones” (Rodríguez et al, 2019), en la

Figura 13 y Figura 14, se observan las temperaturas registradas por los sensores y el porcentaje de tiempo que presenta insatisfacción térmica el espacio con el modelo PPD.

El comportamiento térmico de los espacios monitoreados, presentan evidencia en algunos casos temperaturas que nunca logran los 20°C al interior, por lo cual los espacios no están garantizando buenas condiciones de confort higrotérmico para sus ocupantes. Además es importante conocer los niveles de aislamiento de la envolvente, ya que “las condiciones de confort térmico son las peores para los pisos superiores seguidos de los pisos inferiores. Lo que se debe a las considerables pérdidas térmicas a través del techo y el suelo” (Rodríguez et al, 2019).

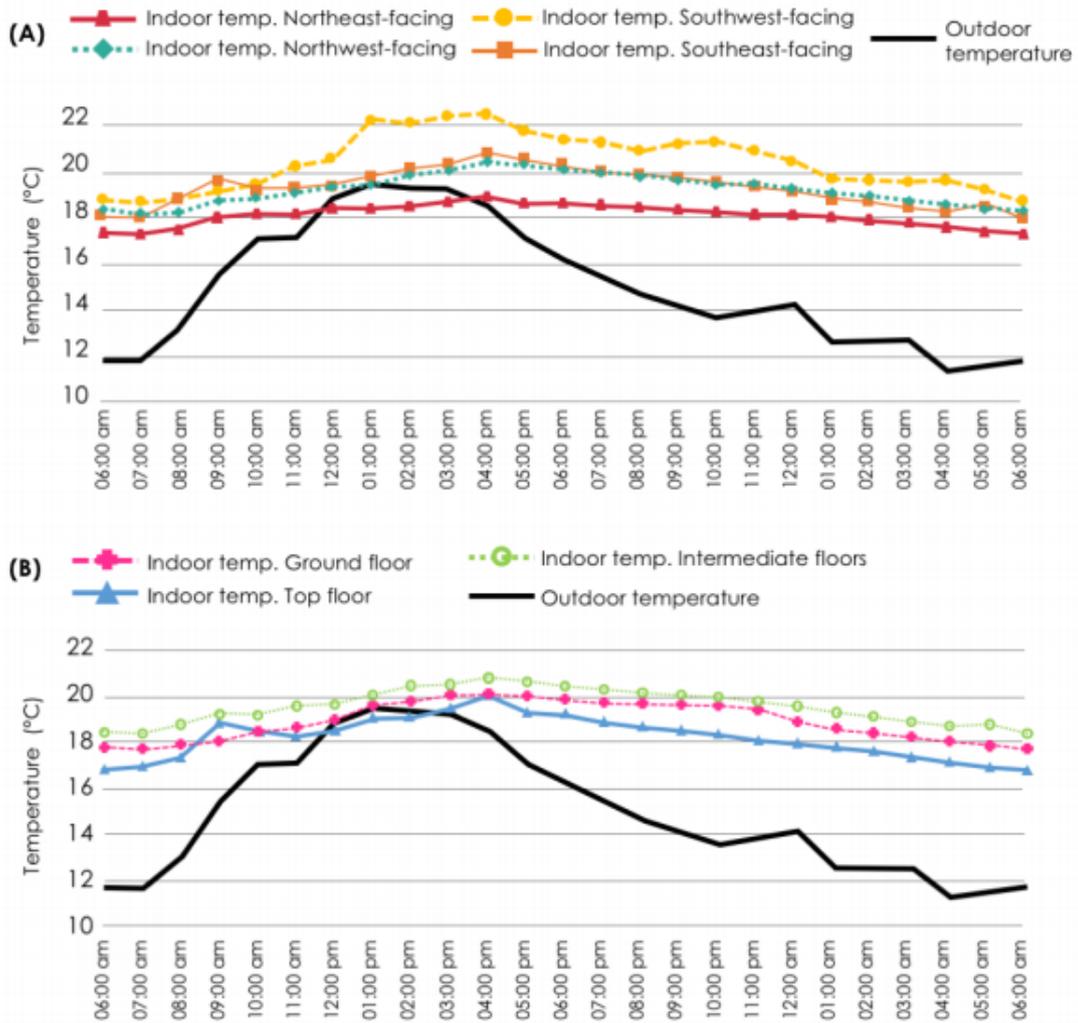


Figura 13. (a) Temperaturas medias según la orientación del apartamento en Relación con la temperatura exterior y (b) Temperaturas medias según Nivel del apartamento en relación con la temperatura exterior. (Rodríguez et al, 2019)

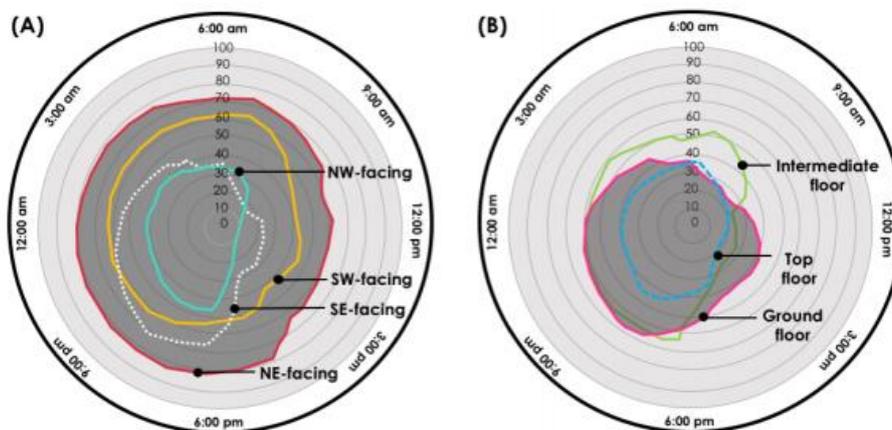


Figura 14. Insatisfacción según análisis de las tablas de calificación: (a) Según la orientación del apartamento y (b) según el nivel del apartamento. (Rodríguez et al, 2019)

Mediciones realizadas en una vivienda de baja densidad en la ciudad de Bogotá (Calderón Uribe, 2019) presenta resultados similares, aunque con temperaturas mucho más bajas en horario nocturno donde la temperatura al interior se comporta muy similar a la temperatura medida en el exterior. Ver Figura 15.

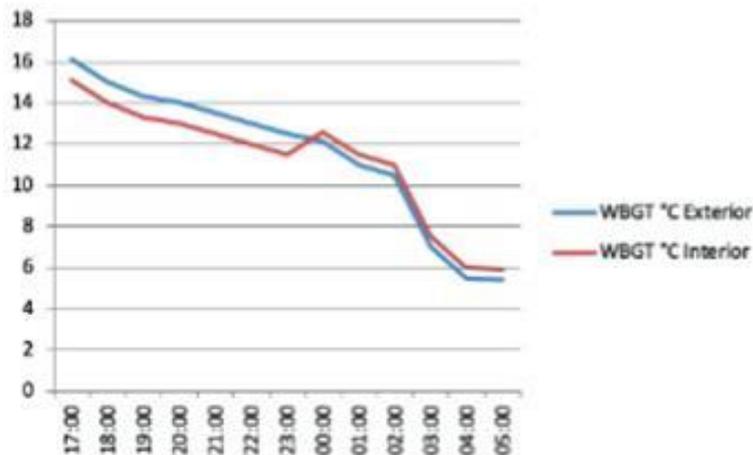


Figura 15. Temperatura media exterior e interior entre las 17:00 y las 5:00 horas. (Calderón Uribe, 2019)

Estos valores se encuentran muy por debajo del rango de confort térmico pues “en la noche y la madrugada las temperaturas mínimas son de 7.6 grados centígrados y la humedad relativa llega al 70%, incrementando la sensación térmica de frío” (Calderón Uribe, 2019).

Los resultados presentados por Hernández et al (2014), Rodríguez et al (2019), Calderón Uribe (2019), son ejemplo de las bajas malas condiciones de confort en viviendas construidas en climas ecuatoriales de alta montaña, las cuales no presentan estrategias de calefacción pasiva, evidenciando una necesidad de explorar estos conceptos en climas de bajas latitudes como la ciudad de Bogotá y zonas aledañas.

## 1.1 ANTECEDENTES

Fueron los romanos los primeros en reconocer y aprovechar el efecto invernadero para calentar sus espacios en invierno, “el concepto de calefacción central se remonta a la época de los romanos, quienes calentaban sus casas utilizando técnicas de construcción de piso doble y haciendo pasar los humos del fuego por la abertura entre las dos capas de piso. Los romanos también fueron los primeros en usar ventanas transparentes” (Çengel, 2007), retomando las ideas planteadas por los griegos en relación a la arquitectura solar “desarrollando la técnica y adaptándola a los diferentes climas del imperio, empleando el vidrio en el cerramiento de las ventanas a fin de incrementar la ganancia de calor solar evitando las pérdidas, y aplicándola en invernaderos y edificios públicos tales como los baños” (Espí, 2014).

Horace de Saussure en el año de (1767) generó bases cuantificables del efecto invernadero, cuando inventó lo que se denominó como Caja Caliente y exploró el poder de calentamiento de una caja con cerramientos acristalados con el interior pintado de negro, obteniendo valores de 109°C; (Oviedo-Salazar et al, 2015) sentando base para futuras investigaciones en sistemas que aprovechan la radiación solar, ya sea para calentar agua o espacios arquitectónicos directamente.

En la primera mitad del siglo XX se retomaron estos conceptos y se realizaron estudios de la influencia del sol en la arquitectura, entendiendo el beneficio que brindaba la radiación solar como fuente de calentamiento; Atkinson en 1912, Henry Wright en 1938, George Fred Keck en 1940 y Arthur Brown en 1945 son ejemplos de una tendencia a estudiar estos conceptos y aplicarlos en el diseño arquitectónico.

“Poco a poco los arquitectos interesados en el concepto de casa solar fueron reinventando las persianas, cortinas, contraventanas y toldos que podían reducir las pérdidas de calor en las noches invernales o la ganancia en los días estivales. Todavía más, Arthur Brown creyó descubrir por vez primera la utilidad del color negro en los muros interiores tras una cristalera orientada al sur, en realidad un principio ya explicitado por Palladio en su tratado del siglo IV” (Espí, 2014).

Diferentes investigaciones han estudiado los aportes solares en el confort interior en los meses fríos del año, (Wright, 1978) y (Mazria, 1983) los cuales presentan la importancia del diseño solar y conceptualiza las diferentes variables físicas que influyen en los sistemas, Steemers, Lewis & Goulding (1992), retomando conceptos trabajados por Mazria y ejemplificando escenarios en diferentes contextos europeos (Sarmiento, 2007), retomando conceptos y aplicándolos al contexto climático Chileno (Guzowski, 2010) y (Ralegaonkar, R. V., & Gupta, 2010), direccionando la práctica solar a la arquitectura inteligente y a la eficiencia energética, tema de gran importancia en las dinámicas mundiales actuales.

Un factor común en todas estas investigaciones y publicaciones es que son desarrollados en climas estacionales, direccionando las recomendaciones a dicho contexto climático, en donde la incidencia de los rayos solares difiere mucho de un contexto tropical.

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Los avances tecnológicos y el auge energético mundial en la segunda mitad del siglo XX, generó estilos arquitectónicos que se fueron alejando de las variables ambientales, acompañados de la poca o inexistente preocupación por el consumo de recursos naturales. Según lo planteado por Mazria en 2003 “la arquitectura se ha distanciado o totalmente divorciado de la naturaleza” ya que se concebían el mismo tipo de edificios en la gran variedad de climas mundiales, sin ser consciente del consumo energético que producía, dejando de lado teorías de incidencia solar en los proyectos de arquitectura, sin plantear con criterio estrategias de protección o captación solar.

El contexto Colombiano no fue ajeno a esta tendencia a pesar de contar con una serie de políticas y normas en torno a las temáticas ambientales, y de tener una normativa específica para limitar los consumos de energía y agua en edificaciones nuevas; en el medio Colombiano aún no se ha masificado la idea de diseñar y construir en relación con el clima.

Algunos autores han analizado viviendas en Colombia encontrando malas condiciones de habitabilidad, según Calderón (2019) “el hábitat seleccionado no presentaba confort térmico en la noche ni en la madrugada; la inercia térmica de los materiales empleados en su construcción era muy baja; los materiales reutilizados tanto en la fachada como en la cubierta (láminas, zinc y tejas de asbesto-cemento, que tienen una inercia térmica de  $0,8 \text{ (W/(m}\cdot\text{K))}$ ) no contribuían a optimizar la inercia térmica”. Estudios realizados en viviendas ubicadas en Bogotá, han reportado que del total de horas del año en el cual dichas viviendas se encuentran dentro del confort térmico es menor al 50% (Agudelo, 2014).

El desarrollo de proyectos inmobiliarios se basa en la premisa económica, buscando el mayor porcentaje de utilidad monetaria posible, por lo cual la orientación y selección de materiales no son factores de alta importancia en las definiciones de diseño; según datos de CAMACOL (2016) y Construdata (2018) los materiales más utilizados son ladrillo hueco en mampostería confinada, teja de chapa y vidrio simple en los diferentes lugares de Colombia, por lo cual se

puede deducir que no hay una respuesta desde los materiales a las diferentes condiciones climáticas presentes en el territorio nacional.

Además, “hay que indicar que en los países latinoamericanos ubicados en la zona del trópico no es habitual implementar sistemas de calefacción ni aire acondicionado; este tipo de sistemas es solamente utilizado por grandes empresas y cadenas hoteleras” (Calderón, 2019), en el imaginario colectivo de las localidades frías no se plantea la posibilidad de comprar equipos que mejoren las condiciones de temperatura interior en edificios de viviendas. Lo anterior junto con malas decisiones de orientación y materialidad, ha generado espacios interiores con temperaturas por debajo de la temperatura de confort térmico como lo vemos en los estudios realizados por Hernández et al. (2014), Agudelo (2014), Cerquera et al. (2016), Latorre (2017), Calderón Uribe (2019) y Rodríguez et al. (2019).

Como una respuesta a esta problemática se plantea estudiar el comportamiento de los sistemas de calefacción solar en climas tropicales fríos y encontrar las principales variables para optimizar el rendimiento de dispositivos de captación de energía solar en dicho contexto climático, ya que en la bibliografía analizada se concentran las recomendaciones y estrategias a climas con variación estacional, en donde el recorrido solar difiere en mucho con las condiciones ecuatoriales, por lo tanto, recomendaciones como la orientación de estos dispositivos pueden no aplicar exactamente igual en la zona planteada para el análisis.

Adicionalmente se considera pertinente estudiar la posibilidad de realizar un dispositivo tipo **prótesis** que permita adherirse a las construcciones existentes y basándose en las premisas de arquitectura solar pasiva aportar en el mejoramiento de las condiciones de confort interior de las viviendas ya construidas en climas ecuatoriales de alta montaña.

## 1.3 OBJETIVOS

### Objetivo General

Definir los aspectos más importantes a considerar en el diseño de sistemas de calefacción solar pasiva en climas ecuatoriales de alta montaña, que propendan al mejoramiento de las condiciones de habitabilidad interior de las viviendas ubicadas en esta condición climática.

### Objetivos Específicos

- Establecer las características mínimas a considerar para el diseño de un sistema de calefacción solar en clima ecuatorial frío
- Analizar las diferentes variables del contexto climático y constructivo local que afectan la propuesta de sistema de calefacción solar pasivo.
- Determinar las variables más importantes en el diseño de un sistema de calefacción solar para clima ecuatorial frío.
- Definir una herramienta existente que sirva de medio para visualizar los resultados e información obtenida del funcionamiento de los dispositivos solares en clima ecuatorial frío.

OBJETIVOS	UNIVERSO DE ANÁLISIS
<b>Obj. Esp. 1</b> - Establecer las características mínimas a considerar para el diseño de un sistema de calefacción solar en clima ecuatorial frío.	Conceptos de sistemas de calefacción solar pasiva, propiedades físicas de transferencia de calor, conceptos de mecánica solar, proyectos con aplicación de sistemas de calefacción solar pasivo.
<b>Obj. Esp. 2</b> - Analizar las diferentes variables del contexto climático y constructivo local que afectan la propuesta de sistema de calefacción solar pasivo.	Condiciones climáticas de la zona de estudio, temperatura, radiación solar, recorridos solares. Tipologías de viviendas en zona de estudio y caracterización térmica de las mismas. Percepción térmica de los ocupantes de las viviendas.
<b>Obj. Esp. 3</b> - Determinar las variables más importantes en el diseño de un sistema de calefacción solar para clima ecuatorial frío.	Tabla de las diferentes variables de los sistemas de calefacción solar. Software de simulaciones térmicas paramétricas. Simulaciones térmicas con análisis de sensibilidad para determinar el nivel de importancia de cada variable en las condiciones climáticas de la zona de estudio.
<b>Obj. Esp. 4</b> – Definir una herramienta existente que sirva de medio para visualizar los resultados e información obtenida del funcionamiento de los dispositivos solares en clima ecuatorial frío.	Software de simulaciones térmicas paramétricas. Inteligencia artificial aplicado a los procesos de simulación de edificios. Algoritmos de optimización. Plataformas de visualización de datos simulados.

Tabla 8. Objetivos y universo de análisis de la investigación

# **PARTE II**

## **Metodología**

## 2.1 ESQUEMA METODOLÓGICO

La metodología propuesta para el desarrollo del presente trabajo se compone de tres etapas; la primera etapa se centra en el análisis del estado del arte, la segunda etapa en estudiar de las diferentes variables de la zona de estudio que inciden en los sistemas de calefacción solar y la tercera etapa busca sintetizar los resultados en una herramienta de fácil manejo para el diseño de sistemas de calefacción solar pasiva en climas fríos tropicales.

La primera etapa se centra en las actividades que se direccionan al cumplimiento del objetivo específico 1 “Establecer las características mínimas a considerar para el diseño de un sistema de calefacción solar en clima ecuatorial frío” y para llegar ahí se pretende estudiar los conceptos de sistemas de calefacción solar pasiva, propiedades físicas de transferencia de calor, conceptos de mecánica solar y proyectos con aplicación de sistemas de calefacción solar pasivo que se han realizado en diferentes lugares del mundo.

La segunda etapa se centra en el desarrollo de la investigación planteada, en procura de dar cumplimiento del objetivo específico 2 “Analizar las diferentes variables del contexto climático y constructivo local que afectan la propuesta de sistema de calefacción solar pasivo”, analizando las consideraciones climáticas de la zona de estudio, información que servirá de input en los procesos posteriores de análisis del sistema de calefacción solar, además de conocer de primera mano las condiciones de habitabilidad de las viviendas de la zona de trabajo, por medio de encuestas y monitoreo a algunos casos puntuales.

En esta segunda etapa también se abordan las actividades que se dirigen a cumplir el objetivo específico 3 “Determinar las variables más importantes en el diseño de un sistema de calefacción solar para clima ecuatorial frío.”; teniendo en cuenta la tabla de las diferentes variables de los sistemas de calefacción solar (generada en la etapa 1), que permite definir los elementos a analizar en un contexto tropical; se presenta la metodología de simulación a utilizar y mediante un análisis de sensibilidad de las variables definidas se determina el nivel de importancia de cada elemento analizado en las condiciones climáticas de la zona de estudio.

La tercera etapa presenta los resultados de las diferentes simulaciones realizadas, brinda los primeros resultados de las variables que son de mayor importancia en el diseño de dispositivos de calefacción solar en climas ecuatoriales fríos y posteriormente, mediante una plataforma de visualización en línea, ofrece una “herramienta” de predimensionamiento de un sistema de calefacción en zonas climáticas con condiciones similares al clima analizado en el presente trabajo.

En la Tabla 9 se presentan las actividades específicas para el cumplimiento de cada objetivo planteado.

<b>Etapa 1</b>	<b>Obj. Esp. 1</b> - Establecer las características mínimas a considerar para el diseño de un sistema de calefacción solar en clima ecuatorial frío.	Actividad 1 - Revisar la bibliografía
		Actividad 2 - Establecer los criterios mínimos para considerar en el diseño del sistema de calefacción solar
<b>Etapa 2</b>	<b>Obj. Esp. 2</b> - Analizar las diferentes variables del contexto climático y constructivo local que afectan la propuesta de sistema de calefacción solar pasivo.	Actividad 3 - Análisis consideración climática de la zona de trabajo.
		Actividad 4 - Analizar tipologías de viviendas construidas en climas tropicales de alta montaña como insumo para el planteamiento del dispositivo de calefacción solar.
		Actividad 5 - Aplicar encuestas a los usuarios para establecer un diagnóstico de viviendas construidas, analizar las tipologías encontradas y conocer las necesidades térmicas y hábitos de uso de las viviendas en la zona de estudio.
	<b>Obj. Esp. 3</b> - Determinar las variables más importantes en el diseño de un sistema de calefacción solar para clima ecuatorial frío.	Actividad 6 – Realizar análisis de sensibilidad para determinar el nivel de impacto de cada característica del dispositivo de calefacción solar
<b>Etapa 3</b>	<b>Obj. Esp. 4</b> - Definir una herramienta existente que sirva de medio para visualizar los resultados e información obtenida del funcionamiento de los dispositivos solares en clima ecuatorial frío.	Actividad 7 – Simular térmicamente diferentes configuraciones de dispositivo de calefacción solar y cuantificar su aporte a la habitabilidad interior de las viviendas en la zona de estudio. Actividad 8 – Realizar optimización del dispositivo de calefacción solar pasiva en clima frío ecuatorial. Actividad 9 – Conectar resultados de optimización a una herramienta de visualización rápida para fácil manejo de la información

Tabla 9. Objetivos y actividades específicas a desarrollar

## 2.2 ETAPA 1

Se realiza una revisión inicial del estado del arte: libros, artículos y proyectos, entendiendo las diferentes consideraciones de los sistemas de captación solar en el mundo para establecer criterios mínimos a analizar en la definición del sistema de calefacción solar pasivo en climas tropicales de alta montaña.

Esta revisión se hace en primera medida desde aspectos conceptuales, y posteriormente se analizan proyectos que hayan aplicado sistemas de calefacción solar en diferentes partes del mundo.

El primer documento revisado fue el “Libro de la energía solar pasiva” (Mazria, 1983), de donde se pudo extraer una primera versión de los diferentes conceptos que deben considerarse en el diseño de los sistemas de calefacción solar pasiva, ya que Mazria se enfoca en abordar el problema desde sus bases conceptuales y posteriormente presenta una serie de obras que aplican dichos conceptos.

Felix Marin en el documento “La arquitectura solar pasiva” nos da una versión menos detallada, abordando únicamente los aspectos que consideraba pertinente en el diseño de la este tipo de arquitectura, entre ellos el aislamiento térmico, la inercia térmica y la ventana como colector solar.

Otros trabajos revisados de manera conceptual fueron los realizados por Steemers, Lewis & Goulding, (1992), Sarmiento (2007), Guzowski (2010) y Ralegaonkar, R. V., & Gupta, (2010).

Posteriormente se revisaron proyectos de ejemplo de aplicación de estos sistemas, varios de los cuales son referenciados en los diferentes libros y artículos que se revisaron en la parte conceptual de los sistemas.

Esta etapa termina generando una tabla con los elementos relevantes en el diseño de un dispositivo de calefacción solar, las cuales serán evaluadas en el clima trabajado en la siguiente etapa del trabajo.

## 2.3 ETAPA 2

Tomando como punto de partida los datos meteorológicos suministrados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), de la estación meteorológica ubicada en el Aeropuerto El Dorado de la ciudad de Bogotá, se realiza un análisis general de las condiciones meteorológicas de la zona estudiada, y de los diferentes parámetros climáticos, haciendo énfasis en la radiación solar incidente, siendo este uno de los factores más relevantes a considerar para aplicar sistemas de calefacción solar pasivos.

Con el fin de analizar los datos de radiación solar suministrados por la estación meteorológica, se utiliza el software Geosol para cuantificar la radiación solar incidente en las 4 orientaciones cardinales básicas, ya que debido al recorrido solar en la zona tropical, todas las fachadas reciben radiación solar en diferentes épocas del año y en diferentes horas del día.

Con el fin de analizar diferentes viviendas en la zona de estudio, se realizaron una serie de encuestas a personas que habitan la zona del altiplano cundiboyacense, para de esta manera establecer el nivel de confort, nivel de adaptabilidad y satisfacción con el comportamiento térmico interior de su vivienda.

En la percepción de los ocupantes de las viviendas encuestadas, se considera la vivienda predominantemente fría, en un 51.7% de los casos, lo que hace evidente una carencia en el confort interior de las viviendas en la zona trabajada.

Adicionalmente la encuesta permitió conocer las características constructivas de las casas en la zona de estudio, donde se evidencia el casi inexistente uso de aislamientos térmicos en la envolvente arquitectónica.

En este proceso se pudo observar una gran variedad de formas y tamaños de viviendas, sin ser clara una tipología en la zona de estudio, por lo cual se eligieron 3 viviendas, en las que los ocupantes hayan manifestado sensación de frío, con características formales diferentes entre ellas, para verificar de primera mano cuales son las temperaturas interiores y verificar si se encuentran en rango de confort térmico.

Las temperaturas obtenidas en este proceso demostraron la necesidad de mejorar el comportamiento térmico de las viviendas construidas, ya que se encontraron espacios con temperaturas muy por debajo del rango de confort térmico recomendado para el clima trabajado; lo cual está muy relacionado con la sensación de sus ocupantes.

Posteriormente se realiza una búsqueda de herramientas que permitan evaluar de manera eficaz la importancia relativa de las diferentes variables de diseño de un sistema de calefacción solar definidas en la etapa 1. Con el objetivo de hacer el mayor número de simulaciones y analizar la mayor cantidad de variables en la configuración de un sistema de captación solar en la zona de estudio, se utilizan programas de simulación paramétricos, con el plugin Honeybee para Grasshopper, complemento del software Rhinoceros. Este plugin permite traducir la geometría paramétrica a formato de OpenStudio para posteriormente ser simulada con el motor de cálculo EnergyPlus.

Como metodología para el análisis del peso de cada variable en el comportamiento térmico del espacio analizado se utiliza el análisis de sensibilidad de Morris (1991), el cual demuestra tener un buen comportamiento costo/beneficio en relación al número de variables analizadas y a los resultados esperados.

Los resultados obtenidos determinan las variables de especial cuidado en el diseño de este tipo de sistemas en climas ecuatoriales de alta montaña.

Como complemento a este análisis se plantea realizar una optimización del sistema de calefacción solar para una habitación típica de la zona trabajada, y de esta manera ver si el comportamiento de la optimización con apoyo de Inteligencia Artificial (IA), la cual dirige los resultados a evidenciar la misma importancia de cada parámetro de diseño presentado en el análisis de sensibilidad.

### **2.3 ETAPA 3**

La tercera etapa presenta los resultados de las diferentes simulaciones realizadas en el proceso de optimización y se concluyen cuales son las variables identificadas como las de mayor importancia para mejorar el comportamiento térmico de los espacios de uso nocturno en el clima trabajado.

Posteriormente ofrece una herramienta de visualización que puede ser aprovechada como “herramienta” de predimensionamiento de un sistema de calefacción en zonas climáticas con condiciones similares al clima analizado en el presente trabajo.

Estas variables principales son: (1) Número de personas en el lugar, (2) longitud del sistema de calefacción solar, (3) aislamiento térmico del techo, (4) altura del sistema de calefacción solar. Presentándose la primera gran diferencia con los climas estacionales, donde la orientación entra a ser la variable más importante en el diseño de dispositivos de calefacción solar.

Es importante aclarar que para que esta visualización de resultados pueda ser considerada una herramienta es necesario continuar con investigaciones que la complementen, redefiniendo parámetros de simulación con el fin de generar un aplicativo en línea que sirva de apoyo en los procesos de diseño de dispositivos de calefacción solar pasiva en climas ecuatoriales fríos.

# **PARTE III**

## **Marco conceptual**

### 3.1 CALEFACCIÓN SOLAR PASIVA

Al hablar de sistemas de calefacción solar pasiva es importante hablar del sol como la fuente de energía para nuestro planeta; el sol se encuentra emitiendo constantemente energía en diferentes longitudes de onda, y una pequeña parte de la radiación emitida es interceptada por la Tierra, “cuando los rayos solares ya pueden considerarse paralelos” (Mazria, 1983) debido a la distancia del sol a la Tierra.

Para proyectar arquitectura solar, se debe tener un claro entendimiento del sol y su incidencia en la tierra, entender la radiación solar y las diferentes longitudes de onda que inciden en nuestro planeta determina las respuestas formales y materiales para poder aprovechar esta energía.

“La radiación solar incidente se clasifica por su longitud de onda, el 49% de la radiación emitida por el Sol, que se acusa en forma de calor, es una radiación de onda más larga que el rojo del espectro visible (mayor de 0.75 micras)” (Mazria, 1983). Es esta energía la que debemos entender y poder aprovechar en los diseños arquitectónicos para el planteamiento de sistemas solares de calefacción.

La intensidad de la radiación solar que incide sobre la superficie de la tierra varía en relación a la época del año y a la hora del día, ya que debido a la traslación y a la rotación de la Tierra, el espesor de atmósfera que debe atravesar la radiación solar varía (Mazria, 1983), haciendo necesario un análisis particular de cada localidad para un diseño de sistema de calefacción solar pasivo.

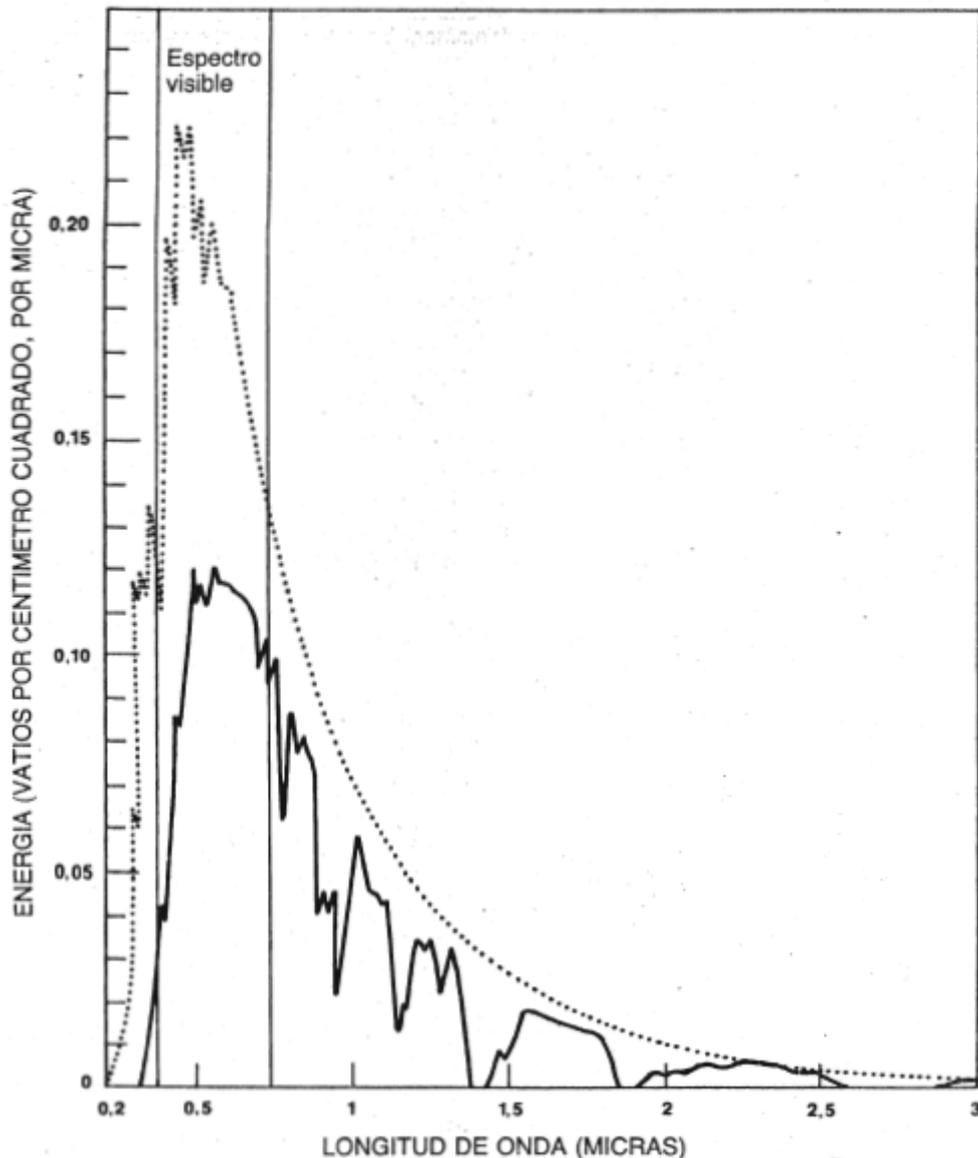


Figura 16. Energía en las diferentes longitudes de onda. Fuente: El libro de la energía solar pasiva. (Mazria, 1983)

Aprovechar esta energía en la arquitectura nos permite calefaccionar los ambientes en los diferentes climas fríos del mundo; “las ventajas de las aplicaciones de la energía solar radican en que es una energía inagotable y en abundancia, no es contaminante y de un bajo costo de inversión relativo” (Sarmiento, 2008), por lo cual se ve con potencial de aplicación en la zona de estudio del presente trabajo.

Con el fin de poder aprovechar todo el potencial solar en la zona trabajada, se debe estudiar los diferentes factores que influyen para un buen funcionamiento de los dispositivos de calefacción solar pasiva, ya que los edificios “están inevitablemente sujetos a una amplia gama de influencias y debe estar diseñado para dar un desempeño satisfactorio sobre toda la gama de variación de los muchos fenómenos que le afectan al mismo tiempo” (Ralegaonkar et al, 2010); es claro que “un invernadero aumenta la temperatura fuera de la pared exterior del edificio al capturar energía solar” (Wright, 1979), pero se debe tener mayor certeza de las diferentes variables involucradas en este proceso de calentamiento para poder generar el sistema óptimo en el clima trabajado.

Los sistemas de calefacción solar pueden ser pasivos o activos, ambos buscan el aprovechamiento solar, pero los sistemas pasivos se basan en fenómenos físicos para captar y transportar el calor, por lo cual no utilizan ningún sistema mecánico de apoyo, como si lo hacen los sistemas activos.

Los primeros elementos recurrentes en los diferentes documentos consultados son: 1) Aberturas acristaladas expuestas al paso del sol, 2) Un medio para recolectar y almacenar la energía del sol que ingresa, 3) Una piel exterior aislada.

Estos 3 elementos son los puntos básicos requeridos para un sistema de calefacción solar, pero en un diseño eficiente de un colector solar hay que considerar varios aspectos adicionales, como los que se exponen a continuación, con base en la bibliografía consultada.

### **Ubicación del Proyecto**

En el escenario de poder intervenir el proyecto arquitectónico considerando la importancia de la ganancia solar para los momentos fríos, es importante contar con un buen análisis de asoleamiento del lote. El recorrido solar es único en cada localidad, es importante considerar la dirección de incidencia de los rayos solares y la sombra arrojada por edificaciones, geomorfología o vegetación cercana al proyecto; lo anterior determinará la orientación y zonificación de la vivienda como respuesta al sol, además nos permitirá dimensionar los sistemas de calefacción solar pasiva.

## **Disponibilidad del recurso solar y movimiento del sol**

Tener claridad de los diferentes factores climáticos es fundamental para poder plantear estrategias de calefacción solar. La radiación solar incidente en cada lugar varía en relación a la latitud, altitud sobre el nivel del mar y niveles de nubosidad presente. La búsqueda de datos meteorológicos precisos garantiza un mejor cálculo y cuantificación de los sistemas de captación y acumulación de ganancia energética solar.

La latitud de un lugar determina si se cuenta con cambios estacionales, además de poder conocer los ángulos de incidencia solar sobre las diferentes superficies del proyecto, ya que a medida que nos acercamos al ecuador los rayos solares tienden a ser más verticales (Wright, 1979). Además determina el movimiento aparente del sol en nuestra atmósfera, factor que sirve para identificar las fachadas con mayor incidencia solar y para verificar los ángulos en los cuales las diferentes superficies del proyecto reciben los rayos solares, ya que “el ángulo con el que inciden los rayos de sol sobre una superficie determinará la cantidad de energía que recibe esta superficie” (Mazria, 1983).

La altitud y los niveles de nubosidad afectan los valores de radiación solar que pueden incidir en el proyecto, ya que a mayor altitud los niveles de radiación solar aumentan, y con mayor presencia de nubosidad los niveles de radiación solar directa disminuyen y la radiación solar difusa aumenta. (Steemers et al, 1992).

## **Orientación**

Debido a la variación en la incidencia de los rayos solares, la orientación de los proyectos arquitectónicos y de sus superficies acristaladas, determinan en gran medida su comportamiento térmico interior.

Un factor común encontrado en la bibliografía analizada es que, al ubicarse en climas principalmente estacionales, las recomendaciones de orientación se dirigen a este tipo de contextos, sin abordar con claridad la condición de clima tropical.

La respuesta de la orientación de las diferentes viviendas solares es clara, “en el hemisferio norte, la mayoría de sus ventanas están orientadas al sur, en el

hemisferio sur, sus ventanas están orientadas al norte” (Holloway, 2000). Esta respuesta es evidente en estos contextos, en donde el momento frío del año (cuando se requiere la calefacción solar) tiene una dirección clara de los rayos solares. Para los proyectos ubicados en el hemisferio norte es imprescindible buscar una orientación sur con sus aperturas y sistemas de calefacción solar, dejando la fachada norte lo más hermética posible para reducir las pérdidas térmicas. En el hemisferio sur se debe trabajar bajo la misma lógica, pero invirtiendo las fachadas, fachada norte para ganancia solar y fachada sur hermética para reducir pérdidas térmicas.

En climas ecuatoriales de alta montaña, los momentos fríos, en los que es necesario aprovechar la radiación solar para calefaccionar los espacios, ocurren a lo largo de todo el año, normalmente en horas de la noche y madrugada; lo anterior, junto la tendencia vertical de los rayos solares, hacen que no sea tan clara la orientación óptima de un sistema de calefacción solar.

### **Materialidad**

Los sistemas de calefacción solar pasiva requieren una buena selección de los materiales que lo componen, pues es necesario captar la energía solar a través de un material como el vidrio, que permita el efecto invernadero; y proponer un material que facilite acumular el calor generado, con el fin de poder almacenarlo para los momentos más fríos del día.

### **Elemento de captación**

El elemento de captación de la energía solar debe ser de un material que permita el paso del mayor porcentaje posible de la energía incidente, “el vidrio, que prácticamente deja pasar toda la radiación solar visible que sobre él incide, absorbe en cambio la mayor parte de la infrarroja de larga longitud de onda que intercepta” (Mazria, 1983), lo que lo hace el material idóneo para los elementos de captación solar en climas fríos.

Orientar superficies acristaladas hacia el sol, garantiza el ingreso de energía y produce el efecto invernadero; es importante conocer el recorrido solar de la localidad de trabajo, ya que, el porcentaje de transmisión del vidrio está

relacionado al ángulo de incidencia de los rayos solares (ver Figura 17), el cual varía en relación a la latitud del lugar de implantación.

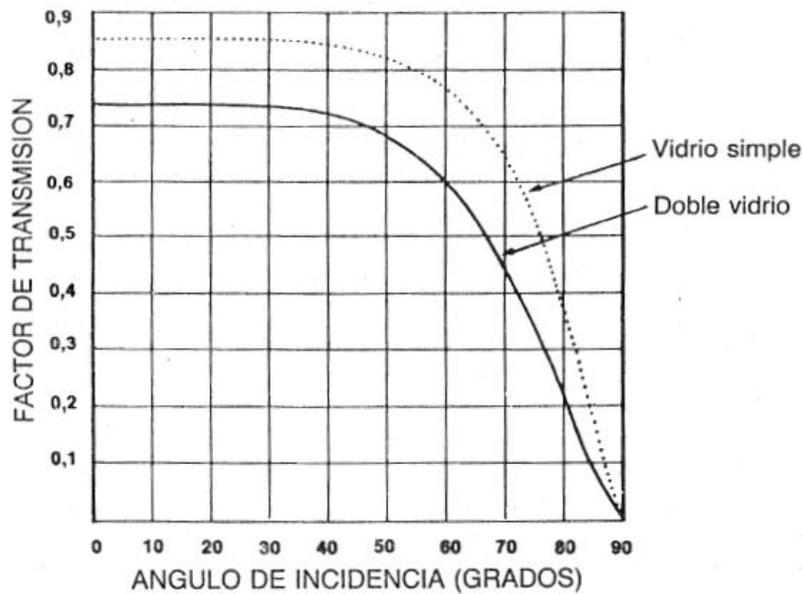


Figura 17. Factor de transmisión en relación al ángulo de incidencia solar. (Mazria 1983)

### Elemento de acumulación térmica

Posterior a que la radiación solar ingrese se debe almacenar la energía térmica en los materiales del proyecto por un determinado periodo de tiempo (Wright, 1979). En un sistema solar pasivo es necesario contar con sistema de acumulación térmica, ya que normalmente el calor generado por el sol es requerido, en mayor medida, en horas de no sol. Ver Figura 18.

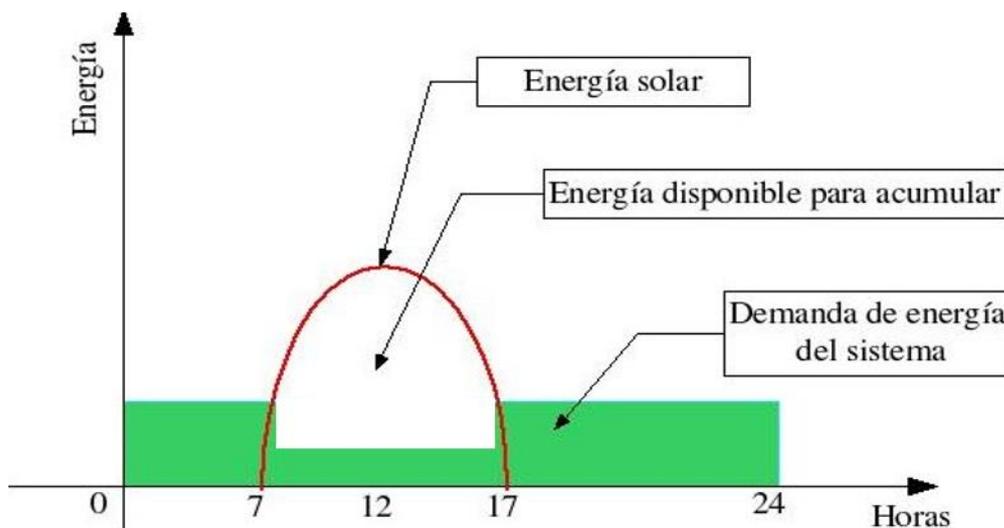


Figura 18. Relación de disponibilidad y demanda del recurso solar. (Hernández, 2017)

Este desacoplamiento entre disponibilidad y demanda del recurso solar, hace necesario estudiar las propiedades térmicas de los materiales en el proyecto arquitectónico, para definir el elemento de acumulación térmica y de esta manera poder garantizar confort interior, reduciendo al máximo la dependencia de sistemas mecánicos de climatización artificial.

Las propiedades que deben considerarse para la elección del material de acumulación de energía térmica para un sistema de calefacción solar pasivo son: el calor específico, la densidad y la conductividad térmica del material.

“Como en construcción, en la práctica, se evalúa a los materiales por su volumen tanto como por su peso, resulta interesante introducir la noción de capacidad térmica (por unidad de volumen) que no es otro que el producto del «calor específico» por la densidad del material (kg por m<sup>3</sup>)” (Mazria, 1983).

<i>Material</i>	<i>Calor específico (kcal/kg-°C)</i>	<i>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Capacidad calorífica (kcal/m<sup>3</sup> °C)</i>
Agua	1	1000	1000
Madera de roble	0,57	750	430
Poliuretano expandido	0,38	24	9
Tejido de lana	0,32	111	35
Aire	0,24	1,2	0,29
Ladrillo	0,20	2000	400
Hormigón	0,156	2300	350
Acero	0,12	7850	950

Tabla 10. Calor específico y capacidad específica de distintos materiales. (Mazria, 1983)

En la Tabla 10 se puede observar que, a pesar de tener un calor específico similar, la diferencia en la densidad entre los diferentes materiales, hace que algunos se descarten inmediatamente como materiales acumuladores de calor.

Adicionalmente se debe mencionar que aunque la madera tiene una capacidad calorífica similar al ladrillo u hormigón, no es utilizada como un material de acumulación térmica debido a que no cuenta con un coeficiente de conductividad térmica alto, alrededor de 0.15 W/m.K dependiendo del tipo de madera, en relación con los valores del hormigón que se encuentran cercanos a los 2 W/m.K, esto hace que en la madera el proceso de transferir el calor a su interior para almacenarlo sea menos eficiente.

Es fundamental seleccionar un material con un valor de capacidad calorífica alto y una buena conductividad térmica para aprovechar al máximo la energía calórica proveniente del sol; además es esencial ubicar el sistema de acumulación de tal manera que reciba directamente los rayos solares (Wright, 1979).

“Materiales adecuados para almacenar el calor ganado durante el día para mantener el calor durante las noches frías son característicamente pesados. Aquellos como ladrillo, hormigón, adobe, piedra y agua son adecuados, mientras la madera, el plástico y otros materiales ligeros no lo son, ya que este último grupo tiene una baja capacidad de almacenamiento de calor.” (Steemers et al, 1992)

### **Aislamiento térmico en envolvente del proyecto**

El aislamiento térmico de la envolvente es necesario para mantener las temperaturas interiores dentro de un rango de confort térmico, aprovechando de esta manera el potencial de los sistemas de calefacción solar pasiva.

Plantear aislamientos térmicos en muros y techo, reduce las pérdidas térmicas en los momentos fríos del año, y de esta manera el calor acumulado brindará las condiciones adecuadas para la comodidad de los ocupantes al mantener las temperaturas interiores dentro del rango de confort térmico.

El concepto de aislamiento térmico está ligado a los conceptos de resistencia térmica (R) y transmitancia térmica (U). La resistencia térmica es la propiedad que tiene el material a resistir el paso de calor y su unidad está dada en  $m^2 \cdot K/W$ . La transmitancia térmica es el inverso de la resistencia y nos dice la cantidad de calor que atraviesa una superficie, la unidad es  $W/m^2 \cdot K$ . Esta propiedad nos dice cuantos vatios de calor pasan por una unidad de superficie cuando la diferencia de temperatura entre un lado y el otro es de  $1^\circ C$  (Steemers et al, 1992), por lo tanto, entre mayor sea este número, mayor será la pérdida térmica de la envolvente de un proyecto constructivo.

Con el objetivo de reducir las pérdidas térmicas de la envolvente de un proyecto que cuente con sistemas de calefacción solar, se recomienda que las superficies exteriores tengan valores  $U \leq 1.1 W/m^2 \cdot K$ , Nivel B según Norma IRAM 11605

(Instituto Argentino de Normalización y Certificación, 2001). Para lograr este valor es necesario implementar una capa de algún material aislante térmico en la composición de la envolvente arquitectónica. Para una mayor eficiencia se recomienda aislar de manera continua toda la envolvente del proyecto. Ver Figura 19 y Figura 20.

Adicionalmente es necesario estudiar los posibles puentes térmicos que puedan presentarse en los diferentes detalles de la envolvente, logrando de esta manera un comportamiento eficiente en el balance global del proyecto.

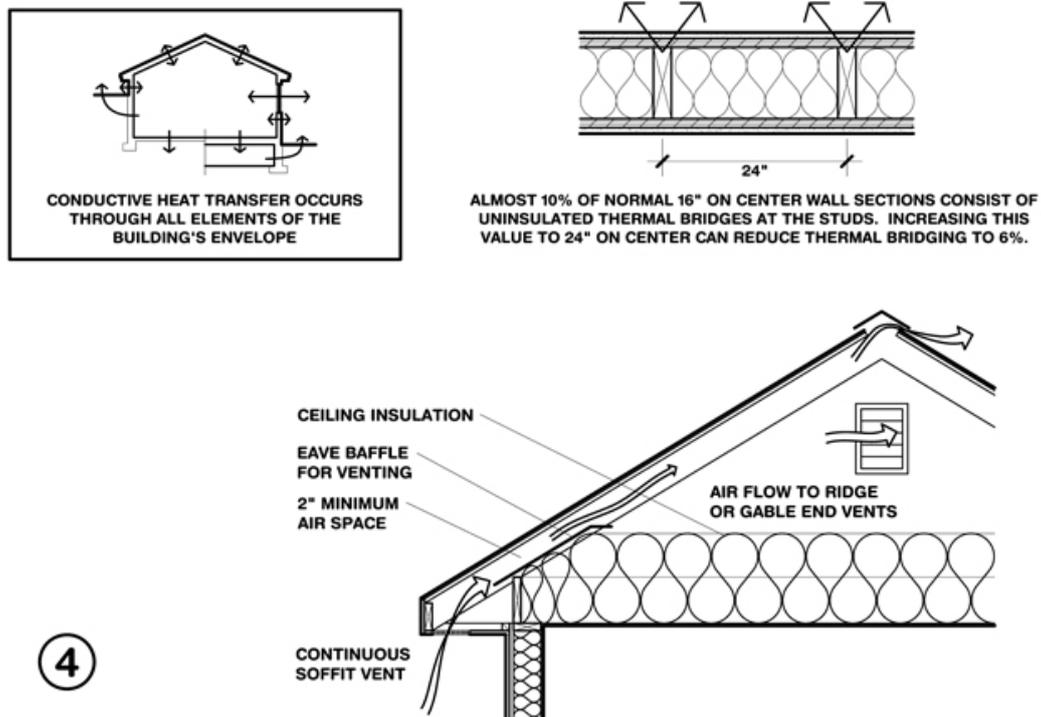


Figura 19. Aislamiento térmico en la envolvente. Fuente: Climate consultant. 2016

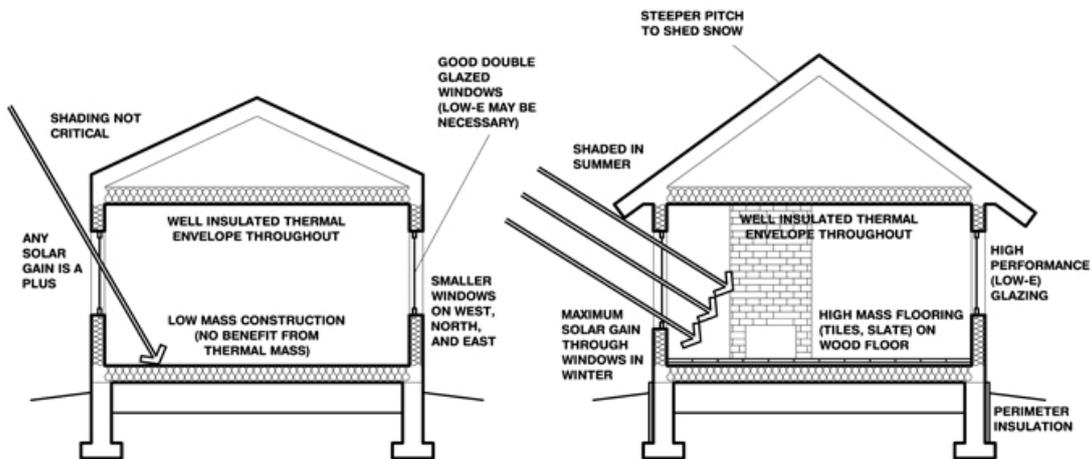


Figura 20. Esquemas de calefacción solar pasiva. Fuente: Climate consultant. 2016

## **Autonomía de funcionamiento**

Los planteamientos de arquitectura pasiva, en muchas ocasiones, requieren de una buena operación por parte del usuario final del proyecto para su buen funcionamiento; esta situación ha llevado, en reiteradas ocasiones, a la frase “un edificio pasivo requiere usuarios activos”, generando una primera barrera para que las personas piensen en optar por sistemas pasivos en sus viviendas.

Con el fin de evitar este tema, se recomienda plantear sistemas de calefacción solar que funcionen de manera autónoma, sin necesidad de una operación manual por parte de los habitantes de la vivienda.

La presencia de ventanillas en el sistema de calefacción, hace necesario considerar un sistema de regulación para evitar pérdidas térmicas en horario nocturno.

Un sistema sin ventanillas, funciona únicamente por medio de la transferencia térmica del material acumulador, eliminando la necesidad de manipulación manual.

**En la siguiente tabla se presenta un resumen de las diferentes variables a considerar en el diseño de un sistema de calefacción solar**

Variables que afecta un sistema de calefacción solar	
Exteriores	Interiores
Consideraciones climáticas exteriores	Ocupación del espacio - Personas
Radicación solar y geometría solar	Ganancias energéticas por iluminación y equipos
Temperaturas exteriores	Tamaño elemento de captación
Flujos de viento	Materialidad elemento de captación
Ubicación del proyecto	Tamaño y espesor elemento de acumulación térmica
Orientación	Materialidad elemento de acumulación térmica
	Nivel de aislamiento de la envolvente
	Autonomía de funcionamiento sistema de calefacción
	Muro trombe – Invernadero adosado

Tabla 11. Variables que afecta un sistema de calefacción solar

La información presentada en la Tabla 11 hace referencia a las diferentes variables que pueden alterar el desempeño de un sistema de calefacción solar, pero no todas se deben resolver de la misma manera en todos los proyectos, ya que las variables exteriores influyen en cómo debe abordarse cada una de las variables internas o propias del proyecto.

### 3.2 PROYECTOS CON SISTEMAS DE CALEFACCIÓN SOLAR

En diferentes lugares del mundo se han proyectado obras que, debido al entendimiento del clima por parte del arquitecto, han logrado ser obras ejemplares, que continúan analizándose en procesos de formación de arquitectos con criterios ambientales.

Las primeras propuestas de arquitectura solar datan de los años 30, con el arquitecto George Keck, considerado pionero en este tipo de arquitectura, el cual diseñó la “Casa del mañana” en 1933 y posteriormente la casa Sloan, en 1940, la cual fue la primera en ser llamada **casa solar**.

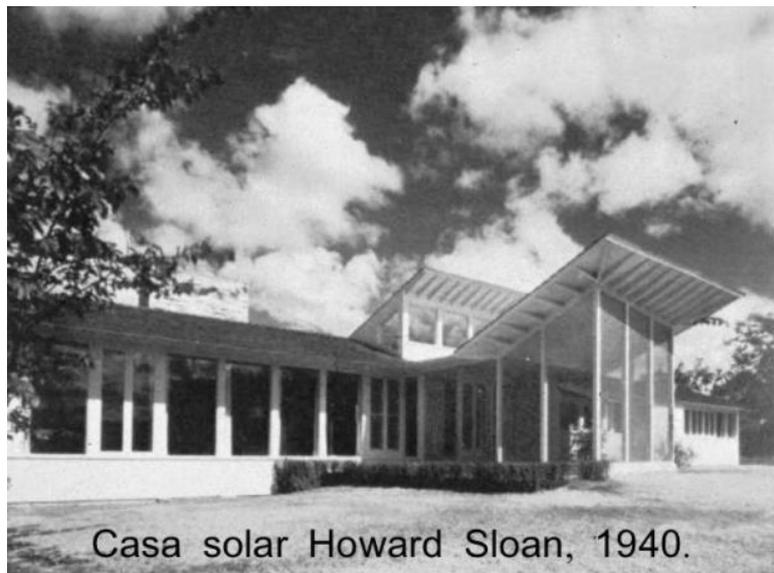


Figura 21. Casa solar Sloan, diseñada por George Keck.

Fuente: <https://es.slideshare.net/SebastianGaviorno/tecn-altern-arq-solar>

En la Casa Sloan, es evidente la orientación y geometría en busca de mayor radiación solar, abriendo grandes ventanales hacia la fachada sur, y buscando materiales interiores que almacenen el calor recibido, de esta manera la vivienda

logra temperaturas cercanas al confort térmico sin necesidad de equipos de climatización de aire.

En 1962 se terminó de construir el Edificio para la Escuela Secundaria de San Jorge, en Wallasey, Inglaterra, un gran ejemplo del aprovechamiento del sol y la selección de materiales para garantizar confort interior, “la reacción pública en aquella época fue la de que el arquitecto había domesticado un nuevo principio físico” (Mazria, 1983), este proyecto entendiendo la mecánica solar se orienta de tal manera que los rayos solares penetren al interior en invierno y sean acumulados en muros de concreto entre 18 cm y 25 cm de espesor, obteniendo de esta manera la masa térmica necesaria para almacenar la energía térmica proveniente del sol, con lo cual logra garantizar el 50% de la demanda de calefacción en invierno (Mazria, 1983).

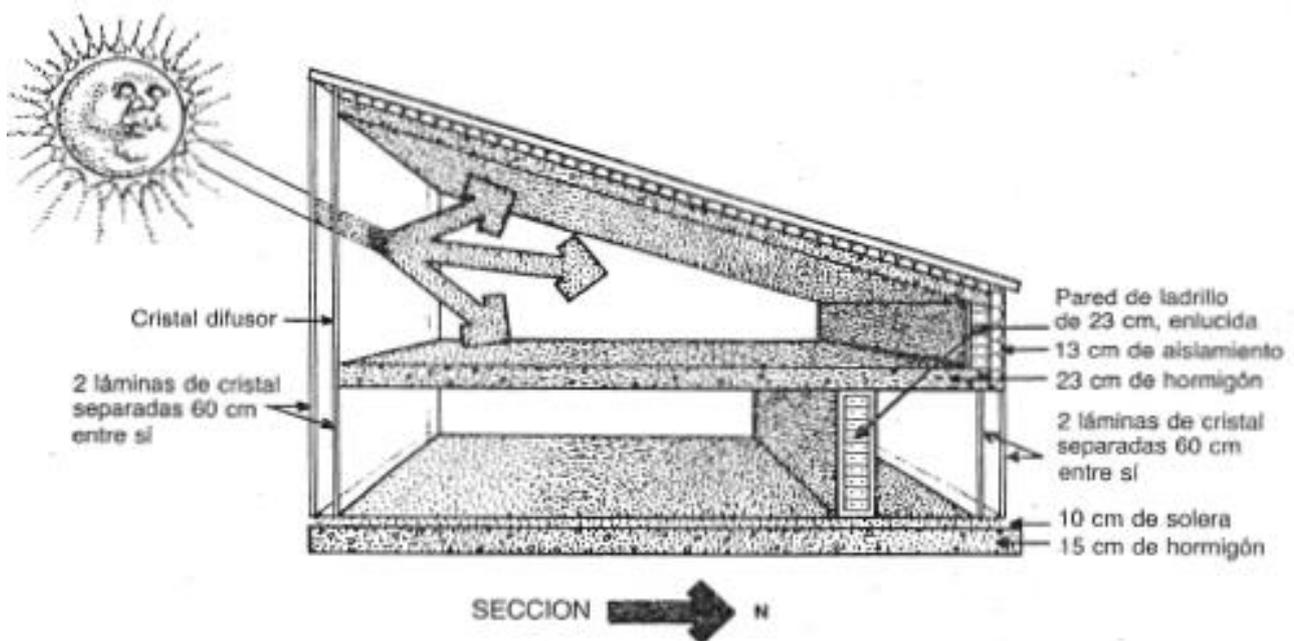


Figura 22. Sección funcionamiento de sistema de calefacción solar en Escuela Secundaria de San Jorge, en Wallasey, Inglaterra. Fuente: El libro de la energía solar pasiva. (Mazria, 1983)

El plantear ventana doble y envolvente con aislamiento térmico de 12.7 cm en los muros exteriores, reduce las pérdidas térmicas permitiendo mantener al interior el calor captado por las diferentes estrategias planteadas.

Estas estrategias, junto con las ganancias energéticas internas, por iluminación y personas, logran mantener los espacios en un rango de temperatura muy

superior a la temperatura exterior, sobre todo en los horarios de ocupación del proyecto. (Mazria, 1983). Ver Figura 23.

En este proyecto es evidente la influencia de los materiales de alta masa térmica para acumular calor, ya que la onda térmica se aplana respecto a la variación de temperatura en el clima exterior.

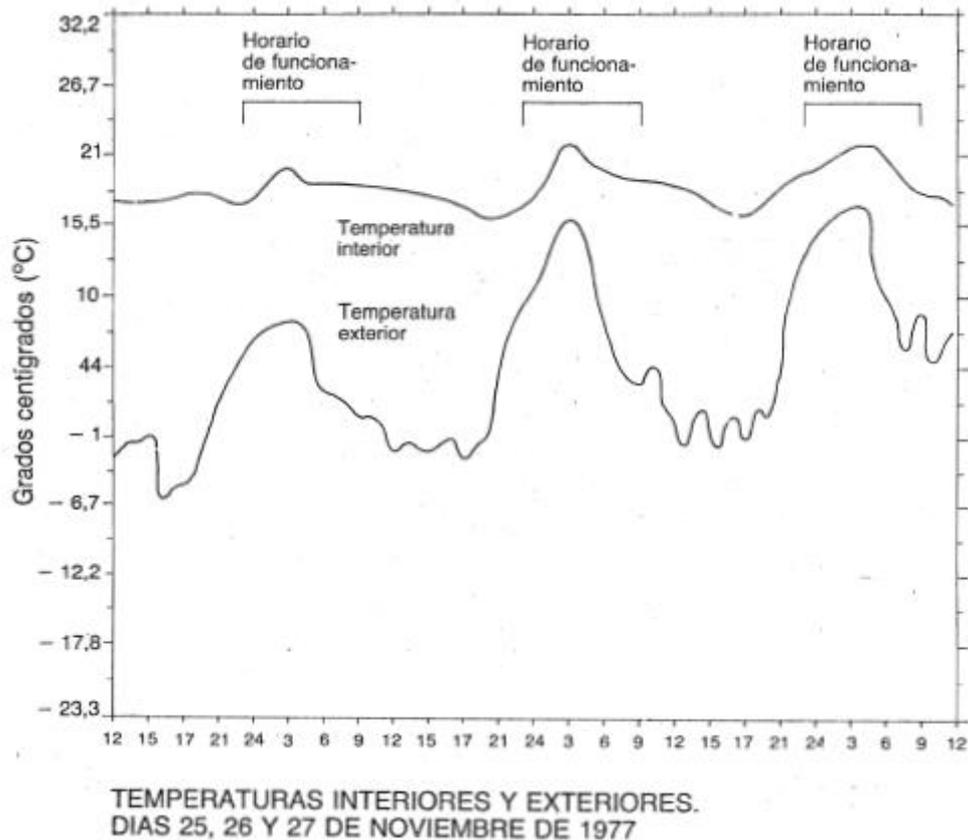


Figura 23. Evolución de la temperatura interior y exterior proyecto Escuela Secundaria de San Jorge, en Wallasey, Inglaterra. Fuente: El libro de la energía solar pasiva. (Mazria, 1983)

Las soluciones de captación solar no siempre deben realizarse en fachada, el restaurante Maximillian's de Albuquerque, Nuevo México, plantea una serie de lucernarios estratégicamente diseñados para aprovechar la cubierta como elemento de calefacción solar, genera el ingreso solar necesario en invierno, y controla los rayos solares en las épocas cálidas. La materialidad en este proyecto juega un papel determinante a lo largo del año, ya que, al plantear muros gruesos de adobe se aumenta la masa térmica la cual ayudan a almacenar la energía calórica en invierno y en verano permite refrigerar de manera pasiva el espacio

interior al combinarse con un sistema de ventilación en el horario nocturno, el cual enfría la masa térmica con las brisas frescas de la noche, logrando muros frescos que, en horas del día, por intercambio térmico por radiación y convección dan sensación de confort a los ocupantes de los espacios interiores.

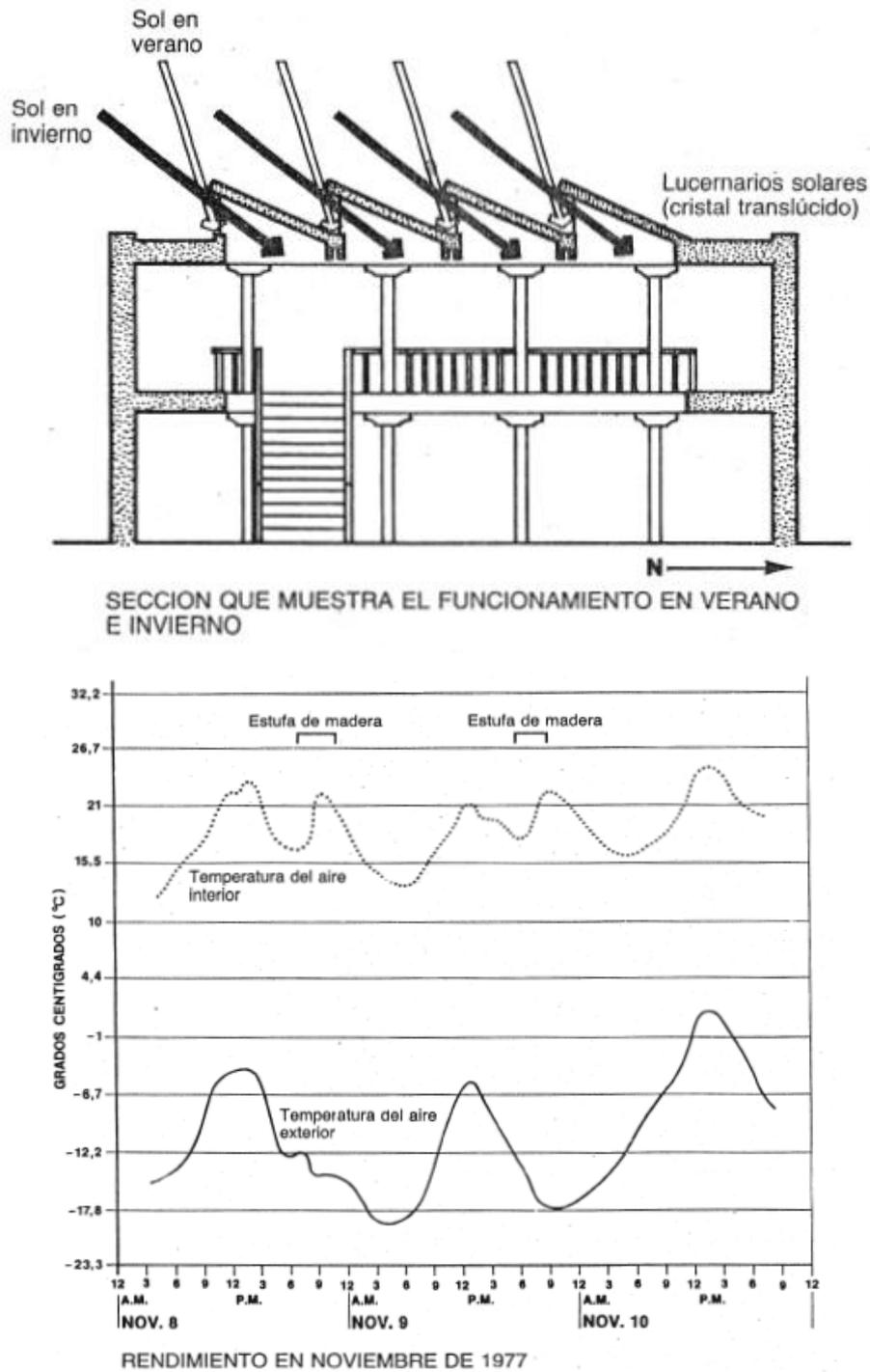


Figura 24. Sección esquema de funcionamiento y evolución de temperaturas al interior en invierno – Restaurante Maximillians. Fuente: El libro de la energía solar pasiva. (Mazria, 1983)

La vivienda Schiff, en Wyoming, y la casa Terry en Santa Fe, Nuevo México, son otros ejemplos de la aplicación de estrategias de orientación y definición de las superficies acristaladas, para lograr niveles de temperatura interiores dentro del rango de confort térmico, sin tener que recurrir a sistemas de calefacción mecánicos.

Los ejemplos anteriormente presentados funcionan por la ganancia solar directa por ventana, con almacenamiento en los mismos elementos del proyecto, como muros y pisos. Pero en algunos proyectos se ha explorado en otros sistemas de aprovechamiento del recurso solar, ejemplos de esto son el muro trombe y el invernadero adosado.

Ambos sistemas aprovechan el fenómeno invernadero para sobrecalentar un espacio de aire entre una superficie acristalada y un muro de acumulación; en el muro trombe la distancia entre el vidrio y el muro es cercana a los 10 cm, lo que se percibe como un muro grueso con acabado de cristal exterior; en el invernadero la distancia entre vidrio y muro es mucho mayor, llegando a tener hasta 3 metros de ancho, convirtiendo el espacio de captación solar en un espacio al cual pueden acceder los usuarios del proyecto, factor que puede ser perjudicial, debido a que si se disponen elementos como mobiliario interior el sistema de acumulación térmica perdería eficiencia.

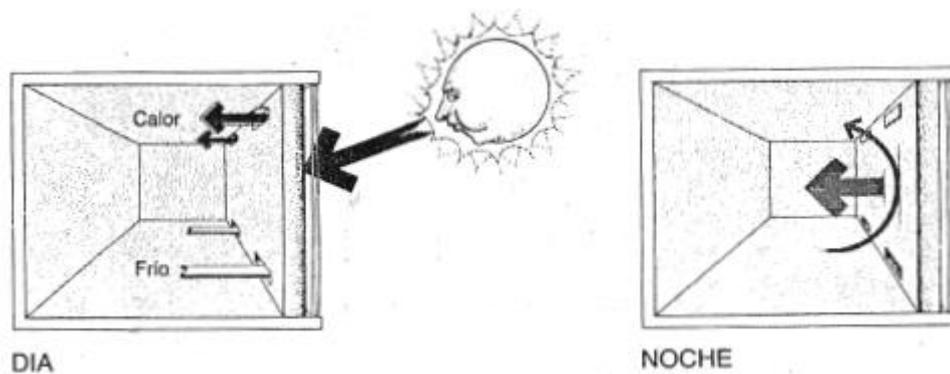


Figura 25. Aporte energético indirecto - muro trombe. Fuente: El libro de la energía solar pasiva. (Mazria, 1983)

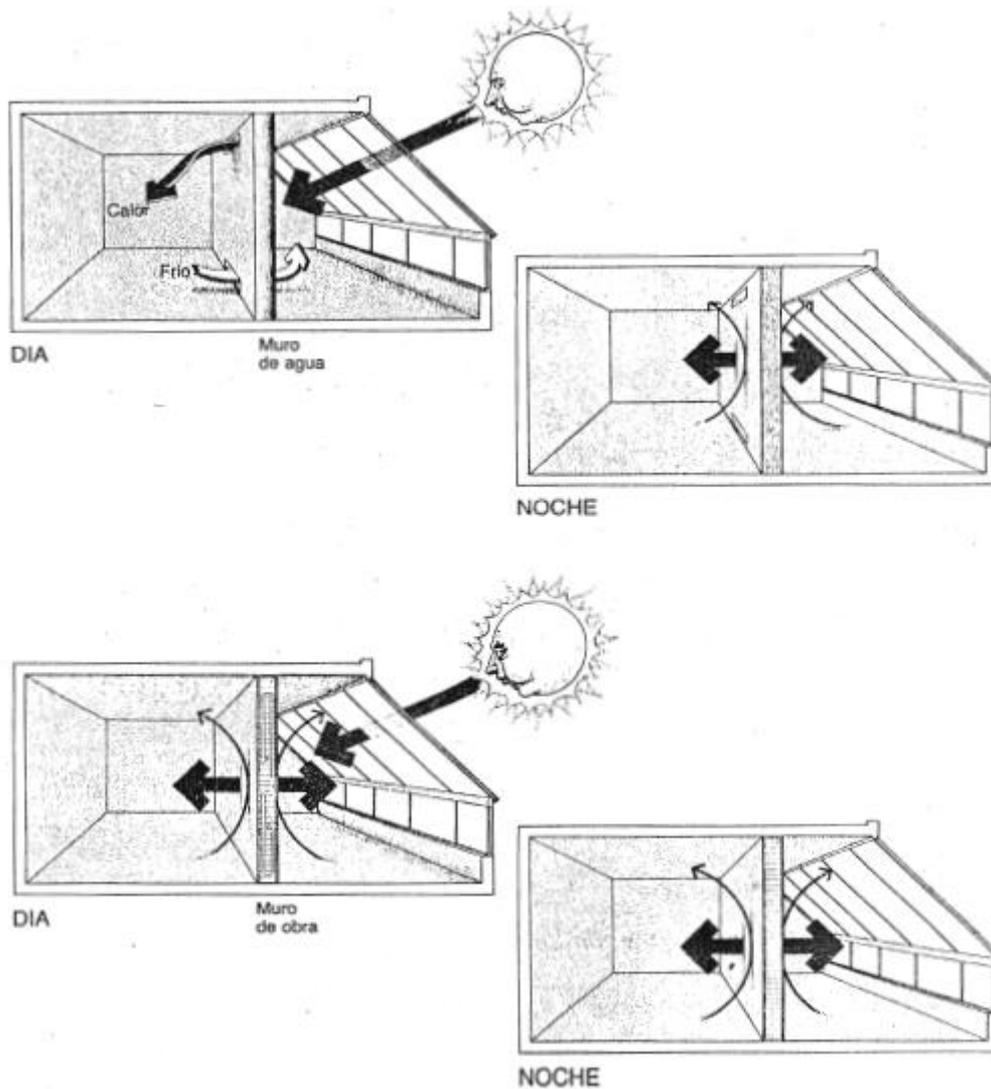


Figura 26. Aportes energéticos indirectos. Invernaderos adosados. Fuente: El libro de la energía solar pasiva. (Mazria, 1983)

Estos sistemas de captación han sido utilizados en proyectos que deben afrontar climas más extremos, un ejemplo es la Vivienda Trombe, en Odeillo, Francia, construida en 1967, en la cual se acumula calor en un muro de 30 cm pintado de negro con una superficie acristalada en su cara exterior, “los estudios y los resultados medidos muestran que se ahorra un 70 % aproximadamente de las exigencias anuales de calefacción mediante la energía solar” (Mazria, 1983).

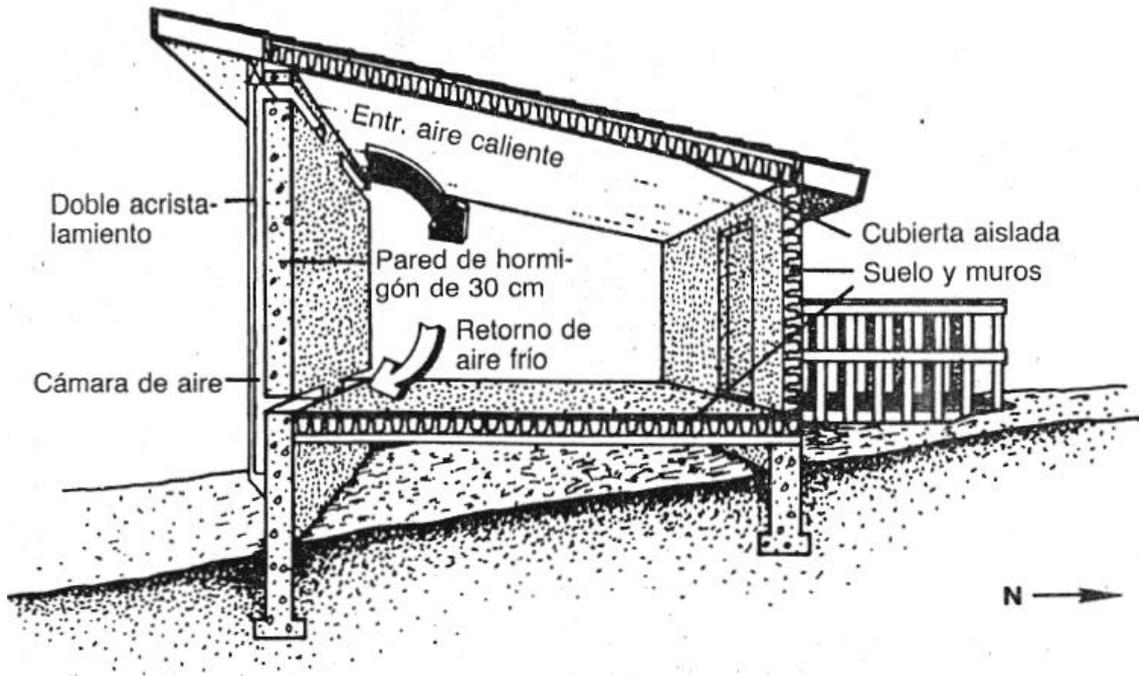


Figura 27. Sección de la vivienda Trombe. Fuente: El libro de la energía solar pasiva. (Mazria, 1983)

En la vivienda Trombe se perciben estrategias similares a los proyectos presentados anteriormente, superficies de captación y acumulación térmica orientadas de acuerdo a los recorridos solares del lugar, fachada norte hermética para reducir pérdidas térmicas y una envolvente aislada térmicamente con el fin de mantener en el interior las ganancias térmicas generadas por el muro trombe.

En el contexto latinoamericano se ha hecho uso de estos sistemas en proyectos como la Estación experimental del INTA Abrapampa en Jujuy, Argentina, construida en 1980, la cual hace uso tanto del muro trombe como del invernadero, orientando estos dispositivos de calefacción solar hacia la fachada con mayor radiación solar (norte). Este proyecto utiliza la piedra del lugar como material de acumulación y en los muros exteriores se adiciona aislamiento térmico en poliestireno expandido para reducir las pérdidas térmicas.

La Figura 28 presenta la fachada norte de la Estación del INTA, se pueden observar grandes ventanales, los cuales en realidad son muros trombe, que acumulan la radiación solar para calentar los espacios interiores, y se disponen unas pequeñas ventanas para permitir el paso de la luz natural al interior de los espacios.



Figura 28. Fachada norte Estación experimental del INTA. Fuente: Seminario Estrategias arquitectónicas de climatización pasiva, UNLP. Hernández 2017.

La buena disposición de los sistemas de captación solar genera las ganancias térmicas necesarias para elevar la temperatura interior hasta 30° por encima de la temperatura exterior, ver Figura 29, lo que garantiza niveles óptimos de confort aún en los momentos más fríos del año.

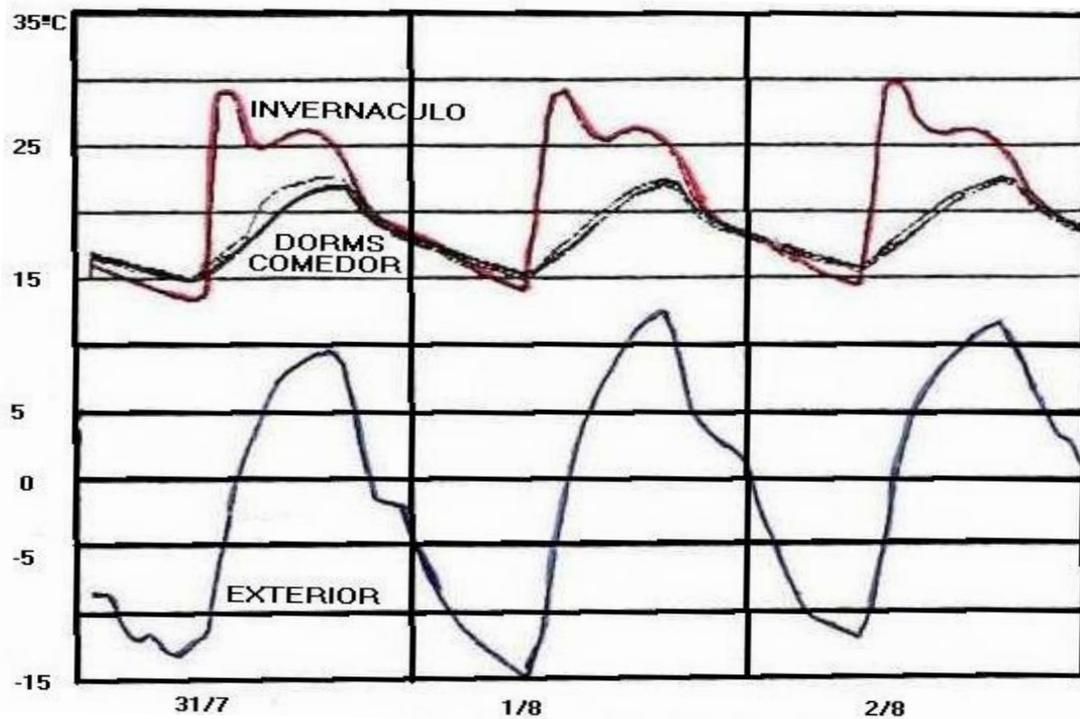


Figura 29. Evolución de temperatura Estación experimental de INTA. Fuente: Seminario Estrategias arquitectónicas de climatización pasiva, UNLP. Hernández 2017.

El Hospital Materno Infantil de la localidad de Susques de Argentina, es el edificio solar construido a mayor altitud sobre el nivel del mar en el mundo, mostrando la eficiencia de los sistemas colectores solares. “En este proyecto fue necesario incluir en su diseño 96 m<sup>2</sup> de muros Trombe, 23 m<sup>2</sup> de ventanas para ganancia directa y 60 m<sup>2</sup> de colectores solares calentadores de aire de flujo forzado que deberán proveer 856 MJ diarios” (Hernández et al, 2007) para lograr calefaccionar todos los espacios interiores. En la localidad de Susques las temperaturas exteriores oscilan por debajo del rango de confort a lo largo de todo el año, contando con noches cercanas a los 0°C aún en el verano, por lo cual es necesario plantear calefacción durante todo el año.

En las simulaciones realizadas por el equipo de consultoría para el acondicionamiento térmico, INENCO, se ve claramente como el proyecto presenta una oscilación térmica interior entre los 14° y los 25°, ver Figura 30, temperatura aceptable considerando la exigencia del clima exterior. En los espacios de internación se logra mantener los niveles mínimos de temperatura interior cercana a los 18.5°C, lo cual demuestra la eficiencia de los sistemas planteados.

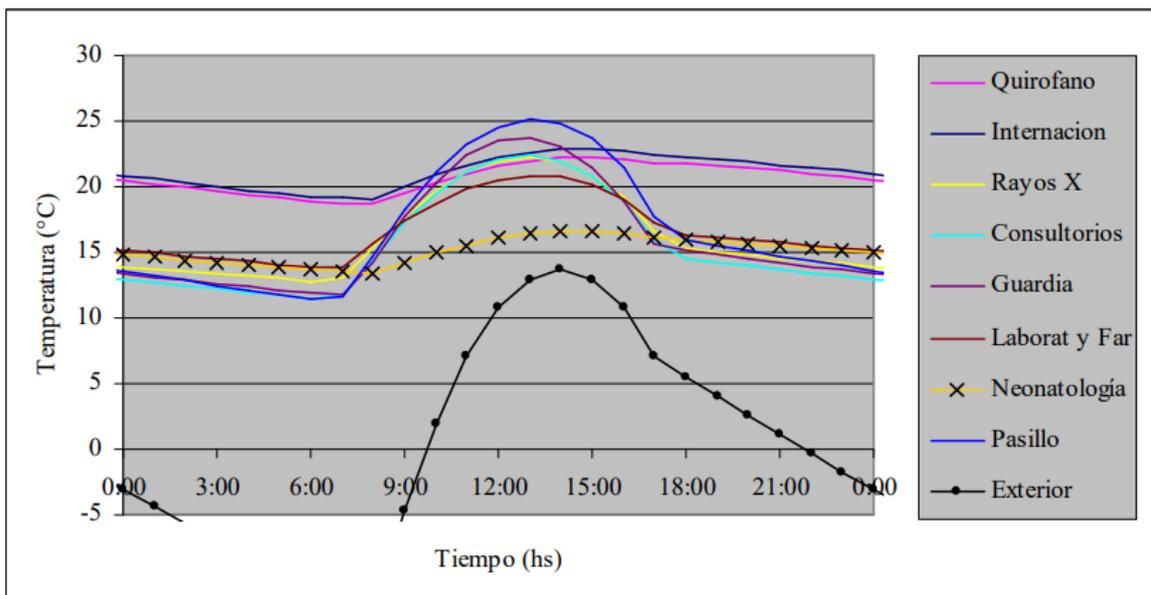


Figura 30. Comportamiento térmico del edificio aislado térmicamente, con muros Trombe al norte y colectores solares calentadores de aire. (Hernández, 2007)

Cada uno de los proyectos presentados anteriormente cuenta con un énfasis particular en cuanto a las variables que influyen en un sistema de calefacción solar pasivo presentadas en la Tabla 11, lo que es una constante en cada uno de ellos es un estudio detallado de las diferentes variables exteriores, de tal manera que la solución del sistema de calefacción solar fuera el mejor en cada escenario.

El primer factor a analizar es la disponibilidad del recurso energético solar, analizando la fachada que más radiación solar aporta, y de esta manera definir la orientación óptima para los sistemas de calefacción solar.

La materialidad debe considerar los coeficientes de transmisión, absorción, calor específico, densidad y conductividad térmica, para de esta manera seleccionar los mejores materiales de acuerdo a las necesidades específicas de cada proyecto.

La definición de áreas específicas del sistema de captación es el resultado de la disponibilidad del recurso en relación a la capacidad de los materiales seleccionados para cada situación, haciendo de los sistemas de calefacción solar únicos para las necesidades de cada proyecto.

“El uso del sol y el clima para el confort térmico y la eficiencia energética es una parte tan importante de todo diseño como es el diseño estructural o incluso el diseño de los espacios mismos” (Steeners et al, 1992)

# **PARTE IV**

## **Desarrollo**

## 4.1 ANÁLISIS

### Análisis Climático

Los datos meteorológicos para el análisis son suministrados por la estación del IDEAM “N 21205790 APTO EL DORADO” situada en el aeropuerto El Dorado ubicado en el costado occidental de la Ciudad de Bogotá, el cual nos brinda datos climáticos completos y un clima similar al presente en los municipios del altiplano. Ver Figura 31.

El clima se analizó mediante el software Climate Consultant, considerando el estándar de confort “Adaptive Comfort Model in ASHRAE Standard 55-2010”

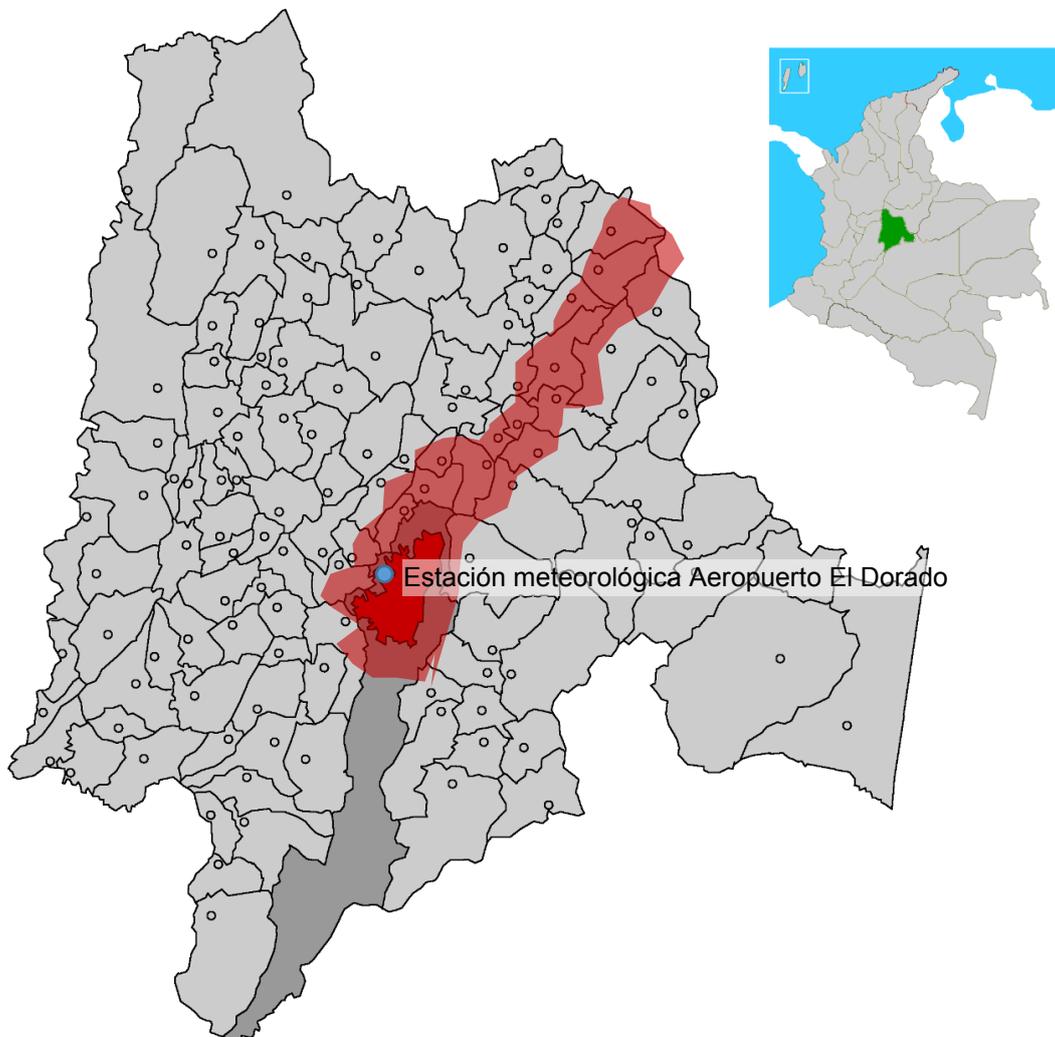


Figura 31. Ubicación estación meteorológica en relación a la zona de trabajo propuesta.

Modificado a partir imagen de Wikipedia

## Rango de temperatura

Debido a la latitud de la zona de estudio, el clima no presenta grandes variaciones en su temperatura a lo largo del año. con una clasificación climática según Caldas – Lang, de clima frío semiárido (IDEAM, 2015). En un solo día se pueden presentar temperaturas desde 0°C hasta los 24°C. La temperatura promedio anual oscila alrededor de 14°C. Ver Figura 32.

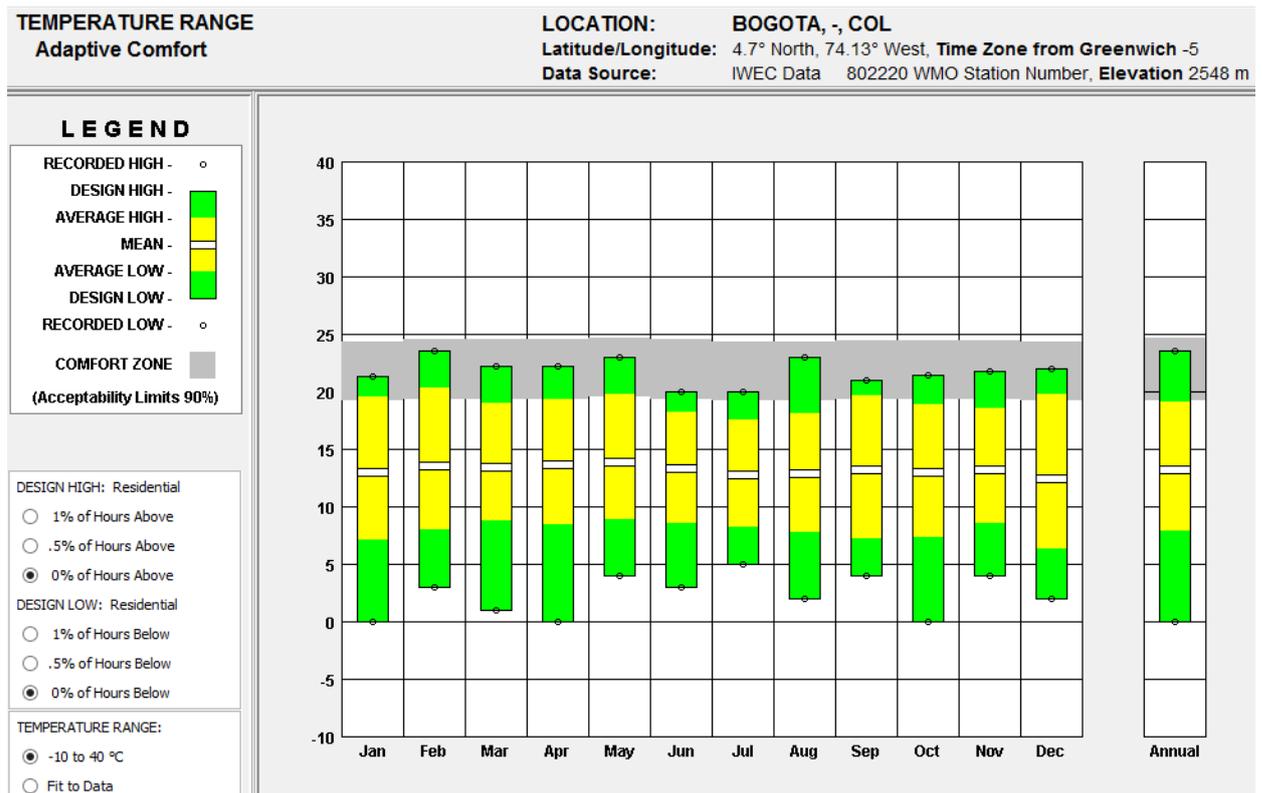


Figura 32. Rango de temperatura. Fuente: Climate consultant. 2016

En el mes de enero y cercanos se presentan un mayor aumento en la temperatura en las horas del día y una mayor disminución en la temperatura en horario nocturno, ya que los niveles de nubosidad en este periodo disminuyen debido a la zona de convergencia intertropical. Ver Figura 33.

En el mes de julio y cercanos la oscilación térmica es diaria menor debido a una mayor presencia de nubes en la bóveda celeste (zona de convergencia intertropical) la radiación directa disminuye, por lo tanto, el aumento en la temperatura es menor y en horas de la noche la pérdida térmica del ambiente hacia la bóveda celeste disminuye.

## Zona de convergencia intertropical (ZCIT) y nubosidad

“La ZCIT es una región de baja presión orientada de oriente a occidente cerca al Ecuador, donde los vientos alisios del noreste se reúnen con los alisios del sureste (Devis et al., 2002). Esto hace que haya una abundante formación de nubes por convección, con vientos débiles y variables y alta pluviosidad. La ZCIT se desplaza latitudinalmente sobre el segmento del océano Pacífico oriental, correspondiente al territorio colombiano entre 1° y 7° de latitud norte en promedio, y en su desplazamiento, el sector por donde se percibe mayor tiempo su presencia es alrededor de los 3° norte” (Villegas et al, 2012).

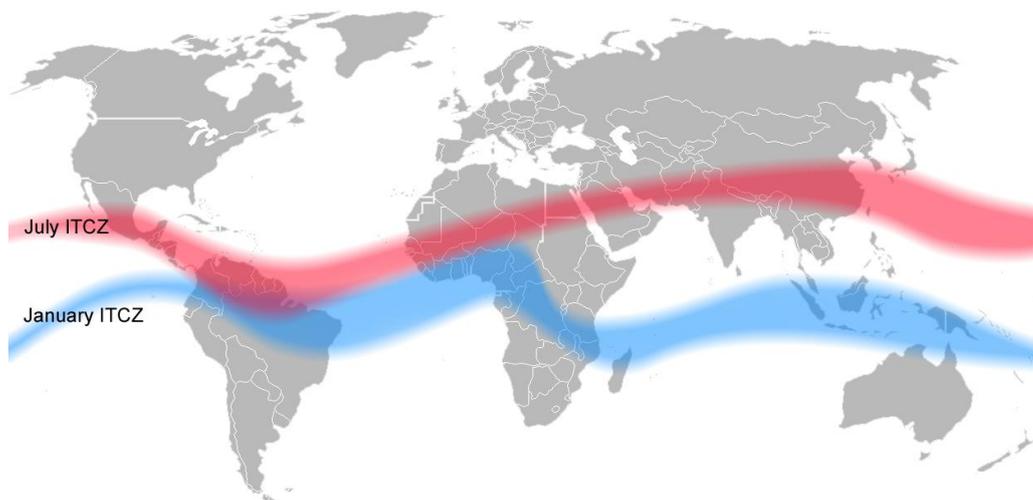


Figura 33. Zona de convergencia intertropical. Fuente:  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Zona\\_de\\_convergencia\\_intertropical](https://es.wikipedia.org/wiki/Zona_de_convergencia_intertropical)

La ZCIT es la región de mayor nubosidad y lluvias, y varía en relación a la época del año; la zona de estudio se ve afectada por la ZCIT en los momentos en que se encuentra más al norte, mes de julio y cercanos. Ver Figura 33.

En los meses de enero y cercanos, la ZCIT se encuentra posicionada al sur de la zona de estudio, por lo cual los niveles de nubosidad disminuyen, aumentando la radiación solar directa.

## Temperatura de bulbo seco promedio

Las temperaturas promedio mensuales en la ciudad de Bogotá se encuentran entre los 0°C y los 21°C todo el año, presentando ocasionalmente algunos días que superan este rango, con temperaturas cercanas a los 24°C en días muy soleados.

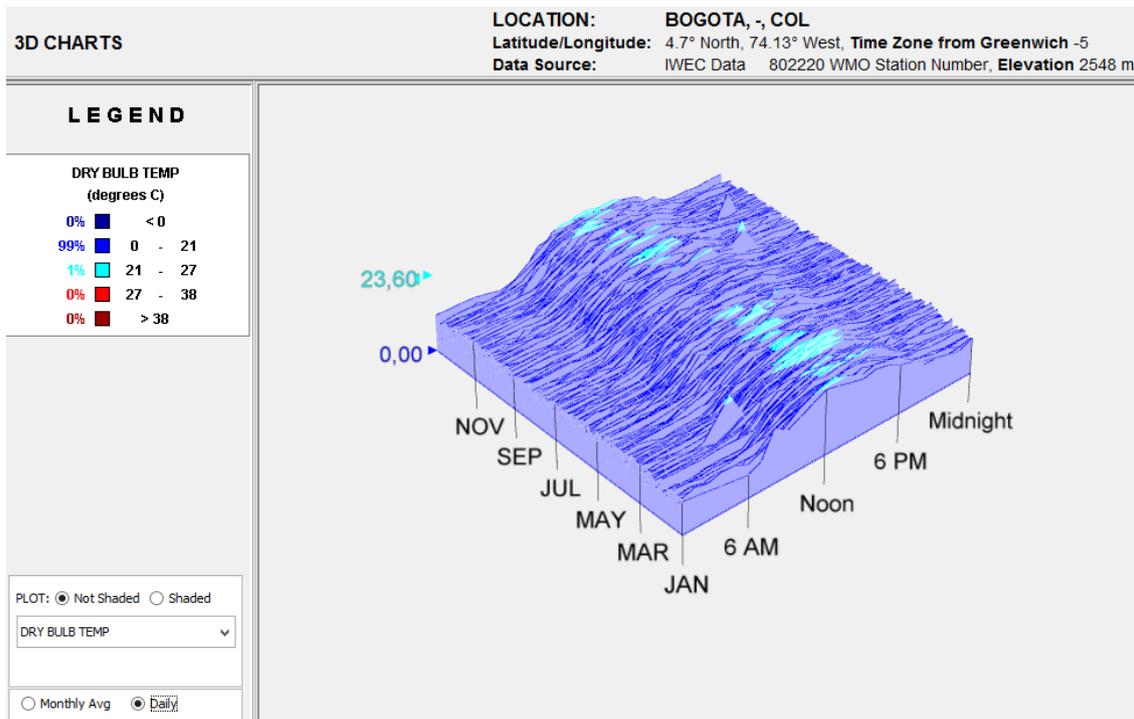


Figura 34. Temperatura de Bulbo seco. Fuente: Climate consultant. 2016

Esta oscilación térmica muestra la necesidad de calefaccionar los espacios en horas de la noche y madrugada durante todo el año, ya que los valores de temperatura exterior se encuentran por debajo de la zona de confort térmico.

## Humedad relativa

La oscilación anual de la humedad relativa se encuentra entre el 55% y 95%. En las noches frías este valor aumenta a valores entorno a 95% de humedad, en horas del día la humedad va disminuyendo progresivamente hasta llegar a valores de 55% a medio día. Ver Figura 35.

**DRY BULB X RELATIVE HUMIDITY**  
ASHRAE Standard 55-2004 using PMV

**LOCATION:** BOGOTA, -, COL

**Latitude/Longitude:** 4.7° North, 74.13° West, **Time Zone from Greenwich** -5

**Data Source:** IVEC Data 802220 WMO Station Number, **Elevation** 2548 m

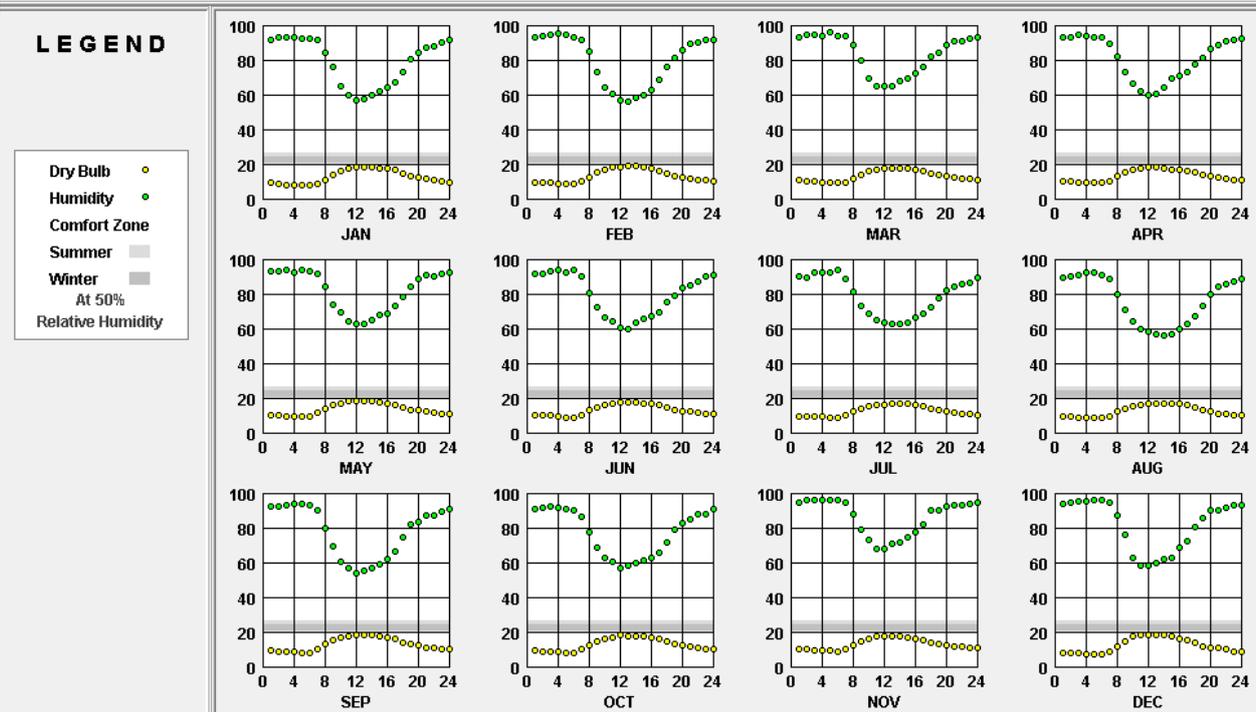


Figura 35. Humedad Relativa. Fuente: Climate consultant. 2016

Con las condiciones de temperatura presentes en el clima trabajado el aire puede llegar a contener pocas cantidades de vapor de agua por kilogramo de aire seco, obteniendo valores de humedad específica entre 4 y 10 g de agua/kg de aire seco, los cuales no son valores que generen grandes molestias en las personas, siempre que se garantice una buena temperatura al interior de los espacios.

### Radiación solar

La irradiación global horizontal, que es la suma de las componentes directa y difusa, es el parámetro más importante para la evaluación del potencial de la energía solar en una región en particular.

- Radiación solar directa: se produce cuando el cielo no presenta nubosidad.
- Radiación difusa: se produce cuando el cielo está cubierto de nubes.

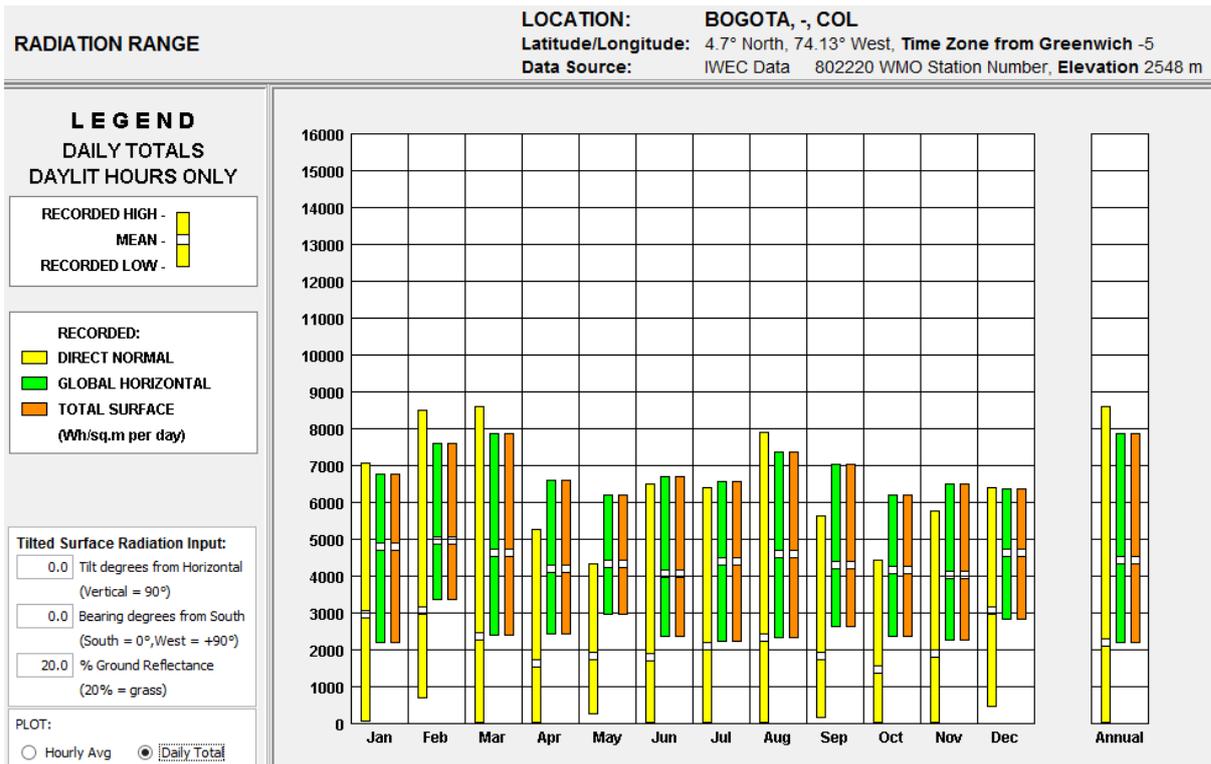


Figura 36 Radiación solar. Fuente: Climate consultant. 2016

Durante los meses de diciembre a febrero se presentan los niveles de radiación más elevados del año, contando con una mayor incidencia de radiación directa y menor radiación difusa. Se percibe una corta amplitud entre la radiación directa y la radiación global debido a la poca nubosidad presente en la cúpula celeste.

Los niveles de radiación directa durante el mes de febrero son los más elevados del año, presentando una media máxima de 3067 W/m<sup>2</sup> día y una media máxima de radiación global que se acerca a los 4966 W/m<sup>2</sup> día.

En el periodo comprendido entre los meses de marzo y noviembre, la radiación solar directa promedio se encuentra entre 1600 W/m<sup>2</sup> día y 2200 W/m<sup>2</sup> día y la radiación solar global se encuentra entre 4000 W/m<sup>2</sup> día y 4500 W/m<sup>2</sup> día. La amplitud entre la radiación directa y la global se amplía, debido a una mayor presencia de nubes en la cúpula celeste, lo cual es resultado de la zona de convergencia intertropical.

## Precipitación

La cantidad de precipitación es el volumen de agua lluvia que pasa a través de una superficie en un tiempo determinado. Como unidades de volumen y superficie se utilizan el litro y el metro cuadrado, respectivamente. La unidad de precipitación es el milímetro (mm). Un milímetro de precipitación equivale a un (1) litro de agua por metro cuadrado de superficie.

En la zona de trabajo, hay dos periodos de lluvias marcados, el primero entre marzo y mayo, y el segundo entre septiembre y noviembre, siendo abril y octubre los meses con mayor índice de precipitación con valores cercanos a los 120 mm. Ver Figura 37.

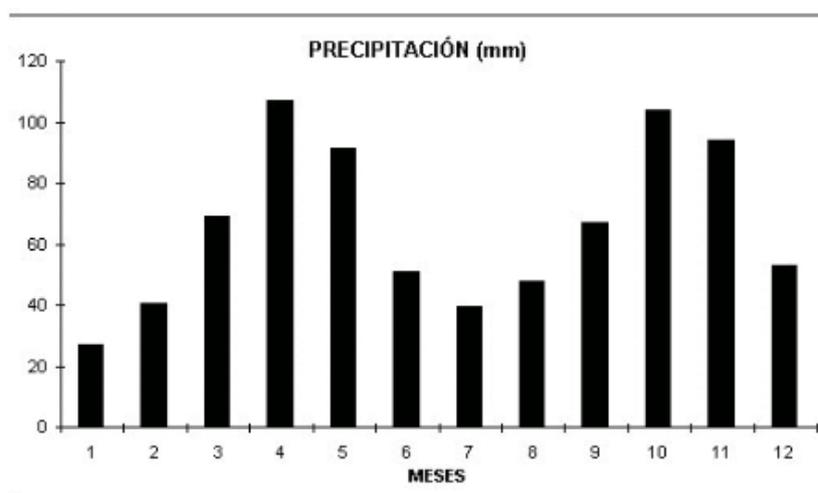


Figura 37. Precipitación ciudad de Bogotá. Fuente IDEAM (2016)

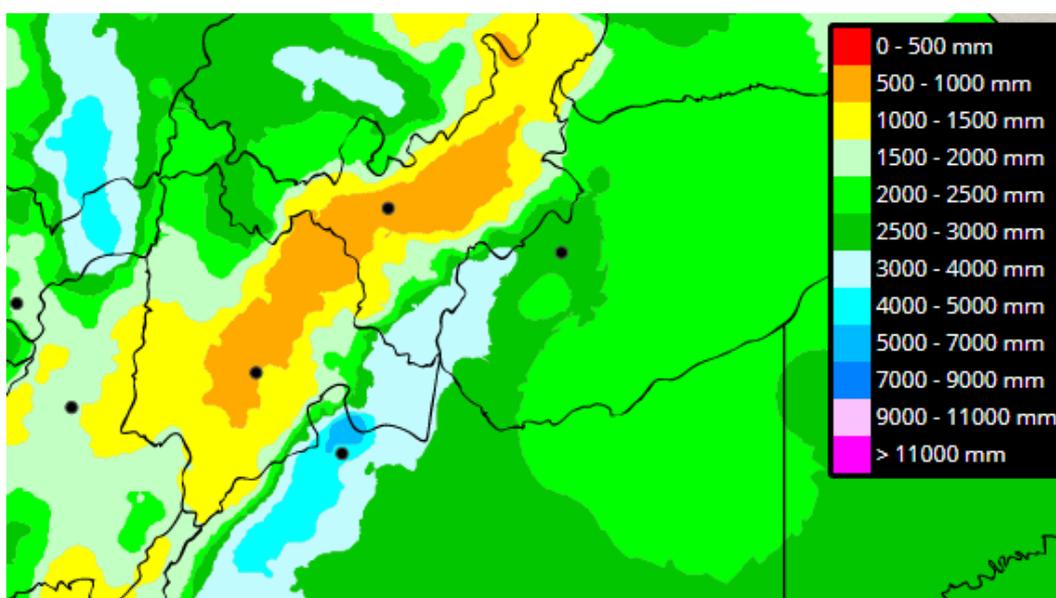


Figura 38. Precipitación zona altiplano cundiboyacense. Fuente IDEAM (2016)

Los niveles de precipitación en la zona se encuentran entre 500 mm y 1000 mm, con niveles promedio cercanos a los 850 mm anuales según la estación del IDEAM ubicada en el aeropuerto El Dorado. Esto significa que sobre cada metro cuadrado de superficie horizontal caerá anualmente una cantidad de 850 litros de agua lluvia.

Es evidente la relación entre los niveles de precipitación con la zona de convergencia intertropical, ya que a mayor nubosidad mayor probabilidad de lluvias.

### Viento

Para el análisis de los flujos de viento tomamos de base la rosa de los vientos, la cual nos permite ver la dirección, velocidad y frecuencia de los vientos predominantes de un lugar.

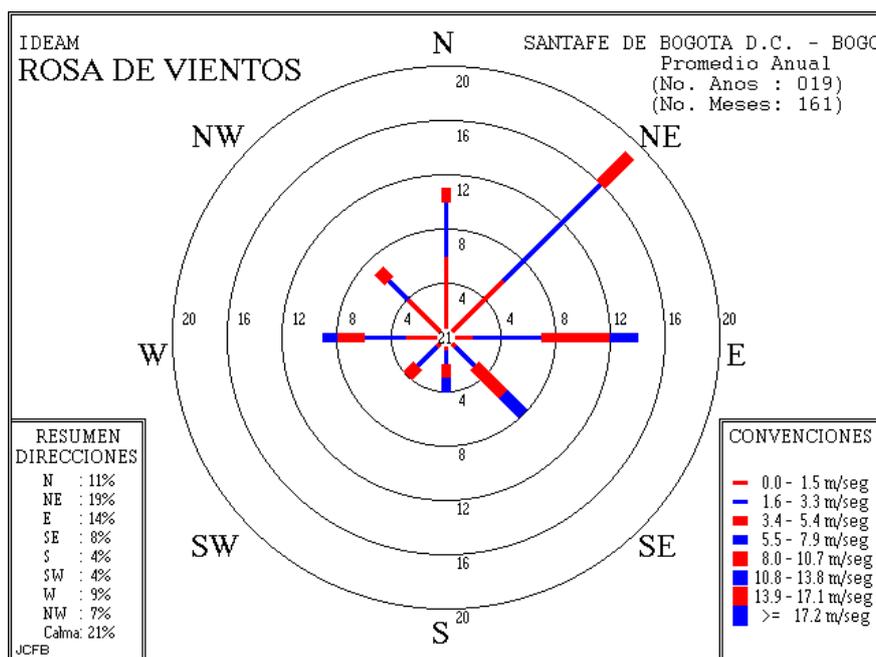


Figura 39. Rosa de los vientos Bogotá. Fuente IDEAM (2016)

Los vientos predominantes en la ciudad de Bogotá provienen de las direcciones norte, noreste y este, siendo los vientos del noreste los que presentan mayor frecuencia, con un 19% del tiempo.

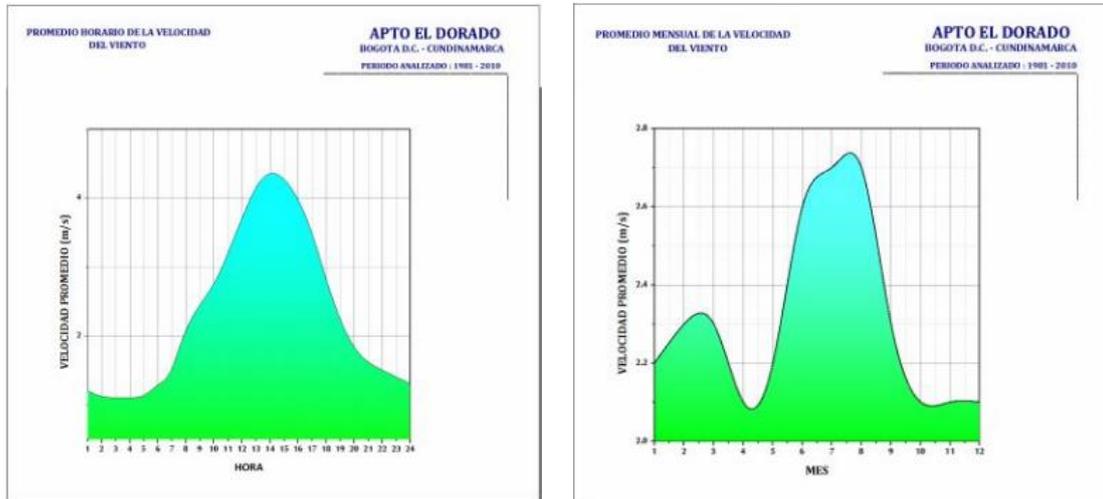


Figura 40. Dirección y velocidad de los vientos en Bogotá. Fuente IDEAM (2016)

Las mayores velocidades de viento se presentan entre los meses de mayo a septiembre, con una velocidad promedio de 2.5 m/s. Entre los meses de septiembre a mayo, se presentan velocidades inferiores, con una media de 2.1 m/s, las cuales siguen siendo significativas.

Durante la noche la diferencia de presiones en el ambiente se reduce y las velocidades de viento bajan considerablemente, obteniendo velocidades de viento en horario nocturno iguales o inferiores a 1 m/s. Ver Figura 40. Lo cual es un factor importante que beneficia los espacios interiores al disminuir las pérdidas térmicas de la envolvente por convección.

En el clima trabajado el sistema de calefacción solar funcionará principalmente para solventar la demanda de calor en horario nocturno, por lo cual es importante considerar las pérdidas térmicas por medio de la envolvente arquitectónica, de tal manera que las ganancias de calor generadas por los sistemas de calefacción solar no se pierdan por medio de las superficies en contacto con el exterior.

## Cuadro psicrométrico confort adaptativo

Se evalúan los datos de temperatura y humedad relativa del lugar de trabajo utilizando el método de confort adaptativo en base al ASHRAE Standard 55-2013, obteniendo un 4.1% del año en confort adaptativo.

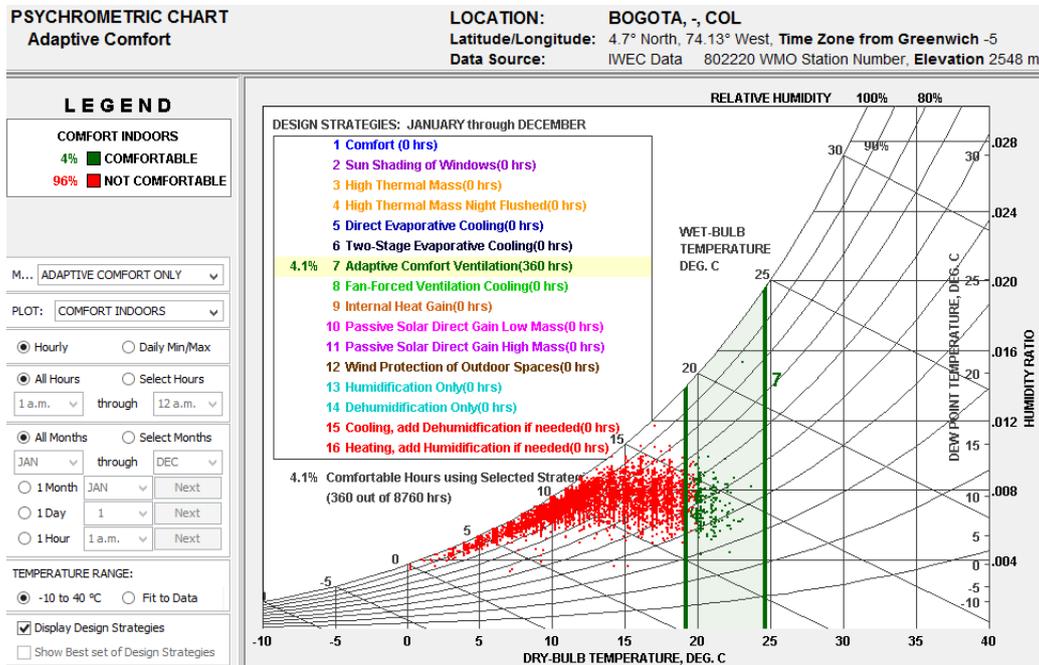


Figura 41. Cuadro Psicométrico - Confort adaptativo. Fuente: Climate Consultant. 2016

Adicionalmente se realiza el análisis de confort interior considerando las diferentes estrategias requeridas para contar con un 100% de confort.

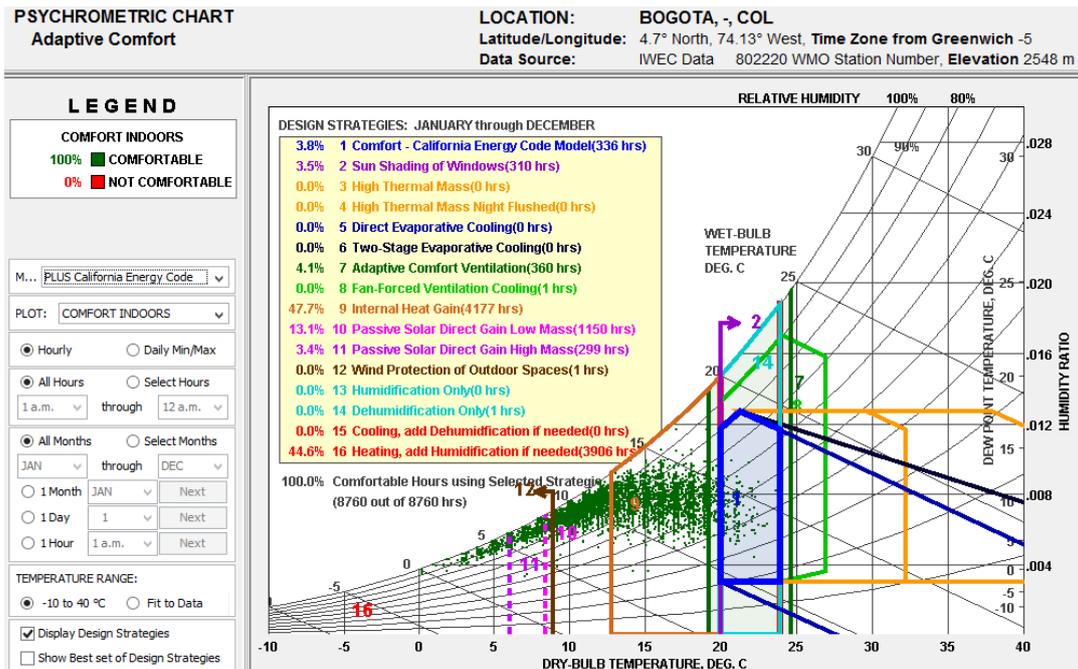


Figura 42. Cuadro Psicométrico - Estrategias a aplicar. Fuente: Climate Consultant. 2016

Teniendo en cuenta las condiciones definidas por el concepto del confort adaptativo, Bogotá presenta condiciones de confort durante el 4% del año, con un rango de temperatura entre los 19°C y los 24.5°C, el 96% del año la temperatura exterior presenta niveles por debajo del rango de confort térmico, por lo cual es necesario plantear sistemas de calefacción solar.

Para mantener los espacios interiores con temperaturas dentro del rango de confort térmico se hace necesario aprovechar las ganancias energéticas internas y estrategias de captación solar.

En los espacios que cuentan con uso 24 horas, es necesario plantear estrategias de captación y acumulación con alta masa térmica para contrarrestar las bajas temperaturas en la noche y madrugada, y así reducir o eliminar los sistemas de calefacción convencional.

### Cuantificación de la ganancia solar en las 5 fachadas para clima ecuatorial

Considerando la importancia de la radiación solar incidente para el diseño de los sistemas de calefacción solar, se realiza el análisis de radiación solar incidente por m<sup>2</sup> para establecer las ganancias energéticas en un clima ecuatorial. Se toman como referencia los datos de radiación solar de la ciudad de Bogotá suministrados por el IDEAM (2016).

ESTACION UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA (BOGOTÁ)												
PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m <sup>2</sup> )												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,2	0,3	0,3
1-2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,4	0,5	0,4	0,2	0,4	0,4
2-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	0,4	0,2	0,3	0,3
3-4	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,2	0,3	0,3
4-5	0,1	0,1	0,3	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,2	0,4	0,3
5-6	0,2	0,1	0,3	1,3	2,5	1,9	1,2	1,2	2,0	3,0	2,7	0,7
6-7	31,8	28,1	39,5	52,9	66,3	62,0	55,2	50,6	60,2	71,0	61,4	50,2
7-8	184,9	162,3	149,3	177,2	188,3	188,0	191,0	172,9	180,6	205,6	198,3	208,9
8-9	351,3	342,2	264,3	309,3	294,4	291,3	313,7	290,8	284,5	346,4	356,3	378,8
9-10	507,6	455,8	366,7	388,1	391,4	389,5	399,7	387,8	399,5	457,6	458,6	504,3
10-11	589,9	543,7	469,8	425,6	431,5	447,8	476,8	467,0	460,2	501,8	519,1	545,5
11-12	607,4	544,1	483,3	433,2	455,7	497,2	520,6	491,4	489,4	458,0	488,2	533,5
12-13	560,1	503,8	433,2	412,9	464,7	490,0	544,6	494,3	481,1	442,4	414,1	491,1
13-14	475,7	465,6	389,8	365,9	404,2	476,3	499,4	457,5	432,5	393,3	355,3	423,4
14-15	375,9	357,0	313,5	307,7	334,2	391,8	404,2	392,0	398,2	315,9	274,7	348,9
15-16	304,4	275,2	231,1	225,1	245,4	275,5	292,9	305,2	298,4	209,9	188,3	254,7
16-17	171,2	145,7	145,0	135,4	143,1	158,6	177,2	168,1	168,4	111,0	90,2	124,9
17-18	46,4	48,7	47,7	35,6	35,7	46,3	59,4	48,9	34,5	16,7	13,0	26,0
18-19	0,5	0,9	0,7	0,2	0,3	0,5	1,1	0,9	0,4	0,3	0,4	0,4
19-20	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2
20-21	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3
21-22	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,2
22-23	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3
23-0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3	0,5	0,2	0,3	0,2
Acumulada diaria	4207,3	3873,1	3334,2	3270,4	3457,9	3716,7	3937,1	3728,5	3690,0	3533,0	3420,7	3891,2

Entre 0 y 200 (Wh/m<sup>2</sup>)

Entre 200 y 400 (Wh/m<sup>2</sup>)

Entre 400 y 600 (Wh/m<sup>2</sup>)

Entre 600 y 800 (Wh/m<sup>2</sup>)

Mayor a 800 (Wh/m<sup>2</sup>)

Tabla 12. Niveles de radiación solar sobre superficie horizontal por hora en Bogotá. Fuente IDEAM (2016)

## Los valores de radiación solar presentados en la

ESTACION UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA (BOGOTÁ)												
PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m <sup>2</sup> )												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,2	0,3	0,3
1-2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,4	0,5	0,4	0,2	0,4	0,4
2-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	0,4	0,2	0,3	0,3
3-4	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,2	0,3	0,3
4-5	0,1	0,1	0,3	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,2	0,4	0,3
5-6	0,2	0,1	0,3	1,3	2,5	1,9	1,2	1,2	2,0	3,0	2,7	0,7
6-7	31,8	28,1	39,5	52,9	66,3	62,0	55,2	50,6	60,2	71,0	61,4	50,2
7-8	184,9	162,3	149,3	177,2	188,3	188,0	191,0	172,9	180,6	205,6	198,3	208,9
8-9	351,3	342,2	264,3	309,3	294,4	291,3	313,7	290,8	284,5	346,4	356,3	378,8
9-10	507,6	455,8	366,7	388,1	391,4	389,5	399,7	387,8	399,5	457,6	458,6	504,3
10-11	589,9	543,7	469,8	425,6	431,5	447,8	476,8	467,0	460,2	501,8	519,1	545,5
11-12	607,4	544,1	483,3	433,2	455,7	497,2	520,6	491,4	489,4	459,0	488,2	533,5
12-13	560,1	503,8	433,2	412,9	464,7	490,0	544,6	494,3	481,1	442,4	414,1	491,1
13-14	475,7	465,6	389,8	365,9	404,2	476,3	499,4	457,5	432,5	393,3	355,3	423,4
14-15	375,9	357,0	313,5	307,7	334,2	391,8	404,2	392,0	398,2	315,9	274,7	348,9
15-16	304,4	275,2	231,1	225,1	245,4	275,5	292,9	305,2	298,4	209,9	188,3	254,7
16-17	171,2	145,7	145,0	135,4	143,1	158,6	177,2	168,1	168,4	111,0	90,2	124,9
17-18	46,4	48,7	47,7	35,6	35,7	46,3	59,4	48,9	34,5	16,7	13,0	26,0
18-19	0,5	0,9	0,7	0,2	0,3	0,5	1,1	0,9	0,4	0,3	0,4	0,4
19-20	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2
20-21	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3
21-22	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,2
22-23	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3
23-0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3	0,5	0,2	0,3	0,2
Acumulada diaria	4207,3	3873,1	3334,2	3270,4	3457,9	3716,7	3937,1	3728,5	3690,0	3533,0	3420,7	3891,2



Tabla 12 son valores incidentes sobre plano horizontal, por lo cual se considera necesario realizar un análisis de incidencia solar en las cuatro orientaciones cardinales con el fin de verificar los meses de incidencia solar y los niveles de radiación solar incidente en plano vertical en cada orientación. Inicialmente se verifican los meses y horas de incidencia solar mediante el diagrama de sombras de la ciudad de Bogotá, Latitud 4.38°N, el cual fue generado con la herramienta lsp “dsombra” para Autocad de Autodesk, por la empresa PVG Arquitectos.

El diagrama de sombras es una herramienta gráfica que permite hacer análisis solares de los proyectos arquitectónicos, es posible decir que es una herramienta similar a un diagrama solar, pero en vez de representar la posición del sol, representa la sombra arrojada por un elemento vertical ubicado en el centro del diagrama. La altura de este elemento es el radio de la circunferencia dibujada en el centro del diagrama de sombras.

Conociendo la altura del elemento y la sombra arrojada por este, se determina de manera sencilla la ubicación del sol en la bóveda celeste, tanto el azimut solar como el ángulo de altura solar. Es importante aclarar que en el diagrama el norte siempre es hacia arriba, totalmente alineado con la vertical.

Con el diagrama podemos identificar las fechas y horas en las que cada fachada presenta incidencia solar directa, lo cual repercute directamente en las

ganancias energéticas solares. Para hacer este análisis de fechas y horas en las que la fachada presenta radiación solar directa, basta con trazar una línea que represente la orientación de la fachada. En la Figura 43 la línea roja horizontal representa una fachada que se encuentra alineada con el eje este-oeste y que mira hacia el norte o sur; posteriormente si queremos analizar la fachada norte, ocultamos del diagrama de sombras todos los puntos que se encuentran hacia el norte de la línea trazada (ver Figura 43), en el caso de analizar la fachada sur, se ocultan los puntos que se encuentren hacia el sur de la línea trazada (ver Figura 44).

Todos los puntos que quedan visibles son las fechas y horas del día en que la fachada analizada recibe radiación solar directa.

## ANÁLISIS DE INCIDENCIA SOLAR POR FACHADA

### Fachada Norte

La fachada norte presenta exposición solar todo el día durante los meses de abril a agosto, siendo junio el mes de mayor incidencia solar.

En los meses de septiembre a marzo no presenta incidencia solar. Ver Figura 43.

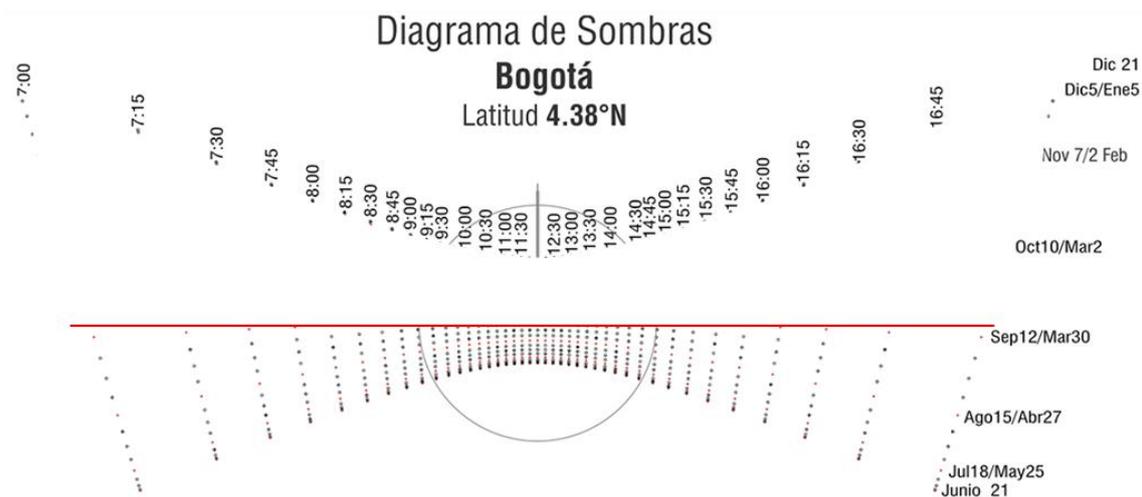


Figura 43. Análisis fachada norte mediante diagrama de sombras. Elaboración propia

### Fachada Sur

La fachada sur presenta exposición solar todo el día durante los meses de octubre a febrero, siendo diciembre el mes de mayor incidencia solar.

En los meses de marzo a septiembre no presenta incidencia solar. Ver Figura 44.

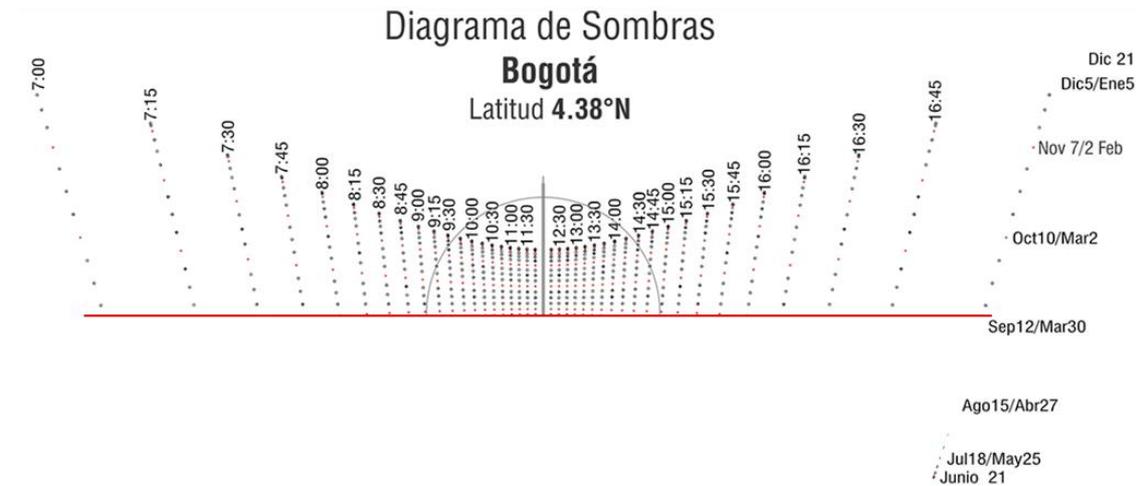


Figura 44. Análisis fachada sur mediante diagrama de sombras. Elaboración propia

### Fachada Este

El ángulo de incidencia solar sobre la fachada este varía a lo largo del año, la mitad del año los rayos solares provienen del noreste y la otra mitad del año provienen del sureste.

La fachada este presenta exposición solar todo el año en horas de la mañana, desde el amanecer hasta medio día, garantizando la disponibilidad del recurso solar durante todo el año sobre esta fachada. Ver Figura 45.

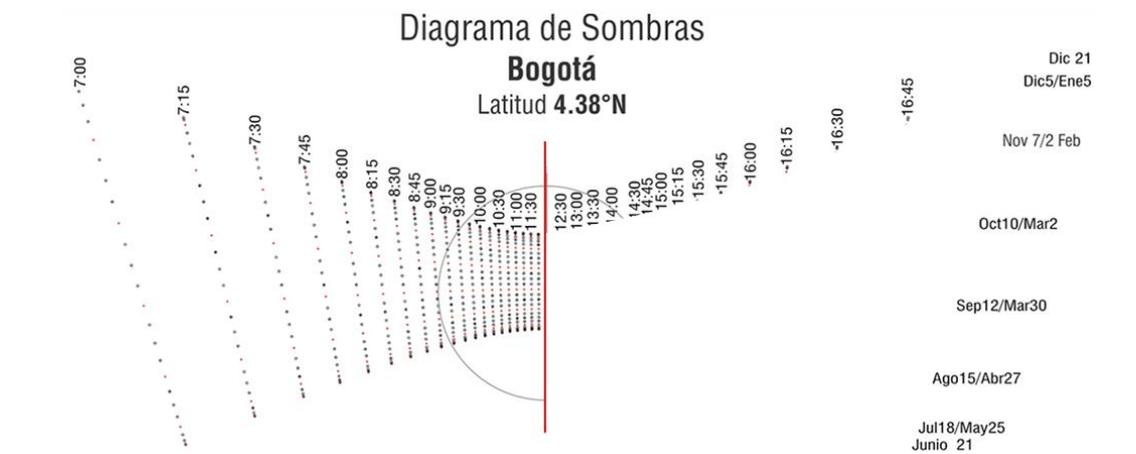


Figura 45. Análisis fachada este mediante diagrama de sombras. Elaboración propia

### Fachada Oeste

El ángulo de incidencia solar sobre la fachada oeste varía a lo largo del año, la mitad del año los rayos solares provienen del noroeste y la otra mitad del año provienen del suroeste.

La fachada oeste presenta exposición solar todo el año a partir de medio día hasta el anochecer, garantizando la disponibilidad del recurso solar durante todo el año sobre esta fachada. Ver Figura 46.

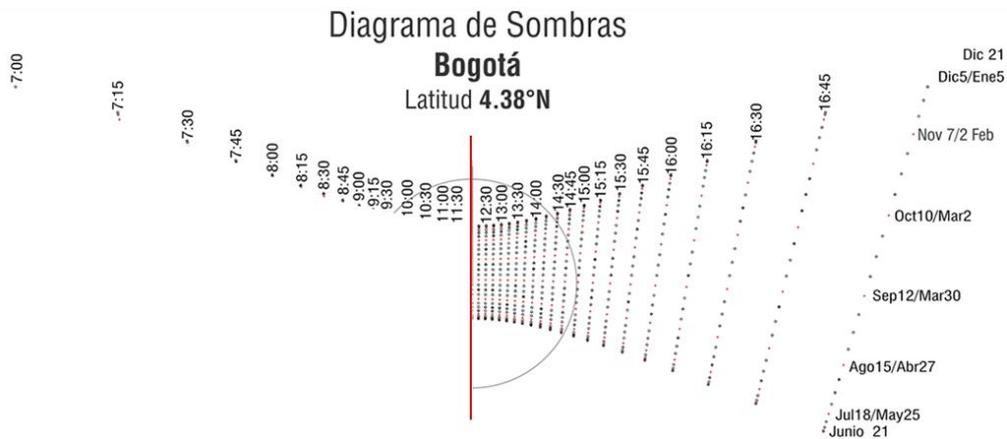


Figura 46. Análisis fachada oeste mediante diagrama de sombras. Elaboración propia

Posterior a tener clara la incidencia solar en meses y horas en cada una de las fachadas, se realiza un análisis de radiación solar por cada una de las orientaciones, entendiendo que en la incidencia solar sobre una superficie acristalada las refracciones y reflexiones sucesivas dependen del ángulo de incidencia. Además, la radiación tiene una componente directa (direccional) y una difusa (resultado de múltiples reflexiones y por lo tanto multi-direccional) (De Gastines et al, 2015).

Para el análisis de radiación solar en superficie vertical en las cuatro orientaciones cardinales se utiliza el software GEOSOL (Hernández, 2003), en el cálculo se ingresaron los datos del lugar de análisis, como latitud, longitud, huso horario y altitud, se consideró un valor de albedo de 0.25 (equivalente a pasto en el software), debido a que es un escenario frecuente en la zona de estudio; y finalmente se realiza el cálculo para los solsticios y equinoccios en un plano con 90° de inclinación en las 4 orientaciones cardinales. Ver Figura 47

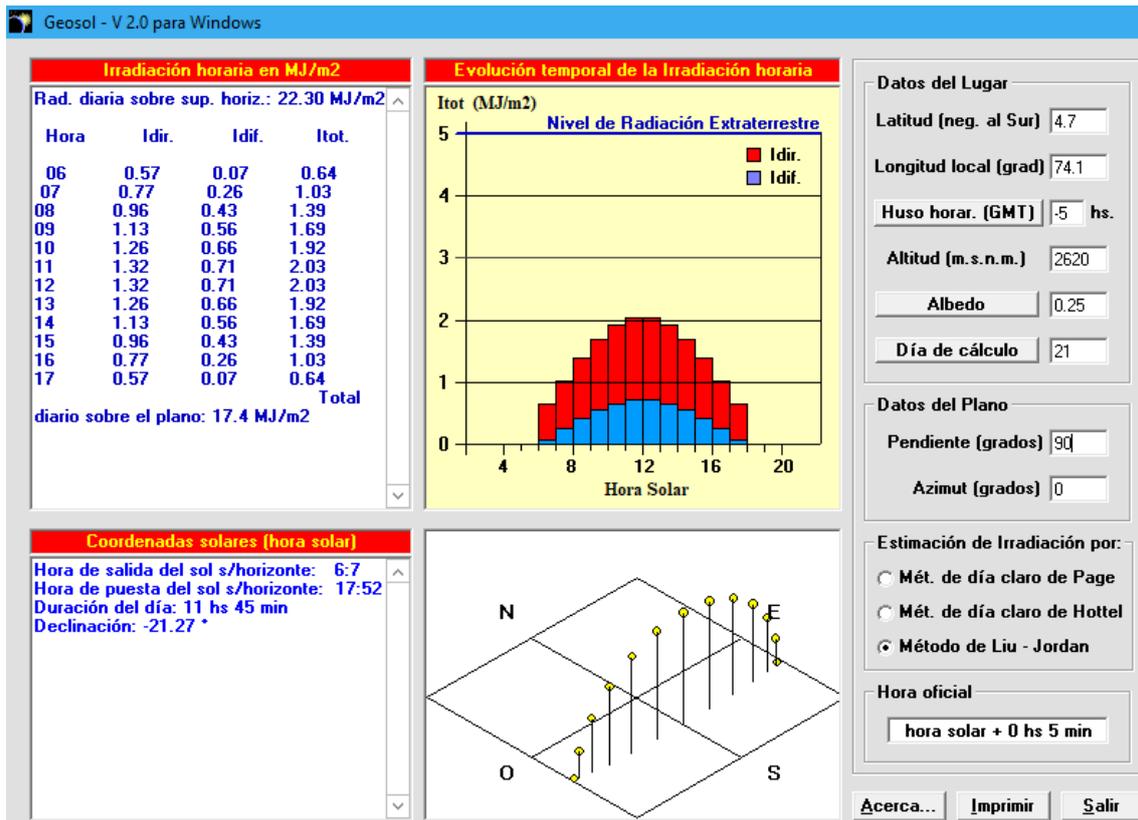


Figura 47. Datos utilizados en software GEOSOL. Elaboración propia.

El software propuesto por Hernández presenta 3 modelos de cálculo, 1) Método de día claro de Page. 2) Método de día claro de Hotel. 3) Método de Liu-Jordan para día medio mensual. Para efectos de este trabajo se utiliza el método de Liu-Jordan, dado que “deriva de un promedio entre días que pueden ser claros, seminublados o nublados, su valor es más conservativo que el correspondiente a los dos métodos anteriores” (Hernandez, 2003). Para el cálculo se toma el valor de radiación solar diaria sobre plano horizontal de la estación meteorológica del Aeropuerto El Dorado de la ciudad de Bogotá, 6.2 Kwh/m<sup>2</sup>día o 22.3 MJ/ m<sup>2</sup>día. Ver Figura 48.

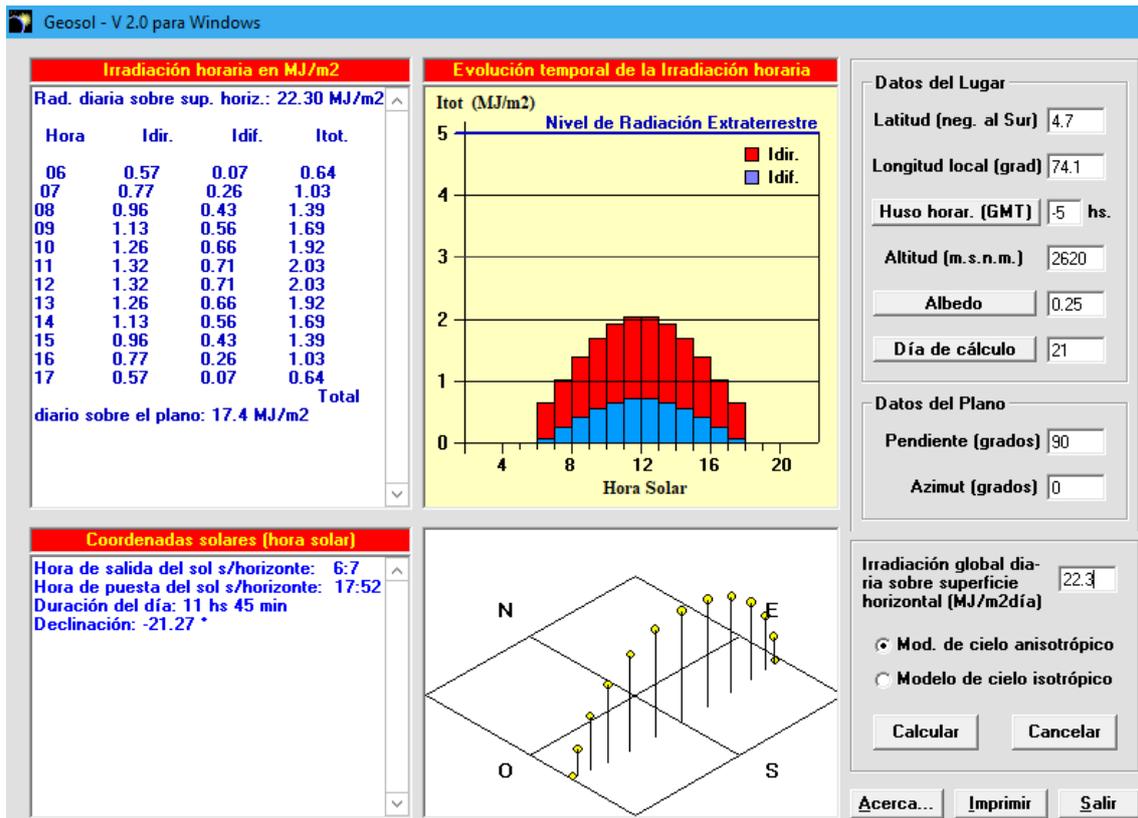


Figura 48. Datos de cálculo utilizados en el método de Liu-Jordan, software GEOSOL.

Este ejercicio se realiza con la radiación meteorológica de cada uno de los meses analizados y en cada una de las 4 orientaciones principales, encontrando que debido al recorrido solar en la zona tropical hay una variación considerable en la radiación solar incidente en la fachada norte y sur. En las fachadas este y oeste los valores de radiación solar se mantienen relativamente uniformes, entre 12 MJ/m<sup>2</sup>día y 14 MJ/m<sup>2</sup>día. Ver Figura 49.

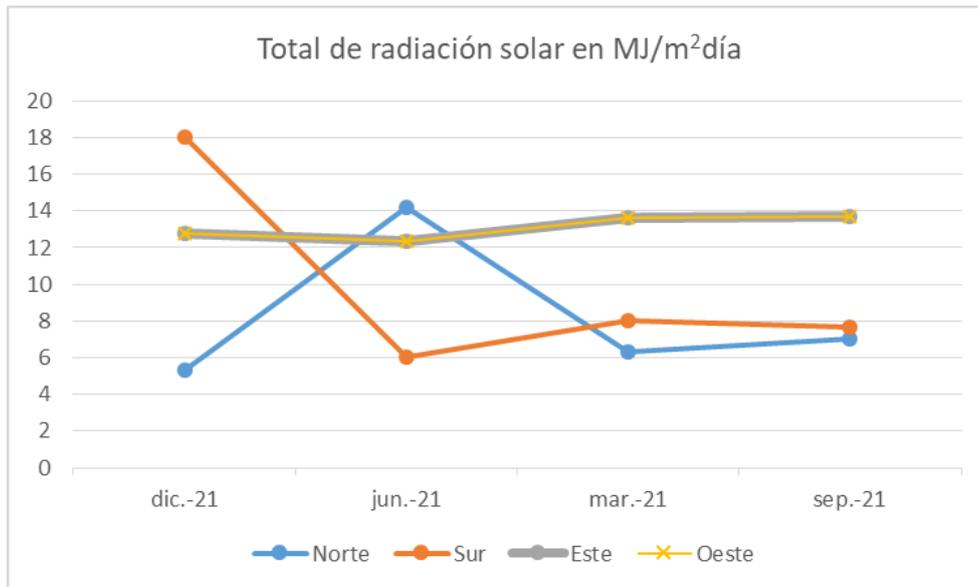


Figura 49. Radiación solar incidente en plano vertical en cada una de las 4 orientaciones cardinales en MJ/m<sup>2</sup>día

Al analizar los niveles de radiación solar y la variación de los ángulos de incidencia solar, se puede concluir que las únicas fachadas que garantizan una ganancia energética constante a lo largo del año son las fachadas este y oeste, lo que convierte estas orientaciones en las primeras opciones en la definición de la orientación de un sistema de calefacción solar.

Si se considera que todo material tiene un límite de tiempo de acumulación, y los momentos más fríos del día se presentan en horas de la noche y madrugada, se puede mencionar como recomendación preliminar que los sistemas de calefacción solar en clima ecuatorial presentarán un mejor comportamiento si se orientan hacia el oeste.

Es importante aclarar que esta recomendación de orientación se verificará mediante simulaciones dinámicas, en las cuales se consideran todas las variables que afectan los dispositivos de captación solar pasiva presentados en la Tabla 11.

### **Análisis de viviendas ubicadas en zona de estudio**

Con el fin de poder aportar en los procesos de diseño de sistemas de calefacción solar pasivo para viviendas en la zona de trabajo, se realiza un análisis de las diferentes tipologías y la percepción de los habitantes de las viviendas construidas en la zona de estudio.

### **Encuestas realizadas en viviendas ubicadas en el altiplano cundiboyacense**

Se realizaron 120 encuestas a personas que habitan en viviendas de la zona definida para el estudio para establecer un diagnóstico de viviendas construidas, analizar las tipologías encontradas y de conocer las necesidades térmicas y hábitos de uso de las viviendas en la zona de estudio.

En el proceso de realizar las encuestas se buscó poder tener datos de diferentes municipios del altiplano cundiboyacense, en la Figura 50 se puede observar la ubicación general de las viviendas encuestadas.

Para la elaboración de la encuesta se toma de referencia la Encuesta de auditoría energética de viviendas desarrollada en el Laboratorio de Arquitectura y Hábitat Sustentable de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional de La Plata. Las preguntas completas de la encuesta se pueden ver en el ANEXO 1 de este documento.

Las encuestas fueron realizadas por medio de un formulario de Google, el cual permite agrupar en un Excel de manera sencilla toda la información recogida; con apoyo de un grupo de 10 estudiantes de Arquitectura de la Facultad de Arquitectura de la Universidad La Gran Colombia, se realizaron visitas a diferentes viviendas de la zona trabajada y se diligenció el formulario en cada visita.

Las respuestas al formulario de cada uno de los encuestados pueden verse en el ANEXO 2 de este documento.

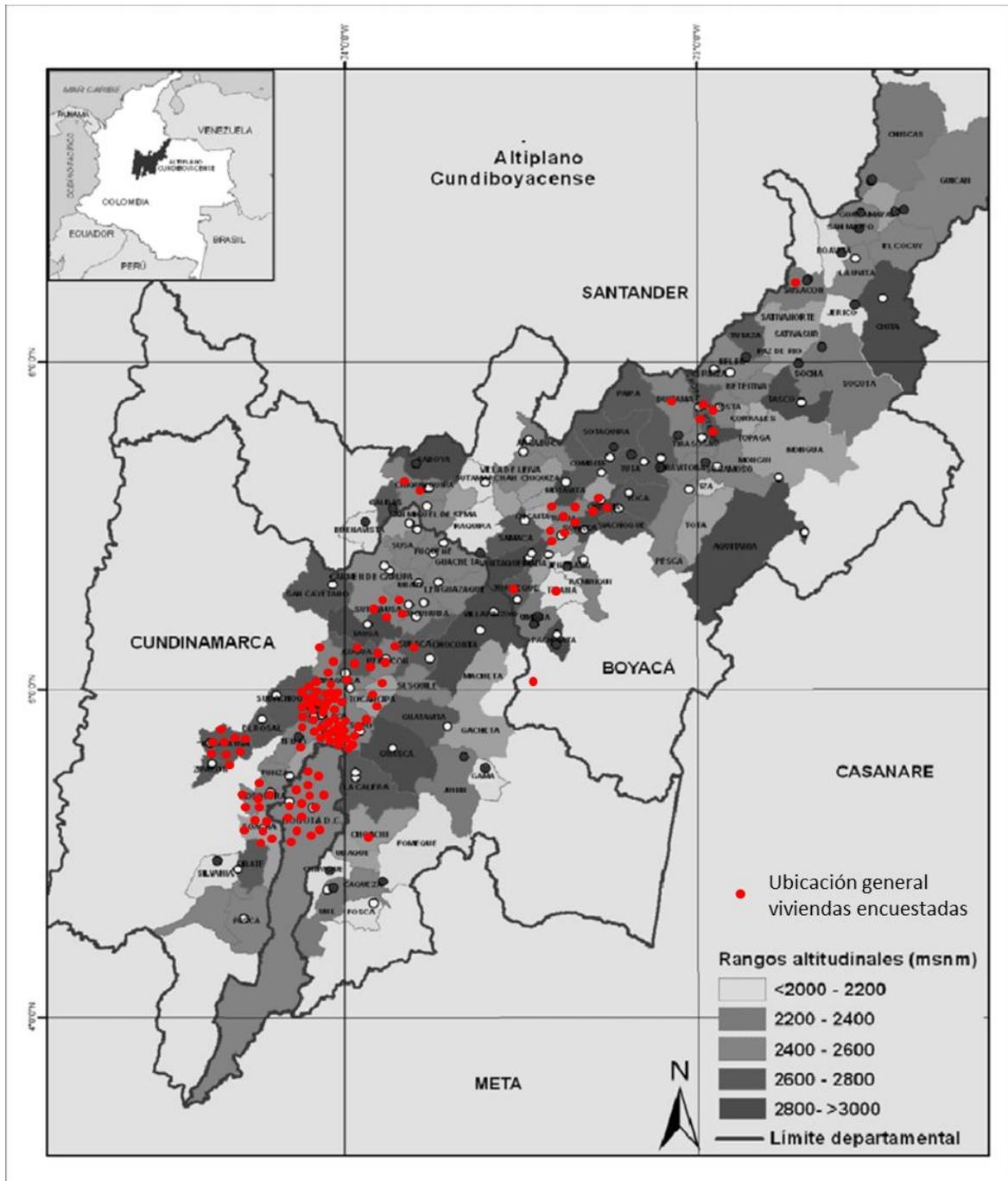


Figura 50. Ubicación general de las viviendas encuestadas en el altiplano cundiboyacense.  
Elaboración propia a partir de plano de Cortés Vecino et al (2010)

En la percepción de los ocupantes de las viviendas encuestadas se considera la vivienda predominantemente fría, con un 51.7%, lo que comprueba la hipótesis de que en la manera de diseñar y construir en el territorio nacional colombiano las variables climáticas exteriores pasan a un segundo plano, predominando las decisiones estéticas y presupuestales, lo cual ha generado espacios sin confort térmico interior. Ver Figura 51.



Figura 51. Percepción térmica de las viviendas según sus habitantes.

Adicionalmente, a pesar de existir un buen número de viviendas en condiciones de bajas temperaturas, la gran mayoría de las personas (86.7%) no cuentan con sistemas de calefacción para mitigar las frías noches presentadas en la zona del altiplano cundiboyacense. Ver Figura 52.

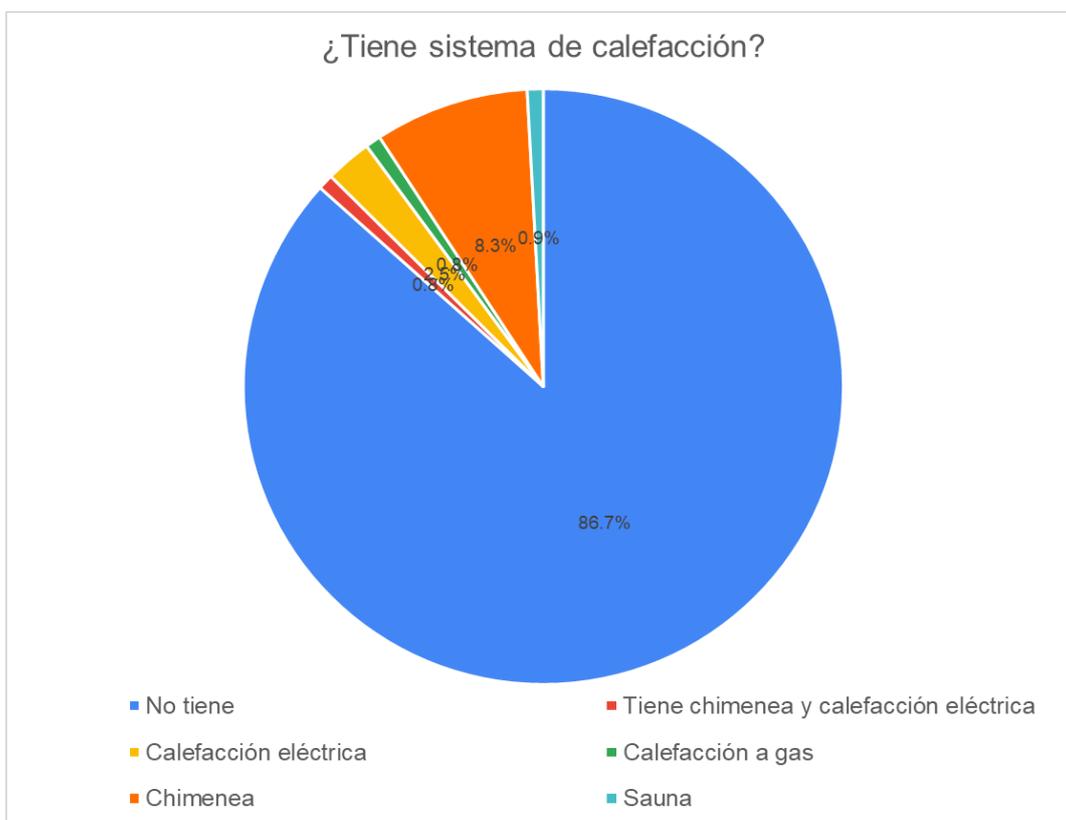


Figura 52. Sistemas de calefacción utilizados en la zona estudiada.

Entre la Figura 53 y la Figura 57, se presentan los materiales de mayor uso en la zona analizada. Se percibe un alto uso de materiales con alta transmitancia térmica, en algunos casos con muros macizos que sirven de acumulación térmica; los aislamientos térmicos en general no son utilizados, lo que genera grandes pérdidas térmicas en horario nocturno.

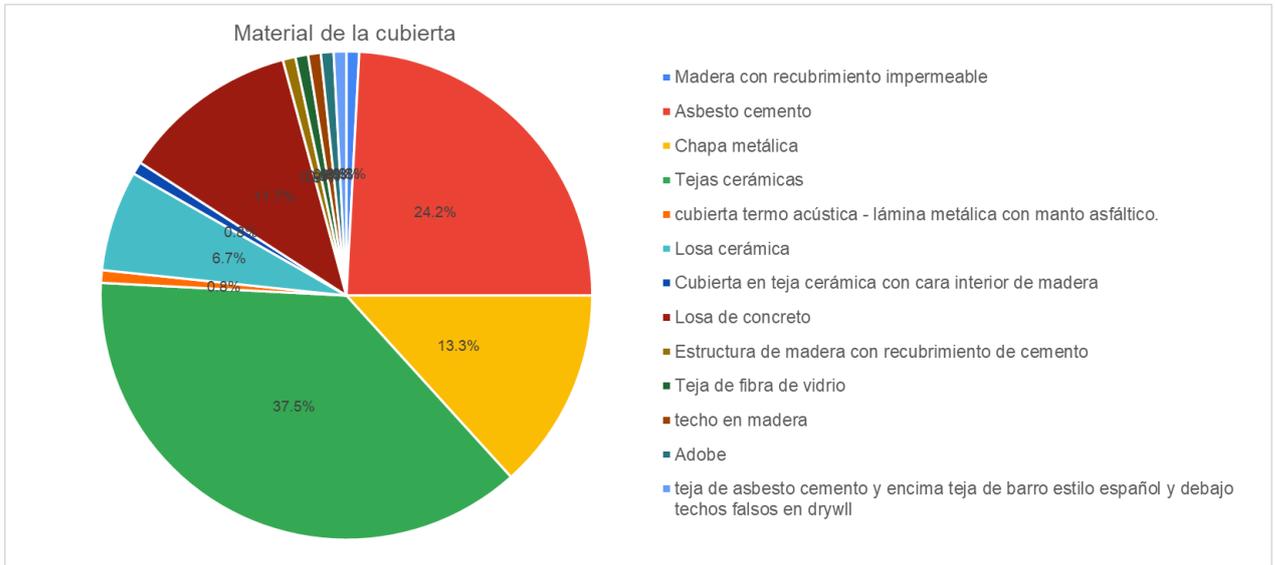


Figura 53. Material de cubierta predominante en viviendas de la zona estudiada

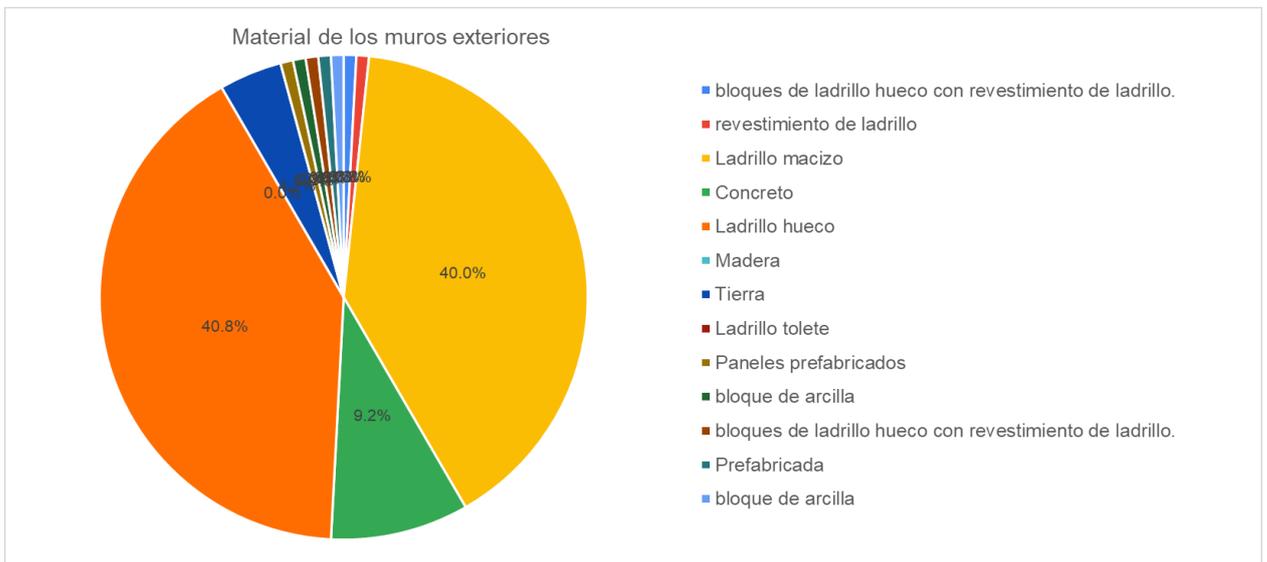


Figura 54. Material de muros exteriores predominante en viviendas de la zona estudiada

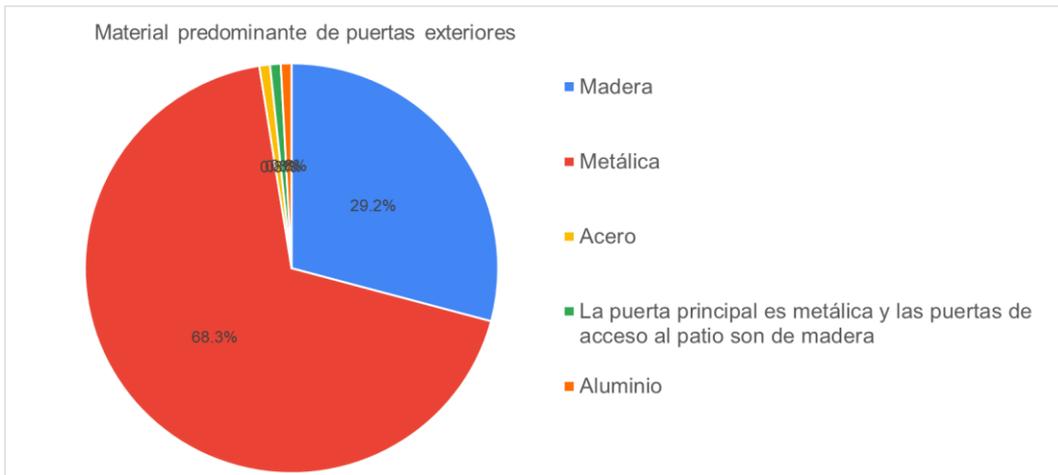


Figura 55. Material de puertas exteriores predominante en viviendas de la zona estudiada

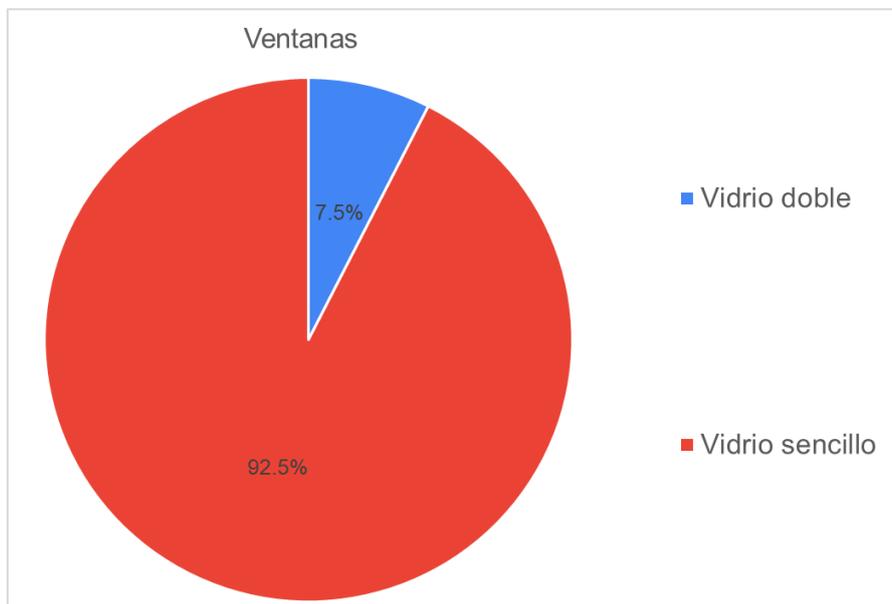


Figura 56. Ventanas utilizadas en viviendas de la zona estudiada

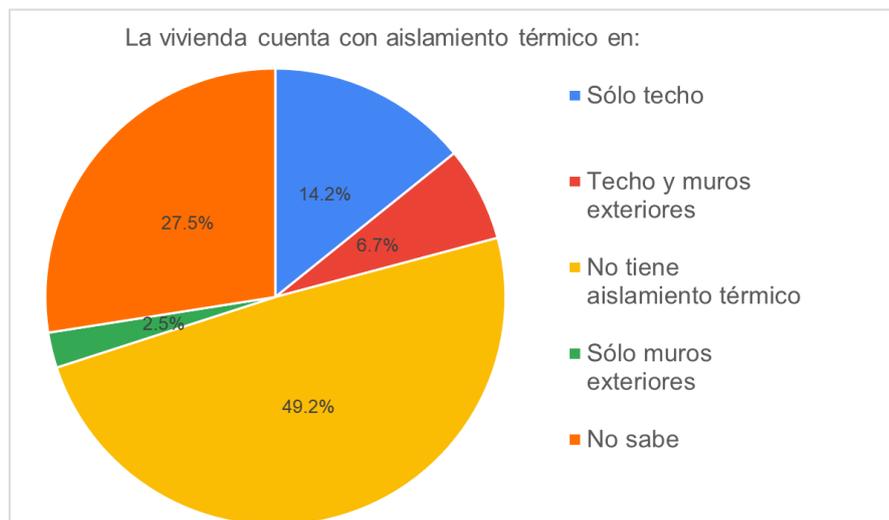


Figura 57. Aislamiento térmico utilizado en viviendas de la zona estudiada

Entre las 62 respuestas de viviendas que manifestaron una sensación predominantemente fría, únicamente 10 cuentan con algún sistema de calefacción en la vivienda; con lo cual se puede suponer una asimilación cultural del frío.

De estas 62 viviendas únicamente 4 cuentan con sistema de ventanas dobles para mitigar la pérdida térmica en horario nocturno y 13 cuentan con aislamientos térmicos en su envolvente. Lo anterior permite suponer que los aspectos térmicos en los procesos de selección de materiales pasan a un segundo plano, posiblemente por aspectos presupuestales.

Con el fin de complementar el análisis y tener datos de primera mano del comportamiento térmico de las viviendas, se toman 3 viviendas que en sus respuestas manifestaron tener espacios muy fríos y que permitirían la instalación de sensores de temperatura en los espacios de uso nocturno.

Las mediciones se realizan con el sensor UNI-T UT330B Humidity/Temperature Datalogger, con rangos de mediciones de 1 hora.

La primera vivienda monitoreada se encuentra en el municipio de Zipaquirá, la cual se encuentra construida con ladrillo hueco, teja cerámica y madera en puertas y ventanas. En la Figura 58 se puede ver la fachada y planta esquemática de la vivienda.

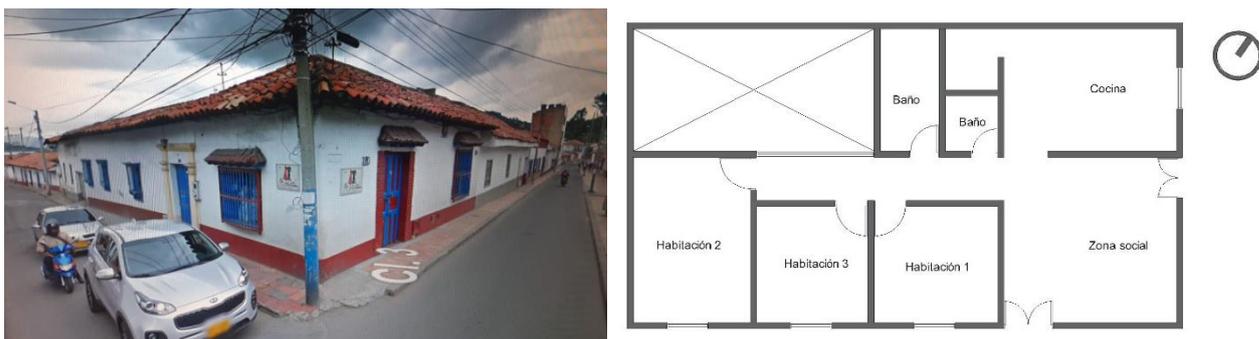
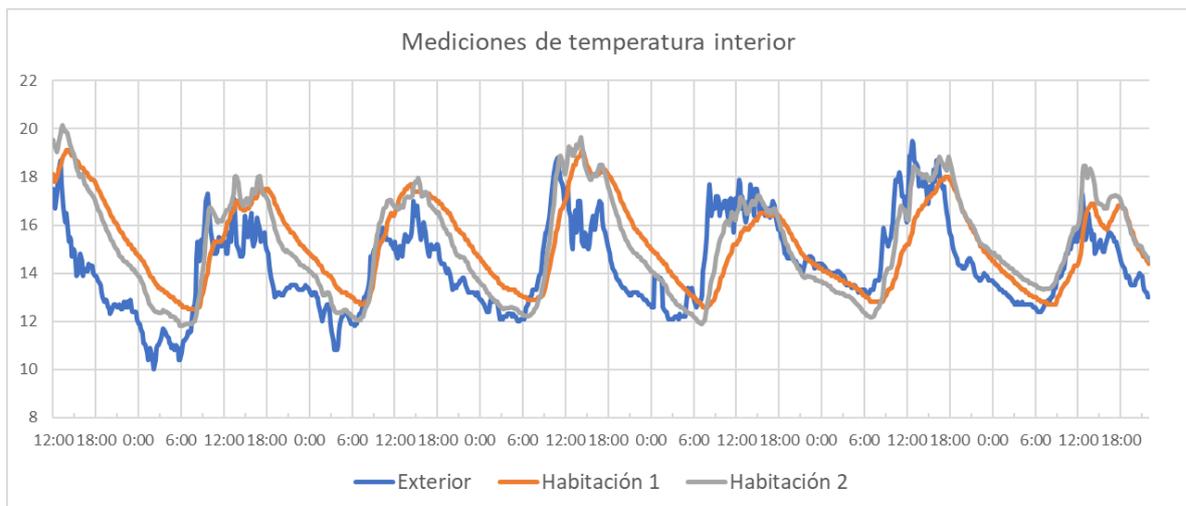


Figura 58. Vivienda monitoreada 1. Ubicada en Zipaquirá, Cundinamarca

La primera percepción de las mediciones es que la semana en la que se dejaron los sensores en los espacios fue una semana particularmente fría, la cual no tuvo altos niveles de radiación solar, por lo cual la temperatura exterior nunca subió de 18°C.

Los espacios de uso nocturno monitoreados presentan oscilaciones térmicas similares al exterior, haciéndose evidente la falta de masa térmica y aislamiento térmico en la envolvente.

Las temperaturas de los espacios interiores presentan un ligero desfase en el proceso de enfriamiento en las horas de la noche y la madrugada, pero al final terminan llegando casi a la misma temperatura del exterior, haciendo que estos espacios de uso nocturno siempre se encuentren por debajo de la temperatura de confort térmico. Ver Figura 59.



En la vivienda número 2 los espacios monitoreados presentan temperaturas por debajo del rango de confort térmico; la oscilación térmica de ambos espacios se encuentra entre el rango de 14°C y 21°C, obteniendo la temperatura máxima cercano al medio día, momento en el que normalmente no se encuentra ninguna persona en el espacio.

La habitación 2 presenta unos ligeros aumentos en la temperatura en las primeras horas del día debido a su orientación este, pero al no contar con masa térmica donde almacenar la energía recibida, en el transcurso de la tarde y noche llega a niveles similares a la habitación 1.

En las dos habitaciones es evidente la falta de masa térmica al generarse una oscilación térmica similar al exterior con un desfase de entre 2°C y 4°C. A pesar de contar con una oscilación térmica similar a la temperatura exterior, ambos espacios se encuentran hasta 4°C más calientes que el exterior en el momento más frío del día. Ver Figura 61.

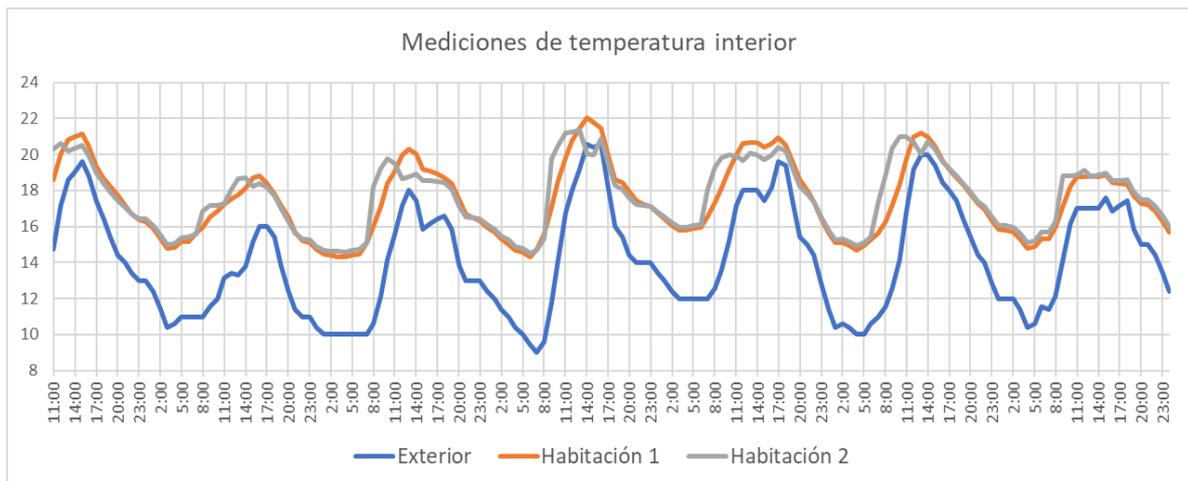


Figura 61. Resultados de mediciones de temperatura interior en vivienda ubicada en Cota.

La tercera vivienda monitoreada se encuentra en las afueras de la ciudad de Bogotá, la cual es una construcción más reciente, año 2010, pero continúa presentando los mismos materiales de las viviendas anteriores, con ladrillo hueco, teja cerámica, y carpintería metálica en puertas y ventanas. En la Figura 62 se presentan imágenes de la vivienda y una planta arquitectónica.



Figura 62. Vivienda monitoreada 3. Ubicada en Bogotá, Cundinamarca

Los espacios monitoreados de la vivienda 3 se encuentran por debajo del rango de confort térmico.

En esta vivienda se percibe una mayor diferencia entre los dos espacios monitoreados, esto se puede deber a que la habitación 2 tiene menos pérdidas térmicas al compartir un muro con una vivienda con la cual se encuentra pareada.

Ambas habitaciones logran un poco de sol por la tarde, generando un desfase de la de la onda térmica respecto a la oscilación exterior, pero la falta de masa térmica hace que esta ganancia energética no se logre mantener para los momentos más fríos del día (noche y madrugada).

La oscilación térmica de la habitación 1 se encuentra entre los  $11^{\circ}\text{C}$  y los  $19.5^{\circ}\text{C}$ , y en la habitación 2 esta oscilación está en el rango de los  $13^{\circ}\text{C}$  y los  $22.3^{\circ}\text{C}$ ; ninguno de los ambientes garantiza niveles de confort térmico en horario nocturno que es cuando se utilizan los espacios. Ver Figura 63.



## **4.2 ANÁLISIS DE IMPORTANCIA RELATIVA DE LAS DIFERENTES VARIABLES QUE INFLUYEN EN UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN SOLAR PASIVO**

En el proceso de planteamiento de un dispositivo de calefacción solar para viviendas en climas tropicales de alta montaña, se debe evaluar las diferentes variables que afectan el buen desempeño de estos sistemas presentados en la Tabla 11.

Con el fin de generar un análisis mucho más completo, que simplemente simular de manera manual diferentes variaciones de cada uno de los elementos que generan impacto en la oscilación de la temperatura interior de los espacios que utilizan un sistema de calefacción solar pasivo, se planteó realizar un análisis de sensibilidad de las diferentes variables, con el fin de determinar el peso relativo de cada una de ellas en el comportamiento térmico final del espacio interior.

### **Análisis de Sensibilidad**

El análisis de sensibilidad es un método que ayuda al diseñador y a los investigadores a reconocer la estrategia de optimización más efectiva aplicada a un contexto específico (Pisello et al, 2012). De acuerdo al método utilizado se manejan “X” número de variables y “X” número de simulaciones, haciendo que el proceso de simulación computacional sea más o menos demorado, y por lo tanto más o menos costoso.

“Un análisis de sensibilidad de bajo costo computacional es con enfoque local, pero la principal limitante del enfoque local es que las derivadas parciales proporcionan información solamente del punto base donde son calculadas y no exploran todo el espacio de los parámetros de entrada”. (López-Cruz et al, 2012), por lo cual para el enfoque de esta investigación no se considera pertinente. Se debe buscar un análisis de sensibilidad con enfoque global, pero con un costo computacional relativamente bajo.

En la búsqueda de un método que pudiera responder a los efectos prácticos de la investigación, generando un análisis global con bajo costo computacional, se encuentra que “el método Morris de un factor a la vez es particularmente efectivo para seleccionar un subconjunto de parámetros relevantes entre los contenidos en modelos con una gran cantidad de parámetros o con simulaciones que

requieren mucho tiempo.” (Confalonieri, 2010), siendo un método que responde de manera adecuada a los requerimientos de simulación de los diferentes parámetros de un sistema de captación solar pasivo, en condiciones de clima ecuatorial frío.

La Figura 64 nos presenta una relación entre la información resultado de utilizar diferentes métodos de análisis de sensibilidad versus el costo computacional de ellos, mostrando el método de Morris como el método con mejor relación información resultante versus costo computacional.

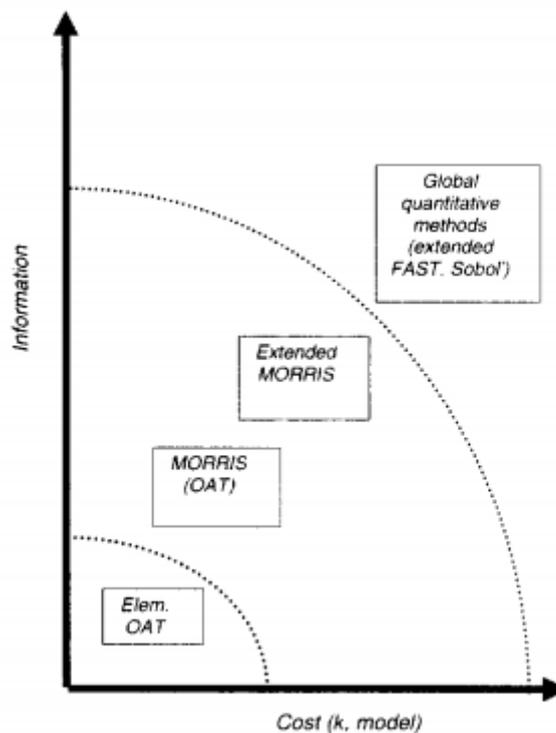


Figura 64. “Representación de varias clases de métodos para el análisis de sensibilidad de acuerdo con dos propiedades: ‘información’, es decir, la cantidad de información producida en términos de la sensibilidad del modelo (a lo largo de la abscisa) y ‘costo’” (Campolongo et al, 1999)

### Método de Morris

El método de Morris plantea que “el análisis de datos puede basarse en el examen de los cambios en una salida que se atribuyen inequívocamente a los cambios en las entradas individuales” (Morris, 1991); el primer paso planteado por el método es realizar un muestreo de valores iniciales dentro de los rangos definidos en todas las variables de entrada y calculando el resultado del modelo

posterior, el segundo paso cambia los valores únicamente de una variable y calcula el cambio resultante en el resultado del cálculo en comparación con el primer análisis, posteriormente se cambian los valores para otra variable, manteniendo el cambio anterior realizado, y se calcula el cambio resultante en el resultado del cálculo en comparación con el segundo análisis; esto continúa hasta que se cambien todas las variables de entrada.

Esto podría repetirse  $r$  veces para producir una muestra aleatoria de  $r$  efectos elementales de  $F$  (variable). “Si el procedimiento se realizara para cada entrada, el resultado sería una muestra aleatoria de valores  $r$  de cada  $F$ , a un costo total de  $n = 2rk$  ejecuciones” (Morris, 1991). Este número es muy eficiente si se compara con otros métodos de análisis de sensibilidad global.

El método Morris ha sido ampliamente utilizado en el análisis energético de edificios, Heiselberg et al (2009), implementó el método Morris para identificar las variables clave que influyen en el uso de energía para un edificio de oficinas en Dinamarca. Los resultados muestran que las dos variables más importantes son el control de la iluminación y la ventilación durante el invierno. Hyun et al (2007), utilizó el método de Morris para investigar el rendimiento de la ventilación natural en un edificio residencial de 15 pisos en Corea. Se encuentra que los cuatro factores importantes son la velocidad del viento, el área de apertura de la ventana por parte de los ocupantes, la constante del terreno local y el exponente de flujo. Corrado et al (2009), utilizó el método de Morris para identificar los factores clave para la calificación energética en una casa en Italia. Descubrieron que los cinco factores clave en orden decreciente de importancia son la temperatura interior, la tasa de cambio de aire, el número de ocupantes, la tasa metabólica y las ganancias de calor del equipo.

El método de Morris ha demostrado ser una herramienta que permite hacer análisis de sensibilidad en evaluaciones energéticas de edificios, con el fin de determinar la importancia relativa de cada variable en cada uno de los escenarios trabajados, razón por la cual se propone como método para realizar las simulaciones de la presente investigación.

## Simulaciones dinámicas – Análisis de sensibilidad de sistema de calefacción solar pasivo

Para realizar el análisis de sensibilidad por el método de Morris, se utilizan programas de simulación paramétricos, con el plugin Honeybee para Grasshopper, complemento del software Rhinoceros. Este plugin permite traducir la geometría paramétrica a formato de OpenStudio para simular los diferentes escenarios con el motor de cálculo EnergyPlus.

Se realizó un análisis de sensibilidad para determinar el impacto de los parámetros clave de diseño (X) en diferentes salidas (Y). Se aplica el análisis de sensibilidad mejorado Método de Morris, utilizando el paquete de "sensibilidad" para R, junto con un código Python personalizado. Ver Figura 65.

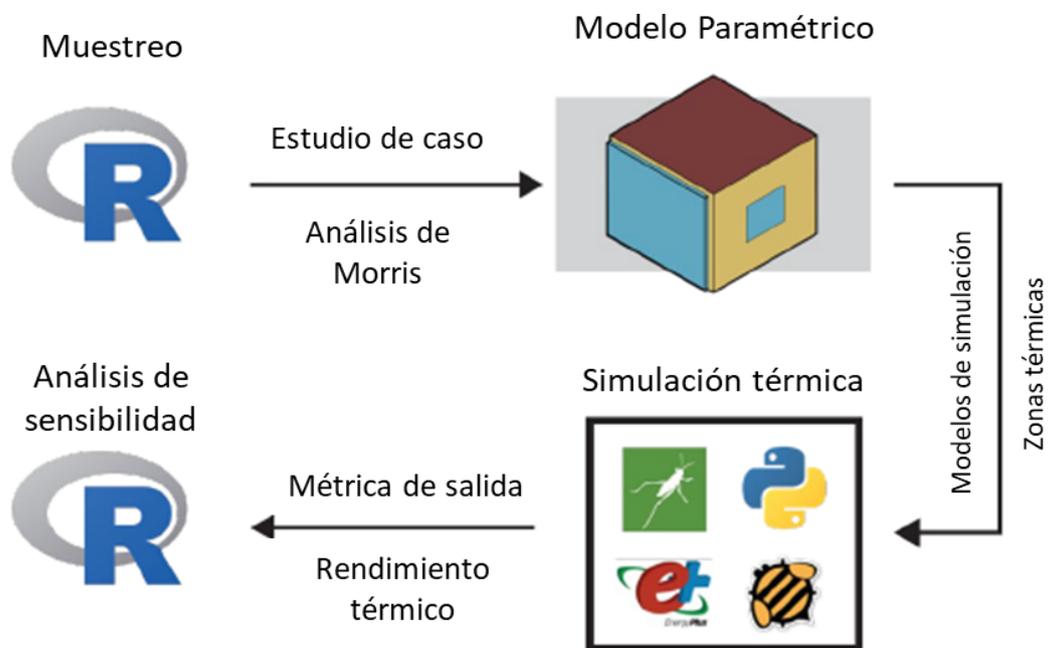


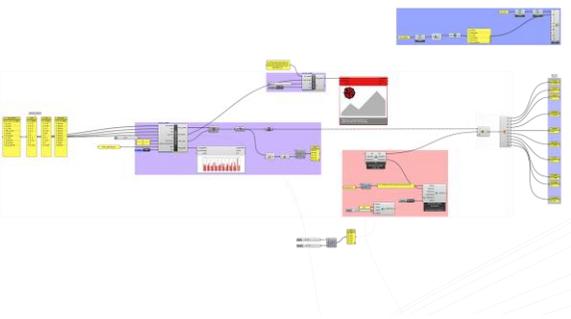
Figura 65. Metodología general para el análisis de sensibilidad R, Python, Grasshopper y EnergyPlus

Los diferentes datos de entrada requeridos para las simulaciones son: geometría del espacio arquitectónico a simular, geometría del dispositivo de calefacción solar, y materialidad de todos los elementos; además de las diferentes variables que se van a analizar con las simulaciones dinámicas. Mayor detalle de todos estos parámetros puede verse en la Tabla 14. Descripción y rango de las variables trabajadas para el sistema de captación solar.

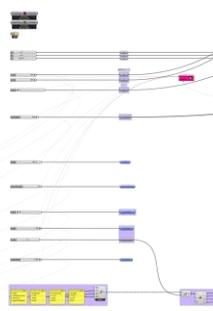
Si bien se cuenta con resultados individuales de cada una de las simulaciones que se realizan en el análisis de sensibilidad, se adiciona un algoritmo para graficar los resultados finales de las diferentes simulaciones realizadas, de tal manera que se pueda analizar de manera rápida el peso relativo de cada uno de los elementos del sistema de calefacción solar sometidos al análisis de sensibilidad.

En la Figura 66 se puede ver el algoritmo en Grasshopper utilizado para las simulaciones de análisis de sensibilidad.

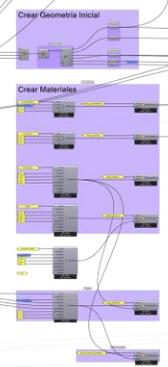
## ANÁLISIS SENSIBILIDAD



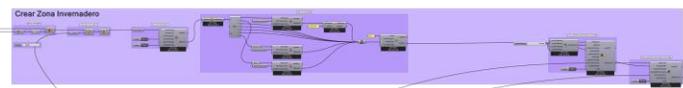
## ENTRADAS



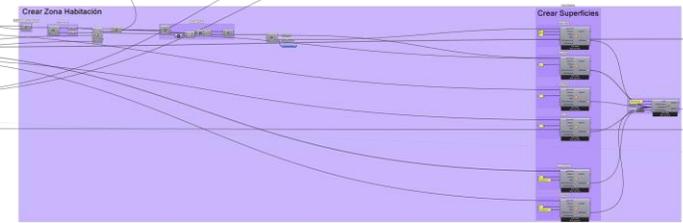
## MATERIALES



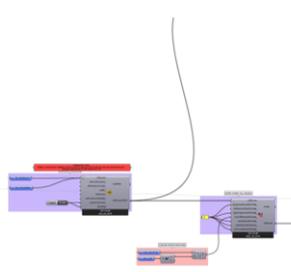
## INVERNADERO



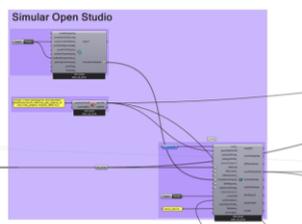
## HABITACIÓN



## PROP EP+



## SIMULAR



## LEER RESULTADOS



## PROCESAR RESULTADOS

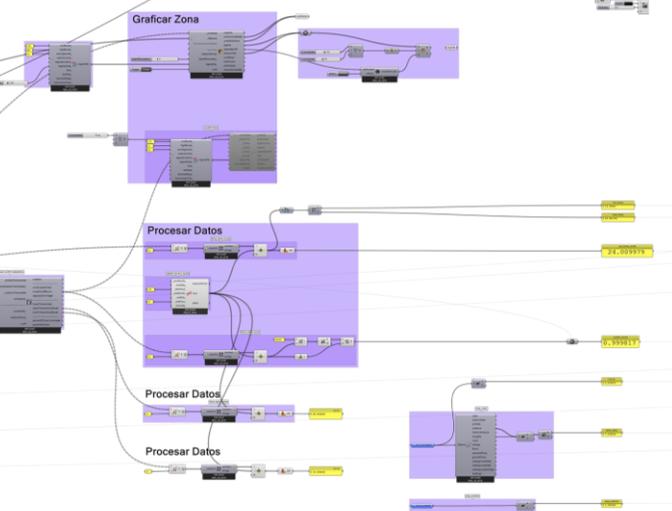


Figura 66. Algoritmo de simulación en plataforma Grasshopper

## Geometría y propiedades del modelo computacional

Para el modelo paramétrico se utilizó un modelo base de una habitación típica de la zona de estudio, con una planta de 3m x 3m y con una altura de 2.5 m; en una de sus fachadas se dispone una ventana de 1m x 1m, como se ilustra en la Figura 67.

Para efectos de la simulación se definen las superficies de piso, y dos de las paredes del recinto trabajado como superficies adiabáticas, entendiendo que estas paredes estarán en contacto con otros espacios de la vivienda, por lo cual no tendrá afectaciones directas de las variaciones climáticas exteriores.

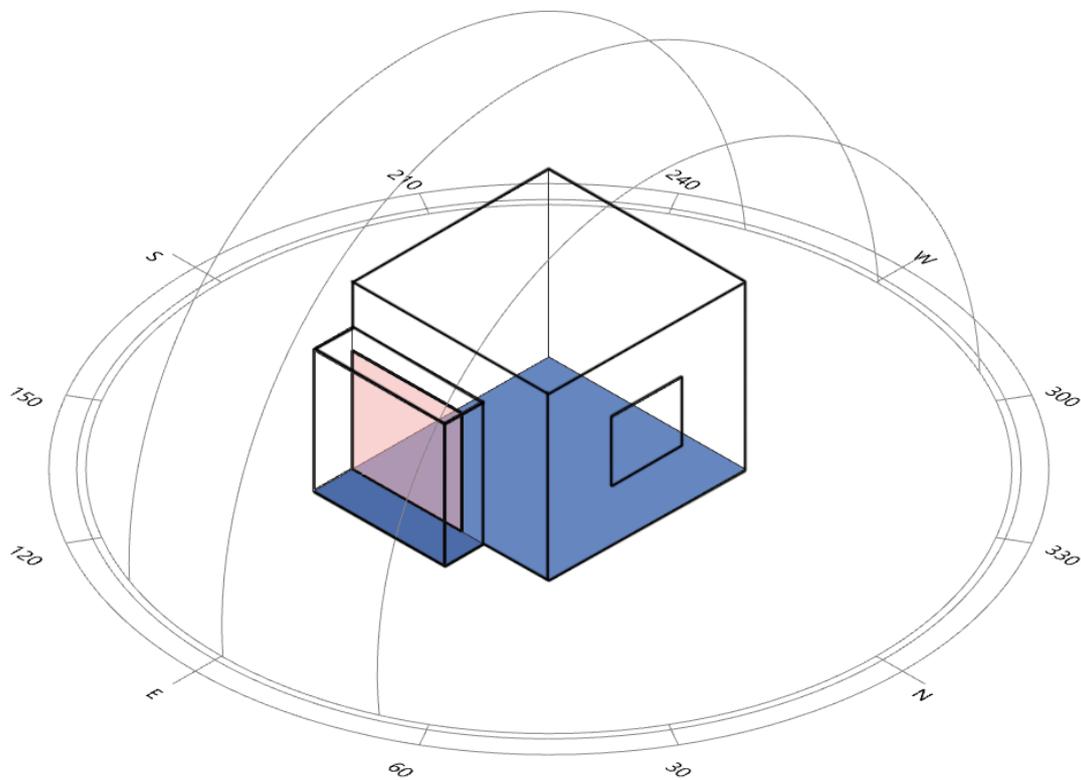


Figura 67. Modelo 3d habitación típica con invernadero adosado

En la Tabla 13 se presentan las propiedades físicas de los materiales que se consideraron constantes en los procesos de simulación.

Tabla 13. Características físicas de los materiales del caso base.

<b>Material</b>	<b>Espesor [mm]</b>	<b>Conductividad [W/m·K.]</b>	<b>Densidad [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Calor Específico [J/kg-J]</b>
Techo	200	0.600	1000	800
Muros	120	0.320	770	1000
Aislante Techo	var*	0.032	30	837

<b>Material</b>	<b>Espesor [mm]</b>	<b>Valor U [U]</b>	<b>SHGC [k]</b>	<b>Transmisión [VT]</b>
Vidrio Ventana	4	5.8	0.9	0.9
Vidrio sistema captador	4	var*	0.9	0.9

\*Materiales que consideran alguna variación en alguna de sus propiedades físicas son indicados con var.

### **VARIABLES DE ESTUDIO**

De acuerdo a los análisis realizados y el resultado presentado en la Tabla 11, se realiza un planteamiento de las variables necesarias a analizar y de esta manera poder determinar el peso relativo de cada una de ellas en la configuración final del sistema de captación solar pasivo.

Las variables definidas para el análisis fueron: 1) tamaño del sistema de calefacción solar pasivo en sus 3 ejes (x, y, z), entendiéndose que es fundamental conocer el comportamiento de diferentes configuraciones formales, en largo, ancho y alto del elemento de captación solar, 2) tamaño del muro acumulador adosado al muro existente, ya que después de captar la energía solar, la debemos acumular en algún material para posteriormente entregarla al espacio de manera progresiva por transferencia térmica, definir el tamaño de este material nos demostrará si es necesario agregar este muro adicional de

acumulación o el sistema funcionaría únicamente con el cerramiento ya existente en las viviendas construidas, 3) orientación del sistema de captación solar, con el fin de determinar la orientación óptima para los sistemas solares pasivos en bajas latitudes, 4) número de personas al interior, ya que la carga energética interna aporta al calentamiento del espacio, 5) coeficiente U del vidrio utilizado en el sistema de calefacción solar, para determinar si es necesario reducir las pérdidas térmicas por transferencia térmica en horario nocturno, o podría funcionar con un vidrio simple, reduciendo costos en el sistema propuesto 6) material acumulador utilizado, en el cual se evalúan tres materiales para determinar cuál puede ser el más eficiente en las condiciones de clima ecuatorial de alta montaña, 7) espesor del material acumulador, el cual, junto al tamaño del muro acumulador nos permitirá definir la necesidad de este muro adicional de acumulación térmica, 8) espesor de aislamiento térmico en techo, con el objetivo de determinar la importancia de tener aislamiento térmico en la cubierta del espacio analizado; se plantea aislamiento únicamente en la cubierta por ser el elemento que mayores pérdidas genera en horario nocturno, además considerando la variable presupuestal no se considera aislar térmicamente los muros exteriores, ya que se busca no aumentar significativamente los costos requeridos para el acondicionamiento del espacio, y en la zona de estudio no es común el uso de aislamientos térmicos.

Las variables de tamaño en el sistema de calefacción solar y en el muro acumulador se analizan de manera porcentual con el objetivo de generar un estudio representativo para espacios de diversas dimensiones y para no generar error en la simulación. Esto último debido a que si no se relacionan estas variables al muro en el que se adosa el elemento de captación podría crearse un elemento de captación más grande que la pared donde se ubicaría, o un muro acumulador más grande que el elemento de captación, generando errores en el modelado y simulación. En la Tabla 14 se puede ver los rangos definidos para cada una de las variables.

Tabla 14. Descripción y rango de las variables trabajadas para el sistema de captación solar

**Sistema de calefacción solar pasivo**

<b>Variables</b>	<b>ID</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor inicial</b>	<b>Rango</b>	<b>Step</b>
<i>Geometría y posición</i>	1	Tamaño elemento de captación en eje x	% de tamaño del muro	30%	(0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1)	0.1
	2	Tamaño elemento de captación en eje y	m	0.3	(0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1)	0.1
	3	Tamaño elemento de captación en eje z	% de tamaño del muro	30%	(0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1)	0.1
	4	Tamaño del muro acumulador en sus ejes x – z	% de tamaño del invernadero	10%	(0.1, 0.22, 0.34, 0.46, 0.58, 0.70, 0.82, 0.95)	0.12
	5	Orientación del dispositivo de captación solar	grados	0 (mirando al sur)	(0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315)	45
<i>Materialidad</i>	6	Coefficiente U del vidrio de elemento de captación	W/m <sup>2</sup> °C	5.8	(5.8, 5.3, 4.8, 4.3, 3.8, 3.3, 2.8)	0.5
	7	Material acumulador utilizado	-	-	Ladrillo macizo Concreto Agua	-
	8	Espesor del material acumulador	m	0.1	(0.1, 0.128, 0.156, 0.185, 0.214, 0.2, 0.228, 0.3)	0.028
	9	Espesor de aislamiento térmico en techo	m	0	(0.001, 0.008, 0.015, 0.022, 0.029, 0.036, 0.043, 0.05)	0.007
<i>Ocupación</i>	10	Número de personas al interior	unidad	0	(0, 1, 2)	1

## **Resultados análisis de sensibilidad**

El método de sensibilidad de Morris requiere un número total de simulaciones de  $n = r (k + 1)$ , siendo  $r$  el número de iteraciones de las simulaciones y  $k$ , el número de parámetros. El paquete de "sensibilidad" para R (Looss et al, 2020) se utilizó para generar el vector de entrada para método de muestreo propuesto por Morris.

El procedimiento de simular las diferentes alternativas se repitió treinta veces ( $r = 30$ ) para diez entradas variables ( $k = 10$ ). Por lo tanto, el número total de simulaciones realizadas fue 330, en las cuales realizó variaciones de diferentes configuraciones de las variables presentadas en la Tabla 14.

En la Figura 68 se pueden observar algunos de los resultados de las diferentes simulaciones resultado de las variables parametrizadas. En cada una de las imágenes se puede ver la variación en tamaño del dispositivo de captación solar, el tamaño del muro acumulador (rectángulo rojo) y la orientación representada por 3 arcos que muestran los recorridos solares; la planta de la habitación se pinta de un color de acuerdo a la temperatura operativa del espacio con los parámetros simulados, ver leyenda. En el ANEXO 3 se presentan los resultados de los 330 escenarios simulados.

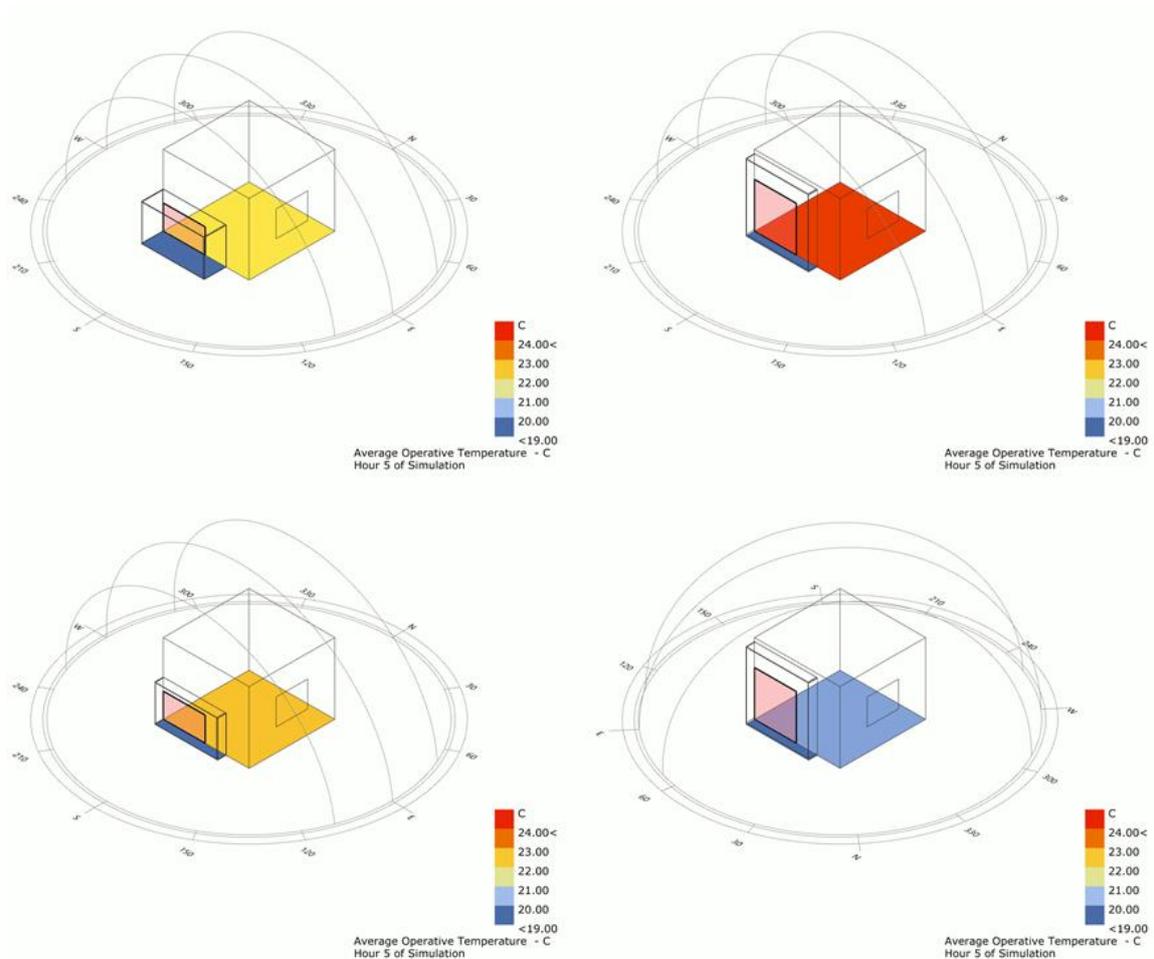


Figura 68. Ejemplo de resultados de simulaciones térmicas de acuerdo a variables parametrizadas

Después de ejecutar todas las simulaciones, se determina la influencia de cada parámetro de diseño sobre la salida. Según Campolongo (2007) “la media absoluta y la desviación estándar de los efectos elementales fueron calculados para evaluar los resultados. La media absoluta valor ( $\mu^*$ ) determina la importancia de cada parámetro de diseño y la desviación estándar ( $\sigma$ ) mide las interacciones con otros factores y posibles efectos lineales.” Por lo tanto, los valores bajos de ambos indican una variable no influyente, mientras que los valores altos indican las principales variables. (Tian, 2013).

De esta manera es posible tener un mejor análisis de los datos de las 330 simulaciones realizadas.

El primer gráfico de análisis de sensibilidad evalúa la importancia y el impacto de cada una de las variables parametrizadas en relación al porcentaje de horas nocturnas (entre las 6 pm a 8 am) dentro del rango de confort térmico.

Para la cuantificación del confort térmico en el interior del espacio simulado, se emplea el rango de confort adaptativo, recomendado en el ASHRAE 55 de 2017, el cual en la zona trabajada, el altiplano cundiboyacense, se establece entre 19.6°C y 24.6°C.

Las gráficas de sensibilidad nos muestran el porcentaje de influencia, con su respectiva desviación estándar, de cada variable en el dato de salida (en la Figura 69 sería confort noche), de esta manera se puede apreciar de manera rápida cuál variable afecta más los resultados de salida en el confort térmico interior en horario nocturno.

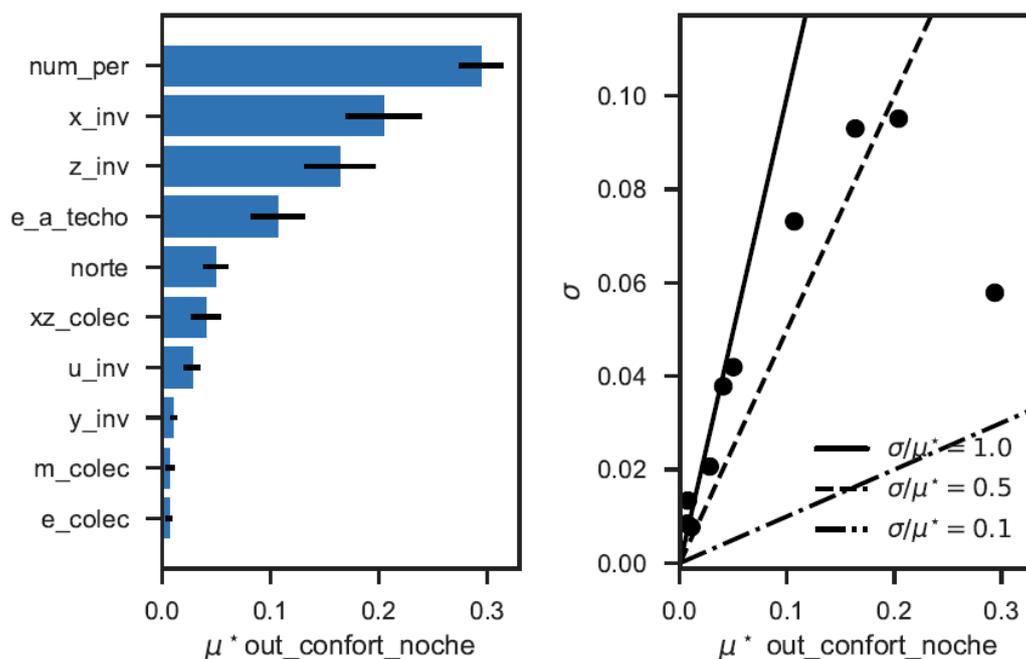


Figura 69. Resultado análisis de sensibilidad por método de Morris en relación al porcentaje de confort interior en horario nocturno.

En la Figura 69 se observa que la variable con mayor importancia en el porcentaje de confort interior es la ocupación del espacio, con un 30% de peso y una desviación estándar de 6%, considerando la ocupación con un valor de ocupación máximo de dos personas. El nivel de importancia de esta variable está asociada a la relación de carga metabólica de las personas versus el tamaño de

la habitación, haciendo que la presencia o no de personas afecte en gran medida la temperatura interior.

Las siguientes variables en orden de importancia son: largo del sistema de captación solar, altura del sistema de captación solar, evidenciando de esta manera la afectación de utilizar sistemas tipo muro trombe en el comportamiento térmico interior; la siguiente variable es el aislamiento térmico del techo, ya que al reducir pérdidas térmicas se mantienen las temperaturas más cerca del rango de confort, y posteriormente la orientación, la cual en primera medida pareciera tener mucha menos importancia en climas tropicales de alta montaña que la que tiene en climas estacionales.

La siguiente variable presentada en el gráfico de sensibilidad, es el tamaño de la superficie colectora, la cual pareciera no tener una importancia fuerte, esto puede deberse a la metodología de parametrización, ya que este elemento se encuentra ligado directamente al tamaño X y Z del sistema de captación, por lo tanto dentro del análisis de sensibilidad su aporte ya es considerado dentro de estos parámetros.

Los siguientes parámetros, como el Valor U del vidrio, el ancho o profundidad del sistema de captación, el espesor y el material de la superficie captadora, no evidencian una gran afectación en el confort interior en horario nocturno, por lo cual puede utilizarse cualquiera de los parámetros simulados y no se afectaría fuertemente el porcentaje de horas nocturnas dentro del rango de confort, modificándolo en un valor cercano al 3%.

Para un mejor análisis, se analizan los resultados de análisis de sensibilidad bajo otros datos de salida, los cuales son: Temperatura operativa promedio de la habitación simulada (Figura 70) y Temperatura operativa mínima en el espacio interior (Figura 71). Encontrando variaciones respecto al orden de las variables en su porcentaje de afectación a la métrica de salida analizada.

En la Figura 70 se presenta el gráfico de sensibilidad e importancia relativa de las diferentes variables en relación a la temperatura operativa promedio de la zona de estudio, se evidencia la misma relación de importancia de las diferentes variables en relación a la presentada en la Figura 69. Resultado análisis de

sensibilidad por método de Morris en relación al porcentaje de confort interior en horario nocturno.

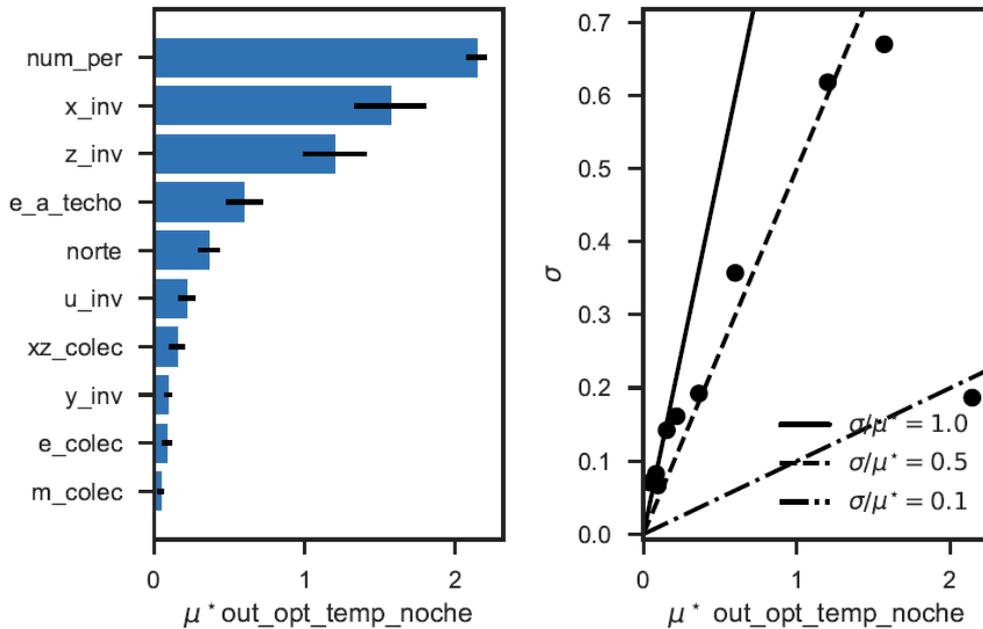


Figura 70. Resultado análisis de sensibilidad por método de Morris en relación a la temperatura operativa del espacio interior

La ocupación del espacio se mantiene como la variable más importante, afectando en 2.1°C la temperatura operativa promedio en el espacio interior. Las variables de largo y alto del sistema de captación generan un impacto entre 1° y 1.5° en la temperatura interior.

Las demás variables analizadas presentan un impacto inferior a 0.6°C en la temperatura operativa promedio del espacio analizado. Ver Figura 70.

En la siguiente métrica de salida, la temperatura mínima obtenida en el espacio interior en el horario nocturno, se mantiene la ocupación del espacio como la variable más importante, afectando en 2.8°C el espacio interior. El aislamiento del techo toma mucha más importancia en la temperatura mínima interior, con un valor de 1.9°C con una desviación estándar de 0.7°C.

Las siguientes variables en orden de importancia son: largo y alto del sistema de captación, tamaño de la superficie colectora; los valores de orientación, ancho del invernadero, valor U del vidrio, material y espesor del colector, no presentan una gran importancia en el resultado final de la temperatura mínima interior del espacio. Ver Figura 71.

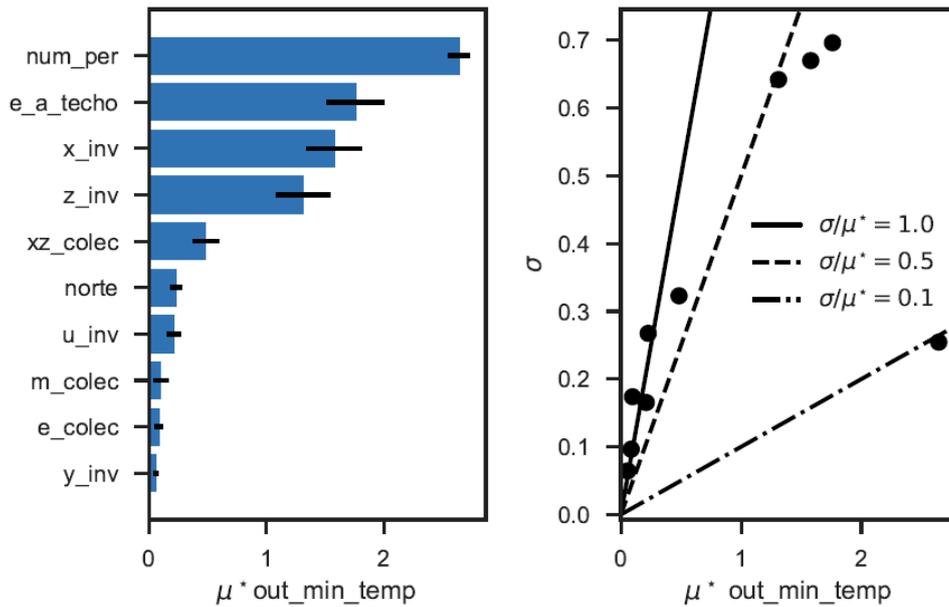


Figura 71. Resultado análisis de sensibilidad por método de Morris en relación a la temperatura mínima del espacio interior

Un factor a resaltar nuevamente es la baja importancia relativa que se encuentra en esta métrica de salida en las variables de orientación, la cual presenta menos importancia que en climas estacionales y ancho del sistema de calefacción solar pasivo, direccionando las soluciones arquitectónicas de los sistemas de captación solar en el clima trabajando hacia muros trombe y no hacia invernaderos.

En las gráficas de sensibilidad presentadas hay coincidencia en algunas variables como las más importantes, quitando el número de personas al interior, la cual es una variable que puede no controlarse (por estar ya determinada en el edificio construido), permanecen como las variables más importantes el largo y alto del sistema de calefacción solar, no su ancho, por lo que se concluye que para las condiciones climáticas del altiplano cundiboyacense, y por el recorrido solar de la zona, funciona mejor un muro trombe que un invernadero como sistema de captación solar a utilizar.

El aislamiento térmico en el techo es un factor importante para mantener mejores condiciones al interior del espacio, al reducir las pérdidas térmicas la temperatura mínima en el espacio es mayor y por lo tanto hay un mayor porcentaje de horas dentro del rango de confort.

El valor de transmitancia U del vidrio y el material del colector, presentan una baja importancia en todos los análisis de sensibilidad realizados, por lo cual se concluye que puede utilizarse cualquiera de los valores simulados. En el caso del vidrio se considera utilizar un valor U de 5.8 por temas presupuestales; en el material del colector se define que puede construirse con concreto y ladrillo macizo, eliminando el agua como opción considerando los problemas constructivos que esta puede traer consigo.

La Tabla 15 muestra los parámetros clasificados según sus valores de efectos elementales absolutos ( $\mu^*$ ), los cuatro principales parámetros altamente sensibles identificados mediante el método de Morris son, en orden descendente: (1) Número de personas en el lugar, (2) longitud del sistema de calefacción solar, (3) aislamiento térmico del techo, (4) altura del sistema de calefacción solar. Estos cuatro parámetros son, por tanto, las variables básicas a considerar en el diseño de un dispositivo de calentamiento solar para viviendas ubicadas en climas de alta montaña en latitudes tropicales.

Variable de entrada	PTC	TOP	TOM	Nivel de importancia
<i>Número de personas al interior</i>	1	1	1	1.0
<i>Tamaño elemento de captación en eje x</i>	2	2	3	2.3
<i>Espesor de aislamiento térmico en techo</i>	4	4	2	3.3
<i>Tamaño elemento de captación en eje z</i>	3	3	4	3.3
<i>Orientación del dispositivo de captación solar</i>	5	5	6	5.3
<i>Tamaño del muro acumulador en sus ejes x – z</i>	6	7	5	6.0
<i>Coefficiente U del vidrio de elemento de captación</i>	7	6	7	6.7
<i>Tamaño elemento de captación en eje y</i>	8	8	10	8.7
<i>Espesor del material acumulador</i>	10	9	9	9.3
<i>Material acumulador utilizado</i>	9	10	8	9.0

Tabla 15. Órdenes de clasificación de parámetros de diseño basados en el Análisis de sensibilidad por método de Morris. Los parámetros en negrita y cursiva son identificados como los parámetros altamente sensibles.

La baja importancia que se evidenció en los resultados de las simulaciones para la variable Profundidad del invernadero, puede deberse a que el elemento de

acumulación térmica se encuentra ubicado en posición vertical, haciendo que sean más importantes los rayos solares que inciden de costado que en la superficie horizontal del invernadero.

La orientación del dispositivo de calefacción solar pasivo se ubica en 5 lugar de importancia, demostrando que no es la variable más importante en el diseño de estos sistemas solares en climas ecuatoriales; algo que parece ser lógico considerando que los niveles de radiación en todas las fachadas son relativamente uniformes, ver Figura 49.

Según el análisis de sensibilidad por el método de Morris es posible garantizar altos niveles de confort térmico interior en los espacios de uso nocturno con diferentes orientaciones, compensando con otras variables de mayor peso como las mencionadas anteriormente; un factor favorable para los efectos de esta investigación, considerando que las viviendas ya construidas en la zona de trabajo tienen todo tipo de orientaciones.

## 4.3 PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

### Algoritmo de optimización

Actualmente se encuentran softwares en el mercado que permiten un proceso de “aprendizaje” en los cálculos computacionales; en el campo de la arquitectura fueron surgiendo con la aparición del diseño paramétrico y las simulaciones dinámicas. La optimización matemática se ocupa de identificar el mejor elemento de un conjunto de alternativas en términos de un criterio específico. En este sentido, “la optimización es un aspecto fundamental de los procesos de diseño, aunque no siempre se lleva a cabo de manera formal.” (Wortmann et al, 2017), adicionalmente en temas de eficiencia energética y confort, hay muchas variables que pueden alterar significativamente el comportamiento interior de los edificios.

Para generar el mejor sistema de captación solar posible en las condiciones de un clima de alta montaña en la zona ecuatorial se realiza la implementación de un proceso de análisis automatizado de “Machine Learning” aplicado a modelos computacionales de simulación térmica, mediante el uso de algoritmos de optimización, el cual se puede considerar una vertiente de la inteligencia artificial, y de esta manera se puede lograr lo que planteaba Michi (1968) “Sería útil si las computadoras pudieran aprender de la experiencia y así mejorar automáticamente la eficiencia de sus propios programas durante la ejecución”.

Con base en los hallazgos de un amplio análisis del rendimiento de diferentes algoritmos de optimización aplicados a la simulación de diversos modelos energéticos de edificaciones como los realizados por Waibel et al (2019), “podemos identificar RBFOpt como el mejor algoritmo de optimización para presupuestos de evaluación muy limitados” (Costa et al, 2018). RBFOpt significa "Optimización de la función de base radial" y se basa en los métodos propuestos en Gutmann (2001) y Regis y Shoemaker (2007). Al muestrear la función de costo desconocida (caja negra), el algoritmo construye y refina iterativamente un modelo de aproximación. Al medir la "irregularidad" del modelo se elige una nueva muestra donde minimizaría esta medida, ya que se supone que es un candidato probable para el óptimo. Además, se muestrean puntos distantes en

partes desconocidas del dominio de búsqueda para mejorar la fidelidad del modelo.

### Optimización del sistema de captación solar para clima ecuatorial frío

Con el fin de buscar optimizar el sistema de calefacción solar en climas fríos ecuatoriales, se plantea el uso del software de análisis térmico paramétrico "Rhino3D" (Rhino) y el plugin de programación visual "Grasshopper", con algoritmos de optimización para encontrar el mejor escenario del dispositivo de calefacción solar pasivo, como se muestra en la Figura 72.

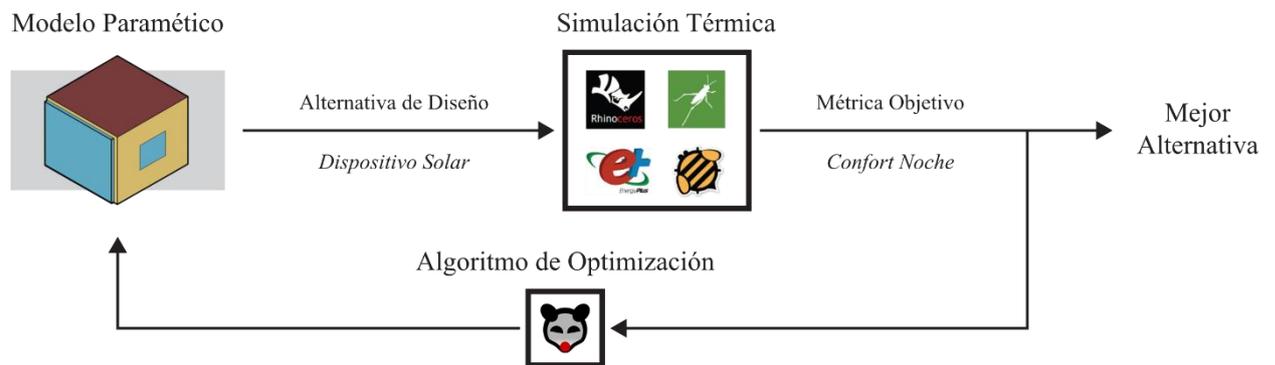


Figura 72. Metodología general de integración de motores térmicos con software de análisis de optimización.

Grasshopper es una plataforma de programación visual intuitiva, donde los componentes individuales ejecutan acciones o incluso un programa de simulación completo. Además, posee una interfaz amigable que permite generar conexiones entre los diferentes componentes, a través de relación sencillas de entrada – salida, como se ve en la Figura 73.

Para la simulación energética fue empleado el Plugin de código abierto Honeybee, con el cual es posible traducir las diferentes geometrías paramétricas a formato de OpenStudio y de esta manera poder realizar la simulación dinámica con el motor de cálculo EnergyPlus.

Para integrar el algoritmo de optimización RBFOpt en la plataforma de Grasshopper, fue empleado el plugin Opossum (Wortmann, 2017), el cual nos permite utilizar algoritmos de alta complejidad de manera sencilla y rápida.

El código en la plataforma Grasshopper se muestra en la Figura 73. Los controles deslizantes en el apartado de "Variables" controlan la definición de parámetros

geométricos y de propiedades térmicas de los materiales del dispositivo de colección solar. Estas variables a su vez están conectadas al componente de optimización (parte superior derecha), a la definición del modelo de geometría y materiales, y al componente de simulación térmica del espacio (EnergyPlus). El componente de optimización establece los controles deslizantes de variables de geometría durante el proceso de optimización. Los valores se transfieren al componente EnergyPlus y al modelo de geometría para construir las geometrías de los diferentes dispositivos de colección solar para simular el desempeño térmico y mejoría de confort en la noche para el espacio analizado. Finalmente, los resultados de EnergyPlus en términos de porcentaje del tiempo de confort funcionan como una función objetivo para el algoritmo de optimización, cerrando así el ciclo de optimización iterativo.

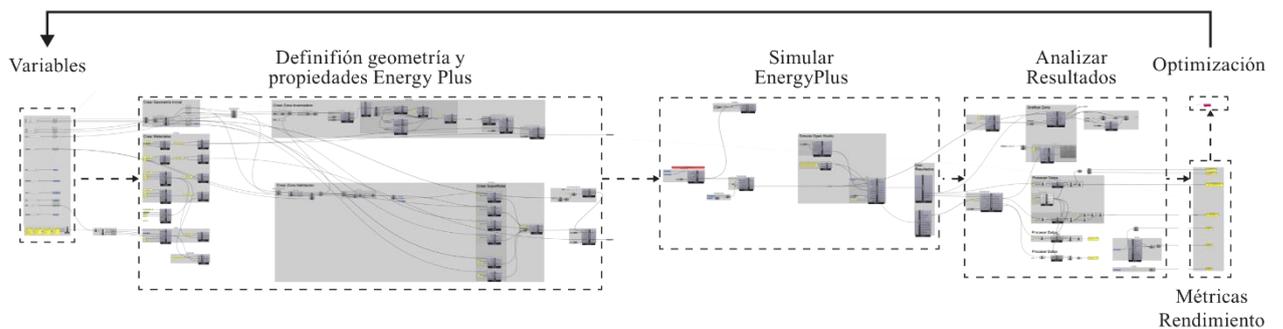


Figura 73. Algoritmo de análisis en la plataforma Rhino / Grasshopper. Líneas entre componentes representan el flujo de los datos.

En la Tabla 16 se muestran las métricas de salida que cuantifican el rendimiento térmico del dispositivo propuesto.

Outputs(Y)	Units
Porcentaje Tiempo dentro del rango de confort *	%
Temperatura operativa mínima *	°C
Temperatura operativa máxima *	°C
Temperatura operativa promedio *	°C

\* Se define el rango de análisis para las horas nocturnas entre las 6 pm y 8 am.

Tabla 16. Datos de salida utilizados en la simulación térmica

Debido al alto costo computacional de la metodología de simulación en este estudio (hasta 5 minutos en un Intel i5-5700 HQ de 4 núcleos 3.30 GHz con 16 GB de RAM para ejecutar una iteración), limitamos el presupuesto de evaluación a un máximo de 40 iteraciones sin encontrar una solución superior, haciendo de RBFOpt la opción ideal para un presupuesto computacional limitado. “Los algoritmos de búsqueda heurísticos clásicos, como los algoritmos evolutivos, generalmente requieren un presupuesto de evaluación significativamente mayor para converger en buenas soluciones” (Waibel et al, 2019). RBFOpt está vinculado a Grasshopper a través del complemento Opossum, utilizando los mismos parámetros que se describen en Waibel et al. (2019)

**El objetivo (output) seleccionado para el proceso de optimización fue la maximización del porcentaje de tiempo dentro del rango de confort adaptativo en horas de la noche.**

Para el proceso de optimización se utiliza el mismo modelo de habitación típica utilizado en el análisis de sensibilidad, ver Figura 67. Además se utilizan las mismas variables presentadas en la Tabla 14. Descripción y rango de las variables trabajadas para el sistema de captación solar. El software realiza simulaciones aleatorias con cada parámetro y va encontrando patrones, en los cuales determina cual es el mejor camino para lograr las mejores condiciones de confort interior en horario nocturno en el modelo simulado.

## 4.4 RESULTADOS

Los proyectos y análisis realizados entorno a los sistemas de calefacción solar en el mundo se han concentrado en climas estacionales, los cuales están claramente determinados por la orientación, ya que se cuenta con una posición muy marcada del sol en los meses fríos del año.

La recomendación recurrente en estos sistemas es orientarse hacia el norte cuando el proyecto se localiza en el hemisferio sur y hacia el sur cuando el proyecto se localiza en el hemisferio norte, sin hacer claridad en lo que esto puede llegar a representar en climas de bajas latitudes, donde no hay una [relación directa de la geometría solar con los momentos fríos del año.

Los análisis realizados en esta investigación en torno a los dispositivos de calefacción solar en climas de bajas latitudes permiten definir las variables más importantes en su peso relativo, de tal manera que los diseñadores que enfrenten a diseñar dispositivos solares en estos climas tengan una idea preliminar de cuáles aspectos son fundamentales por lo tanto deberán volverse determinantes en el diseño del proyecto. Ver Tabla 15. Órdenes de clasificación de parámetros de diseño basados en el Análisis de sensibilidad por método de Morris. Los parámetros en negrita y cursiva son identificados como los parámetros altamente sensibles.

### **Resultados algoritmo de optimización**

El algoritmo de optimización nos permite llegar a los escenarios de mejor respuesta bajo una métrica establecida.

Como herramienta de visualización del proceso de optimización se utiliza la plataforma de visualización de resultados “Envolventes inteligentes”<sup>1</sup>, que permite filtrar y analizar los datos del análisis de optimización de forma rápida y sencilla.

La plataforma de visualización presenta de manera gráfica todos los resultados de los diferentes modelos simulados; las diferentes variables del dispositivo de calefacción solar se presentan en columnas paralelas y las “filas” son las

---

<sup>1</sup>[https://monsieurpablo.github.io/DesignExplorer/?ID=BL\\_3ndZmOZ](https://monsieurpablo.github.io/DesignExplorer/?ID=BL_3ndZmOZ)

variaciones dadas a cada parámetro. Las diferentes columnas están conectadas con líneas que representan los diferentes escenarios simulados, y el punto de conexión en cada columna representa el valor en cada variable para el escenario simulado.

En la Figura 74, los valores en el eje “x” (columnas), de color negro, son las variables de entrada para el diseño del dispositivo de captación solar (inputs); y de color azul, los datos de salida (outputs); en el eje “y” se encuentran todas las variables simuladas en los diferentes inputs y los resultados obtenidos en cada uno de los outputs. Cada línea representa un escenario simulado, las zonas con mayor densidad de líneas demuestran la tendencia de aprendizaje del software aplicando el algoritmo de optimización.

En el campo de la optimización se recomienda correr en varias ocasiones el algoritmo, para efectivamente comprobar que la solución está convergiendo, el camino del algoritmo es diferente cada vez que se corre, por lo que si se llegan a las mismas conclusiones es porque hay convergencia y consenso en que la optimización está llegando a una solución óptima. Este proceso es importante, ya que puede ocurrir el caso que el algoritmo se "salte" la solución óptima cuando sólo se corre 1 vez. En optimización del sistema de calefacción para clima frío ecuatorial, se corrió el algoritmo en 6 ocasiones para identificar que la convergencia realmente ocurra.

Un aspecto identificado en los diferentes resultados obtenidos con el algoritmo, es que cada que se corría el algoritmo, tomaba caminos disímiles y el número de iteraciones era diferente en cada ocasión. Cada corrida del algoritmo es diferente, ya que su inicio es aleatorio, y en sí, su proceso es de "black box", haciendo alusión a que no se sabe muy bien lo que pasa dentro del algoritmo, ya que éste toma decisiones propias (Inteligencia Artificial) de acuerdo a los resultados que va obteniendo en las diferentes simulaciones que realiza. Por ello, en un escenario de “suerte”, el algoritmo puede dar con la mejor solución en las primeras simulaciones. O en un caso contrario, que tome mucho más tiempo para encontrar el óptimo, haciendo que el número de iteraciones aumente.

En la Figura 74 se presentan los resultados de las últimas 4 corridas del algoritmo, se percibe la tendencia de la inteligencia artificial con el código

utilizado; las primeras iteraciones en la variable X ancho del dispositivo de calefacción solar se genera de manera aleatoria, mostrando una tendencia muy marcada a ir a valores mayores, ya que esta variable es de gran importancia en el objetivo planteado de lograr confort térmico en horario nocturno en el modelo analizado.

Al revisar la segunda columna (variable Z altura del dispositivo de calefacción solar) se percibe una tendencia similar a la observada en el primer parámetro. En la tercera variable (Y profundidad del dispositivo de calefacción solar) se puede observar que el algoritmo no se direcciona de manera marcada hacia algún valor en particular, demostrando que en el clima trabajado es posible llegar a valores de confort tanto con invernaderos como con muros trombe.

En la variable de tamaño del muro colector se observa que el algoritmo realiza diferentes análisis, en algunas corridas del código se percibe poca tendencia en este parámetro; pero en la última corrida del algoritmo se hace clara la tendencia a aumentar el tamaño de este material colector, lo que posiblemente ayuda en lograr mejores niveles de confort, ya que si se analiza bien, los 4 procesos de la Figura 74, se percibe que en el último el algoritmo llegó a mejores porcentajes de confort interior.

La variable orientación es la variable que menos tendencia evidencia, haciendo prácticamente el mismo número de simulaciones en las diferentes orientaciones en todas las ocasiones que el algoritmo ejecutó el proceso, lo cual confirma la hipótesis presentada en este documento de que, a pesar de ser la variable más importante en climas estacionales, no es el factor más determinante en los dispositivos de calefacción solar en climas ecuatoriales fríos.

En cuanto a la ocupación del espacio, es claro que a mayor ocupación mayor carga energética, lo cual generó en procesos de simulación previos que todas las simulaciones se concentrarán en la ocupación máxima de 2 personas; este resultado hizo necesario cambiar esta variable en el algoritmo a un máximo de 1 persona en el espacio, para poder ver la optimización del sistema de captación solar en la condición que más se repite por el territorio en una vivienda, una persona por habitación.

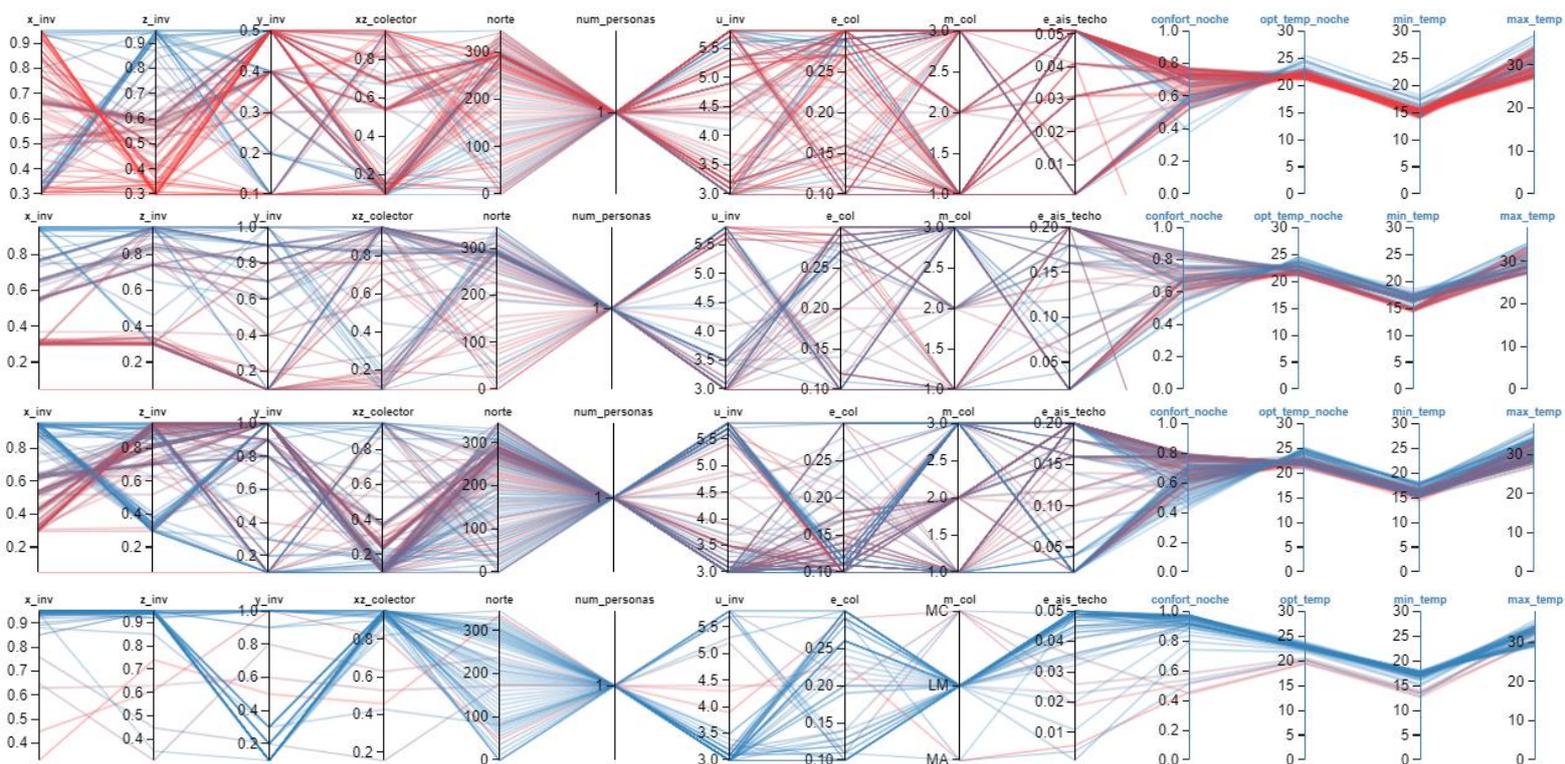


Figura 74. Resultados últimas 4 simulaciones – Algoritmo de optimización del sistema solar pasivo

En la variable de valor U del vidrio del invernadero el algoritmo realiza simulaciones en diferentes valores, las simulaciones se centran en el valor máximo y mínimo, y no en los valores promedio; se percibe una tendencia mayor hacia los valores bajos, los cuales reducen las pérdidas térmicas, pero al tener datos tan dispersos, se evidencia que esta variable no afecta drásticamente el resultado final de confort interior; y considerando aspectos presupuestales, la solución de vidrio sencillo puede ser la mejor para este tipo de sistemas.

En el espesor del material acumulador vemos el mismo número de simulaciones en casi todos los valores de la variable, demostrando que este no es un valor fundamental para generar confort en la vivienda construida. Es importante aclarar que el modelo utilizado para realizar la optimización se plantea como vivienda construida, por lo cual hay un muro preexistente en el cual se adhiere el dispositivo de calefacción solar; por lo cual, al ya contar con un muro de mampostería en ladrillo hueco, el algoritmo no considera necesario aumentar el espesor del muro acumulador.

Las simulaciones mediante el proceso de optimización demuestran que, para un edificio construido en las condiciones de clima ecuatorial frío, se comporta mejor el ladrillo macizo como material de acumulación térmica de los sistemas de captación solar pasiva. (MC: Muro en concreto, ML: Muro en ladrillo, MCA: Muro de agua)

El espesor del material de aislamiento del techo evidencia una clara tendencia en el algoritmo de optimización hacia los valores más altos, demostrando lo importante de esta variable para garantizar niveles de confort interior, no basta con un buen dispositivo de calefacción solar, si la cubierta de la habitación no tiene aislamiento térmico.

Considerando todos los aspectos mencionados anteriormente se concluye que las variables más importantes de un dispositivo de calefacción solar, halladas en el proceso de optimización, son: ancho y alto del dispositivo, tamaño del muro acumulador y el material del muro; siendo las variables que más atención requieren en el diseño de este tipo de sistema en climas ecuatoriales fríos. Las demás variables pueden llegar a ser compensadas, al no ser determinantes en el objetivo planteado de lograr temperaturas dentro del rango de confort térmico en horario nocturno.

El uso de la plataforma de visualización no se limita a la determinación del mejor escenario simulado para el sistema de captación solar en clima ecuatorial frío, sino que, ofrece también la posibilidad de filtrar resultados, lo que permite aprovechar el análisis de optimización realizado para determinar las características del sistema de calefacción solar en una condición particular, volviéndose una posible herramienta para utilizar en proyectos que requieran sistemas de calefacción solar en el clima trabajado.

Lo anterior se debe a que la plataforma de visualización permite filtrar los resultados por medio de cualquier variable o cualquier resultado de salida. Un ejemplo de esto es el poder filtrar entre todas las alternativas del sistema los escenarios simulados bajo una orientación determinada, y de esta manera poder buscar la alternativa con mayor porcentaje de horas de confort en esa orientación particular; estas alternativas tienen ya definidos los valores en cada una de las variables analizadas y el resultado en aspectos como: porcentaje de confort en

horas de la noche, temperatura operativa mínima y máxima en la zona de habitación, con lo cual es posible dar respuestas a casos particulares.

En la Figura 75 se visualizan los resultados al aplicar el filtro de datos para orientación sur; con este filtro de orientación en la plataforma de visualización, se muestran todas las variables simuladas en la orientación determinada, para de esta manera verificar el mejor comportamiento en confort interior logrado y cuáles fueron los parámetros para conseguirlo; y esta manera basados en la información de los escenarios simulados se puede realizar la intervención en un proyecto en particular.

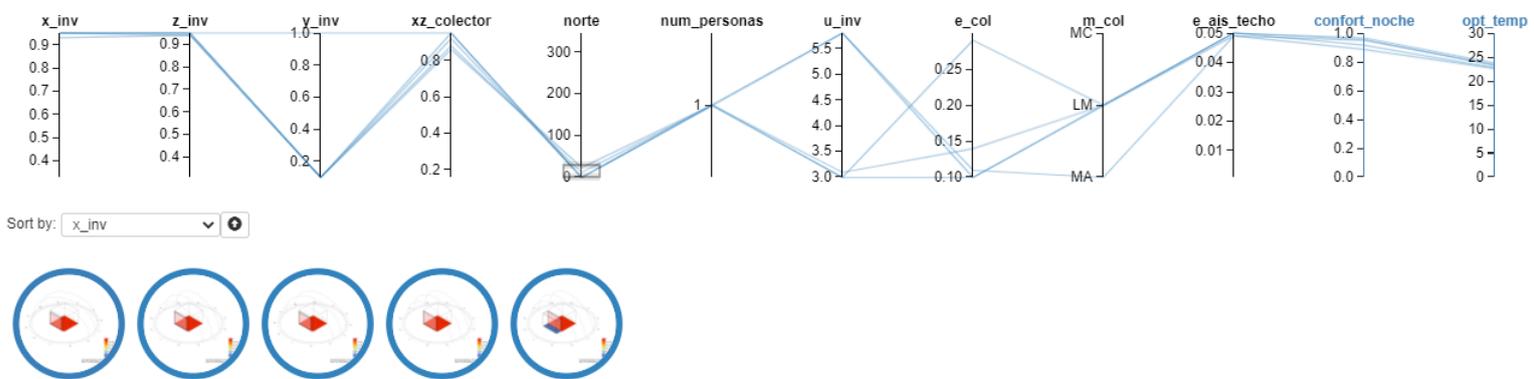


Figura 75. Visualización de resultados de optimización con selección específica de espacios con sistema de captación solar con orientación sur y simulaciones realizadas en proceso de optimización en orientación sur.

Posterior a aplicar el filtro, la plataforma nos muestra los diferentes escenarios bajo los parámetros filtrados. En el caso presentado en la Figura 75, se pueden observar 5 escenarios (círculos de contorno azul) con la orientación filtrada. En este punto es posible realizar tres cosas: 1. Filtrar nuevamente los resultados bajo otro parámetro preestablecido, 2. Seleccionar en el aparte “Sort by” el dato de salida de “confort\_noche” de tal manera que la plataforma ordene los resultados en orden desde la que más porcentaje de confort ofrece hasta la que menos ofrece, dentro de los filtros establecidos, ver Figura 76, y 3. Seleccionar cada uno de los resultados del filtro y ver en detalle los parámetros de simulación y los resultados obtenidos en las diferentes métricas de salida (outputs).

En las Figura 77, Figura 78, Figura 79, Figura 80 y Figura 81 podemos ver los 5 escenarios diferentes de la orientación analizada, con sus respectivos datos de entrada en cada una de las variables y los resultados en cada métrica de salida.

Sort by: confort\_noche

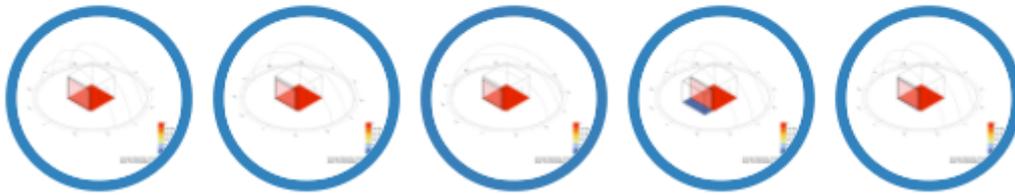


Figura 76. Escenarios simulados en orientación sur ordenados de mayor porcentaje de confort a menor porcentaje de confort interior.

Leyenda

x\_inv : 0.95  
z\_inv : 0.95  
y\_inv : 0.1  
xz\_colector : 0.95  
norte : 0  
num\_personas : 1  
u\_inv : 3  
e\_col : 0.1  
m\_col : LM  
e\_ais\_techo : 0.05  
confort\_noche : 0.9663  
opt\_temp : 23.774665  
min\_temp : 17.52753  
max\_temp : 33.905644  
ganancia\_colector : 664.003915  
area\_vidrio : 7.152312  
area\_colector : 6.108797  
vol\_inv : 0.676875  
Rating : 0

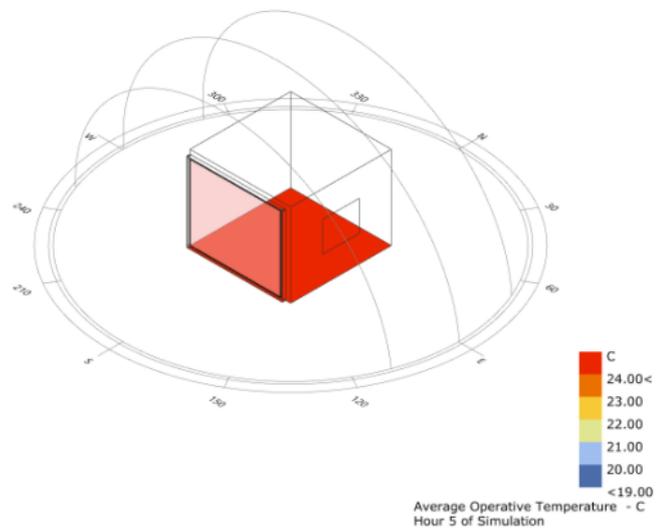


Figura 77. Detalle de parámetros y resultados de un caso particular

Leyenda

x\_inv : 0.95  
z\_inv : 0.95  
y\_inv : 0.1  
xz\_colector : 0.88  
norte : 12  
num\_personas : 1  
u\_inv : 3  
e\_col : 0.29  
m\_col : LM  
e\_ais\_techo : 0.05  
confort\_noche : 0.956227  
opt\_temp : 23.232647  
min\_temp : 17.710088  
max\_temp : 32.808214  
ganancia\_colector : 587.624819  
area\_vidrio : 7.152312  
area\_colector : 5.24172  
vol\_inv : 0.676875  
Rating : 0

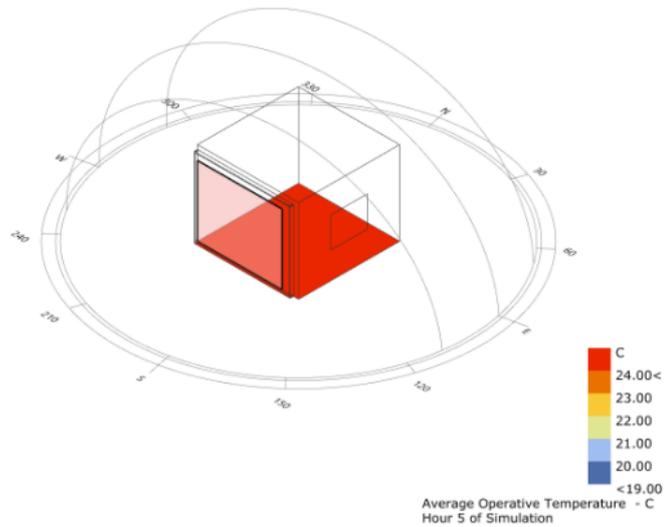


Figura 78. Detalle de parámetros y resultados de un caso particular

Leyenda
x_inv : 0.93
z_inv : 0.94
y_inv : 0.1
xz_colector : 0.86
norte : 24
num_personas : 1
u_inv : 3.1
e_col : 0.14
m_col : LM
e_ais_techo : 0.049
confort_noche : 0.948718
opt_temp : 23.364687
min_temp : 17.270618
max_temp : 34.070888
ganancia_colector : 558.807707
area_vidrio : 6.940225
area_colector : 4.849187
vol_inv : 0.65565
Rating : 0

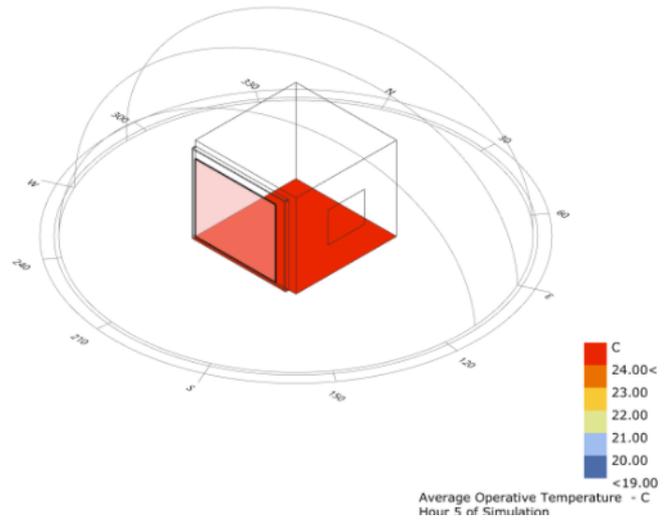


Figura 79. Detalle de parámetros y resultados de un caso particular

Leyenda
x_inv : 0.95
z_inv : 0.95
y_inv : 1
xz_colector : 0.95
norte : 0
num_personas : 1
u_inv : 5.8
e_col : 0.1
m_col : LM
e_ais_techo : 0.05
confort_noche : 0.914835
opt_temp : 22.761183
min_temp : 16.58852
max_temp : 32.920938
ganancia_colector : 860.363237
area_vidrio : 13.650312
area_colector : 6.108797
vol_inv : 6.76875
Rating : 0

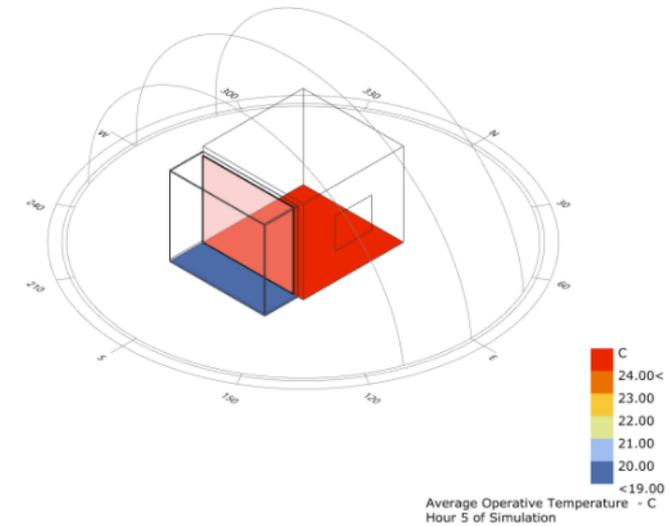


Figura 80. Detalle de parámetros y resultados de un caso particular

Leyenda
x_inv : 0.95
z_inv : 0.94
y_inv : 0.1
xz_colector : 0.92
norte : 0
num_personas : 1
u_inv : 5.8
e_col : 0.11
m_col : MA
e_ais_techo : 0.049
confort_noche : 0.886264
opt_temp : 22.64565
min_temp : 16.21168
max_temp : 33.40031
ganancia_colector : 523.27872
area_vidrio : 7.079875
area_colector : 5.668764
vol_inv : 0.66975
Rating : 0

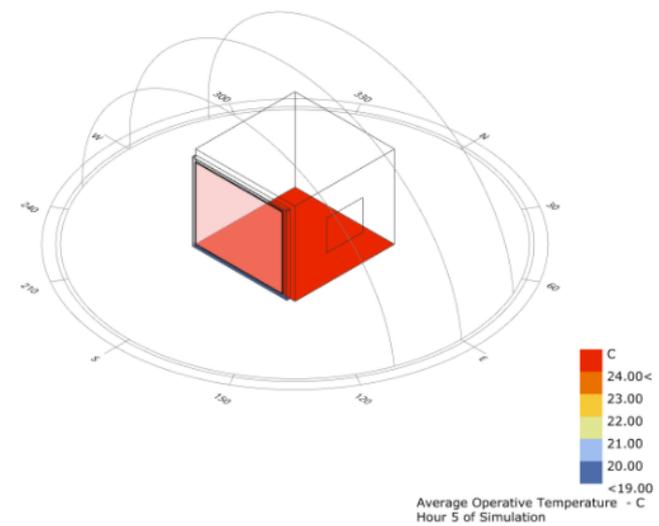


Figura 81. Detalle de parámetros y resultados de un caso particular

Los datos presentados en la leyenda de cada uno de los casos simulados tienen la siguiente información:

#### **INPUTS:**

**x\_inv:** largo del dispositivo de calefacción solar, en una relación porcentual respecto al muro donde se adosa el dispositivo.

**z\_inv:** altura del dispositivo de calefacción solar, en una relación porcentual respecto al muro donde se adosa el dispositivo.

**y\_inv:** ancho del dispositivo de calefacción solar, en metros con un ancho máximo de 1m.

**xz\_colector:** tamaño en largo y alto del muro acumulador, en una relación porcentual respecto al largo y alto de las variables “x\_inv” y “z\_inv”.

**norte:** orientación del sistema de calefacción solar, donde 0 es sur, 90 oeste, 180 norte, y 270 este.

**num\_personas:** el cual se mantiene constante en 1 en el último algoritmo.

**u\_inv:** coeficiente de transmisión térmica Valor U, del vidrio utilizado en el sistema de calefacción solar. Unidades en W/m<sup>2</sup>.K

**e\_col:** espesor del material de acumulación, dado en m.

**m\_col:** material utilizado para acumulación, donde MC: Muro en concreto, ML: Muro en ladrillo, MCA: Muro de agua

**e\_ais\_techo:** espesor del aislamiento térmico en techo, dado en m.

#### **OUTPUTS:**

**confort\_noche:** porcentaje de tiempo dentro del rango de confort térmico en horario nocturno.

**opt\_temp:** temperatura operativa promedio al interior del espacio interior.

**min\_temp:** temperatura operativa mínima obtenida en el espacio interior.

**max\_temp:** temperatura operativa máxima obtenida en el espacio interior.

**ganancia\_colector:** ganancia térmica del dispositivo de calefacción solar.

**area\_vidrio:** área total del vidrio que compone el dispositivo de calefacción solar.

**área\_colector:** área del muro acumulador.

**vol\_inv:** volumen de aire al interior del dispositivo de calefacción solar simulado.

Cada uno de los datos de “outputs” abre la posibilidad a conectar el algoritmo con un proceso adicional de optimización, por ejemplo calcular costos ligados al área de los materiales.

## CONCLUSIONES

Este trabajo permitió conocer las diferentes variables que deben ser consideradas en el proceso de diseño de un dispositivo de calefacción solar pasivo, y su importancia relativa en climas de bajas latitudes. Se revisó la bibliografía correspondiente, encontrándose que la teoría y los diferentes proyectos que cuentan con este sistema, están localizados en regiones con climas estacionales, donde las determinantes climáticas son totalmente diferentes a las condiciones de los territorios con climas ecuatoriales.

Se revisó información de la zona propuesta para la investigación y por medio de estudios previos y algunos relevamientos hechos de primera mano, permitió evidenciar la carencia de confort higrotérmico presente en un gran porcentaje de las viviendas construidas en el altiplano cundiboyacense.

Adicionalmente se revisó la normativa colombiana relacionada con la sustentabilidad en la construcción, encontrando que la única norma que genera ciertos lineamientos en temas de construcción sustentable, focaliza sus esfuerzos en la eficiencia energética y eficiencia hídrica, con poca claridad de cómo lograr las metas propuestas; el tema de confort no es mencionado en este tipo de documentos.

Es importante que entes gubernamentales y educativos empiecen a involucrar el confort como una variable de especial cuidado en los procesos de diseño y construcción de nuevos edificios, ya que la falta de interés en este tema está dirigiendo la cultura constructiva a no garantizar condiciones mínimas de bienestar en las viviendas, evidente por la presencia, por ejemplo, de temperaturas inferiores a los 15°C en horario nocturno en espacios de dormitorio.

El presente trabajo pretende definir las características principales a considerar en el diseño de dispositivos de calefacción en climas de bajas latitudes, y de esta manera ayudar en los procesos de mejora de edificación existente y en los

procesos de diseño de obra nueva. A partir del desarrollo de este estudio fue posible identificar las variables de mayor importancia en los sistemas de calefacción solar en climas ecuatoriales de alta montaña, los cuales en orden de importancia son: (1) Número de personas en el lugar, (2) longitud del sistema de calefacción solar, (3) aislamiento térmico del techo, (4) altura de sistema de calefacción solar; lo que evidencia un cambio radical en relación a la importancia de la orientación en este tipo de sistemas en climas estacionales. Ver Tabla 15. Órdenes de clasificación de parámetros de diseño basados en el Análisis de sensibilidad por método de Morris. Los parámetros en **negrita y cursiva** son identificados como los parámetros altamente sensibles.

En el proceso de investigación se evidenció que, por la gran variedad de tipologías existente en la zona de trabajo, no se podía determinar un único dispositivo para posibles intervenciones en obra construida; para afrontar esta determinante se encontró una serie de herramientas informáticas que dirigieron la investigación a determinar la importancia de cada variable en un dispositivo de calefacción solar mediante análisis de sensibilidad, con una posterior optimización del sistema mediante algoritmos de IA.

Lo anterior permitió utilizar una plataforma de visualización en línea existente, que permite de manera rápida e intuitiva filtrar los resultados de las simulaciones realizadas, y con esto poder analizar los diferentes requerimientos del sistema de captación según sea la condición particular si se requiere intervenir en una obra construida. Se puede acceder a esta herramienta de visualización mediante el siguiente link:

[https://monsieurpablo.github.io/DesignExplorer/?ID=BL\\_3ndZmOZ+](https://monsieurpablo.github.io/DesignExplorer/?ID=BL_3ndZmOZ+)

El aplicativo en línea permite analizar diferentes configuraciones de un dispositivo de calefacción solar en el clima trabajado, y generar posibles intervenciones en la obra construida.

En etapas de diseño, la herramienta de visualización puede no ser de uso óptimo debido a que ya tiene una serie de determinantes como tamaño del espacio y materialidad base de la habitación (ver Tabla 13). En futuras investigaciones podrían dejarse estas características como variables adicionales y de esta

manera el aplicativo en línea pueda ser utilizado en los diferentes procesos de diseño.

En cuanto a los objetivos específicos planteados, se realizó una búsqueda de los diferentes estudios que abordan los sistemas de captación solar, se revisaron proyectos y se establecieron los elementos comunes, para determinar cuáles son las características que estos elementos deberían tener y evaluar si los elementos encontrados en la bibliografía debían mantenerse en climas ecuatoriales fríos. Se encontró que si bien las variables trabajadas son las mismas, no debe darse la misma importancia a cada uno de los elementos del sistema, ya que por las condiciones particulares de recorridos solares y temperaturas anuales, los requerimientos en el clima trabajado son diferentes.

La investigación permitió evaluar el comportamiento de los sistemas solares pasivos en climas de alta montaña en bajas latitudes, evidenciando que, debido al recorrido solar y a la cantidad de variables que puede modificarse en el diseño del sistema de calefacción solar, la orientación del dispositivo juega un papel secundario, existiendo otros parámetros de diseño que, en casos particulares, pueden ser más importantes para el buen funcionamiento del sistema; factor opuesto a lo evidenciado en los diferentes sistemas implementados en el mundo en climas estacionales, donde la orientación del sistema de captación solar es primordial, ya que determina el éxito o fracaso del mismo.

Adicionalmente la plataforma de visualización utilizada se convierte en una “herramienta” de diseño que puede evolucionar con futuras investigaciones, la cual podrá apoyar los procesos de diseño de sistemas de calefacción solar pasiva en climas similares al trabajado, permitiendo tomar decisiones de diseño con datos técnicos de comportamiento del sistema.

La metodología paramétrica propuesta permitió simular un número mayor de escenarios a los normalmente trabajados en los procesos de verificación energética de proyectos arquitectónicos. Además, se demostró que la implementación de herramientas de Machine Learning a través del uso de algoritmos de optimización, es de gran utilidad en la definición de alternativas de diseño que lleven a edificaciones de un alto desempeño térmico y energético, en procura del cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

El presente trabajo abre un camino adicional en el análisis de edificios en climas de bajas latitudes, particularmente en Colombia, futuras investigaciones pueden generarse herramientas paramétricas que apoyen la toma de decisiones en procura del cumplimiento de la normativa ambiental edilicia, Resolución 0549 de 2015, la cual, a pesar de ya llevar 4 años desde su emisión, tiene un porcentaje de su cumplimiento en el territorio nacional limitado.

Aprovechar la velocidad de procesamiento de los computadores puede favorecer la toma de decisiones en etapas tempranas de diseño y de esta manera poder concebir edificios cada vez más sustentables. Desarrollar herramientas que posibiliten una mejor toma de decisiones a los profesionales que no tienen amplios conocimientos en temas ambientales, podría ser el camino para masificar la construcción sustentable en el mundo.

## REFERENCIAS

Agudelo Varón, C. A. (2014). *Efecto de los materiales de los muros y ventanas sobre el confort térmico y de iluminación natural en la vivienda de interés social actual de Bogotá* (Bachelor's thesis, Bogotá-Uniandes).

American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, "ASHRAE HandBook", (2007) ASHRAE Standing Standard Project Committee 90.1. Systems Energy Utilization

American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, "ASHRAE HandBook", (2013) ASHRAE Standard Project Committee 55. Physiology and Human Environment

ARQHYS. 2012, 12. Historia de la Arquitectura Bioclimática. Revista ARQHYS.com. Obtenido 11, 2018, de <http://www.arqhys.com/construcciones/historia-arquitectura-bioclimatica.html>

Atlas IDEAM (28 de octubre de 2015). IDEAM. Recuperado de <http://atlas.ideam.gov.co/presentacion/>

Calderon Uribe, F. (2019). EVALUACIÓN DEL MEJORAMIENTO DEL CONFORT TÉRMICO CON LA INCORPORACIÓN DE MATERIALES SOSTENIBLES EN VIVIENDAS EN AUTOCONSTRUCCIÓN EN BOSA, BOGOTÁ. *Revista hábitat sustentable*, 9(2), 30-41.

Campolongo, F., Tarantola, S., & Saltelli, A. (1999). Tackling quantitatively large dimensionality problems. *Computer physics communications*, 117(1-2), 75-85.

Carrasco, C., & Morillón, D. (2004). ADECUACIÓN BIOCLIMÁTICA DE LA VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL DEL NOROESTE DE MÉXICO CON BASE AL ANÁLISIS TÉRMICO DE LA ARQUITECTURA VERNÁCULA. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 8, N° 1. 74-80.

Çengel, Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico*. McGraw-Hill.

CIBSE. (2007). CIBSE AM10 Natural ventilation in non-domestic buildings. (K. Butcher, Ed.) London: CIBSE Publications. Retrieved 11 29, 2014, from CIBSE: <http://www.cibse.org/knowledge/cibse-am/am10-natural-ventilation-in-non-domesticbuildings>

Confalonieri, R. (2010). Monte Carlo based sensitivity analysis of two crop simulators and considerations on model balance. *European Journal of Agronomy*, 33(2), 89-93.

CONSTRUDATA. ¿Cómo se construye en Colombia? (en línea) Bogotá D.C: 05 de Julio de 2018 (Fecha de consulta: 20/07/2019). Disponible en Internet: [http://www.construdata.com/Bc/Otros/Archivos/como\\_se\\_construye\\_en\\_colombia.asp](http://www.construdata.com/Bc/Otros/Archivos/como_se_construye_en_colombia.asp)

- Corrado, V., & Mechri, H. E. (2009). Uncertainty and sensitivity analysis for building energy rating. *Journal of building physics*, 33(2), 125-156.
- Cortés Vecino, J. A., Betancourt Echeverri, J. A., Argüelles Cárdenas, J., & Pulido Herrera, L. A. (2010). Distribution of Rhipicephalus (Boophilus) microplus ticks on cattle and farms from Altiplano Cundiboyacense (Colombia). *Revista Corpoica-Ciencia y Tecnología Agropecuarias*, 11(1), 73-84.
- Costa, A., & Nannicini, G. (2018). RBFOpt: an open-source library for black-box optimization with costly function evaluations. *Mathematical Programming Computation*, 10(4), 597-629.
- De Gastines, M., Correa, E., & Pattini, A. (2015). Evaluación del balance energético de ventanas en mendoza. Impacto de su tecnología y orientación. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 19, 05-01.
- Department of Energy (2018). Climate Consultant (Version 6.0) [Windows]. California, USA: Department of Energy USA
- Díaz Bejarano, D. (2011). Investigación de mercados para determinar el uso de sistemas solares térmicos por parte de hoteles cuatro y cinco estrellas de la ciudad de Bogotá DC (Bachelor's thesis, Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas).
- Discoli, C., Viegas, G. M., & San Juan, G. A. (2015). Muros Acumuladores de Calor (MAC): efecto de la pigmentación integral de la masa térmica. In XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente (ASADES 2015)(Buenos Aires, 2015).
- Discoli, C., Viegas, G. M., & San Juan, G. A. (2011). Viviendas bioclimáticas en Tapalqué. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 15.
- Espí, M. V. (2014). Una brevísima historia de la arquitectura solar. *Boletín CF+ S*, (9).
- Giraldo Castañeda, W. (2018). *Optimización del confort térmico en clima ecuatorial con tecnologías pasivas en fachadas: el caso de las viviendas de interés social de Cali* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata).
- González Couret, D. (2006). Algo más sobre el diseño bioclimático. *Revista ENERGÍA y tú*, (36).
- Gutmann, H. M. (2001). A radial basis function method for global optimization. *Journal of global optimization*, 19(3), 201-227.
- Guzmán, A. J., Pilatti, J. L., Angulo, S., Piumetti, J., Salinas, M., Pereyra, F., & Olarte, A. (2018). Situación clima/energética en localidades de la prov. de Córdoba, evaluación de vivienda tipo; simulaciones con diferentes envolventes y orientaciones, y propuesta de adecuación térmica, utilizando muros trombe u otras formas de energía solar pasiva. In X Congreso Regional de Tecnología en Arquitectura (CRETA)(La Plata, 2018).

- Guzowski, M. (2010). *Towards Zero-Energy Architecture: New Solar Design*. London: Laurence King.
- Heiselberg, P., Brohus, H., Hesselholt, A., Rasmussen, H., Seinre, E., & Thomas, S. (2009). Application of sensitivity analysis in design of sustainable buildings. *Renewable Energy*, 34(9), 2030-2036.
- Hernández, A., & Lesino, G. (2007). Diseño y simulación computacional de sistemas pasivos y activos de calentamiento de aire para el nuevo hospital materno infantil de la localidad de Susques, provincia de Jujuy. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 11, 0329-518.
- Hernández, A. (2003). Geosol: una herramienta computacional para el cálculo de coordenadas solares y la estimación de irradiación solar horaria. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 7(2), 19-24.
- Holloway, D. (2000). A simple design methodology for passive solar architecture. *New Mexico, USA*.
- Hyun, S. H., Park, C. S., & Augenbroe, G. (2007). Uncertainty and sensitivity analysis of natural ventilation in high-rise apartment buildings. In *Proceedings of the 10th IBPSA Building Simulation Conference* (Vol. 1013).
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2001). IRAM n° 11605 - Acondicionamiento térmico de edificios: condiciones de habitabilidad en edificios: valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos. Buenos Aires.
- International Organization for Standardization. (2005). ISO Standard 7730-2005, Ergonomics of the thermal Environment. Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria, ISO: Geneva.
- Jodra, J. I., Viegas, G. M., San Juan, G. A., & Discoli, C. A. (2018). Tecnologías modulares de climatización solar pasiva para el hábitat residencial y el de la producción. In X Congreso Regional de Tecnología en Arquitectura (CRETA)(La Plata, 2018).
- Latorre, A. A. P. (2017). *The Influence of Courtyards Thermal Comfort Study in Bogotá, Colombia*. Illinois Institute of Technology.
- Looss B, Janon A. & Pujol G. (2020) 'Sensitivity' Package - CRAN.
- López-Cruz, I. L., Salazar-Moreno, R., Rojano-Aguilar, A., & Ruiz-García, A. (2012). Análisis de sensibilidad global de un modelo de lechugas (*Lactuca sativa* L.) cultivadas en invernadero. *Agrociencia*, 46(4), 383-397.
- Marín, F. P. (1980). La arquitectura solar pasiva. *CAU: construcción, arquitectura, urbanismo*, (67), 40.
- Mazria, E. (1983), El libro de la energía solar pasiva. México, Ediciones G. Gili.

- Mazria, E. (2003). It's the architecture, stupid!. *World and I*, 18(10), 138-145
- Menberg, K., Heo, Y., & Choudhary, R. (2016). Sensitivity analysis methods for building energy models: Comparing computational costs and extractable information. *Energy and Buildings*, 133, 433-445.
- Mendez, P. L. (2012). Rehabilitación sostenible de viviendas históricas en Santiago de Compostela (Doctoral dissertation, Universidad Politécnica de Madrid).
- Mercado, M. V., Esteves, A., & Filippín, C. (2010). Comportamiento térmico-energético de una vivienda social de la ciudad de Mendoza, Argentina. *Ambiente Construido*, 10(2), 87-100.
- Mercado, M. V., Esteves, A., Filippín, C., & Navarro, L. (2008). Evaluación Térmico-Energético y Cualitativa de Condiciones Ambientales de Una Vivienda Social de la Ciudad de Mendoza: condiciones reales de uso y estrategias de mejoramiento térmico-energético bioclimático. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 12(05), 73-80.
- Mercado, M. V., Esteves, A., & Filippín, C. (2007). Sistema de Climatización Solar Pasivo: su integración en viviendas de bajo costo. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Salta, 11, 05-121.
- Mercado, M. V., Esteves, A., & Filippín, C. (2007). Sistema de calefacción solar radiante. "Mediciones experimentales de invierno y evaluación con software de simulación térmica SIMEDIF" ENTAC (Encuentro Nacional de Tecnología no Ambiente Construido), 334-344.
- Mercado, M. V., Esteves, A., Filippín, C., & Larsen, S. F. (2009). SISTEMA DE CALEFACCIÓN RADIANTE SOLAR PASIVO DISEÑO, CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS. *Energías Renovables y Medio Ambiente (ERMA)*, 23.
- Michie, D. (1968). "Memo" functions and machine learning. *Nature*, 218(5136), 19.
- Morris, M.D., 1991. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. *Technometrics* 33, 161-174.
- Oviedo-Salazar, J. L., Badii, M. H., Guillen, A., & Serrato, O. L. (2015). Historia y Uso de Energías Renovables History and Use of Renewable Energies. *Daena Int. J. Good Conscience*, 10(1), 1-18.
- Olgay, V. (1998), *Arquitectura y Clima*, Barcelona España, Gustavo Gili.
- Pisello, A. L., Goretti, M., & Cotana, F. (2012). A method for assessing buildings' energy efficiency by dynamic simulation and experimental activity. *Applied Energy*, 97, 419-429.
- Puppo, E., & Puppo, G. (2005). *Sol y diseño*.
- Ralegaonkar, R. V., & Gupta, R. (2010). Review of intelligent building construction: A passive solar architecture approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(8), 2238-2242.

- Ré, M. G., & Blasco Lucas, I. (2010). Comportamiento higrotérmico, lumínico y energético de edificios residenciales ubicados en la ciudad de San Juan. *Revista AVERMA*, 4, 05-35.
- Regis, R. G., & Shoemaker, C. A. (2007). Improved strategies for radial basis function methods for global optimization. *Journal of Global Optimization*, 37(1), 113-135.
- Rodriguez, C. M., Medina, J. M., & Pinzón, A. (2019). Thermal Comfort and Satisfaction in the Context of Social Housing: Case Study in Bogotá, Colombia. *Journal of Construction in Developing Countries*, 24(1), 101-124.
- Rodríguez, Humberto. (2008). Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. *Revista de Ingeniería*, (28), 83-89.
- Rosenfeld, E., Guerrero, J. L., & Ravello, O. (2009). La casa solar de La Plata.
- San Juan, G. A. (2013). Diseño bioclimático como aporte al proyecto arquitectónico. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP).
- Sarmiento, P. (2007). *Energía solar en arquitectura y construcción*. RIL editores.
- Stemmers, T. C., Lewis, J. O., & Goulding, J. R. (Eds.). (1992). *Energy in architecture: the European passive solar handbook*. BT Batsford for the Commission of the European Communities, Directorate General XII for Science, Research and Development.
- Tian, W. (2013). A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. *Renewable and sustainable energy reviews*, 20, 411-419.
- Trujillo, A. G., Olivieri, F., & Gómez-Rubiera, E. L. (2016) 2.3. 6. LA IMPORTANCIA DE LOS INDICADORES DE CONFORT TÉRMICO EN ZONAS TROPICALES FRÍAS-HÚMEDAS Y LOS PROBLEMAS QUE SE ESTÁN PRESENTANDO EN EL ECODISEÑO DE EDIFICIOS. ETSAM Universidad Politécnica de Madrid, Colombia.
- Velasco Roldan, L. (2016). Estrategias de captación solar mediante colectores solares de aire en climas fríos. *Estudios del Hábitat*, 14.
- Venegas, L., Orellana, P., Ulloa, J., Fissore, A., Palma, F., Tapia, F., López, D. El concepto de prótesis para la rehabilitación de vivienda social. Rescate de la diversidad de patrones locales de adaptación bioclimática espontánea en el espacio intersticial. In II Congreso de investigación interdisciplinaria en Arquitectura, Diseño, Ciudad y Territorio. (Santiago de Chile, 2018).
- Villegas, N., Barrientos, J. C., & Málikov, I. (2012). Relación entre parámetros océano-atmosféricos y la producción del café verde en Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 6(1), 88-95.
- Waibel, C., Wortmann, T., Evins, R., & Carmeliet, J. (2019). Building energy optimization: An extensive benchmark of global search algorithms. *Energy and Buildings*, 187, 218-240.

Waler, É., Agüero, M., Watkins, M. G., & Mansilla, G. (2016). Escuela bioclimática y sustentable. In I Encuentro Nacional sobre Ciudad, Arquitectura y Construcción Sustentable (La Plata, 2016).

Wortmann, T. (2017). Opossum: OPTimizatiOn Solver with SURrogate Models.

Wortmann, T., & Nannicini, G. (2017). Introduction to architectural design optimization. In *City Networks* (pp. 259-278). Springer, Cham.

Barcelona, España Food4Rhino. Apps for Rhino and Grasshopper. Recuperado de <https://www.food4rhino.com/app/opossum-optimization-solver-surrogate-models>

Wright, D. *Natural solar architecture: a passive primer*. United States.

Zalamea-León, E., & Quesada, F. (2017). Criterios de integración de energía solar activa en arquitectura. Potencial tecnológico y consideraciones proyectuales. *Revista de Arquitectura*, 19(1), 56-69.

# **ANEXOS**

## ANEXO 1

### Encuesta realizada en viviendas del altiplano cundiboyacense

*Esta encuesta se realiza con el fin de generar información suficiente sobre las tipologías y el desempeño higrotérmico de las viviendas ubicadas en el altiplano Cundiboyacense y buscar la manera de mejorar sus condiciones de confort interior.*

**Nombres y apellidos \***

Texto de respuesta corta

---

**Fecha \***

Fecha

dd/mm/aaaa

---

**Municipio donde se ubica la vivienda \***

Tu respuesta

---

**Año de construcción de la vivienda \***

Tu respuesta

---

**Año de ocupación de la vivienda \***

Tu respuesta

---

**Número de pisos en la vivienda \***

1

2

3

Cantidad de ocupantes de la vivienda \*

1

2

3

4

5

Otro: \_\_\_\_\_

Tiene mascotas

No

1 y 3

3 y 5

Mas de 5

Cantidad de espacios en la vivienda (contando únicamente habitaciones, sala, comedor y estudio) \*

3

4

5

6

Otro: \_\_\_\_\_

Hábitos de ocupación (Por favor describa cuantas personas y en que horario se ocupa la vivienda) \*

Tu respuesta

---

### Comportamiento térmico de la vivienda

Para usted la vivienda es \*

- Muy fría
- Más fría que cálida
- Más cálida que fría
- Muy cálida

¿Por qué le parece que es así?

Tu respuesta

---

En que horario ventila la vivienda \*

Elige

No ventila

En la mañana

En la tarde

En la noche

Mañana y tarde

Mañana y noche

Tarde y noche

Todo el día

¿Tiene sistema de calefacción? \*

- No tiene
- Chimenea
- Calefacción a gas
- Calefacción eléctrica
- Otro: \_\_\_\_\_

En qué jornada enciende el sistema de calefacción \*

- No tiene calefacción
- En la mañana
- En la tarde
- En la noche
- Todo el día

¿Deja encendida la calefacción cuando sale? \*

- No tiene calefacción
- Siempre
- En ocasiones
- No, por economía
- No, por seguridad

## Características constructivas de la vivienda

### Material de cubierta \*

- Tejas cerámicas
- Chapa metálica
- Asbesto cemento
- Losa de concreto
- Losa cerámica
- Otro: \_\_\_\_\_

### Material de muros exteriores \*

- Ladrillo hueco
- Ladrillo macizo
- Concreto
- Madera
- Tierra
- Otro: \_\_\_\_\_

### Material predominante de puertas exteriores \*

- Madera
- Metálica
- Puerta en vidrio
- Otro: \_\_\_\_\_

## Ventanas \*

Vidrio sencillo

Vidrio doble

## Marcos

Madera

Chapa doblada

Perfilera en acero

Aluminio

## Protección aberturas \*

Cortinas de enrollar exteriores

Postigón

Celosías

Cortinas interiores

Alero

Parasoles

Otro: \_\_\_\_\_

La vivienda cuenta con aislamiento térmico en \*

- Techo y muros exteriores
- Sólo techo
- Sólo muros exteriores
- No tiene aislamiento térmico
- No sabe

Permitiría la instalación de un sensor de Temperatura y Humedad Relativa, por un periodo de 8 días, en su vivienda para verificar los niveles de confort interior \*

- Sí
- No

Planta esquemática de la vivienda o foto de fachada de la vivienda

[AÑADIR ARCHIVO](#)

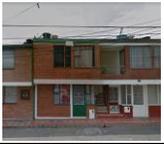
**ENVIAR**

## ANEXO 2

### Resultados de las encuestas realizadas

	Imágenes	Nombres y apellidos	Municipio donde se ubica la vivienda	Año de construcción de la vivienda	Año de ocupación de la vivienda	Número de pisos en la vivienda	Cantidad de ocupantes de la vivienda	Tiene mascotas	Cantidad de espacios en la vivienda (contando)	Hábitos de ocupación (Por favor describa cuantas personas y en que horario se ocupa la vivienda)	Para usted la vivienda es	¿Por qué le parece que es así?	En que horario ventila la vivienda	¿Tiene sistema de calefacción?	En qué jornada enciende el sistema de calefacción	¿Deja encendida la calefacción cuando sale?	Material de cubierta	Material de muros exteriores	Material predominante de puertas exteriores	Ventanas	Marcos	Protección aberturas	La vivienda cuenta con aislamiento térmico en	Permitiría la instalación de un sensor de Temperatura y Humedad Relativa, por un periodo de 8 días, en su vivienda para verificar los niveles de confort interior
1		Francy Sarmiento	Facatativá	2005	2013	3	3	1 y 3	14	Todo el día hay personas en la vivienda	Más cálida que fría	Porque le entra sol por todas las ventanas y el ambiente queda caliente	Todo el día	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto cemento	Ladrillo tolete	Metálica	Vidrio sencillo	Perfilería en acero	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	Sí
2		Jenny Camacho	Bogotá	2000	2018	2	3	No	4	3 Toda la noche y la mañana hasta las 7 am	Más fría que cálida	Porque es esquinera entonces le pega el frío por ambas fachadas	En la tarde	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto cemento	Concreto	Metálica	Vidrio sencillo	Perfilería en acero	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	Sí
3		Valentina Vargas Ramirez	Zipaquirá	1959	2	1	2	1 y 3	4	Una persona sale a las 6am, la otra sale al medio día, quedando	Muy fría	Porque hace mucho frío y está ubicada en el centro histórico de Zipaquirá ya que baja directamente	Todo el día	Calefacción eléctrica	En la noche	No, por economía	Tejas cerámicas	Ladrillo hueco	Madera	Vidrio sencillo	Madera	Alero	No tiene aislamiento térmico	Sí
4		Andrés Rojas	Soacha	1985	1987	3	6	1 y 3	7	En el día tiende a permanecer vacía y en las noches se encuentran	Más cálida que fría	La habitación de él se encuentra ubicada en el centro de la vivienda	No ventila	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto cemento	Ladrillo hueco	Madera	Vidrio sencillo	Perfilería en acero	Cortinas de enrollar exteriores	No tiene aislamiento térmico	Sí
5		Ulpiano fandiño	Facatativá	1999	2000	3	2	1 y 3	5	Dos personas Todo el día	Más fría que cálida	Porque tiene ventanales grandes y por la loma	En la mañana	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto cemento	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	No sabe	Sí

6		Emperatriz Sarmiento	Facatativá	2015	2015	3	5	1 y 3	3	1 persona Solo habita en la noche	Muy fría	Por qué la casa permanece sola	Todo el día	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto cemento	Concreto	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	No sabe	Sí
7		Viviana Sarmiento	Facatativá	2015	2015	3	2	No	4	Dos ocupantes y solo en la noche	Muy fría	Porque es un primer piso	Todo el día	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto cemento	Concreto	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	Sí
8		Edwin Alejandro Gil Velasquez	Suesca	2004	2004	3	2	1 y 3	6	2 Personas, horarios rotativos por el trabajo	Más fría que cálida	Por la dirección del viento que golpea la fachada principal.	En la mañana	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Losa de concreto	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Perfil en acero	Nada	No tiene aislamiento térmico	Sí
9		María Alejandra Macías	Nobsa	2003	2003	1	4	1 y 3	5	4 y tarde noche	Más cálida que fría	Le entra el sol por la mayoría de las ventanas	Mañana y tarde	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Perfil en acero	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	Sí
10		Teresa Barragán	Nobsa	1980	1980	1	3	No	4	2, Noche	Más cálida que fría	Por las paredes	Todo el día	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Tierra	Madera	Vidrio sencillo	Madera	Postigón	No tiene aislamiento térmico	No
11		Alejandro baron	Nobsa	2012	2012	1	6	1 y 3	5	5, todo el día hay alguien, solo en la noche están todos	Más fría que cálida	La altura	No ventila	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Chapa metálica	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Perfil en acero	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	No
12		JOHANA ALFONSO BANOY	ZIPAQUIRA	1998	2000	2	6	No	6	Manana 6 personas Noche 6 personas Todo el día 2 personas	Muy fría	Por la ubicación	En la mañana	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto cemento	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Perfil en acero	Cortinas interiores	No sabe	Sí

13		KAREN LINARES	Facatativa	2013	2014	2	4	No	5	Manana 2 personas Noche 4 personas Todo el día 2 personas	Más cálida que fría	por que esta enchapada y con techo en pvc	Todo el día	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto cemento	Ladrillo hueco	Madera	Vidrio sencillo	Madera	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	Sí	
14		Clara guerrero	Choachi Cundinamarca	2010	10	1	5	1 y 3	5	5 todo el día	Más cálida que fría	Por variación del clima de la región	Todo el día	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto cemento	Ladrillo hueco	Madera	Vidrio sencillo	Madera	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	No	
15		Gladis Castillo Cruz	Bogotá	2014	5	3	4	Mas de 5	11	4 personas ocupan la vivienda, inician su día desde las 5am y finaliza a las	Más cálida que fría	Porque la cubierta es metálica y se calienta.	Mañana y tarde	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Chapa metálica	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	No	
16		Brayan Alexis Burgos Rojas	Chiquinquirá	1992	2010	3	4	No	5	3 personas	Más fría que cálida	Por el clima del municipio	En la mañana	Chimenea	En la noche	No, por economía	Tejas cerámicas	Ladrillo hueco	Madera	Vidrio sencillo	Madera	Cortinas de enrollar exteriores	Sólo techo	No
17		Camilo Zapata	Chiquinquirá	1999	2014	3	3	No	6	3 personas	Más fría que cálida	No se	Todo el día	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto cemento	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Madera	Cortinas de enrollar exteriores	Sólo techo	No	
18		Javier Andres Angarita	Susacón Boyacá	2009	2009	1	4	No	4	6pm - 9am	Más fría que cálida	El clima del lugar	En la mañana	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto cemento	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Perfil en acero	Cortinas interiores	No sabe	No	
19		HEIBER FERNEY VELASQUEZ HERNANDEZ	COTA	2005	2017	2	2	1 y 3	5	2 PERSONAS EN LA MAÑANA Y EN LA NOCHE GENERALM	Muy fría	CORRIENTES DE VIENTO	Todo el día	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Ladrillo hueco	Madera	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas de enrollar exteriores	No sabe	Sí	

20		Juan Jose Villamil Choconta	Sutatausa	1997	1998	1	5	No	5	La casa esta habitada por 5 personas y por lo general calienta los días.	Muy cálida	por durante el día absorbe mucho calor por que las paredes son muy gruesas.	Tarde y noche	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto cemento	Concreto	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	No
21		Salvador Villamil Choconta	Sutatausa	1974	1974	1	5	1 y 3	5	esta ocupada por 5 personas, aproximadamente desde las 7 de la mañana hasta las 2 de la tarde.	Más cálida que fría	La casa en la noche no es tan fría, mantiene el calor y no es necesario estar muy abrigados.	Tarde y noche	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Losa cerámica	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Perfilera en acero	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	No
22		Fabio Corredor Ortiz	Sutatausa	1999	1999	1	3	No	4	esta habitada por 3 personas, están en ella por lo general.	Más cálida que fría	en la noches no hace tanto frío dentro de la casa como afuera de ella.	Tarde y noche	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto cemento	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Perfilera en acero	Cortinas interiores	No sabe	No
23		David Ruiz	Sutatausa	1998	1998	1	3	No	4	4 personas, 3 de ellas salen en el día a trabajar y estudiar.	Más cálida que fría	No sabe	Mañana	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto cemento	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Perfilera en acero	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	No
24		Alejandro Quiroga Bello	Sutatausa	1999	1999	1	3	No	4	La vivienda tiene 3 ocupantes, están dentro de ella desde las 6 de la mañana hasta las 6 de la tarde.	Más cálida que fría	porque durante el día se calienta y en la noche conserva su calor, los días no son fríos.	Tarde y noche	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto cemento	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Perfilera en acero	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	No
25		Santiago Villamil Cubillos	Ubate	1998	1998	2	4	No	5	La ocupan cuatro personas y en la noche es cuando todos se encuentran.	Más cálida que fría	los días no son fríos, siempre están cálidos y por lo general toda la casa también se calienta.	Tarde y noche	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Losa cerámica	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	No
26		Edgar Ramirez Villamil	Cota	2014	2015	3	3	1 y 3	6	tres personas ocupación variada una de ellas durante el día y las otras dos en la noche.	Más fría que cálida	Clima un poco, de otro lado cerro cercano sopla viento frío.	Mañana y tarde	Chimenea	En la noche	No, por seguridad	Tejas cerámicas	Ladrillo macizo	Madera	Vidrio sencillo	Madera	Cortinas interiores	Sólo techo	No

27		Daniel rubiano	Sopó	2012	2013	2	5	No	5	5 personas, de 11 a 5	Más cálida que fría	Es perfectamente calentica	En la mañana	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Losa cerámica	Concreto	Madera	Vidrio doble	Madera	Cortinas interiores	Techo y muros exteriores	No
28		Claudia Marcela Chala B	Chia cundina marca	1987	33	2	4	3 y 5	5	4 personas en la tarde y noche	Más cálida que fría	Porque toda la casa tiene ventanas grandes por donde entra luz y sol	En la mañana	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Ladrillo macizo	Madera	Vidrio sencillo	Madera	Cortinas interiores	Techo y muros exteriores	Sí
29		Harold Andrés Jiménez Rodríguez	Chis	1980	2001	2	5	1 y 3	8	Todo el día	Más fría que cálida	Por falta de calefacción	En la mañana	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	Sólo techo	Sí
30		Ivonne johanna gutierrez gaitan	Bogota	1975	32	3	10	1 y 3	10	10	Muy cálida	De noche hace calor	En la mañana	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto cemento	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Chapa doblada	Cortinas de enrollar exteriores	No sabe	Sí
31		Juan pablo sanchez	Chia	2008	10	2	3	1 y 3	4	Una persona todo el día, en la tarde y noche otra y la última rotativo /	Más cálida que fría		Mañana y tarde	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto cemento	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Madera	Celosías	Sólo techo	Sí
32		Javier Mendoza	Bogotá	1980	15	2	4	1 y 3	6	Horario laboral	Más fría que cálida		Tarde y noche	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto cemento	Ladrillo macizo	Madera	Vidrio sencillo	Perfilería en acero	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	Sí
33		Nestor David Verá Urrego	Chia	2005	15	3	5	No	6	Mama papa y hermano sales 6 am y regresan 4pm y fines de semana todo el día 4	Más cálida que fría	Las mayorías del día el sol pega por toda la vivienda	Mañana y tarde	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto cemento	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Perfilería en acero	Cortinas interiores	Sólo muros exteriores	Sí

34		Patricia Labrador	Chia	30	5	1	4	1 y 3	5	En la noche 4 personas en la mañana 1 persona en la tarde	Más fría que cálida	No le entra suficiente energía solar	No ventila	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Estructura de madera con recubrimiento de	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas de enrollar exteriores	No tiene aislamiento térmico	Sí
35		Paula Solórzano	Chía	1996	2006	2	7	1 y 3	8	5 personas que viven aquí, 2 de ellas estudian en colegio así	Más fría que cálida	En las zonas comunes suele hacer frío	En la mañana	Chimenea	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Ladrillo hueco	Madera	Vidrio sencillo	Perfil en acero	Cortinas interiores	No sabe	Sí
36		Juliana Velasquez	Cota	2013	2013	1	4	3 y 5	6	6 a 10 personas, durante todo el día	Más cálida que fría	Por el material de construcción	En la mañana	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Paneles prefabricados	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	No sabe	Sí
37		Daniela Cortes Espitia	Mosquera	2017	2018	3	5	3 y 5	8	5 personas permanecen de 9 pm a 8 am	Más cálida que fría	Cocina	Mañana y tarde	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Ladrillo macizo	Madera	Vidrio doble	Aluminio	Cortinas interiores	No sabe	No
38		Sara Janeth Torres R	Zipaquirá	1985	1987	3	7	1 y 3	8	7 noche	Más cálida que fría	Por que tiene mucho elemento de madera	Mañana y tarde	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Ladrillo macizo	Madera	Vidrio sencillo	Madera	Cortinas interiores	No sabe	Sí
39		Juan Manuel Torres	Zipaquirá	2000	2005	3	4	No	10	4 noche	Más fría que cálida	Por que hay una bodega en el primer piso	En la tarde	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto cemento	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio doble	Perfil en acero	Cortinas interiores	No sabe	Sí
40		Mateo Choconta Collazos	Chia	2010	2011	2	4	1 y 3	6	4 personas, por la mañana y en la noche	Más fría que cálida	El clima del municipio	En la mañana	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Ladrillo macizo	Madera	Vidrio doble	Aluminio	Cortinas interiores	No sabe	Sí

41		Belarmina mendoza	Nariño cundina marca	2017	2018	2	2	No	7	2 personas , todo el dia	Muy cálida	Clima	En la tarde	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Ladrillo hueco	Madera	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	No sabe	Sí	
42		Octavio Arisa	chia	2011	2011	2	2	No	4	dos personas , una esta todo el día y la otra llega de noche	Más fría que cálida	las paredes son delgadas y la teja	En la mañana	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto cemento	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Perfil en acero	Cortinas interiores	Sólo techo	No	
43		Miguel Martines	pacho	1970	1970	1	5	3 y 5	6	1 persona todo el día y los otros vuelven en la tarde	Más cálida que fría	por el techo, por que es en teja y tiene techo falso en guadua	Todo el día	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Chapa metálica	Ladrillo macizo	Madera	Vidrio sencillo	Madera	Cortinas interiores	No sabe	No	
44		Carlos Vargas	Cajica	2003	2003	1	3	1 y 3	5	todos en la noche	Muy fría	por la humedad en los pisos y muros	No ventila	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto cemento	bloque de arcilla	aluminio	Vidrio sencillo	Madera	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	No	
45		Pedro Cierra	Cota	2009	2009	3	5	No	7	siempre hay alguien	Más cálida que fría	tienes buenas terminaciones	En la mañana	Chimenea	En la noche	No, por seguridad	teja de asbesto cemento y encimera teja	Ladrillo hueco	Madera	Vidrio doble	Madera	Cortinas de enrollar exteriores	Techo y muros exteriores	No
46		Lucrecia Baron	Duitama	1980	1980	2	8	1 y 3	9	siempre hay dos personas y los demas vuelven en la tarde	Más fría que cálida	espacios vacios	Todo el día	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Perfil en acero	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	No	
47		Segundo Barragán	nobsa	1920	1920	1	3	No	4	3 todos el día	Más fría que cálida	por las paredes	Todo el día	No tiene calefacción	No tiene calefacción	techo en madera	Tierra	Madera	Vidrio sencillo	Madera	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	No	

48		Sebastián López Vera	Chia	1995	1995	1	5	1 y 3	5	Tardes y Noches	Más cálida que fría	Zona rural	No ventila	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Concreto	Metálica	Vidrio sencillo	Perfil en acero	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	No
49		Bryan Nickolas Morales Aguirre	Guateque	1899	120	3	2	1 y 3	6	2 que la ocupan todo el tiempo	Muy fría	Por las condiciones climáticas que cambiaron hace 25 años	Todo el día	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Adobe	Adobe	Madera	Vidrio sencillo	Perfil en acero	No tiene	No tiene aislamiento térmico	No
50		TATIANA SANCHEZ	BOGOTÁ	2007	11	3	3	1 y 3	5	3 PERSONAS DE 8 AM A 6 PM	Más fría que cálida	ESTA EN CLIMA FRIO	En la mañana	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Concreto	Metálica	Vidrio sencillo	Perfil en acero	Cortinas de enrollar exteriores	No tiene aislamiento térmico	Sí
51		Lina Peña	Cota	1959	1959	1	3	No	4	Siempre está ocupada por los 3	Más fría que cálida	Por el clima	No ventila	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Perfil en acero	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	No
52		Luis García	Cota	1980	1980	1	6	1 y 3	3	En el día 3 personas En la noche están los 6	Muy cálida	Adentro de la vivienda no sienten frío	En la mañana	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	Sí
53		Camilo	Cota	2016	2017	3	7	1 y 3	8	En la mañana hay 4 personas En la noche hay 7 personas	Más cálida que fría	Buenos ambientes	En la mañana	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	Sí
54		Bibiana	Cota	1990	1990	1	4	1 y 3	3	Una persona en la mañana 4 personas en la noche	Muy fría	Es húmeda	Todo el día	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	Sí

55		Juan	Chía	2012	2012	2	4	No	5	Una persona todo el día, y en la noche todos	Más fría que cálida		En la tarde	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Chapa metálica	Ladrillo hueco	Madera	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	Sí	
56		Luisa castillo	Cota	2009	2009	2	4	3 y 5	5	En la noche 4 personas	Más cálida que fría	Porque es bajita	Todo el día	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Losa cerámica	Ladrillo macizo	Madera	Vidrio sencillo	Madera	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	Sí	
57		Claudia Rodríguez	Cota	2014	2014	3	7	1 y 3	5	En la tarde 3 personas en la nochebuena los 7	Muy cálida	Es por pisos la temperatura	En la mañana	Chimenea	En la noche	No, por seguridad	Losa cerámica	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Perfil en acero	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	Sí
58		Luisa castillo	Cota	2009	2009	2	4	3 y 5	5	En la noche 4 personas	Más cálida que fría	Porque es bajita	Todo el día	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Losa cerámica	Ladrillo macizo	Madera	Vidrio sencillo	Madera	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	Sí	
59		Clara	Cota	2007	2007	1	1	No	3	Se ocupa siempre por una persona	Más cálida que fría	Por ser un solo piso y se siente húmedo	En la mañana	Calefacción eléctrica	En la noche	No, por economía	Tejas cerámicas	Ladrillo macizo	Madera	Vidrio sencillo	Madera	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	No
60		CARLOS GALINDO	TIBANA, BOYACÁ	1984	35	1	5	Mas de 5	3	TODO EL DÍA Y LA NOCHE	Más fría que cálida	-	En la mañana	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Tierra	Madera	Vidrio sencillo	Madera	Cortinas de enrollar exteriores	No tiene aislamiento térmico	No	
61		CECILIA APONTE	TUMERQUE, BOYACÁ	1970	49	1	4	3 y 5	6	DÍA Y NOCHE	Muy fría	-	En la noche	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Tierra	Madera	Vidrio sencillo	Madera	Cortinas interiores	Techo y muros exteriores	No	

62		PAULA ROZO	COGUA CUNDI MANARCA	2008	2008	1	4	1 y 3	6	DESPUES DE LAS 4 PM SE OCUPAN LA MAYORIA DE	Más fría que cálida	LA SENSACIÓN TÉRMICA CON RESPECTO A LA TEMPERATURA	Mañana y tarde	Chimenea	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Perfilera en acero	Cortinas interiores	No sabe	Sí
63		Jaime Andrés Motta Vásquez	Cota	1970	1995	1	4	1 y 3	6	Todo el día mantiene ocupada	Más cálida que fría	Porque siento calor	Mañana y tarde	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Tierra	Madera	Vidrio sencillo	Madera	Alero	No tiene aislamiento térmico	Sí
64		Rosa helena acuña	Bogota	1950	1950	3	10	1 y 3	8	Una o dos personas siempre en la casa , de resto se ocupa en la noche	Más cálida que fría	Se siente más calor	En la noche	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Losa de concreto	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Perfilera en acero	Celosías	No sabe	Sí
65		EFRAIN PORRAS	SANTA ROSA DE OSOS	2005	14	2	7	Mas de 5	11	PERSONAS TODO EL DÍA, JUNTO CON DOS NIÑAS EN LA TARDE	Más cálida que fría	-	Mañana y tarde	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	No sabe	No
66		blanca rodriguez velasquez	mosquera	1998	1998	3	3	1 y 3	3	la vivienda se ocupa en mayor medida en las noches mas o menos	Más cálida que fría	por que por las noches no se siente frio en la sala si no que es mas una sensación	En la noche	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Losa de concreto	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	No
67		Santiago García	Chía	1992	1995	1	4	No	3	2 personas en el día 4 personas en la noche	Muy fría	-	Mañana y tarde	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Chapa metálica	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	Sí
68		luis carlos leon coronado	mosquera	2006	2010	3	3	No	5	la vivienda esta mas ocupada desde las horas de la tarde, a partir de	Más fría que cálida	tal vez por los materiales de construccion la vivienda se siente fria en algunas	En la mañana	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	No sabe	No

69		james moreno pardo	mosquera	2004	2006	3	4	No	4	las personas que habitan la casa son 4 padres y dos hijos los cuales	Más fría que cálida	por que la vivienda esta construida en materiales como concreto y	En la tarde	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Perfilería en acero	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	No
70		john erwin rodriguez	mosquera	2000	2006	2	5	No	6	la vivienda cuenta con 5 personas las cuales habitan la vivienda en la mayoría de los días	Más cálida que fría	la vivienda se siente calida por que los espacios no son tan grandes	Mañana y noche	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Losa de concreto	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Perfilería en acero	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	No
71		oscar daniel candro	mosquera	1996	1996	1	4	1 y 3	3	la vivienda cuenta con 4 personas de las cuales los padres estan	Más cálida que fría	por que la vivienda siempre permanece ocupada ademas de las	Todo el día	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Losa de concreto	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	No
72		Manuel Fernando Carmona Duarte	Soacha	1992	1992	1	1	No	3	La casa esta ocupada por tres personas, entre semana	Más fría que cálida	porque queda en un primer piso y no le entra mucha luz solo por una ventana.	Tarde y noche	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Losa de concreto	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Perfilería en acero	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	No
73		Luis Evelio Galeano	Soacha	1992	1992	1	3	No	3	La vivienda esta ocupada por tres personas una de ellas la mayor	Más fría que cálida	Porque solo tiene una ventana y esta solo permite la entrada de iluminación a	Mañana y tarde	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Losa de concreto	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Perfilería en acero	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	No
74		Janeth Medina Castilla	Soacha	1994	1994	1	4	No	4	La vivienda esta ocupada por 4 personas, una de ellas sale a las 4 de la	Más fría que cálida	Porque la casa no cuenta con varias ventanas y casi no le da el sol	Todo el día	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Losa de concreto	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Perfilería en acero	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	Si
75		Leonor Duarte Galeano	Soacha	2015	2015	1	2	No	4	La vivienda esta ocupada por dos personas, por lo general	Muy cálida	Porque tiene buena iluminación y durante el día el sol de la por dos de sus	Tarde y noche	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto cemento	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Perfilería en acero	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	Si

76		Valerie Rodriguez	Cota	2012	2013	3	4	No	6	4 personas (Vivienda ocupada parcialmente en horas de la tarde)	Más fría que cálida	Porque en días muy calurosos, la percepción interna es fresca durante el día	Mañana y tarde	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Losa de concreto	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio doble	Aluminio	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	Sí
77		Elena Solano	cota	1995	1995	1	3	1 y 3	4	Un habitante todo el día, dos habitantes después de las 3 de la tarde	Más cálida que fría	Porque en las noches hace mucho calor	En la tarde	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	No sabe	Sí
78		Leonardo Mejia	Cota	1999	1999	1	4	No	5	7:00 p.m. - 8:00 a.m.	Muy cálida	Porque da mucho sueño	Mañana y tarde	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	No
79		Camila Corredor	COTA	2000	2000	1	4	Mas de 5	6	Toda la noche, parcialmente en el día	Más cálida que fría	Conserva el calor en las noches	Todo el día	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Prefabricada	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	No sabe	Sí
80		José Alfredo González Castro	Boyacá	1999	2005	1	3	1 y 3	11	La vivienda la ocupan 3 personas de 12 a 2 PM y de 6pm a 8 am	Más fría que cálida	Por los grandes espacios	Mañana y tarde	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Perfil en acero	Cortinas interiores	No sabe	Sí
81		Claudia Sofía Forero	Boyacá	2000	2004	1	4	No	6	Los hijos la ocupan de 7 PM a 11am y los padres de 7pm a 8am	Más cálida que fría	Porque la altura de piso a techo no es muy amplia y porque los espacios son pequeños	Tarde y noche	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Perfil en acero	Cortinas interiores	No sabe	No
82		Hernán Pineda Acosta	Boyacá	1994	1998	1	2	No	4	Las personas ocupan la vivienda de 9 am a 5pm	Más cálida que fría	Porque durante el día entra mucha luz natural y por los materiales de construcción	Mañana y tarde	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Perfil en acero	Cortinas interiores	No sabe	No

83		Esteban Duarte Perdomo	Chia	2001	2002	2	4	No	5	Los integrantes de mi familia, trabajan y estudian, mi mamá y mi papá.	Más fría que cálida	Dentro de la casa se siente mucho frío en las mañanas y después de 4, supongo que es por la ubicación.	En la mañana	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Losa de concreto	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	Sólo techo	Sí
84		Ramiro Sanchez	Chía	2000	2010	1	5	No	3	Solo en la noche, el día la casa está sola.	Muy fría	-	No ventila	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Chapa metálica	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Perfil en acero	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	Sí
85		Maria Camila Reyes Rodriguez	Chia	1997	2014	2	5	1 y 3	3	son tres apartamentos, así que son los dueños viven en la casa, otra familia conformada por mamá y dos hijos.	Muy fría	por que creo que al no tener tantos vecinos pegados a la casa el viento pega por la ubicación.	No ventila	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Chapa metálica	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	No sabe	No
86		Isidro Mendez Hortic	Chia	1998	2001	2	5	1 y 3	6	todos en la casa trabajan en Chia o en Bogotá así que la casa casi siempre está fría.	Más fría que cálida	por que la ubicación de la casa hace que la casa sea muy fría, además de que Chia es fría.	En la mañana	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Chapa metálica	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Chapa doblada	Cortinas interiores	Techo y muros exteriores	Sí
87		Maria Antonia Cuervo Giraldo	Cajica	2000	2001	2	3	No	6	soy ama de casa, mi esposo trabaja en Zipaquirá y mi hijo estudia en Zipaquirá.	Más fría que cálida	por que cajica es un municipio frío.	No ventila	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Chapa metálica	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	Sólo techo	No
88		Juan Esteban Alvarado Ruiz	Tocancipa	2001	2003	3	nay dos familias, una de 3 y otra de 4.	No	son dos habitaciones, sala y comedor.	Más fría que cálida	supongo que por el material además de que tocancipa casi siempre es frío.	No ventila	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Chapa metálica	bioques de ladrillo hueco con revestimiento.	Metálica	Vidrio sencillo	Perfil en acero	Cortinas interiores	No sabe	No
89		Camilo Lopez Gonzalez	Tocancipa	2004	2006	2	4	No	una casa mas local con el local de mi mamá.	Más fría que cálida	por la localización, siempre ha sido fría.	En la mañana	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Chapa metálica	revestimiento de ladrillo	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	No sabe	No	

90		Juan Pablo Martinez Duarte	los Alpes, Tocancipa	2004	2006	2	5	1 y 3	4 habitaciones, estudio, sala	mi mama y mi abuela permaneces en casa, mis hermanos y yo permanecemos en mi casa ya que soy pensionada, mis hijos trabajan en zipaquirá y yo trabajo medio tiempo, mi esposo trabaja en Bogota y mis dos hijos todos en mi casa trabajamos asi que en las noches y mañana estamos	Más fría que cálida	por la ubicación, mis papa dicen que tocancipa era mas fría pero aun así supongo que por la ubicación, antes vivia en zipaquirá pero estando acá me parece	En la mañana	Chimenea	En la noche	No, por seguridad	Tejas cerámicas	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Perfil en acero	Cortinas interiores	Techo y muros exteriores	No
91		Maria del Carmen de Ospitia Guzman	Sesquelé	2001	2003	2	5	1 y 3	6	Más fría que cálida	Sesquelé siempre ha sido frío, supongo que es por eso.	En la mañana	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Chapa metálica	Concreto	Metálica	Vidrio sencillo	Perfil en acero	Cortinas interiores	Sólo techo	No	
92		Luisa Morales Rios	sesquelé	2003	2006	2	4	1 y 3	6	Más fría que cálida	por la ubicación siempre en la mañanas y noches hace mucho frío.	En la mañana	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Losa de concreto	Concreto	Metálica	Vidrio sencillo	Perfil en acero	Cortinas interiores	Sólo techo	No	
93		Eric Steve Castro Gomez	Chocontá	2010	2012	2	3	1 y 3	5	Más fría que cálida	Por su estructura	En la tarde	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Chapa metálica	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	No sabe	No	
94		Silvia Quiroga	Cogua	2003	16	2	7	No	7	Más cálida que fría	Porque durante el día entra mucha luz natural y por los materiales	En la mañana	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Madera	Cortinas de enrollar exteriores	Sólo techo	No	
95		Hernán Pineda Acosta	Boyacá	1994	1998	1	2	No	4	Más cálida que fría	Por el patio central que genera una gran circulación de viento al igual que por el techo	Mañana y tarde	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Perfil en acero	Cortinas interiores	No sabe	No	
96		Nidia Constanza Pirazan Rodríguez	Boyacá	1996	2000	1	3	No	7	Más fría que cálida	Por el patio central que genera una gran circulación de viento al igual que por el techo	Todo el día	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Chapa metálica	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Perfil en acero	Cortinas interiores	Sólo muros exteriores	Sí	

97		Alexandra Pirazan Rodríguez	Boyacá	2001	2004	2	3	No	6	Una de las personas permanece todo el día y las otras dos están por	Más cálida que fría	Porque los espacios son un poco más reducidos y los materiales interiores	Mañana y tarde	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Cubierta en teja cerámica con cara interior	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Perfil en acero	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	No
98		Carlos Castro	Tunja	2007	2012	2	5	No	5	1 persona en el día 5 personas en la noche	Muy fría	No le pega el sol	Todo el día	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Chapa metálica	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Perfil en acero	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	Sí
99		Judy Cuellar Duque	Soacha	1995	1995	1	3	No	3	Esta ocupada por tres personas, salen durante el día	Más fría que cálida	Por que casi no le da el sol.	Tarde y noche	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Losa de concreto	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Perfil en acero	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	No
100		Angela naranjo	Sogamoso	1998	2000	2	4	1 y 3	3		Más cálida que fría	Ambiente	En la mañana	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto cemento	Ladrillo macizo	Madera	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	Sólo techo	Sí
101		Mireya betancourth	Sogamoso	2017	2017	3	3	1 y 3	6		Más cálida que fría	Por el sol	En la mañana	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Losa cerámica	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio doble	Madera	Cortinas interiores	Sólo muros exteriores	Sí
102		Yolanda Rosas Correa	Sogamoso	2015	2017	3	2	No	5	Solo en la tarde y noche	Muy cálida	Es el último piso	En la tarde	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Losa de concreto	Ladrillo macizo	Acero	Vidrio doble	Perfil en acero	Cortinas interiores	No sabe	No
103		Paula Camila Uribe Velasco	Cundinamarca	1990	2007	2	9	1 y 3	8	9 personas. 1 estudiante de bachillerato, 4 estudiantes universitarios	Más fría que cálida	En la mañana y en la noche hace mucho frío, sólo en la tarde se conserva el calor	Mañana y tarde	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Teja de fibra de vidrio	Ladrillo hueco	La puerta principal es metálica y las puertas	Vidrio doble	Perfil en acero	Cortinas interiores	No sabe	Sí

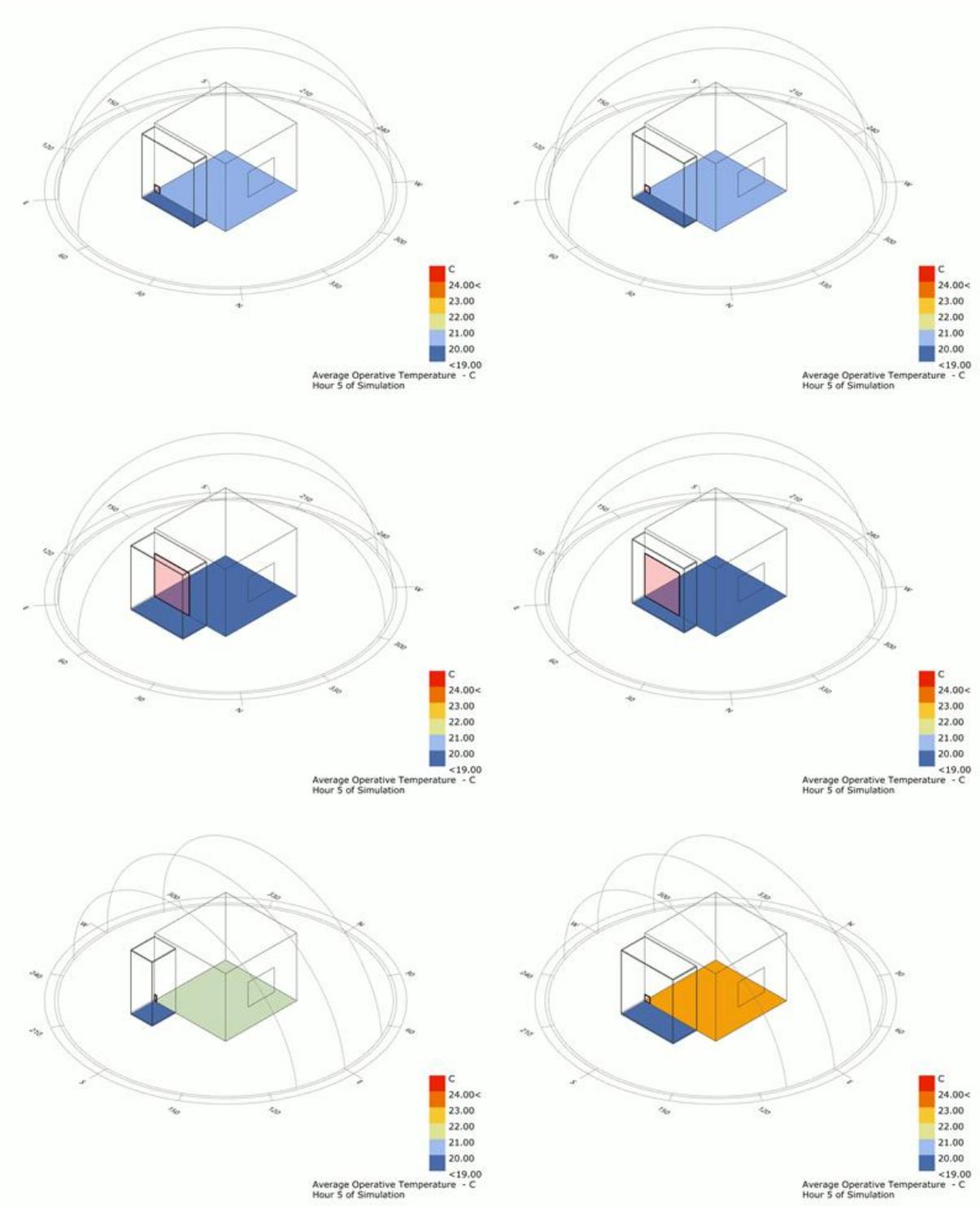
104		Deissy Barrera Silva	Cundinamarca	1960	1960	3	7	No	8	3 personas todo el día y 4 en la noche y mañanas hasta las 7:30am	Más cálida que fría	Tiene muros gruesos y está ventilada	Mañana y tarde	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Chapa metálica	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Perfiles en acero	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	Sí
105		Mayra Alejandra Garcia González	Bogotá	2003	2004	3	4	No	6	4 personas . Mañana - noche ( 6 pm - 8 am)	Más fría que cálida	Materialidad y cercanía a humedal	Mañana y tarde	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto cemento	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Perfiles en acero	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	Sí
106		Aleida Tatiana Duque Betancur	Bogotá	1940	2002	3	7	No	9	5 en la mañana y noche	Más cálida que fría	Por que se siente confort en cuanto a su temperatura e iluminación	En la mañana	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto cemento	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	Sólo techo	Sí
107		Karen Denisse Diaz Suarez	Bogotá	2000	2003	3	3	1 y 3	6	3 personas por lo general en la mañana y en la noche	Más cálida que fría	Porque esta ubicada en conjunto cerrado y eso hace que las corrientes de aire fría	En la tarde	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto cemento	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Perfiles en acero	Cortinas interiores	Sólo techo	No
108		Javier D'Achiardi	Tabio	1980	10	1	3	1 y 3	8	Siempre	Más fría que cálida	Clima del lugar	Mañana y tarde	Chimenea	En la noche	No, por seguridad	Tejas cerámicas	Ladrillo hueco	Madera	Vidrio sencillo	Madera	Postigón	No tiene aislamiento térmico	Sí
109		Mabel Edith Cuchimaque Sánchez	Bogotá	1983	1984	3	5	1 y 3	6	Somos 5 personas quienes habitamos la vivienda, la ocupación	Más fría que cálida	Por la condicion climática y/o de temperatura, por la ubicación geográfica	En la mañana	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Losa de concreto	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Perfiles en acero	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	Sí
110		Camila Rodriguez	Bogotá	2010	2010	2	4	1 y 3	3	En el día la vivienda está sola	Muy fría	Los materiales no guardan el calor	En la mañana	Chimenea	En la noche	No, por seguridad	Tejas cerámicas	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	Sí

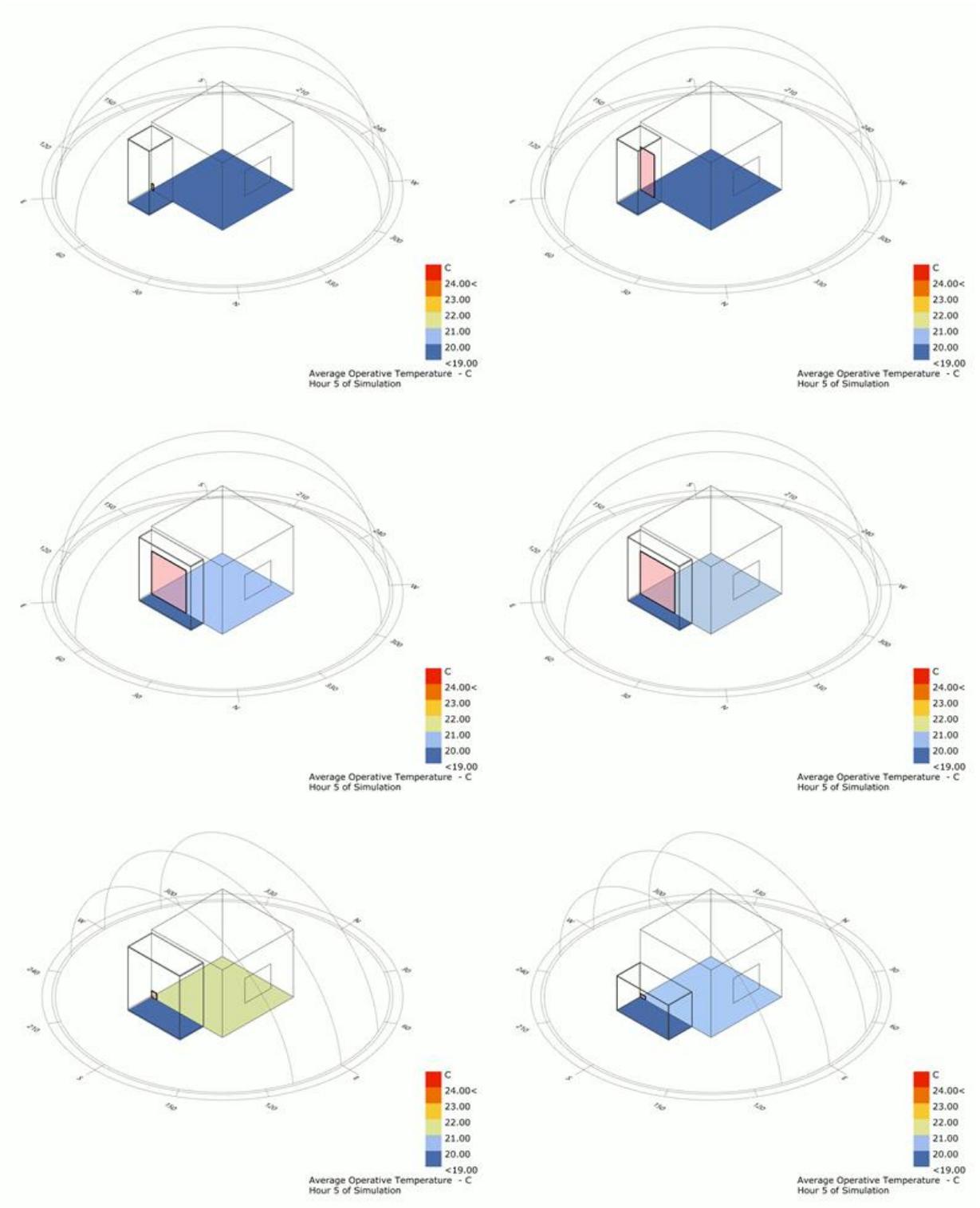
111		Andrés Mazutis	Chia	2009	2015	3	3	1 y 3	5	Usualmente entre semana la ocupación es de 5 pm a aproximada	Más fría que cálida	En sabana centro es necesaria la incorporación de nuevas tecnologías que	En la tarde	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Madera con recubrimiento impermeable	Ladrillo macizo	Madera	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	No
112		Diego Romero	Sopo	2000	2000	3	3	1 y 3	5 habitaciones	3 personas entre 5 pm y 8 am	Más fría que cálida	Es poco de la vivienda al igual que de los aparatos que la complementan, también	En la mañana	Tiene chimenea y calefacción eléctrica	En la noche	No, por economía	Asbesto cemento	Ladrillo hueco	Madera	Vidrio sencillo	Madera	Cortinas interiores	Sólo techo	Sí
113		Andrea Carolina Meneses Bernal	Cundinamarca	1990	1990	3	4	1 y 3	6	4 personas: 3 adultos y 1 adolescente, siempre hay alguien	Más cálida que fría	Depende del piso, el primero es mas frío pero hay calefacción	Mañana y tarde	Calefacción eléctrica	En la noche	No, por seguridad	Chapa metálica	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Perfilera en acero	Cortinas interiores	Techo y muros exteriores	Sí
114		John Alex Guillen Rodríguez	Yerbabuena Chía	1994	1998	2	3	3 y 5	7 espacios	Permanecemos la mayor parte del tiempo en diferentes actividades	Muy fría	Por la ubicación geográfica	En la mañana	Calefacción a gas	En la noche	No, por seguridad	Tejas cerámicas	Ladrillo macizo	Madera	Vidrio sencillo	Madera	Cortinas de enrollar exteriores	No tiene aislamiento térmico	No
115		ANDERSON YESID ROJAS GOMEZ	FACATATIVA	2004	2004	3	4	1 y 3	6	En la vivienda permanecemos dos personas todo el día y las otras	Más fría que cálida	Principalmente porque la vivienda esta ubicada en el borde sur del municipio de Facatativá	Todo el día	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Cubierta termoacústica - lámina metálica	Ladrillo hueco	Metálica	Vidrio sencillo	Perfilera en acero	Alero	Sólo techo	Sí
116		Guillermo López	Bogotá	1971	1972	2	4	No	4	4 personas, 6pm - 8am	Más cálida que fría	Ubicación y arquitectura	En la tarde	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Tejas cerámicas	Concreto	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	Techo y muros exteriores	Sí
117		Nathaly Chavez Orozco	Facatativá	1990	1990	2	La vivienda está distribuida por 3	No	Cada apartamento cuenta	2 personas la ocupan parcialmente todo el día y el restante en la mañana y	Más cálida que fría	El sol esta presente todo el tiempo	Mañana y noche	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto cemento	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Perfilera en acero	Cortinas interiores	No tiene aislamiento térmico	Sí

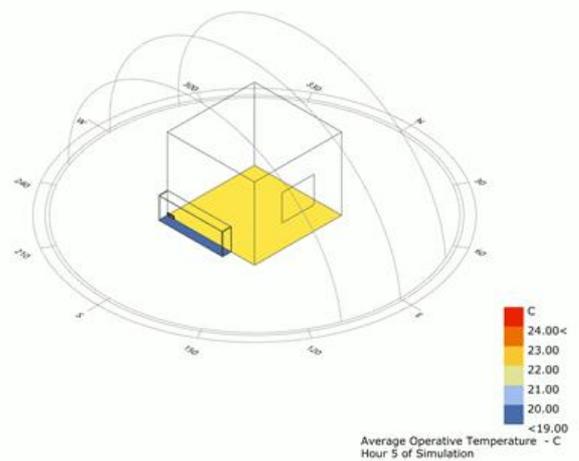
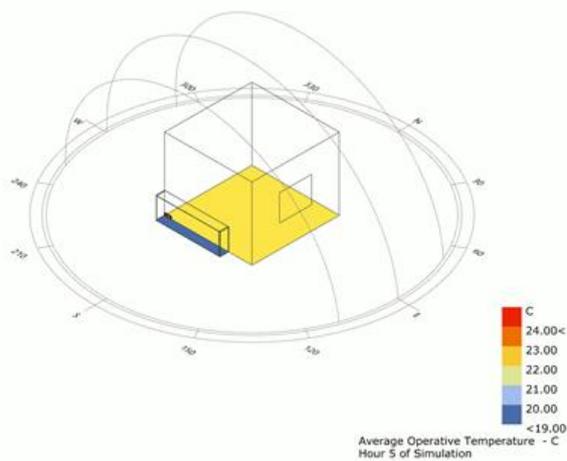
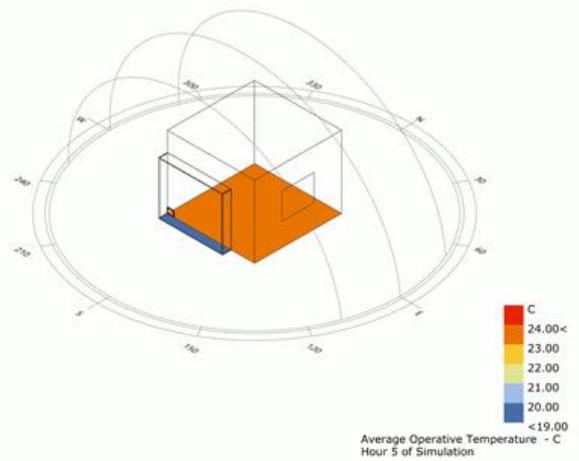
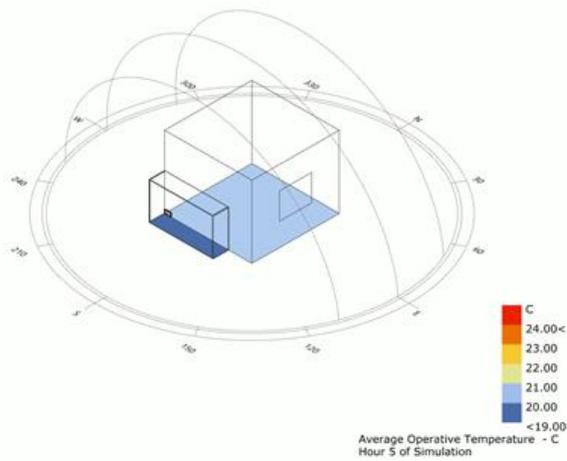
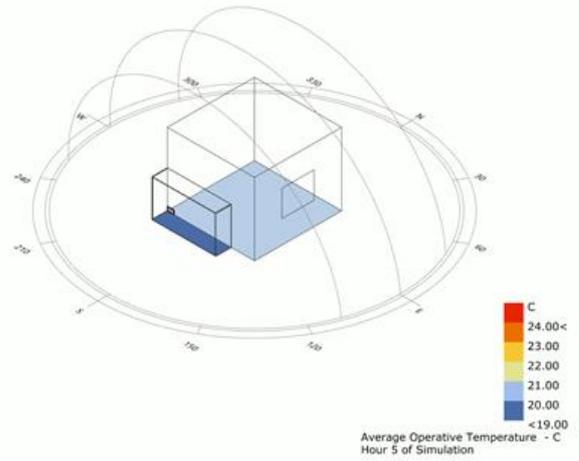
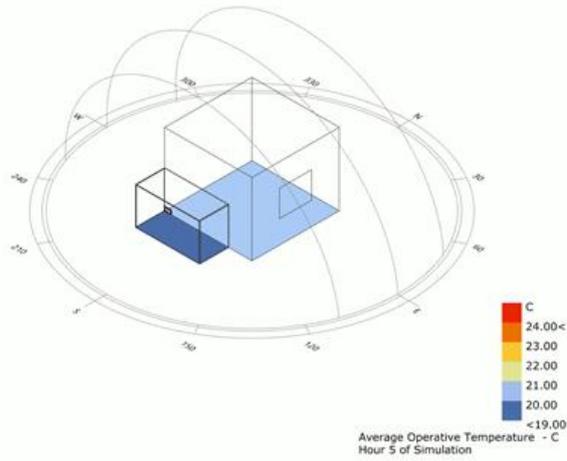
118		Aleida Tatiana Duque Betancur	Bogotá	1940	2002	3	7	No	9	5 en la mañana y noche	Más cálida que fría	Por que se siente confort en cuanto a su temperatura e iluminación	En la mañana	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto o cemento	Ladrillo macizo	Metálica	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas interiores	Sólo techo	Sí
119		Geidy Katherine Celis Sánchez	Facatativá	2010	2	3	5	1 y 3	5	5 personas, en todo momento	Más cálida que fría	El sol pega muy bien, y esto la hace muy cálida	Mañana y tarde	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Losa cerámica	Concreto	Madera	Vidrio sencillo	Madera	Cortinas interiores	No sabe	No
120		Lizeth Cano	Facatativá	1946	1966	1	10	No	16	Somos en total diez personas, todas salimos a trabajar o estudiar en	Más cálida que fría		En la mañana	No tiene	No tiene calefacción	No tiene calefacción	Asbesto o cemento	Ladrillo macizo	Madera	Vidrio sencillo	Aluminio	Cortinas de enrollar exteriores	No sabe	Sí

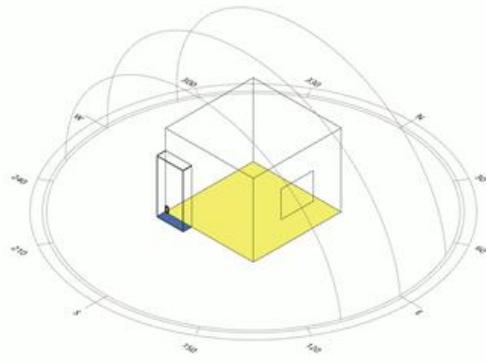
# ANEXO 3

## Resultados simulaciones análisis de sensibilidad

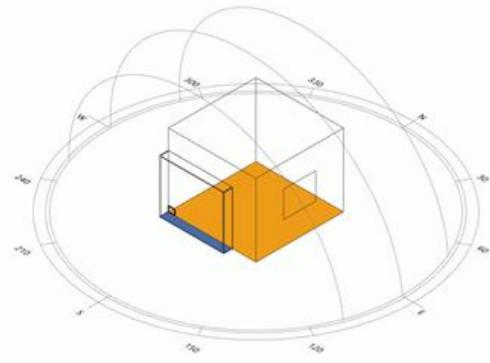




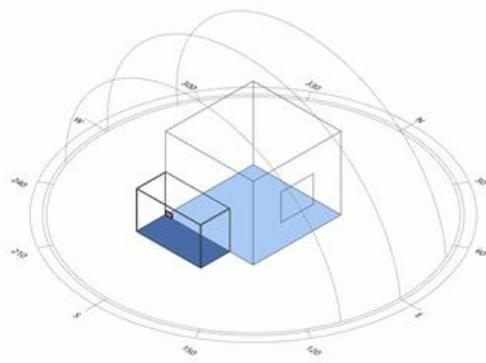




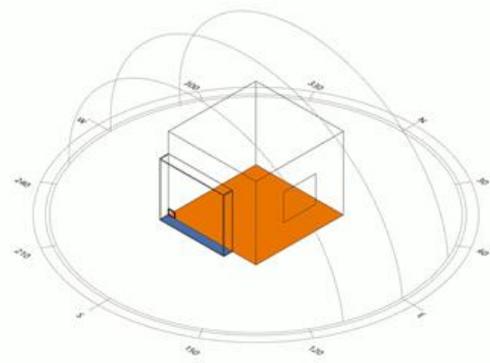
Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation



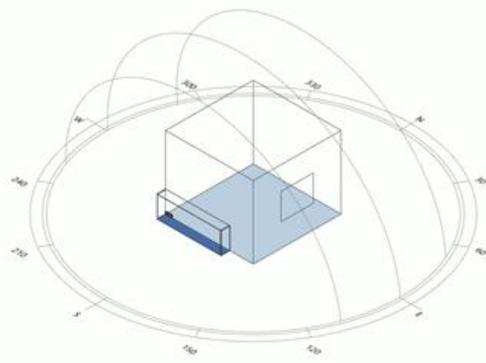
Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation



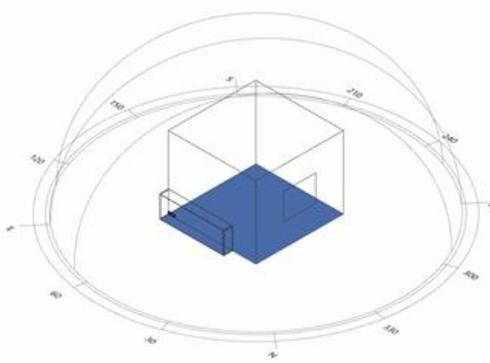
Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation



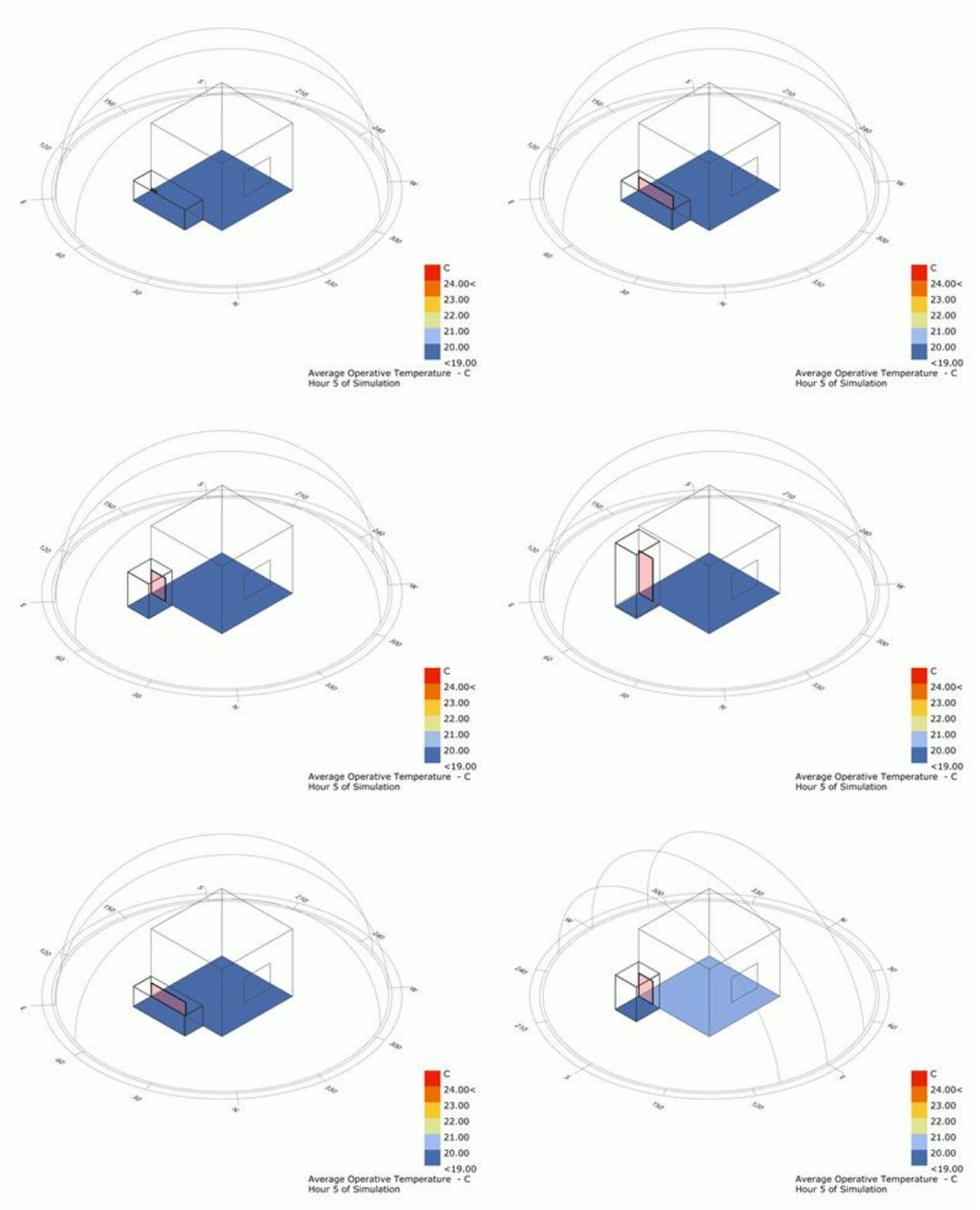
Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation

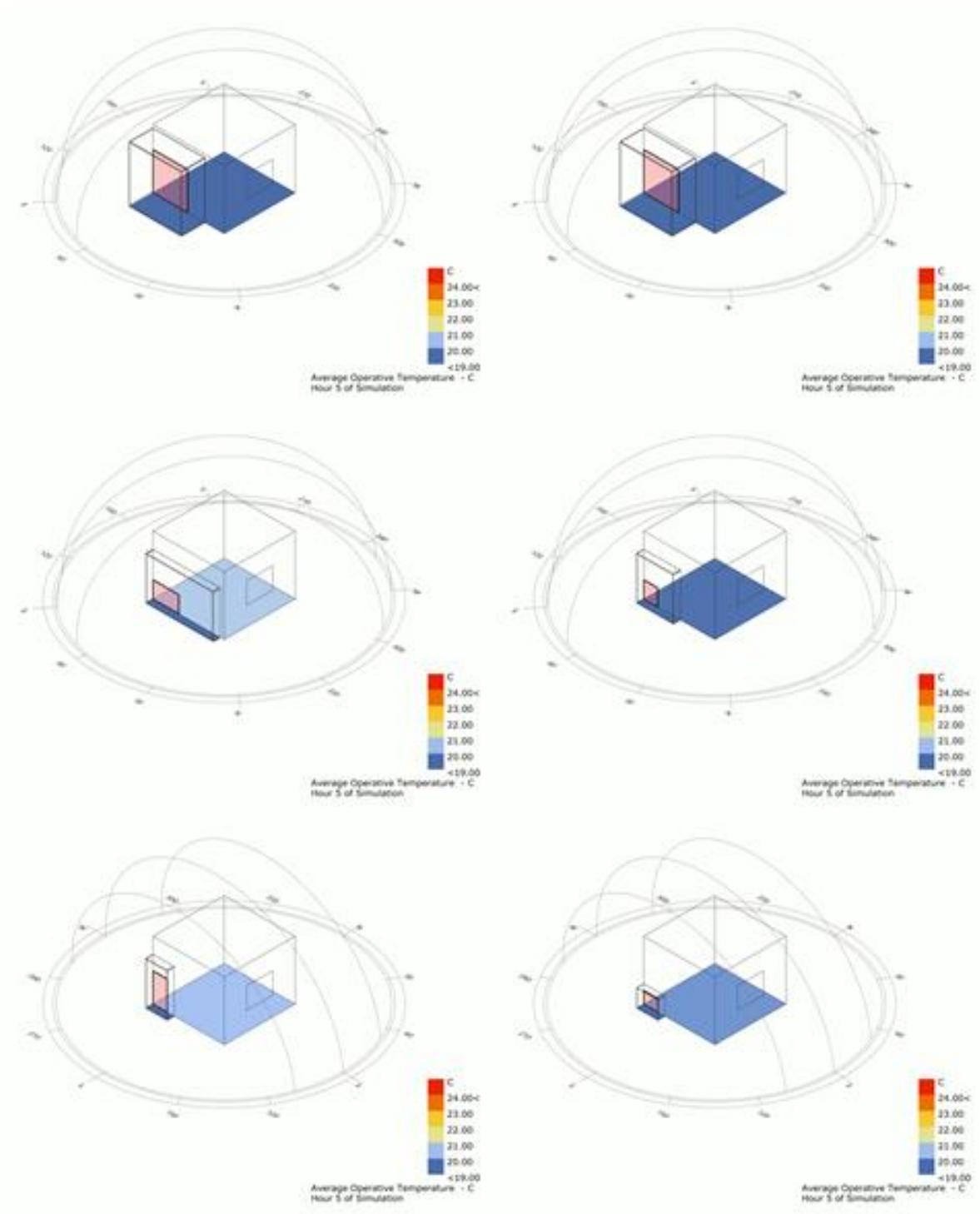


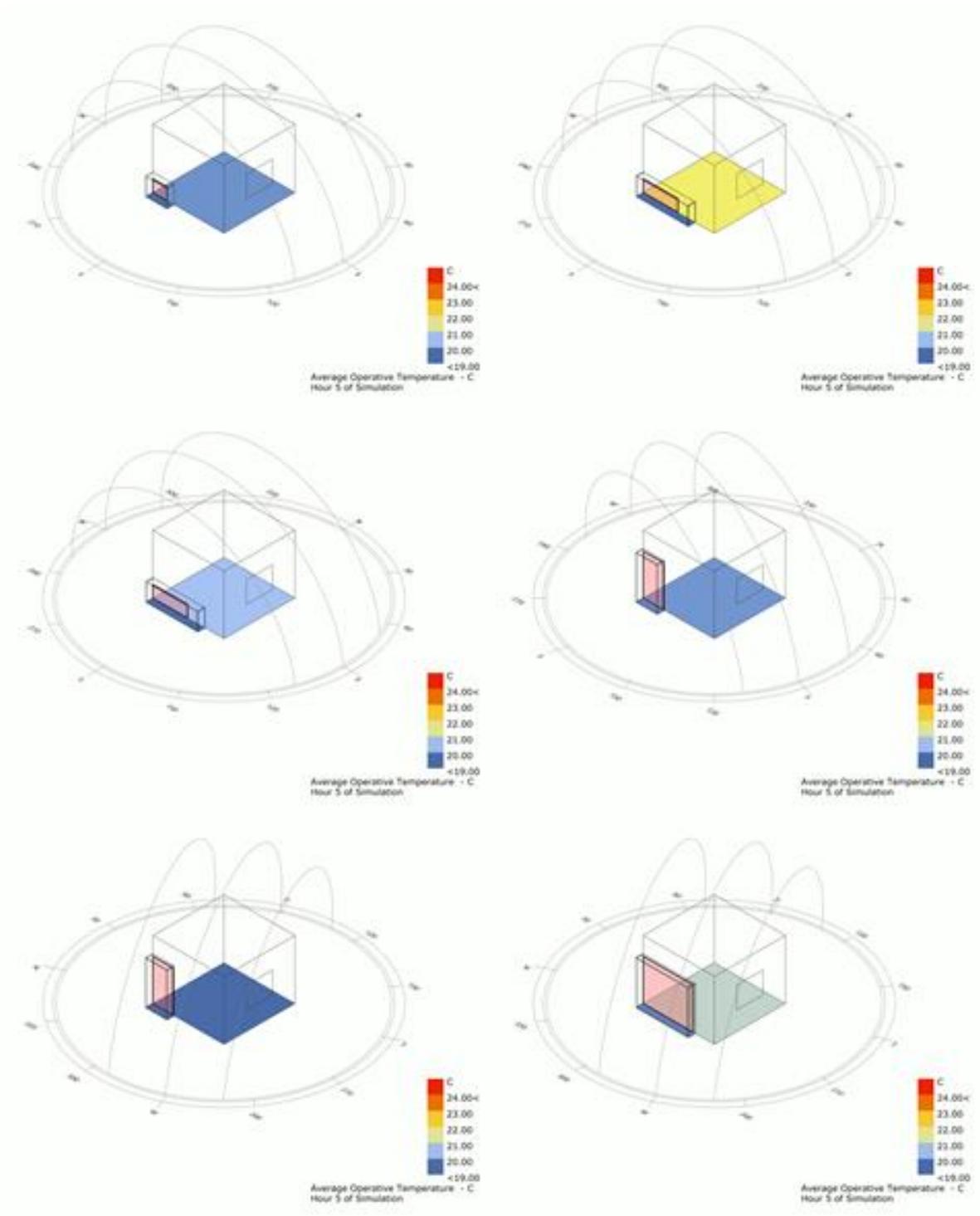
Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation

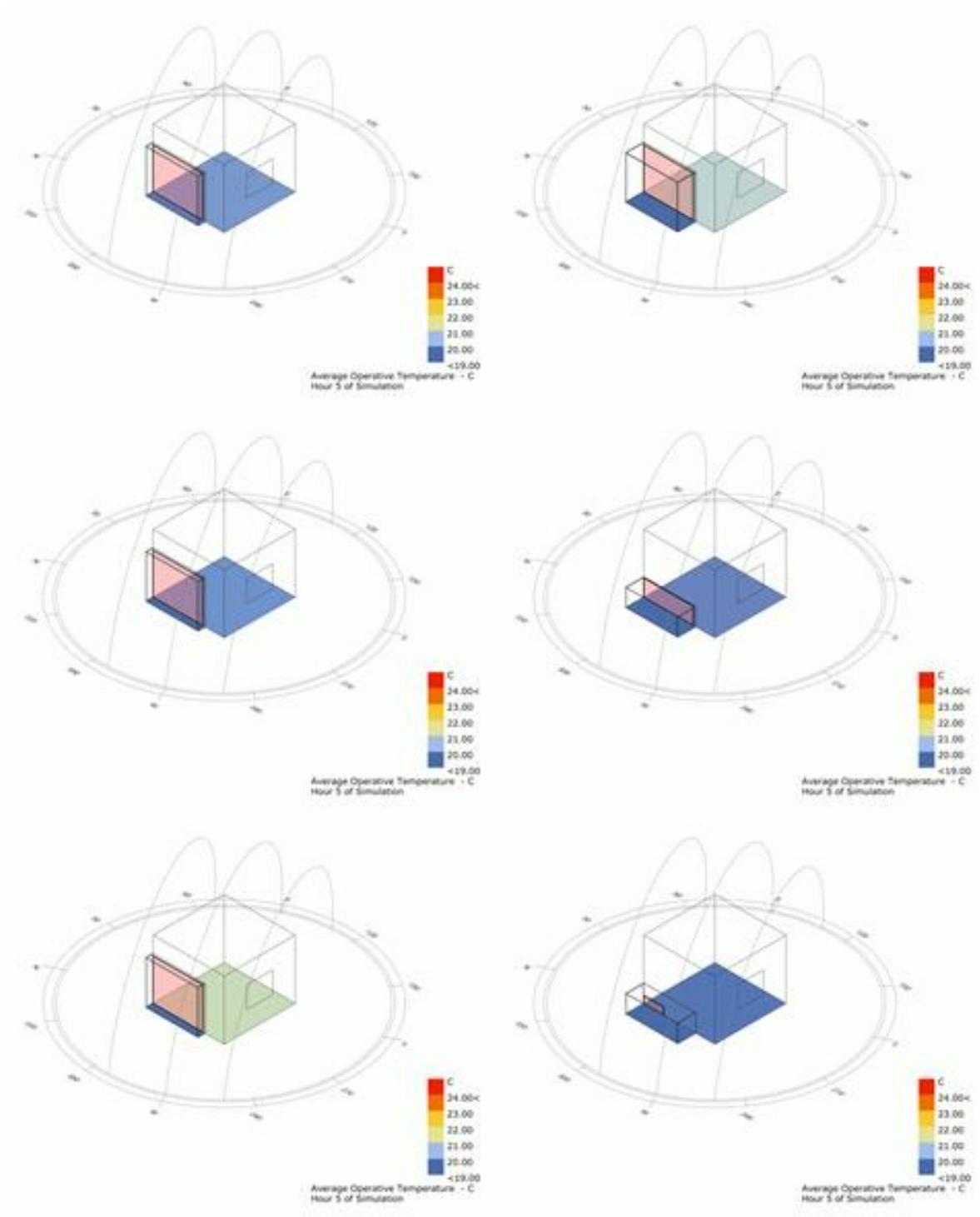


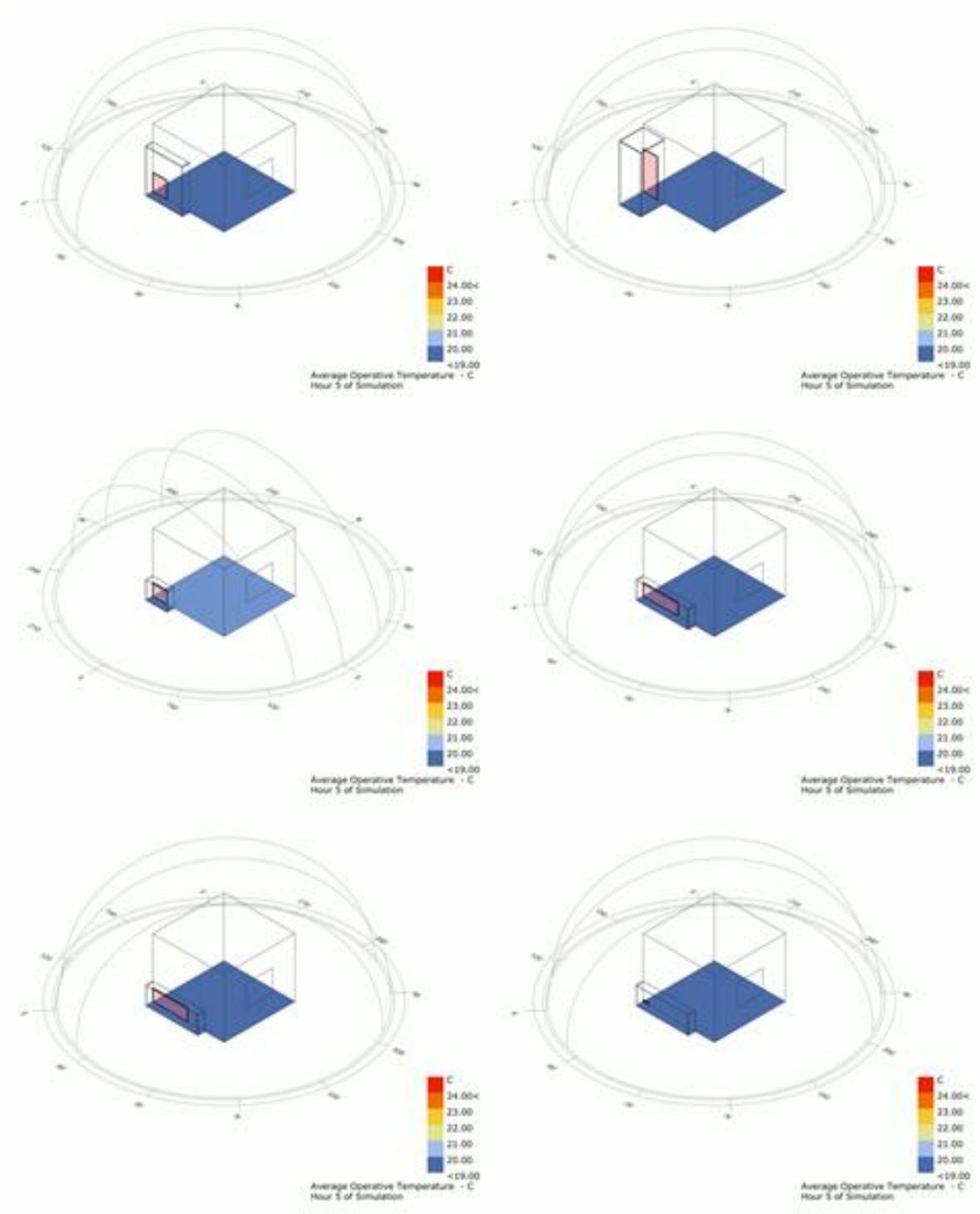
Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation

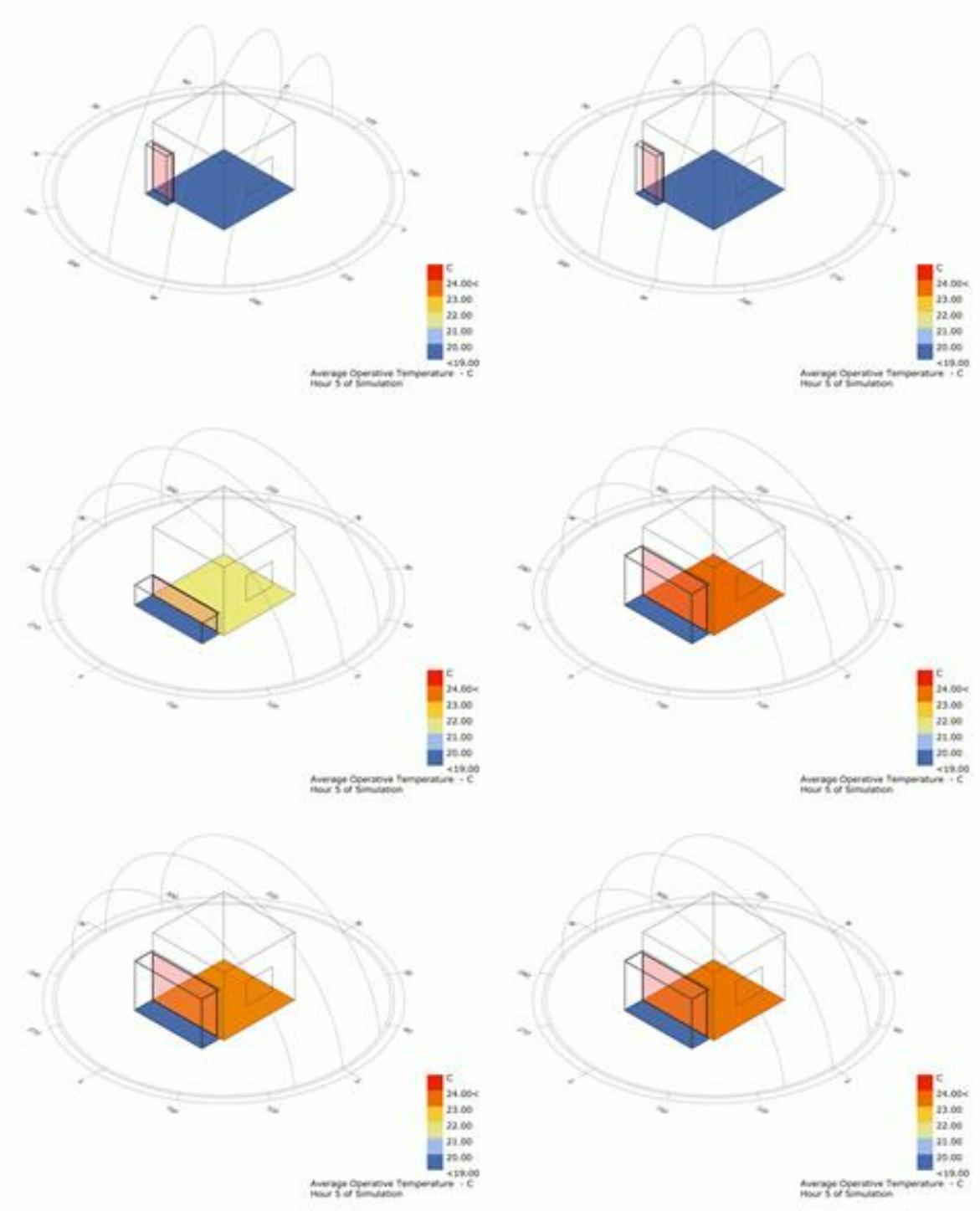


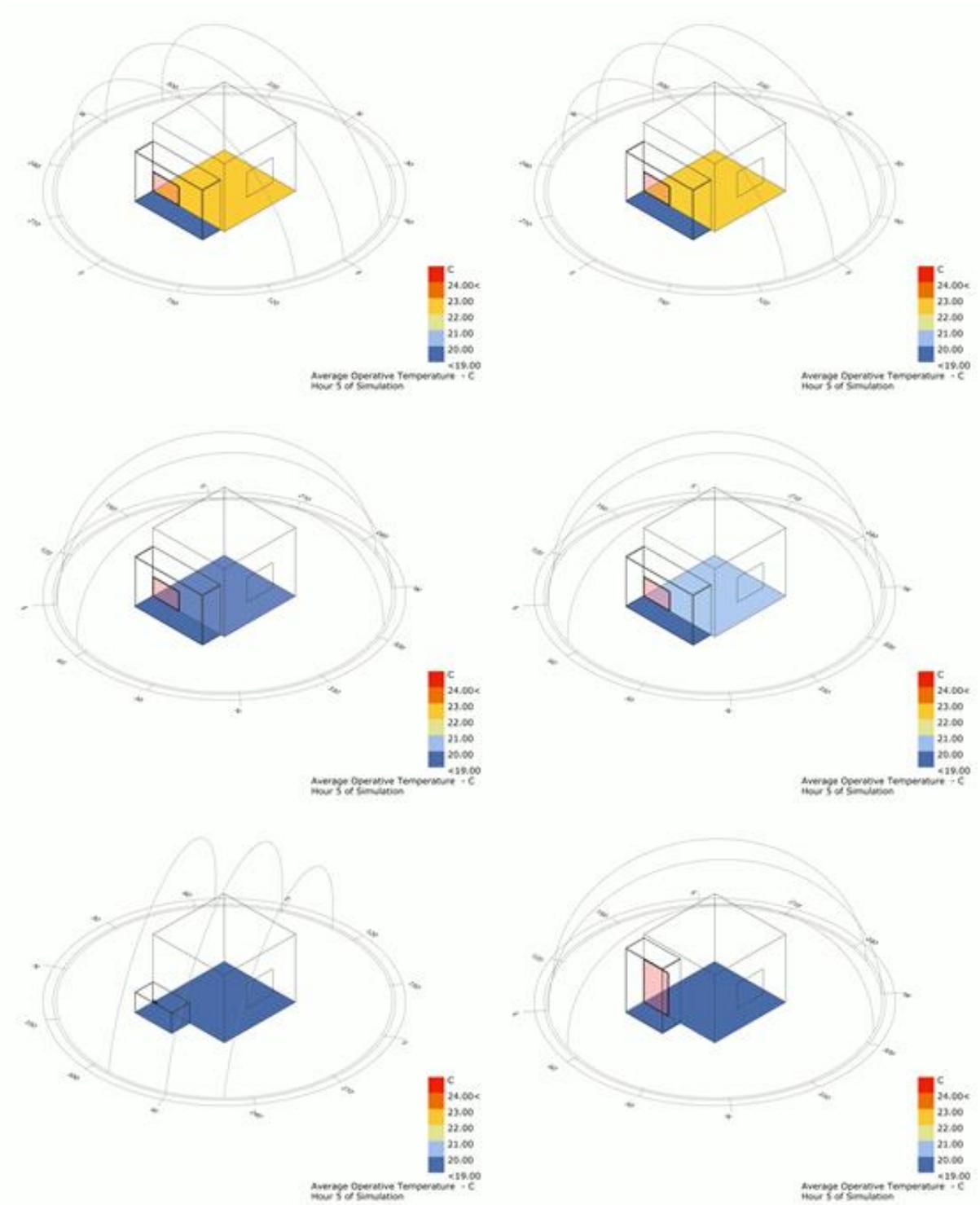


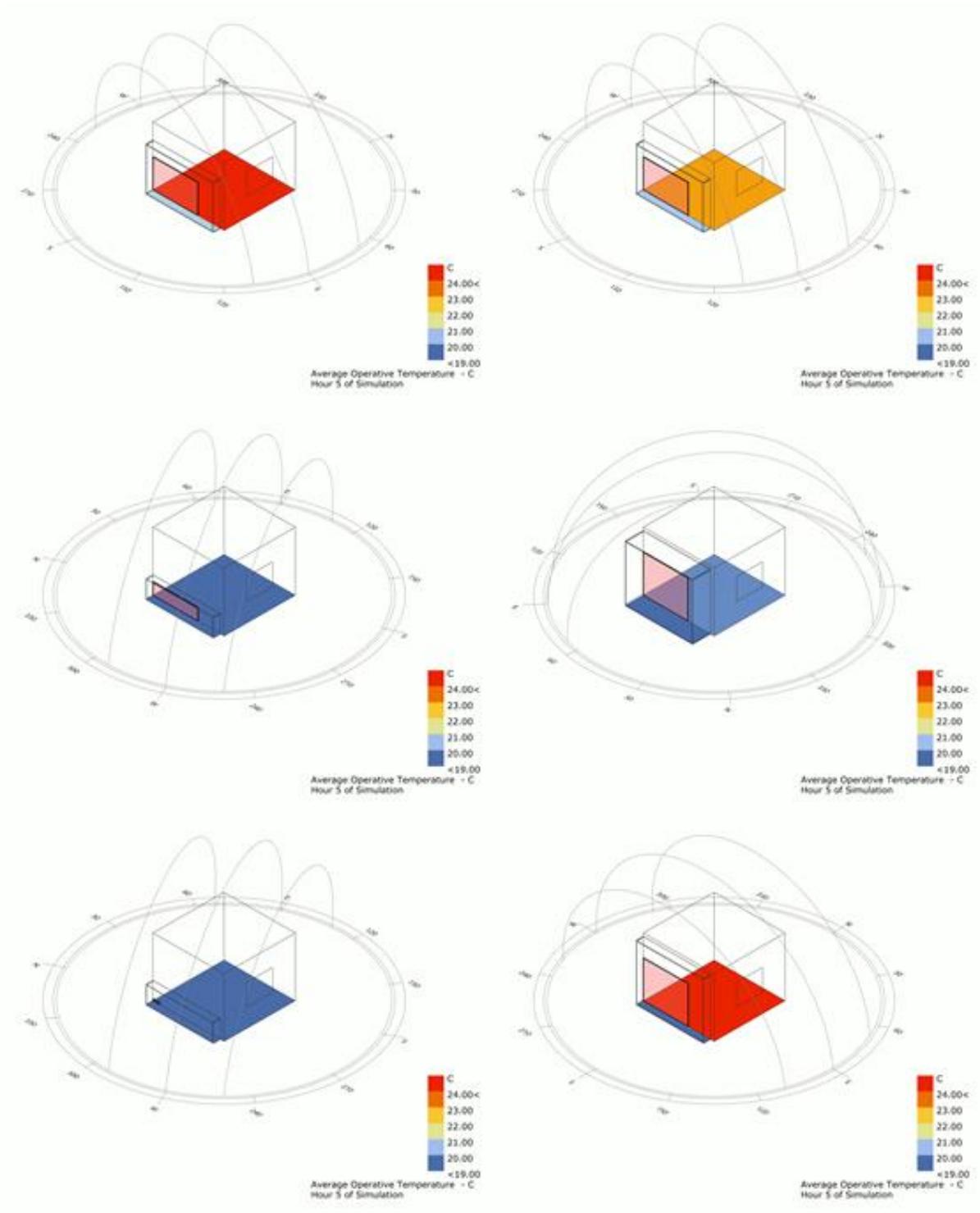


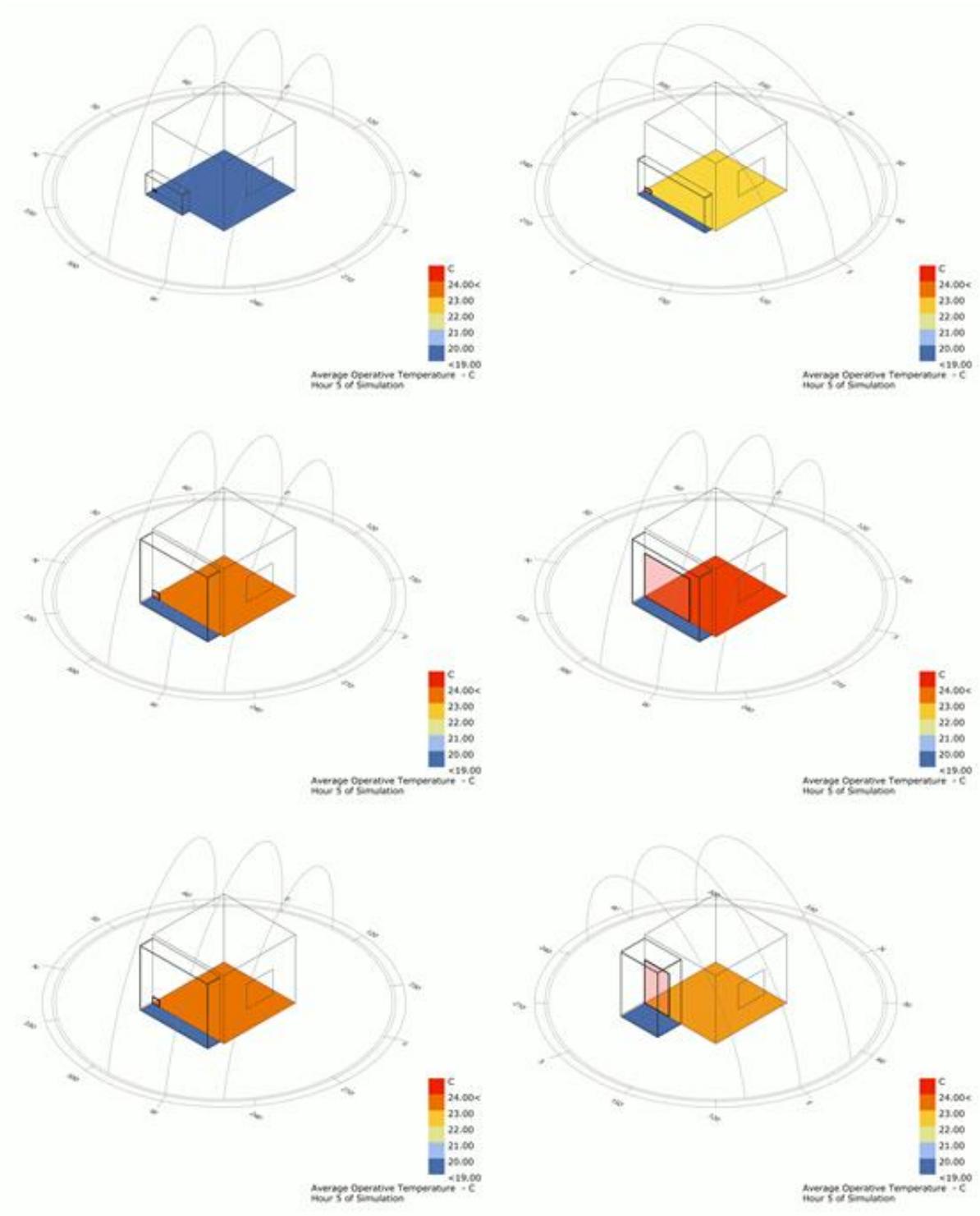


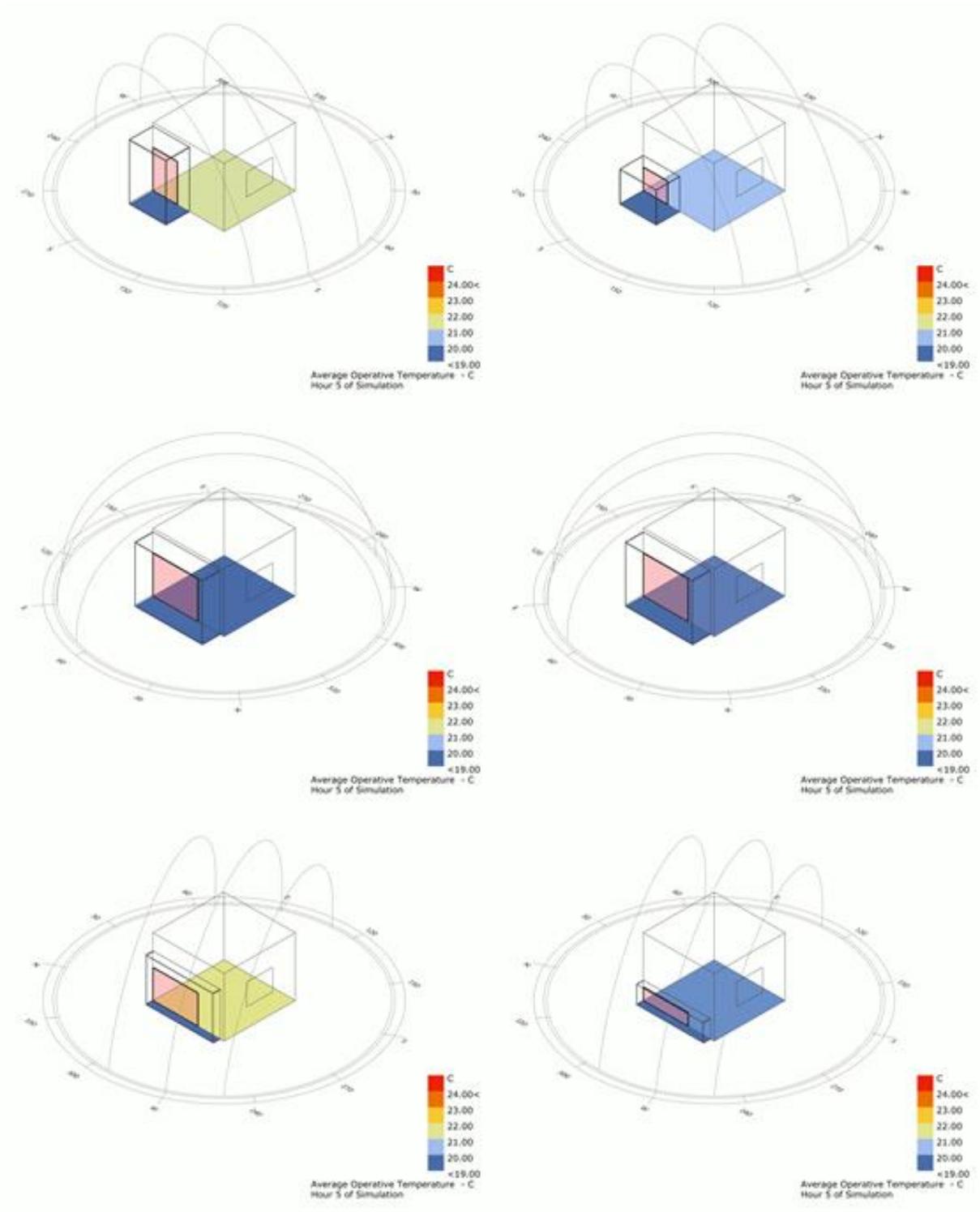


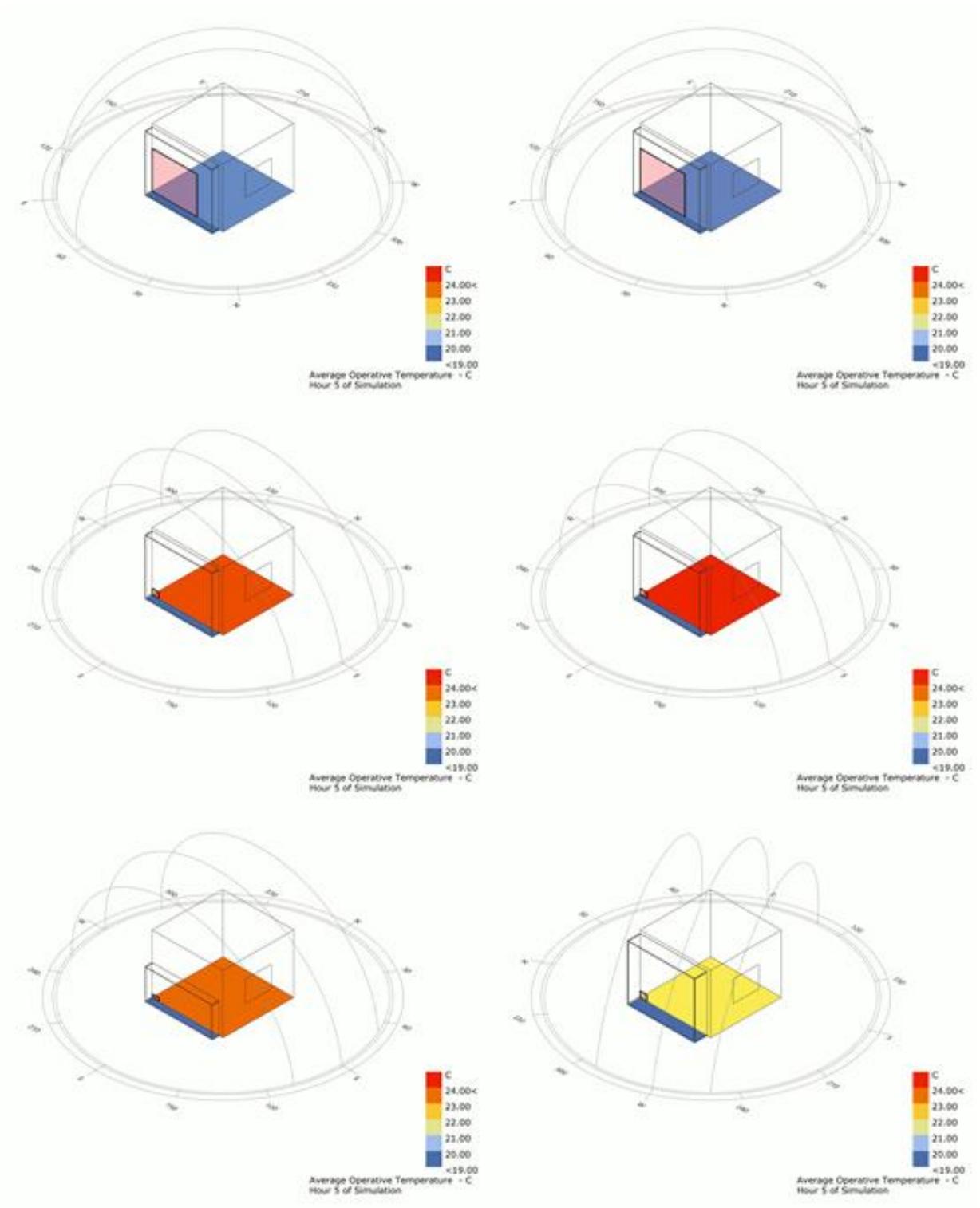


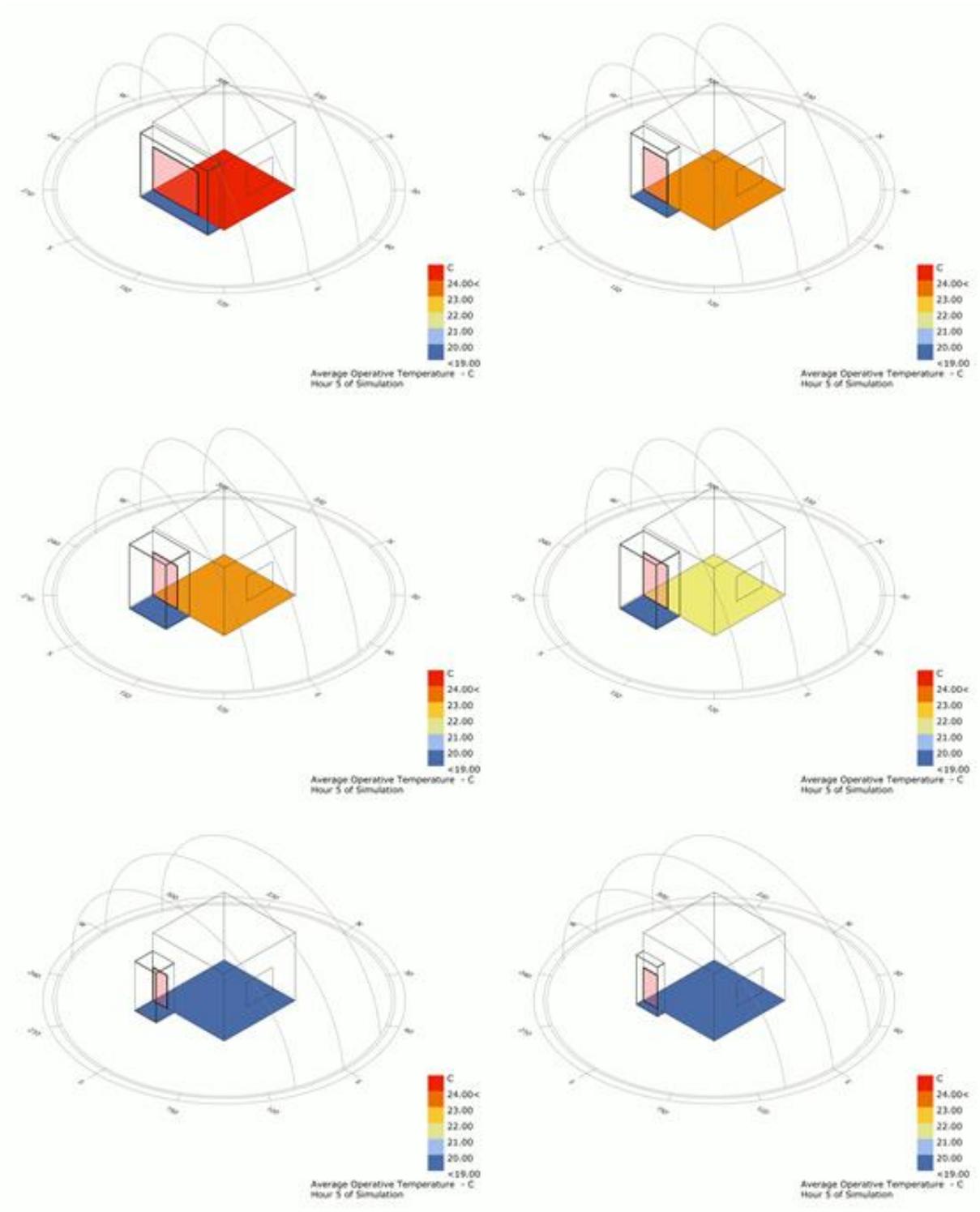


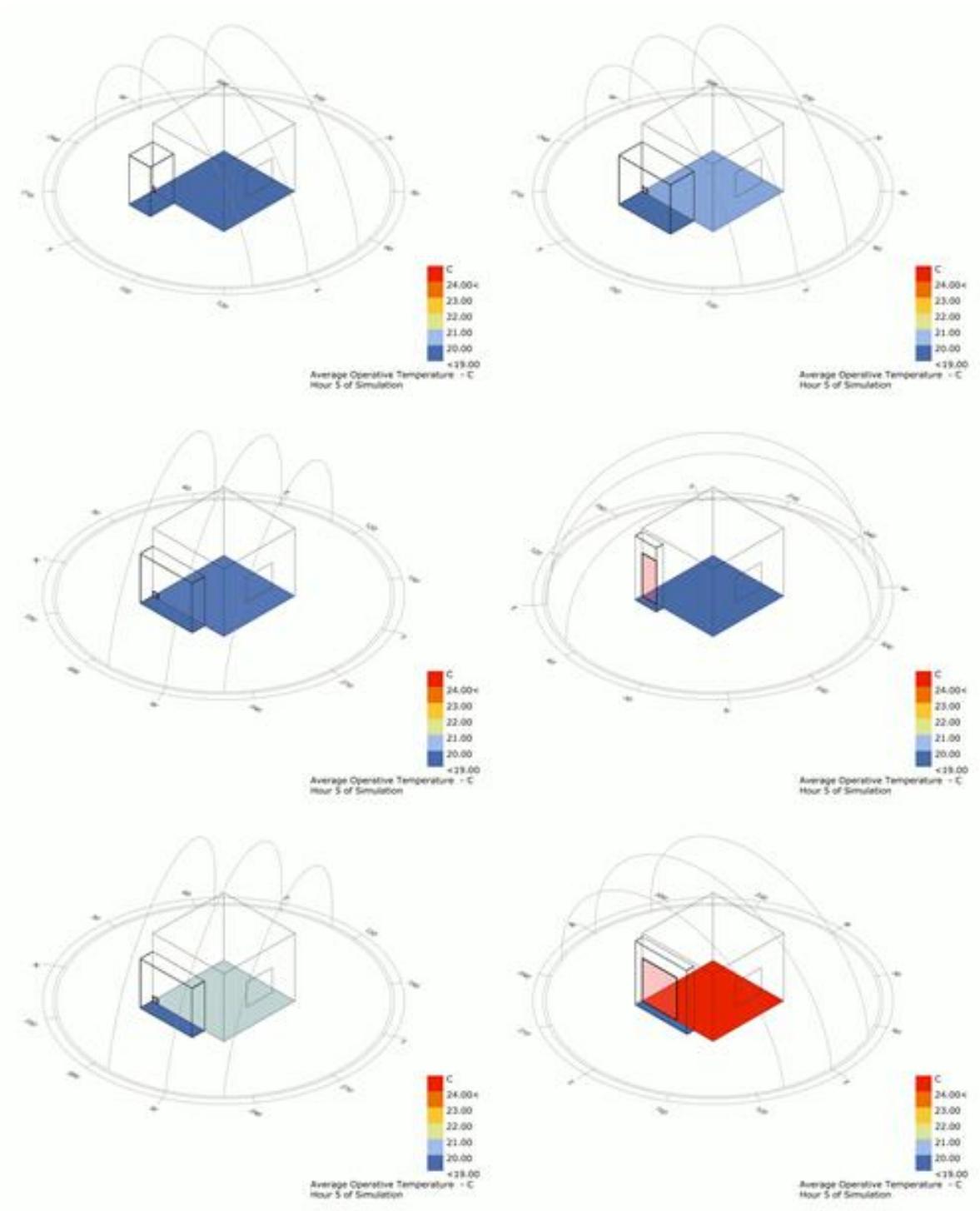


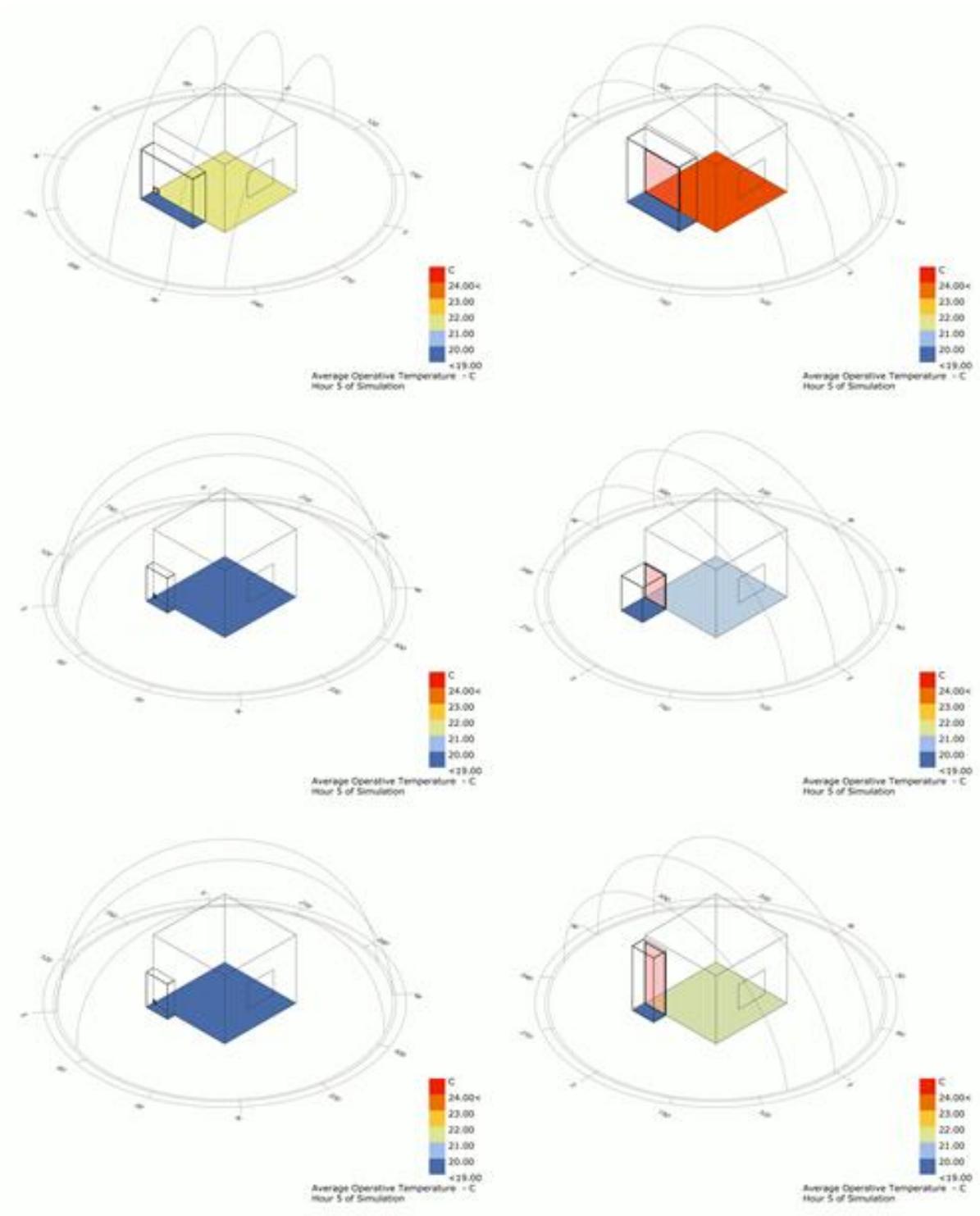


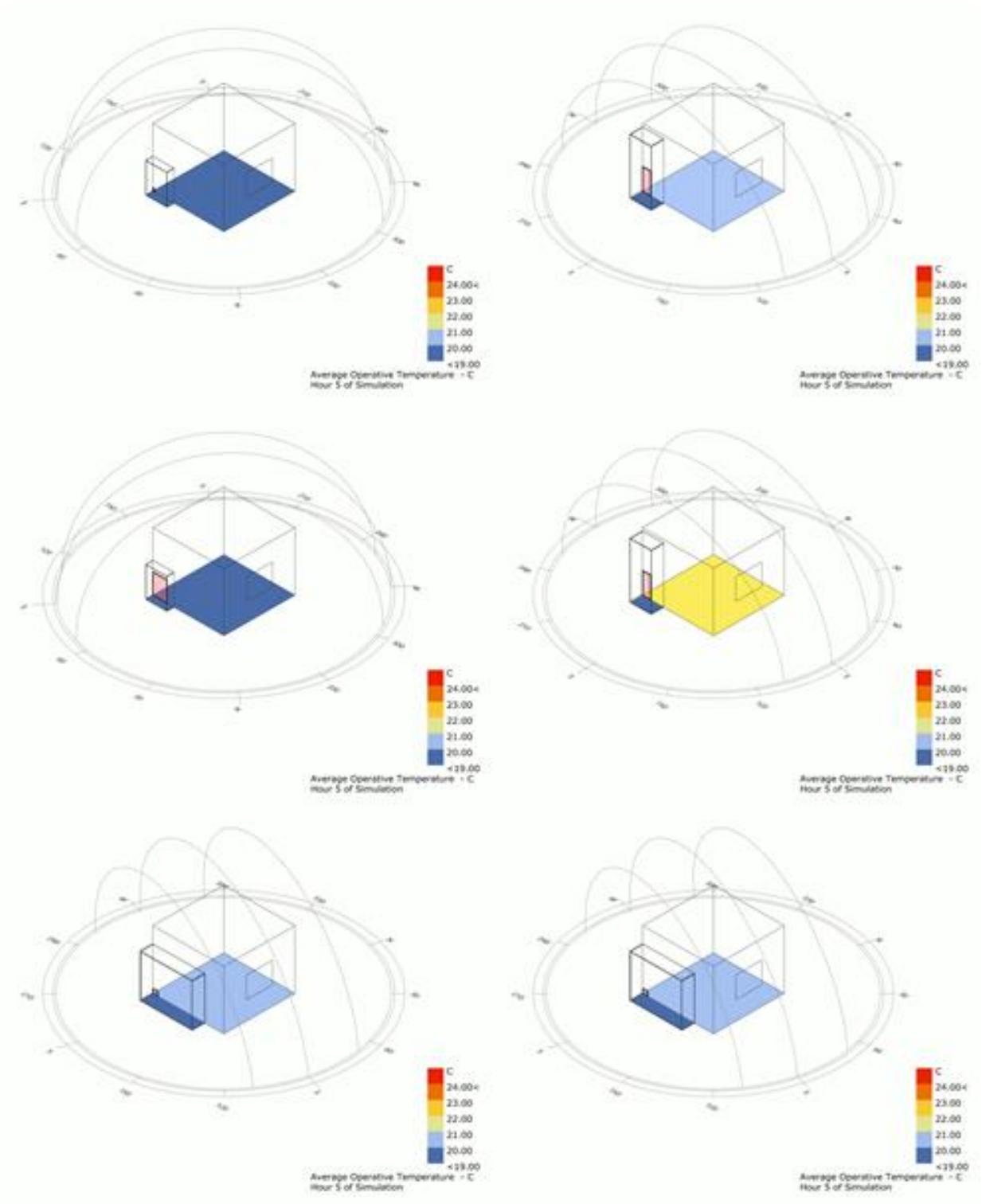


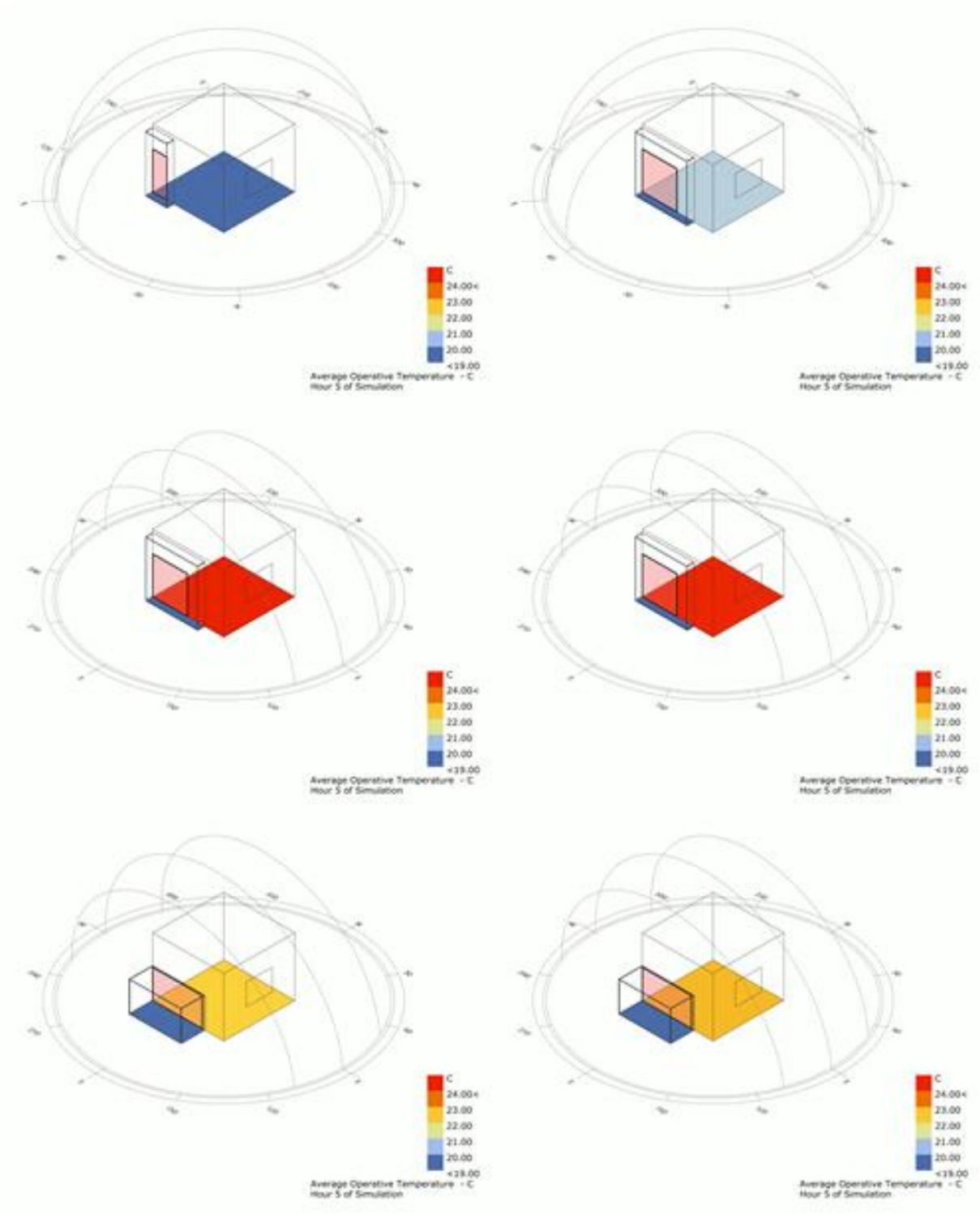


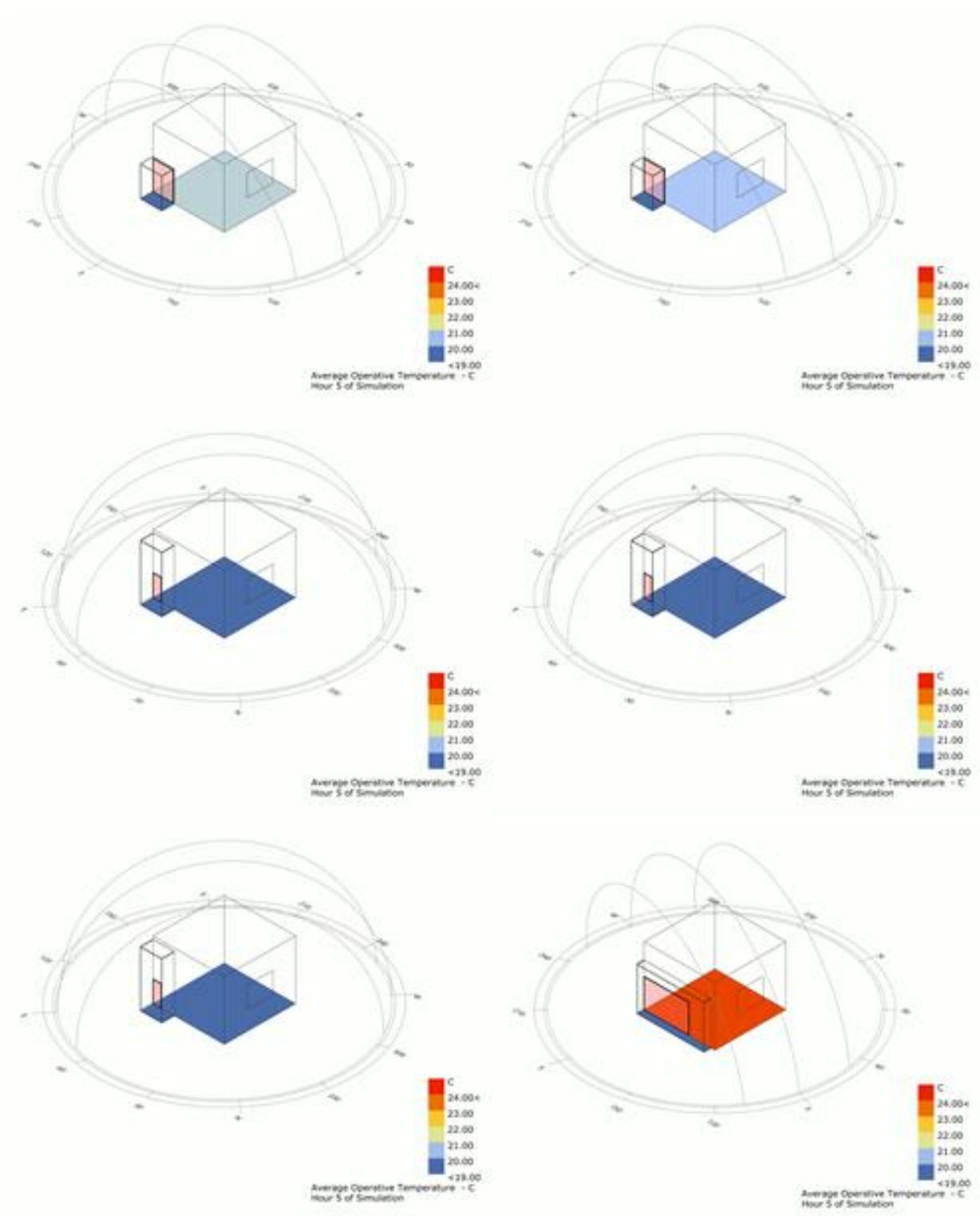


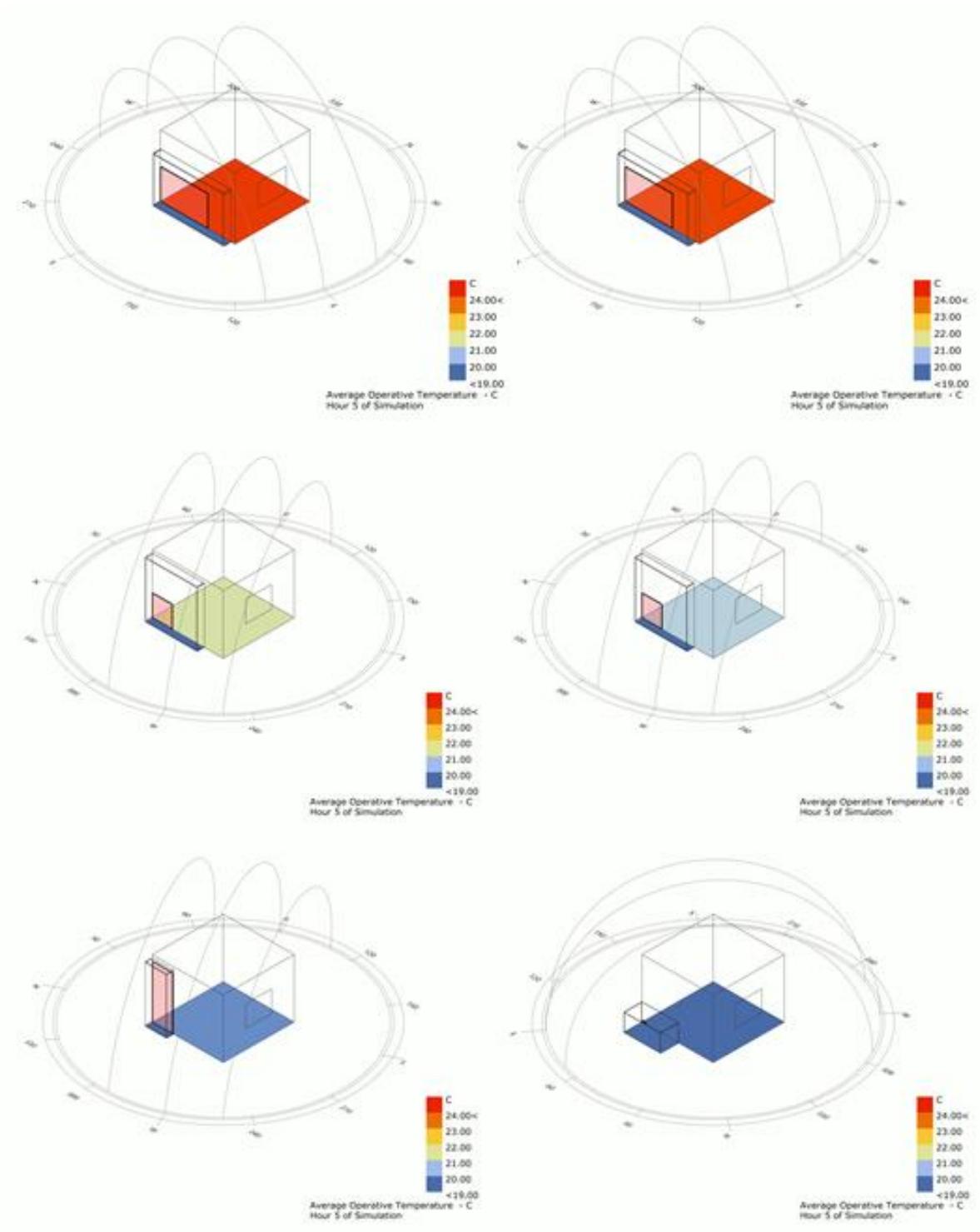


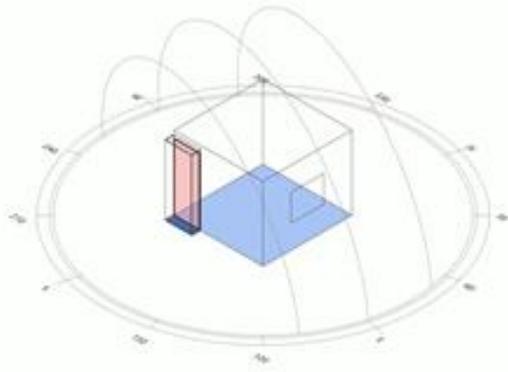




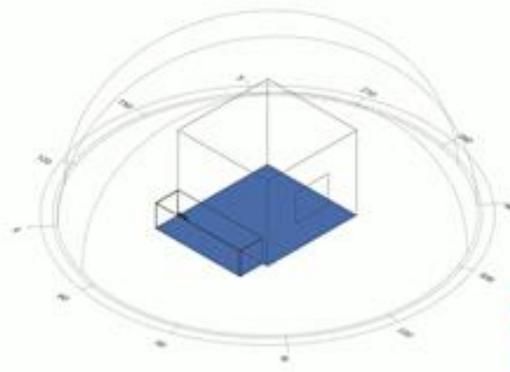




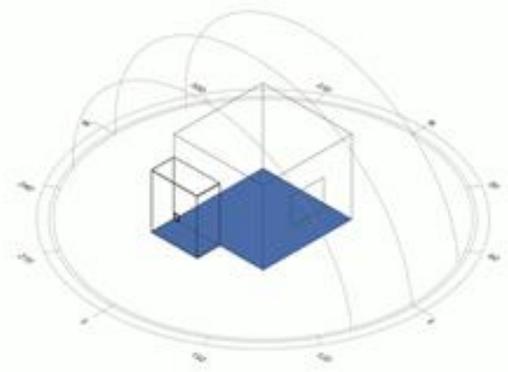




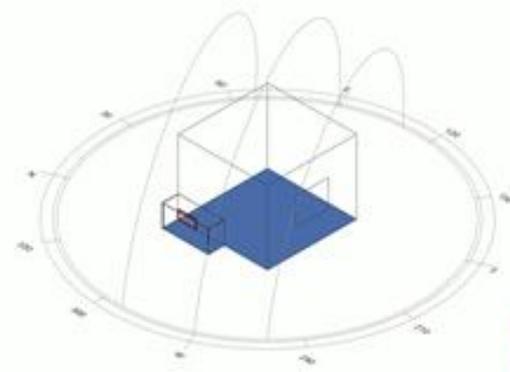
Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation



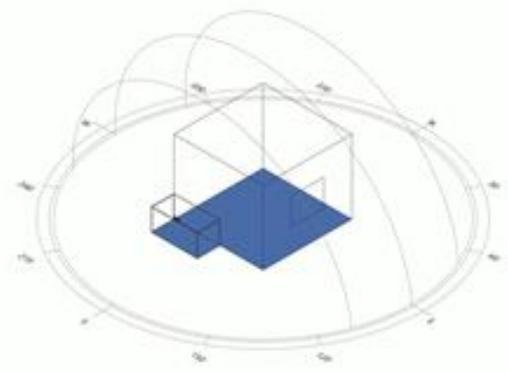
Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation



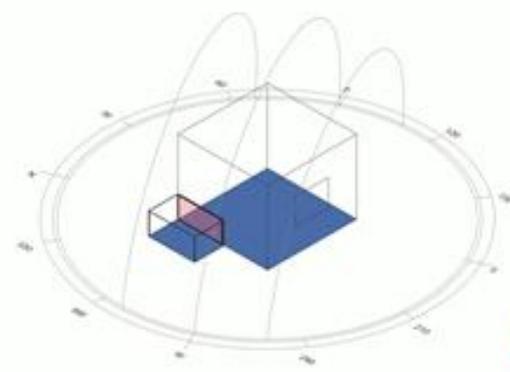
Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation



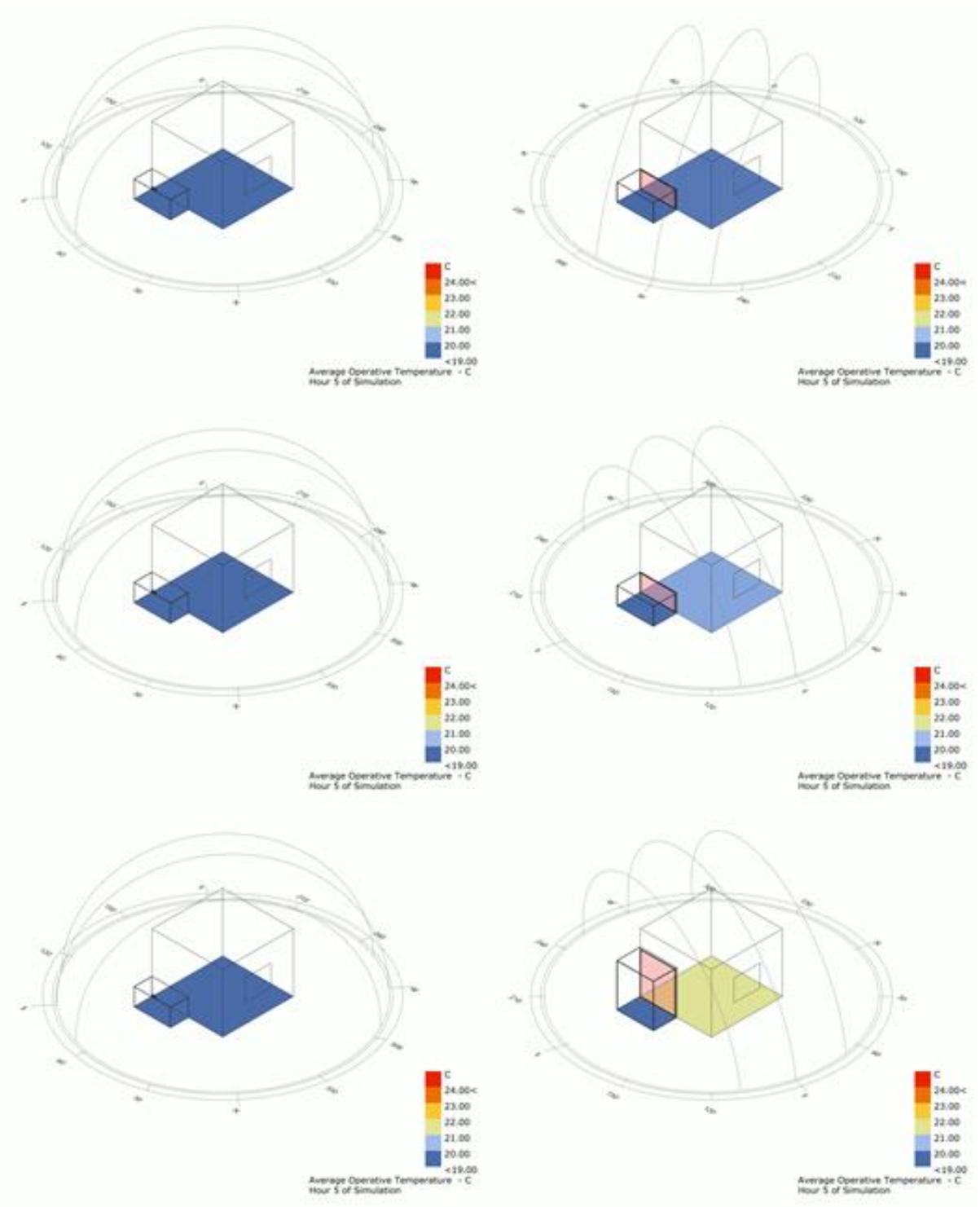
Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation

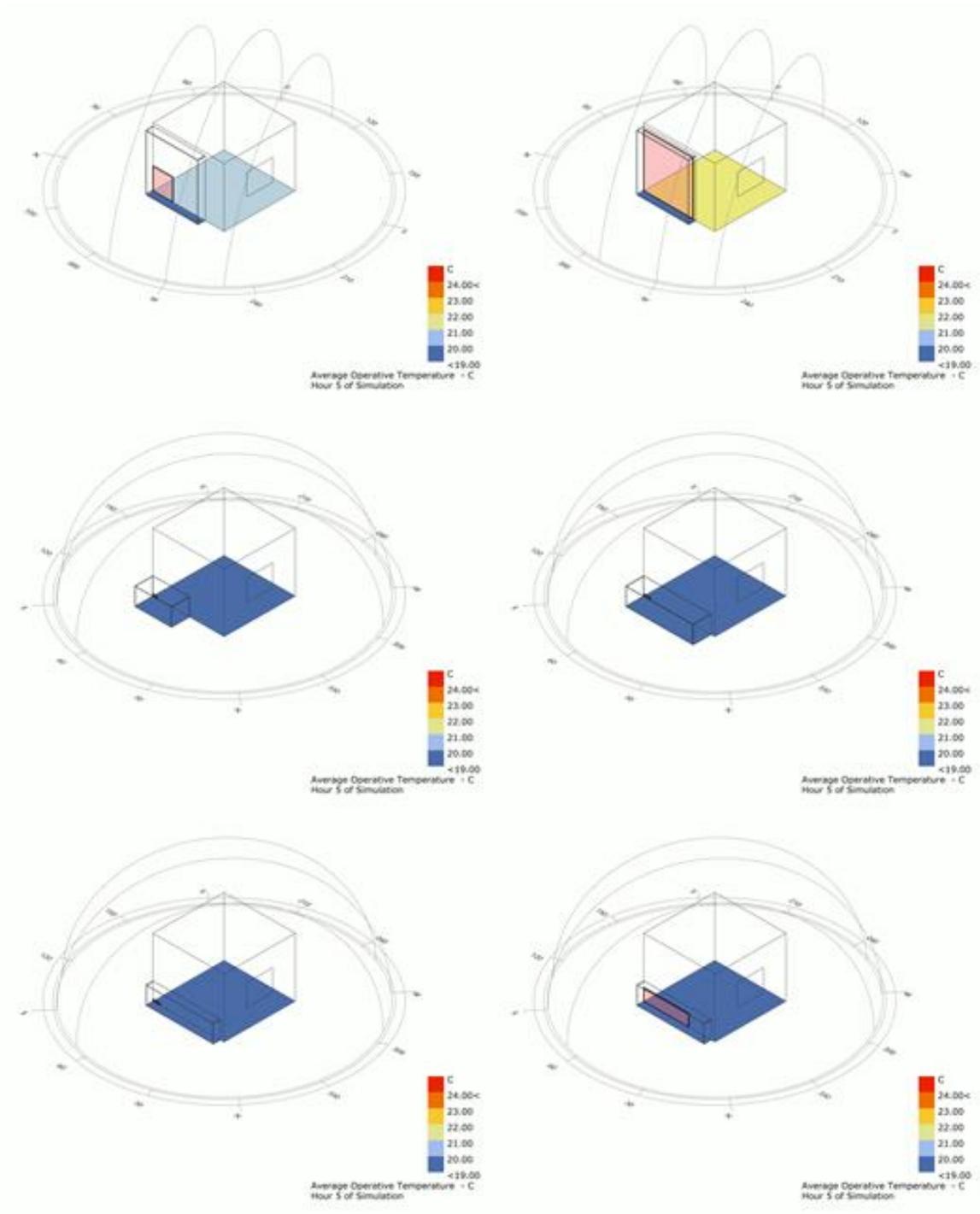


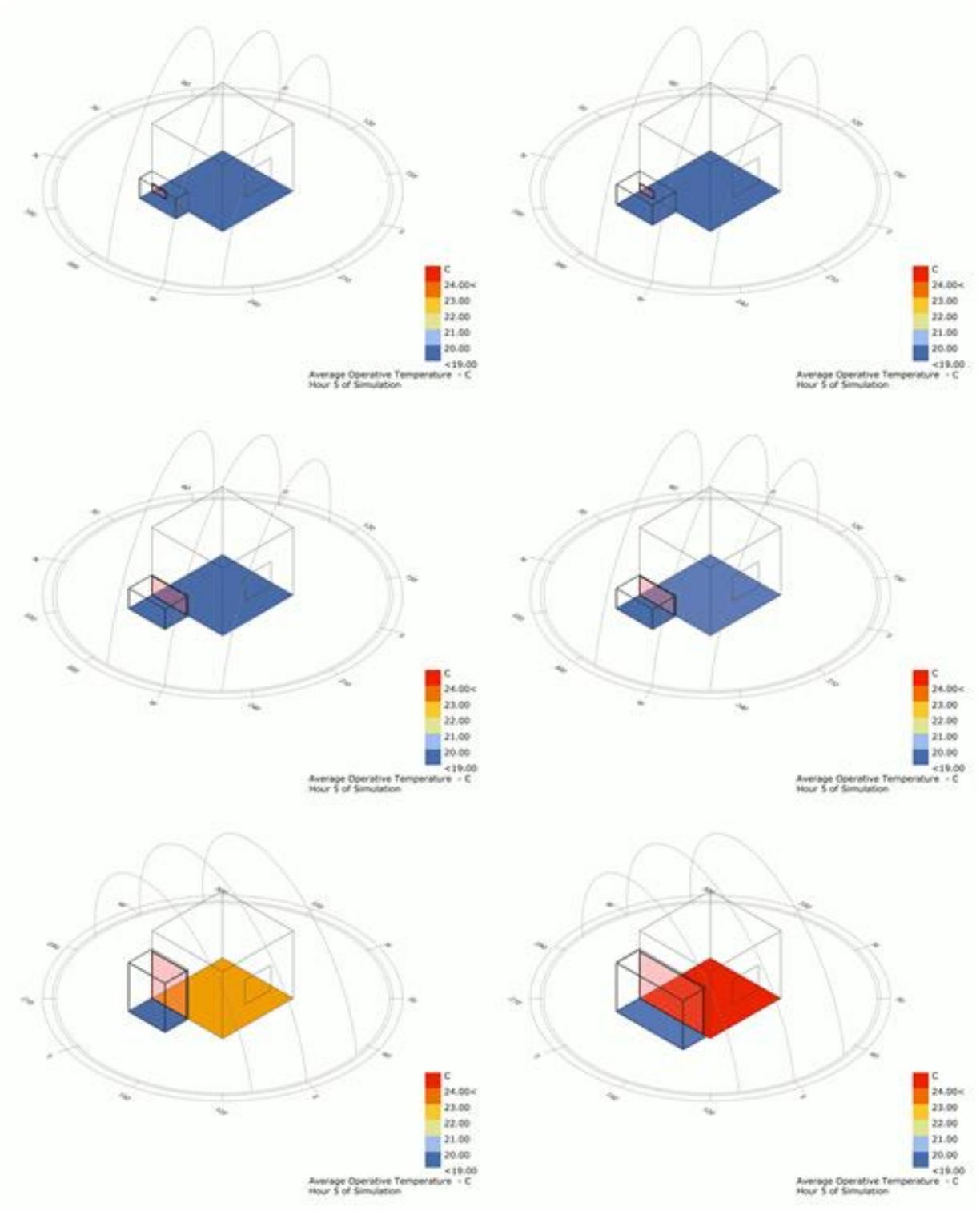
Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation

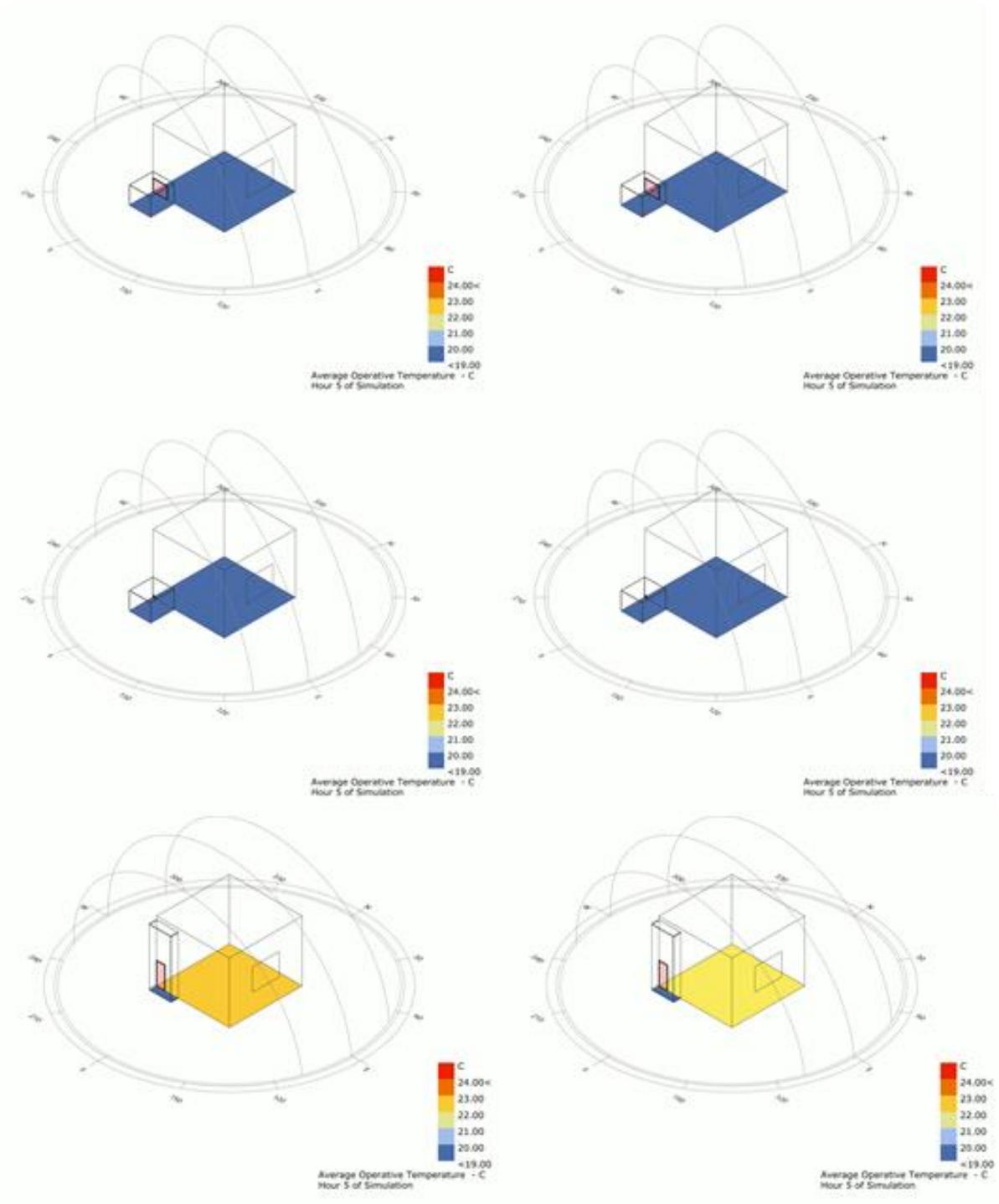


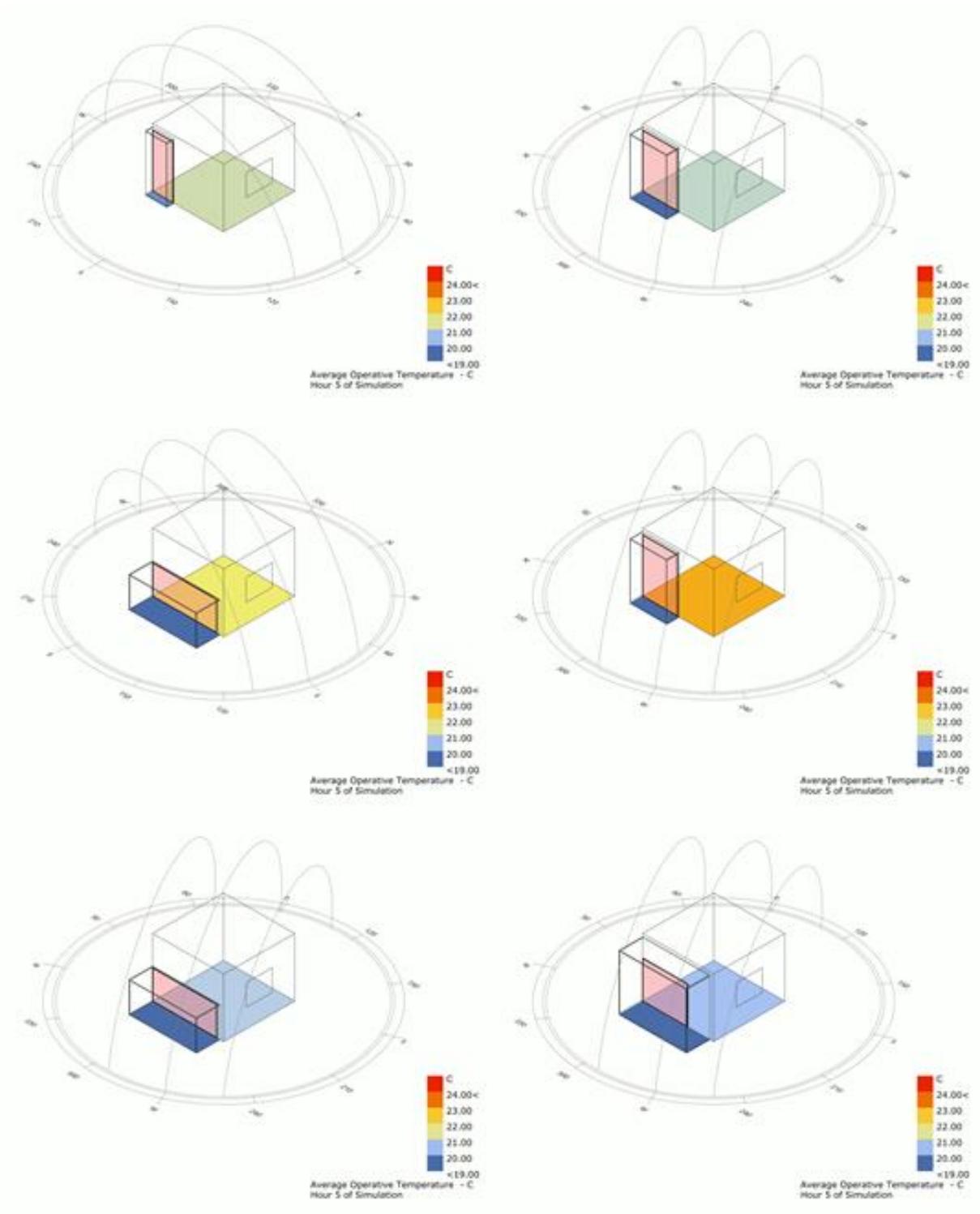
Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation

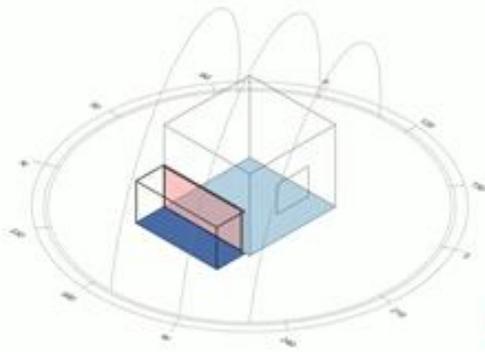




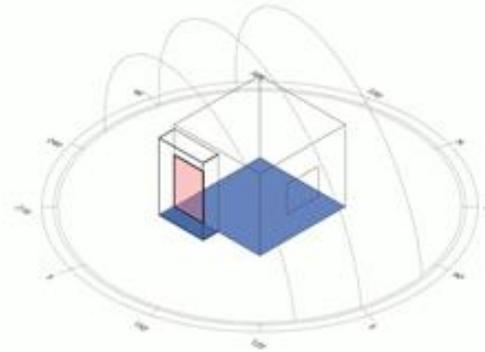




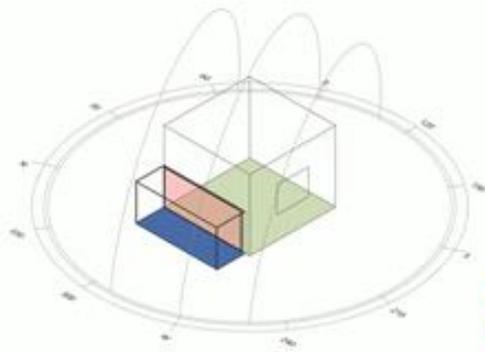




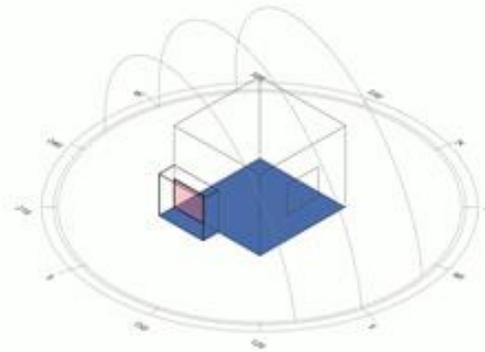
Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation



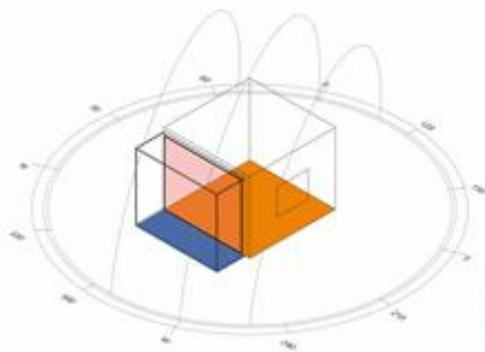
Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation



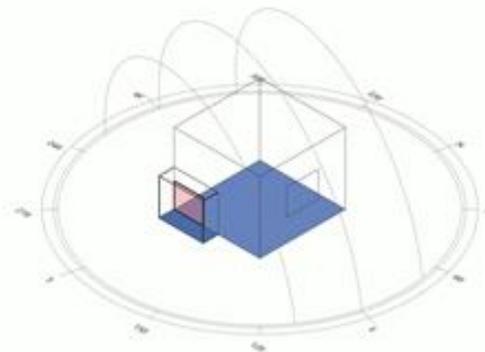
Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation



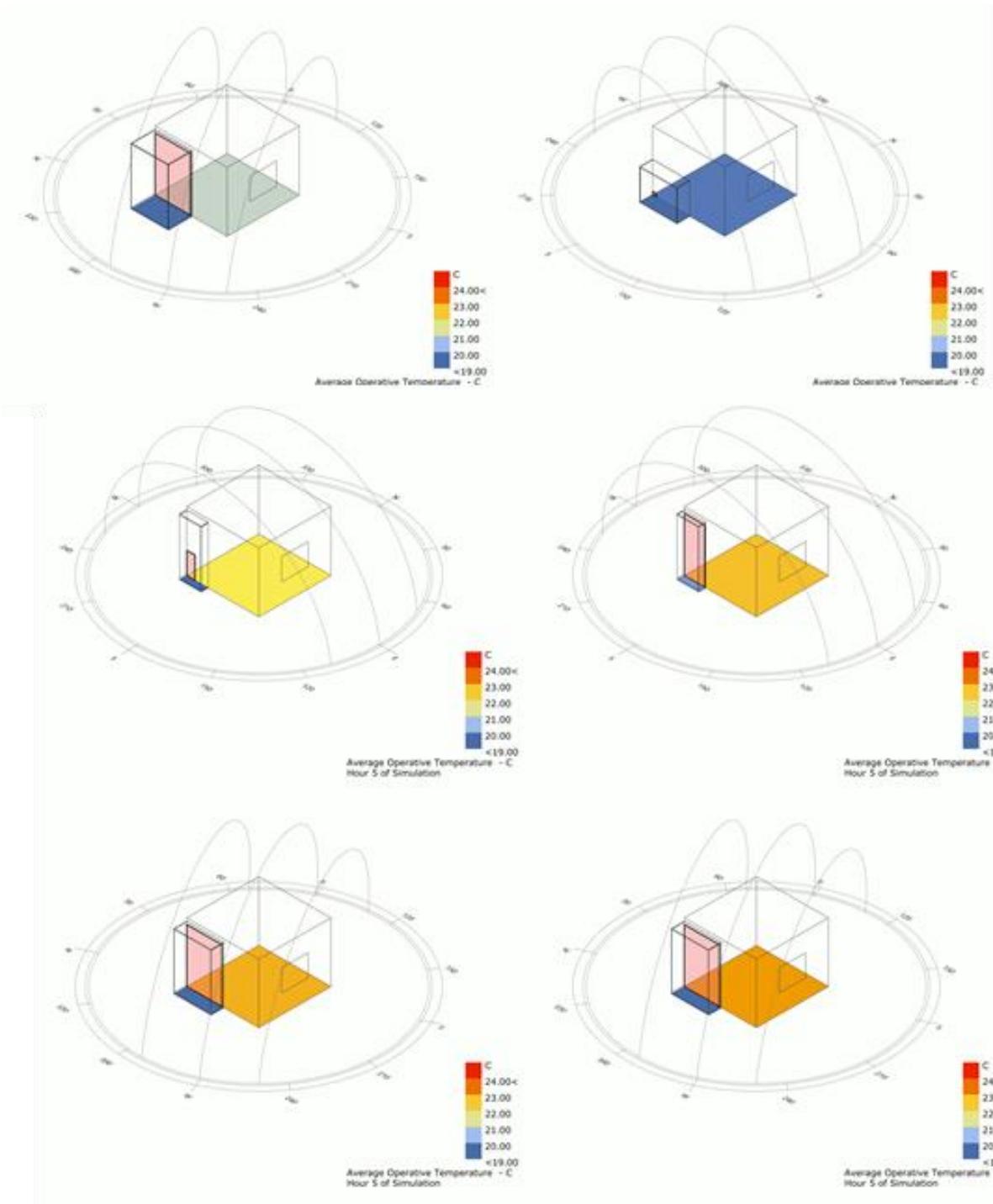
Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation

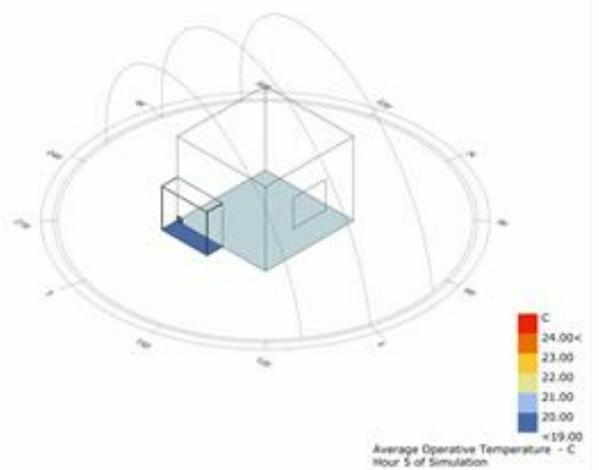
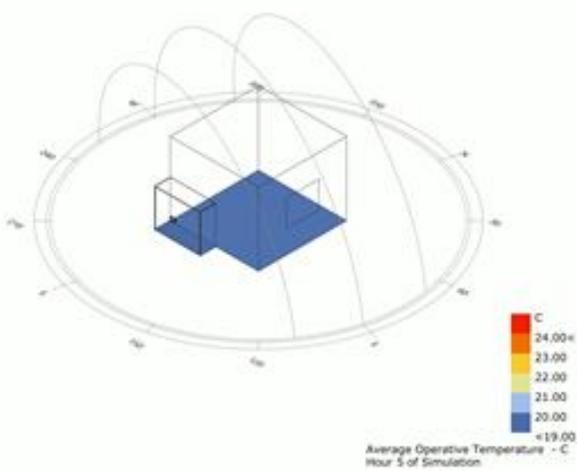
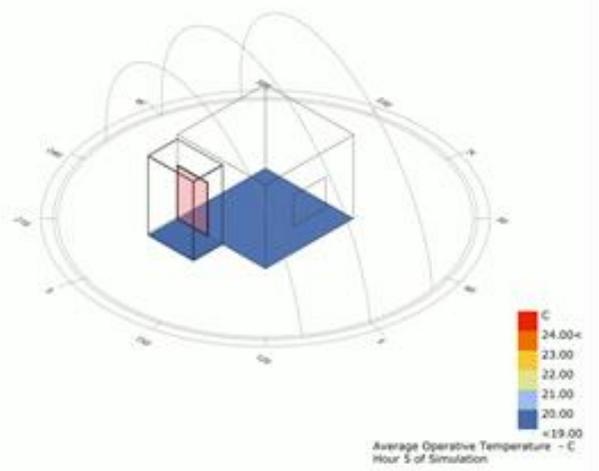
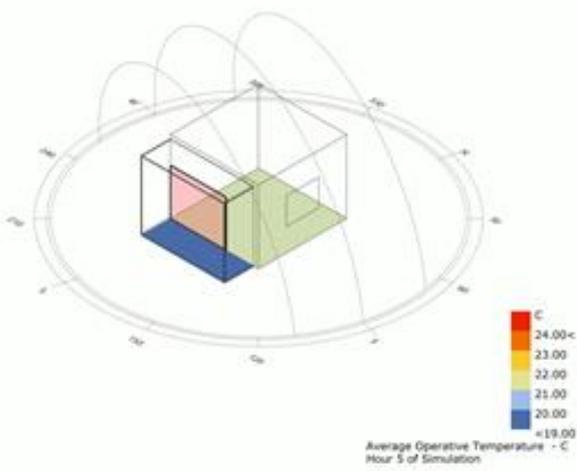
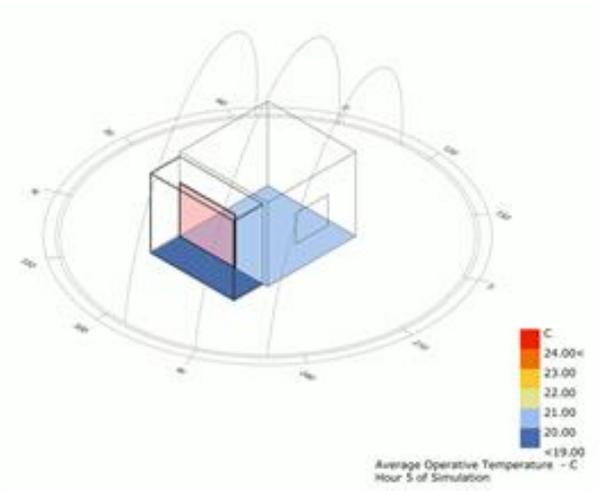
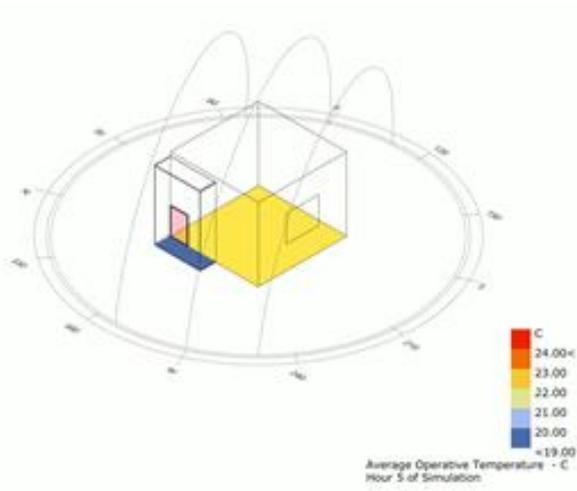


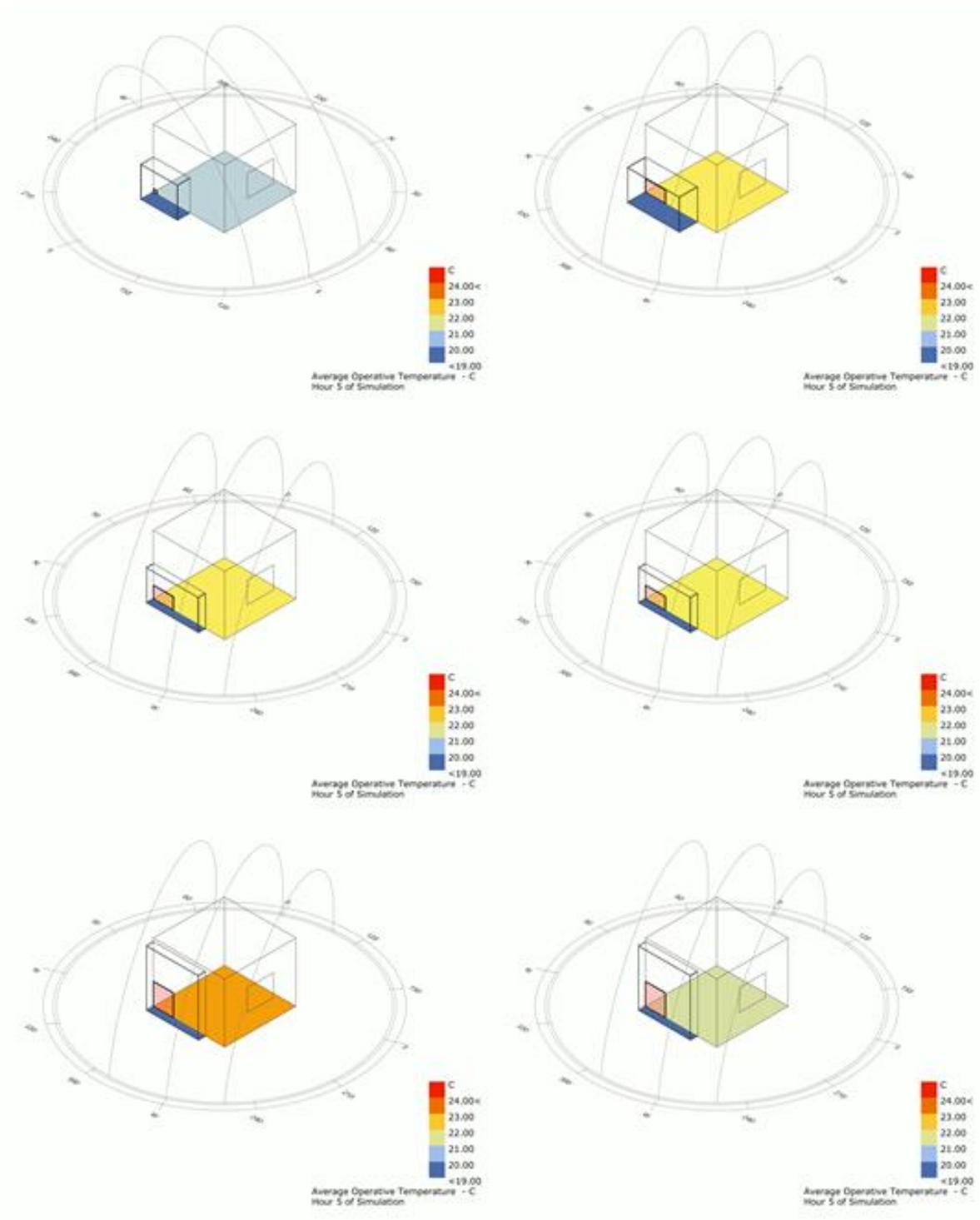
Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation

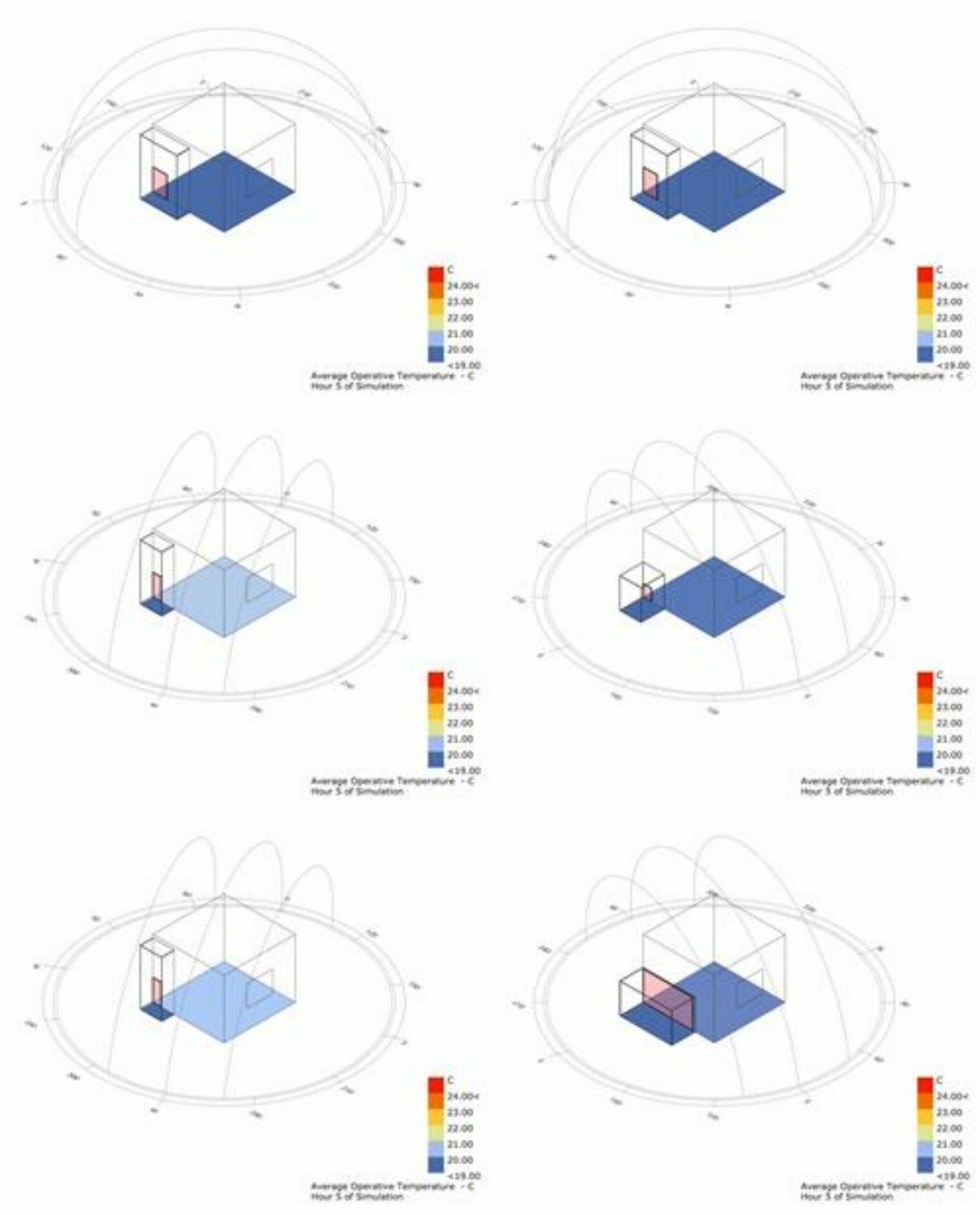


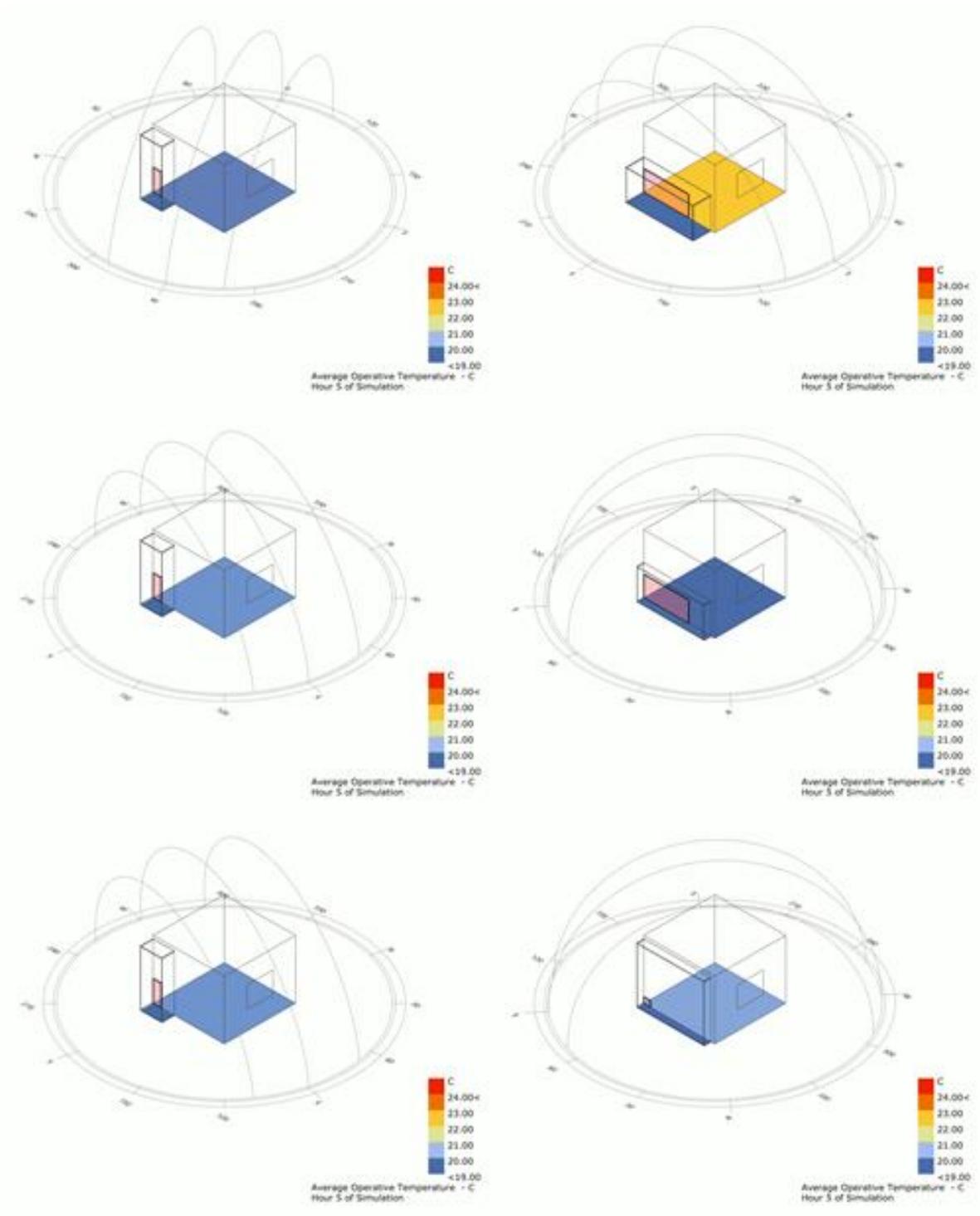
Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation

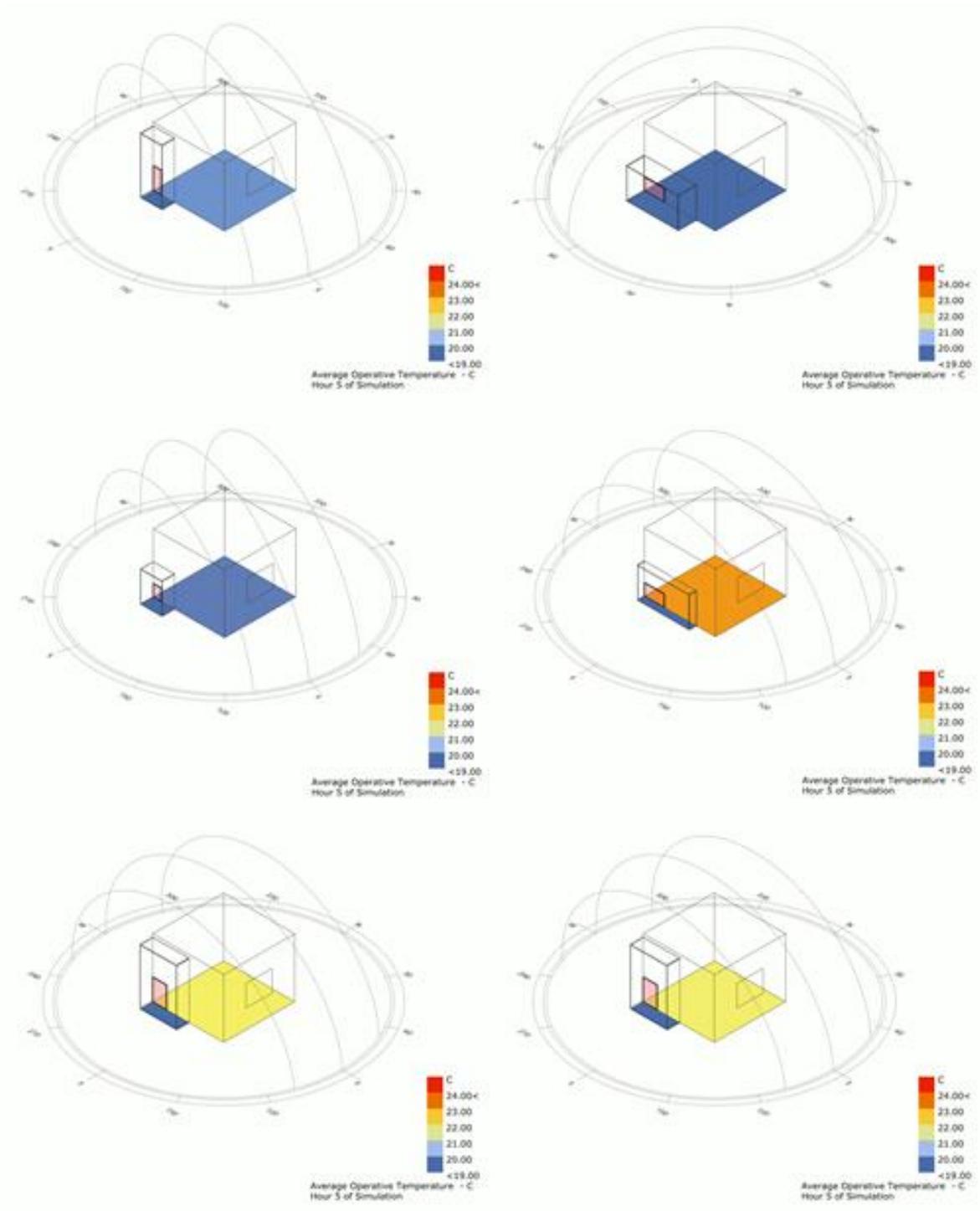


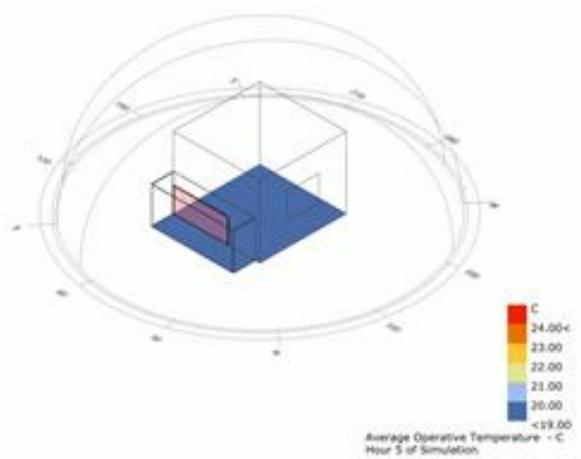
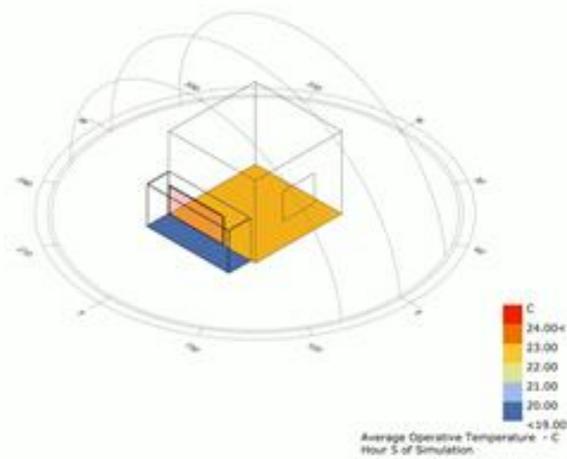
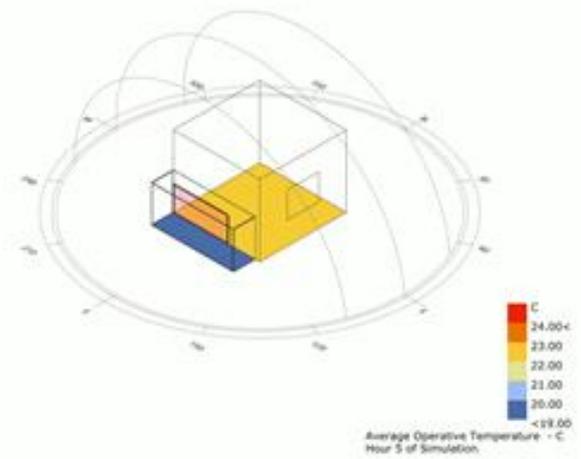
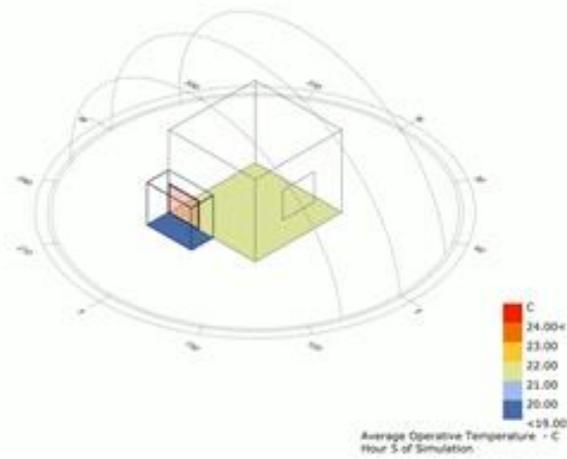
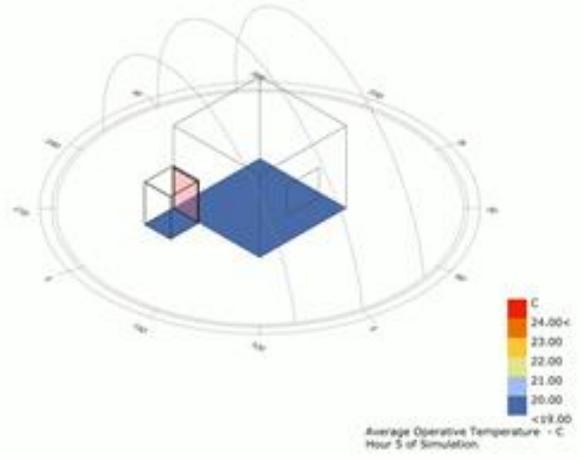
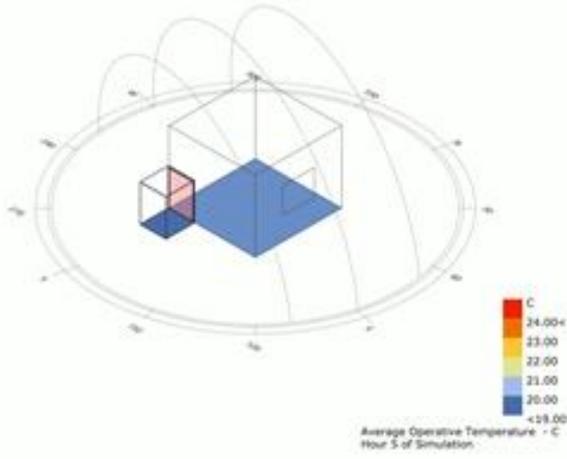


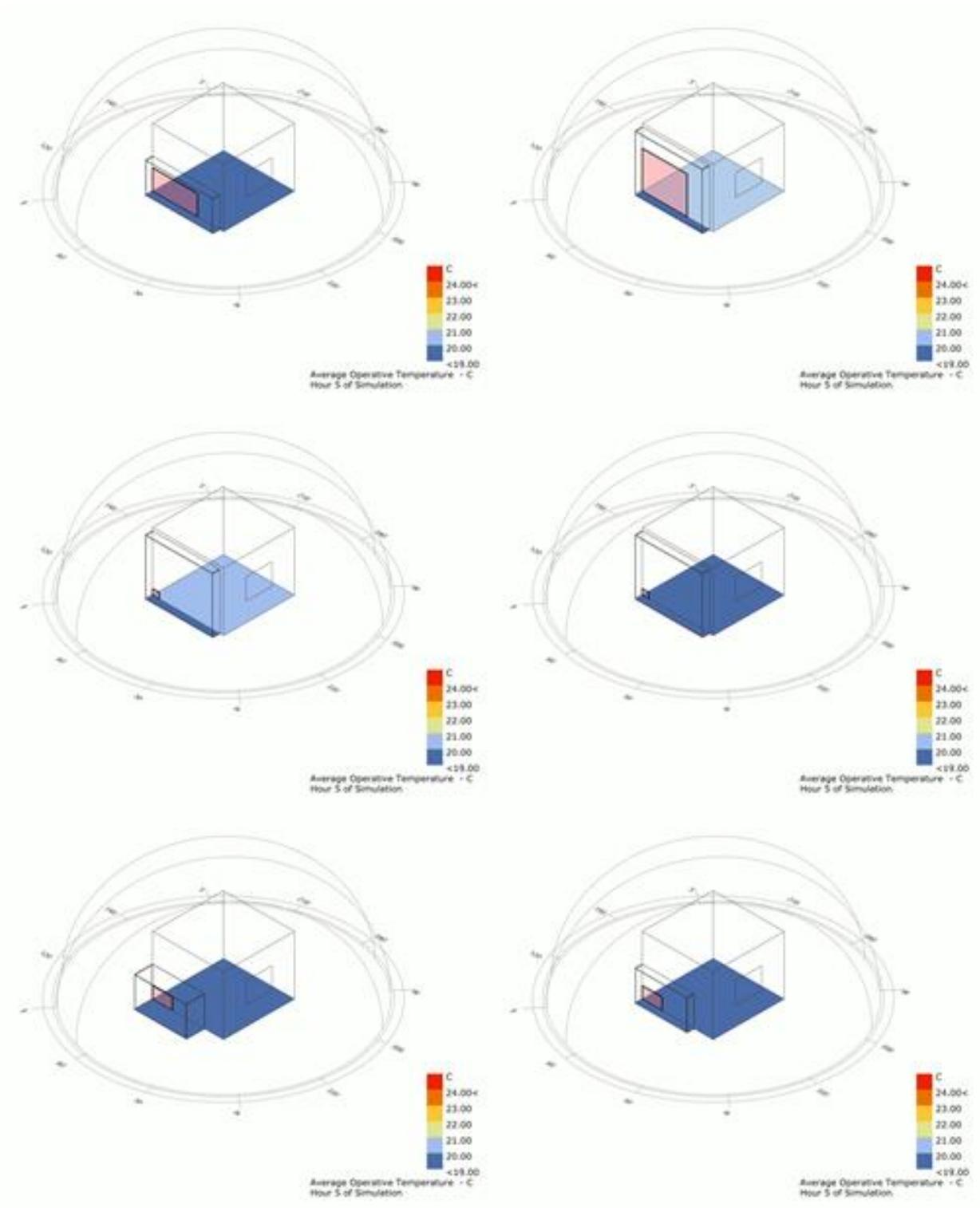


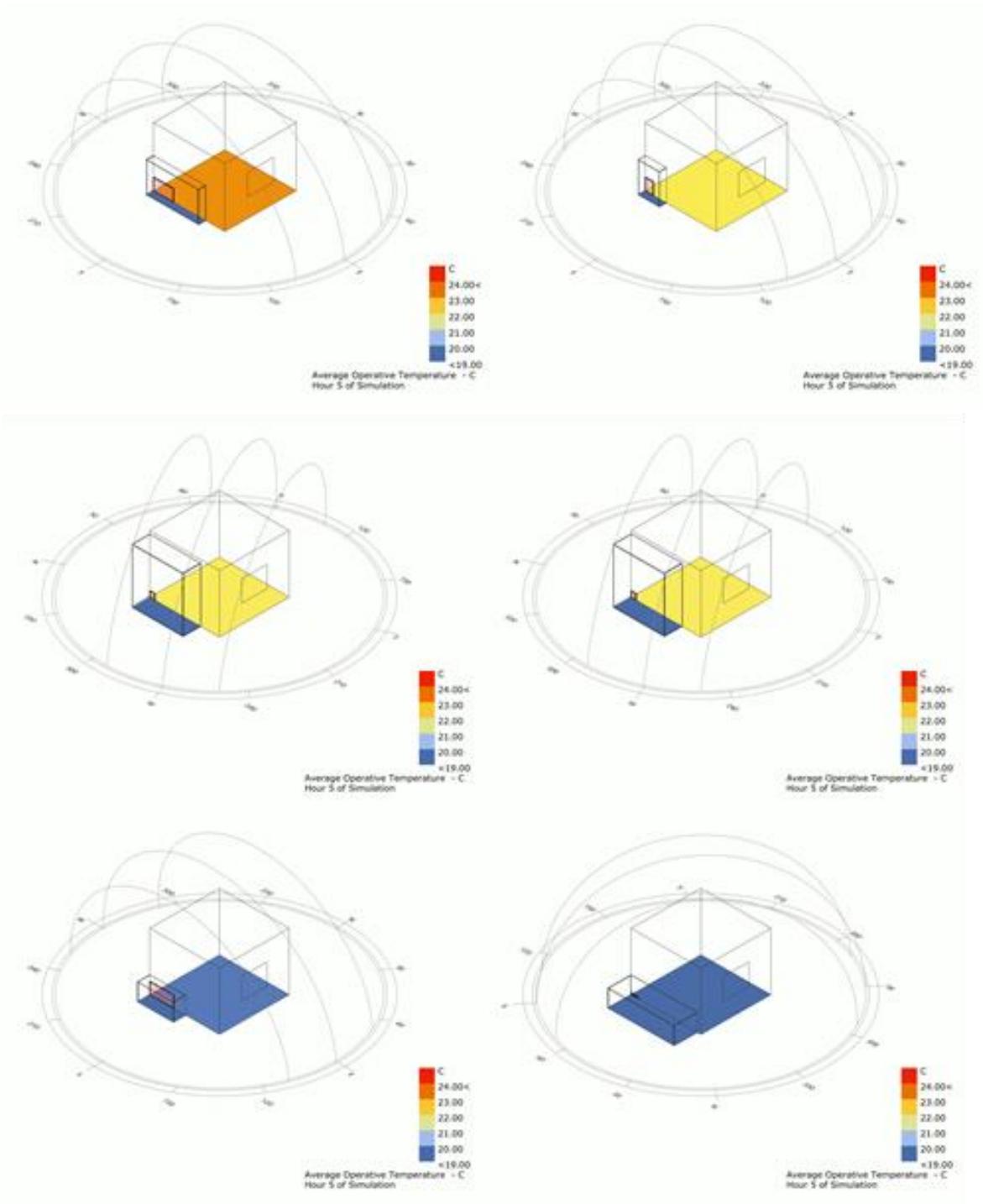


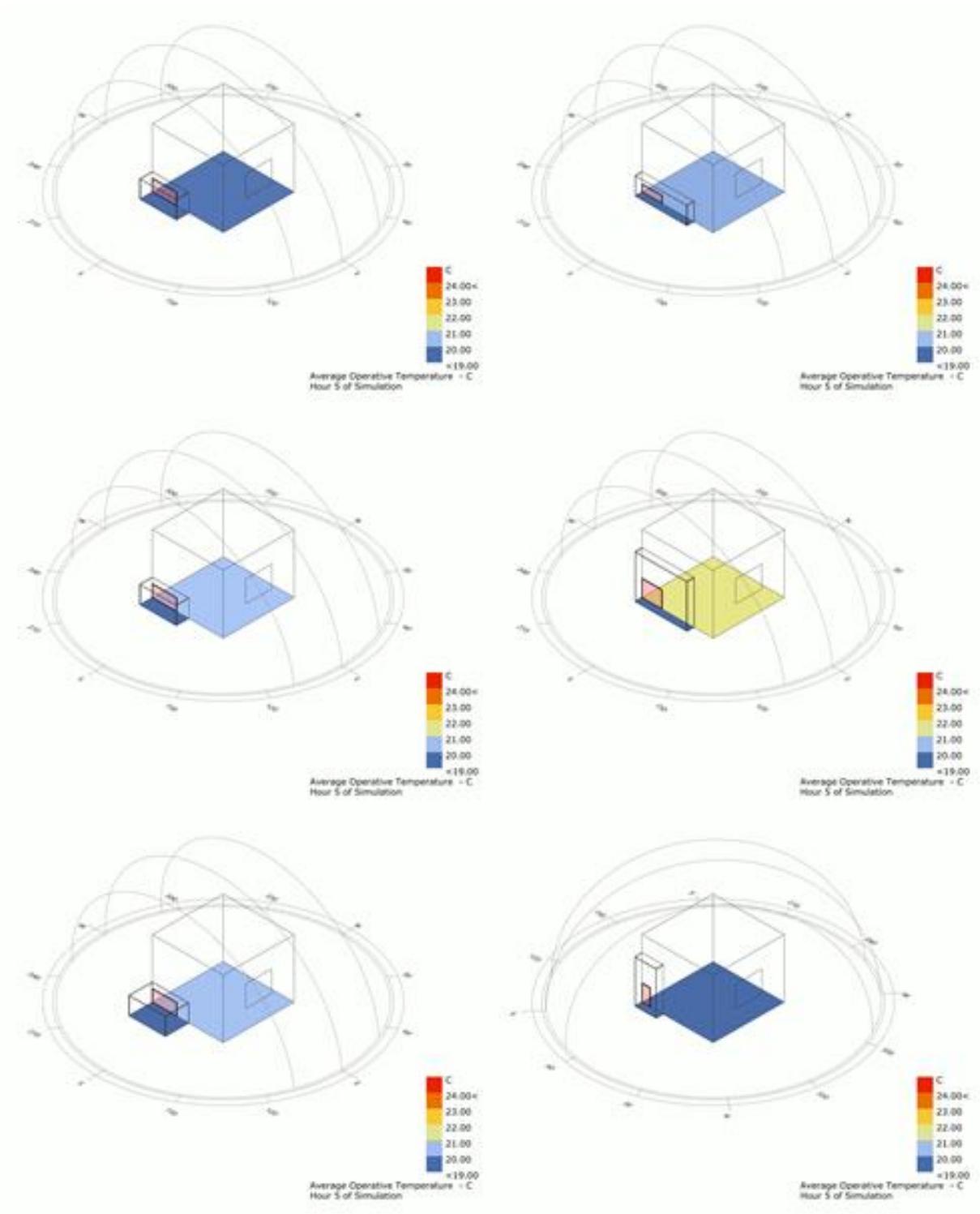


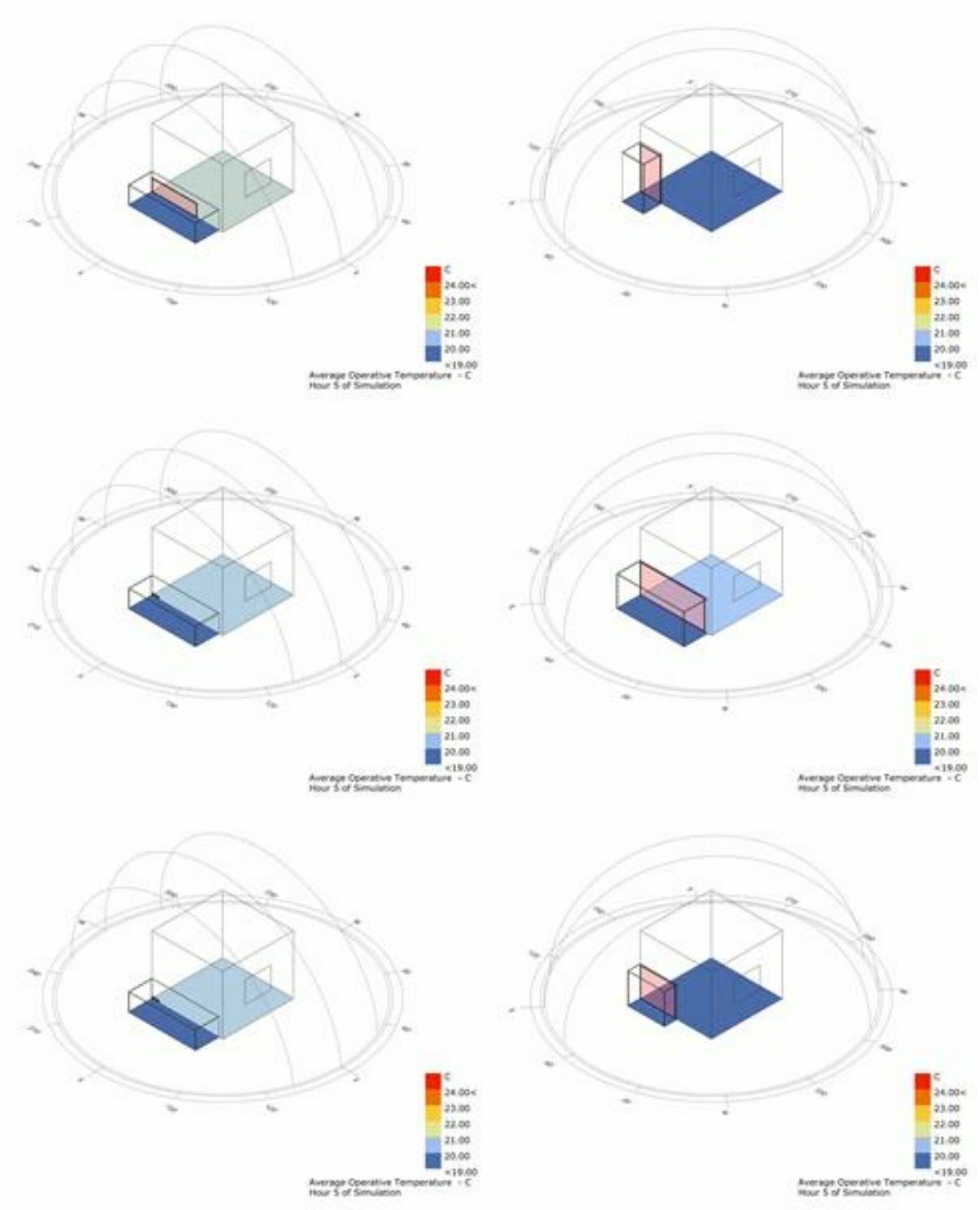


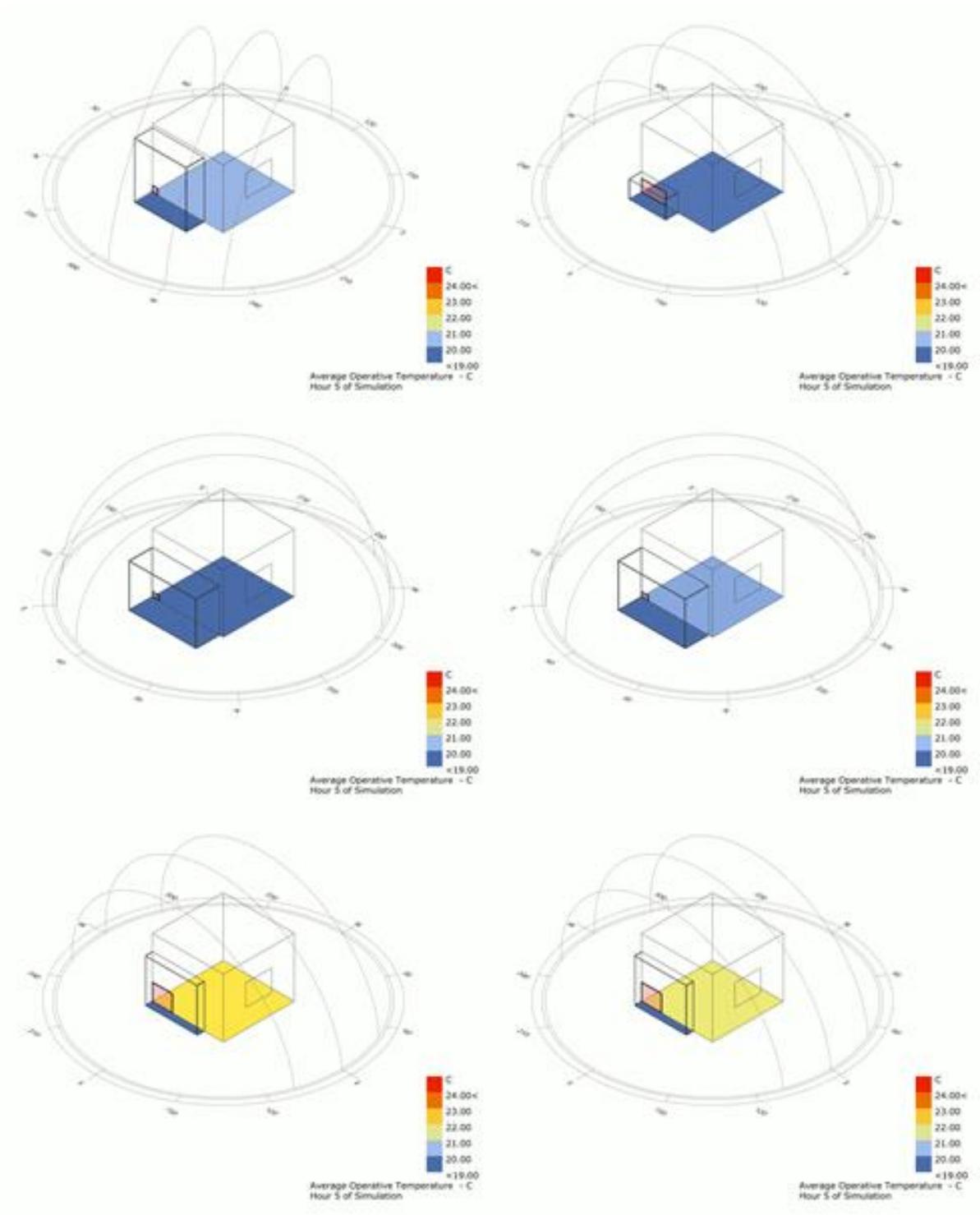


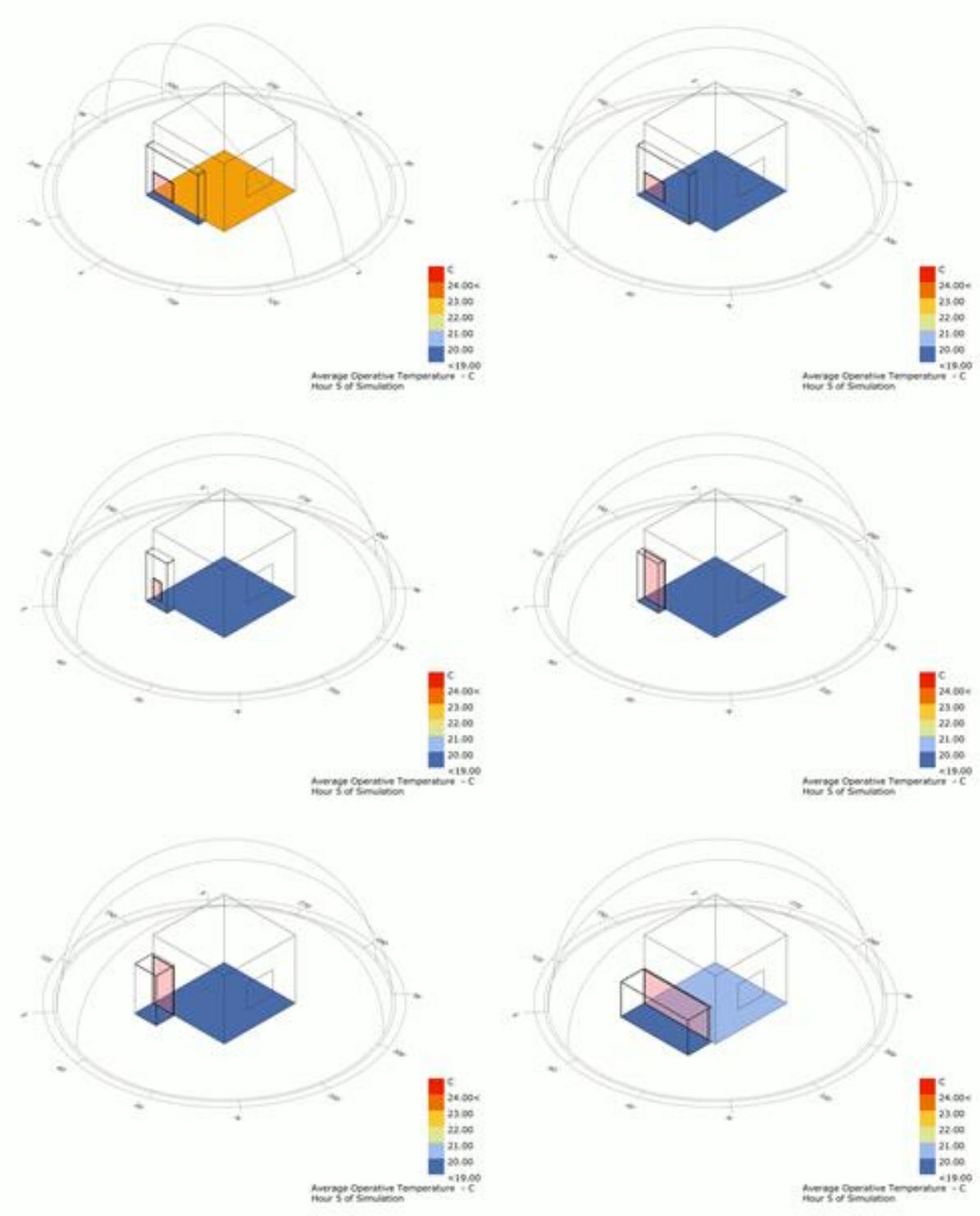


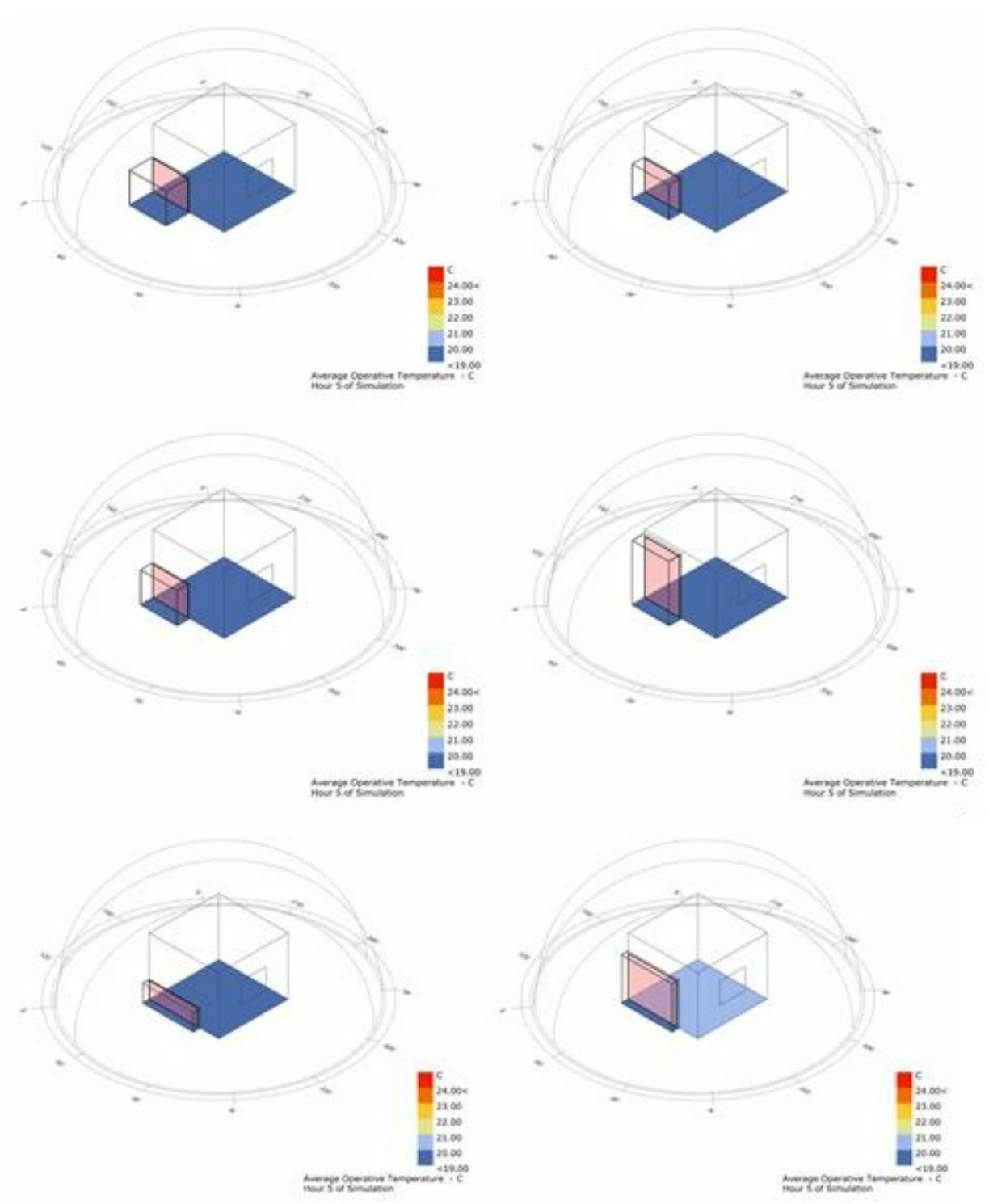


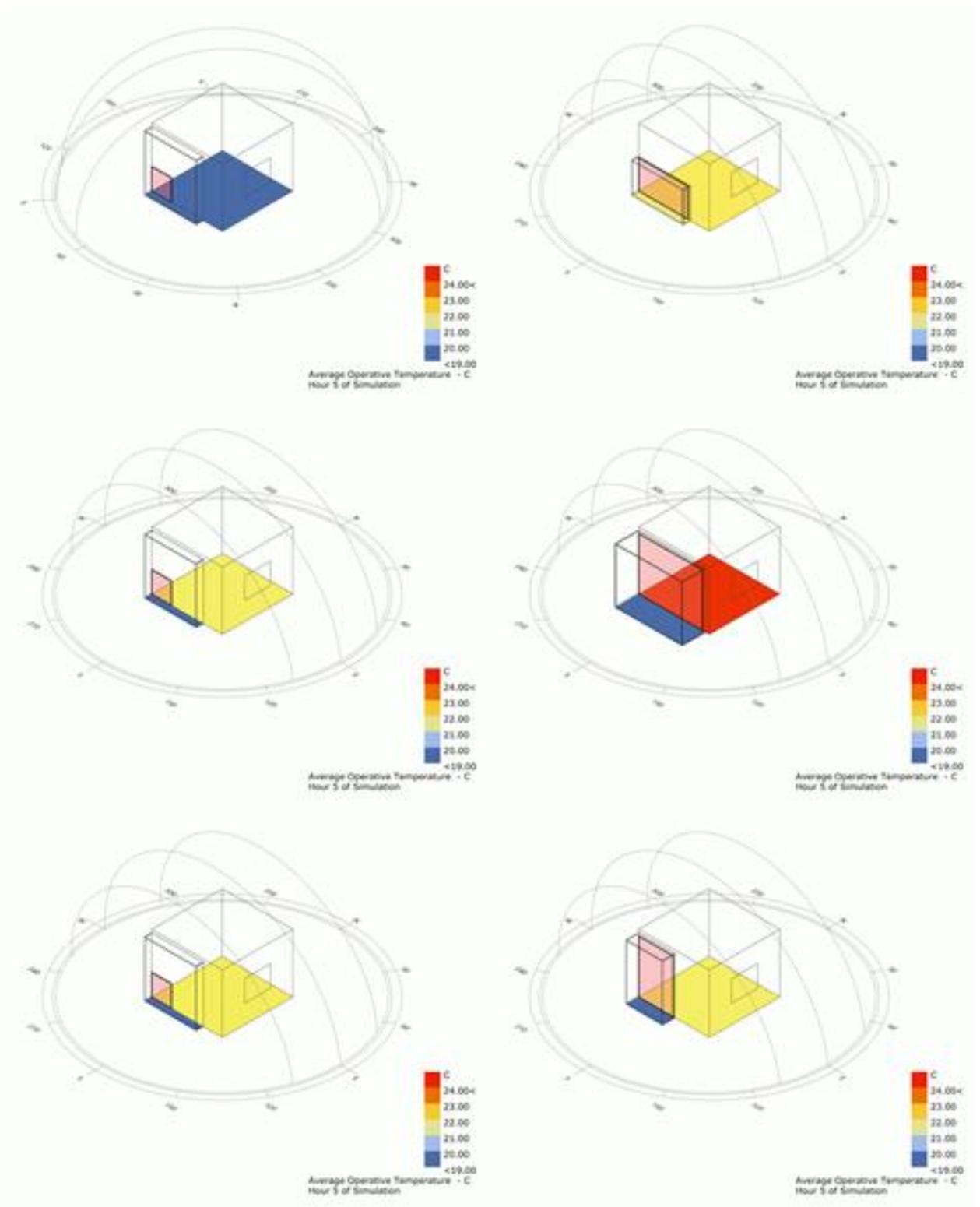


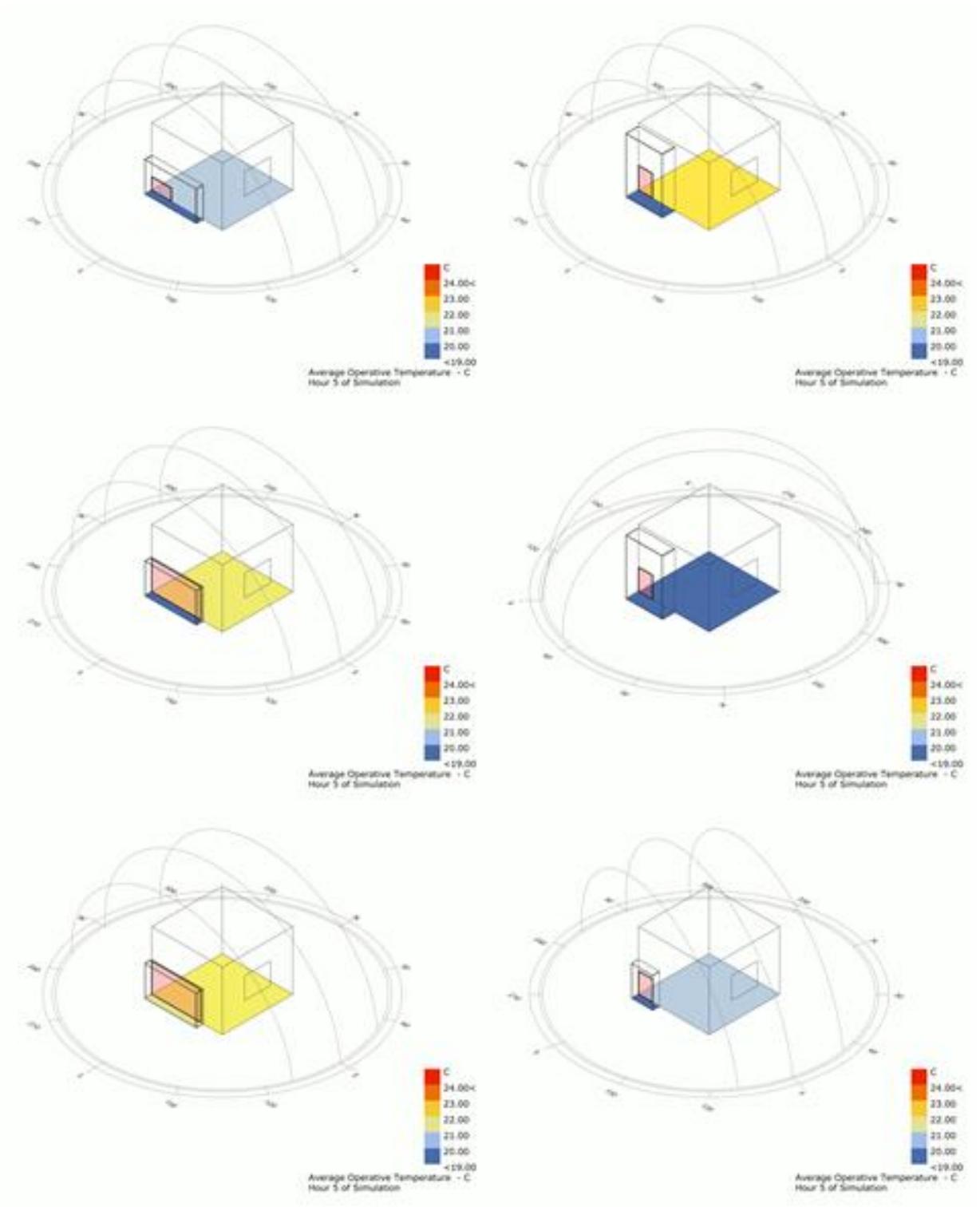


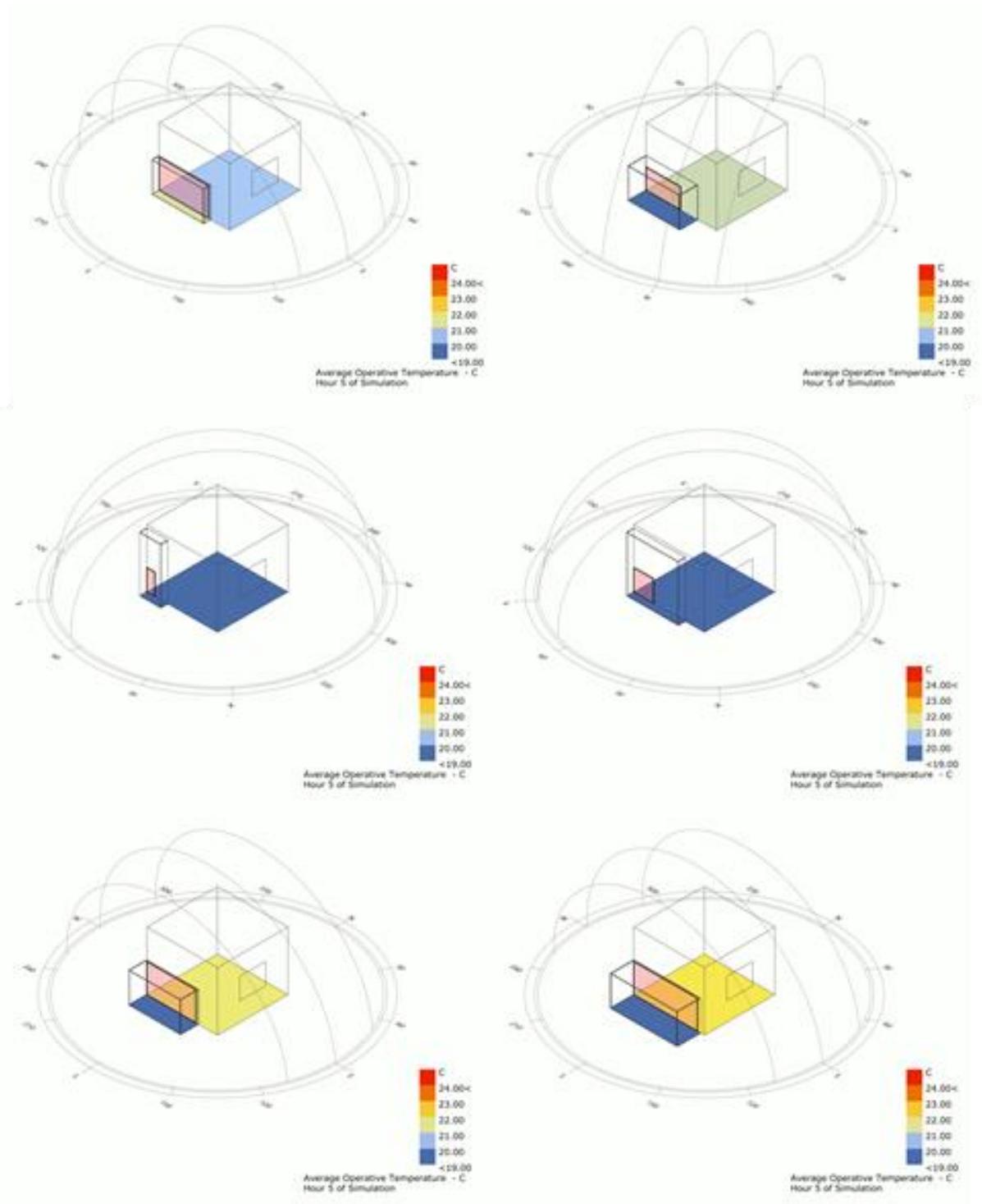


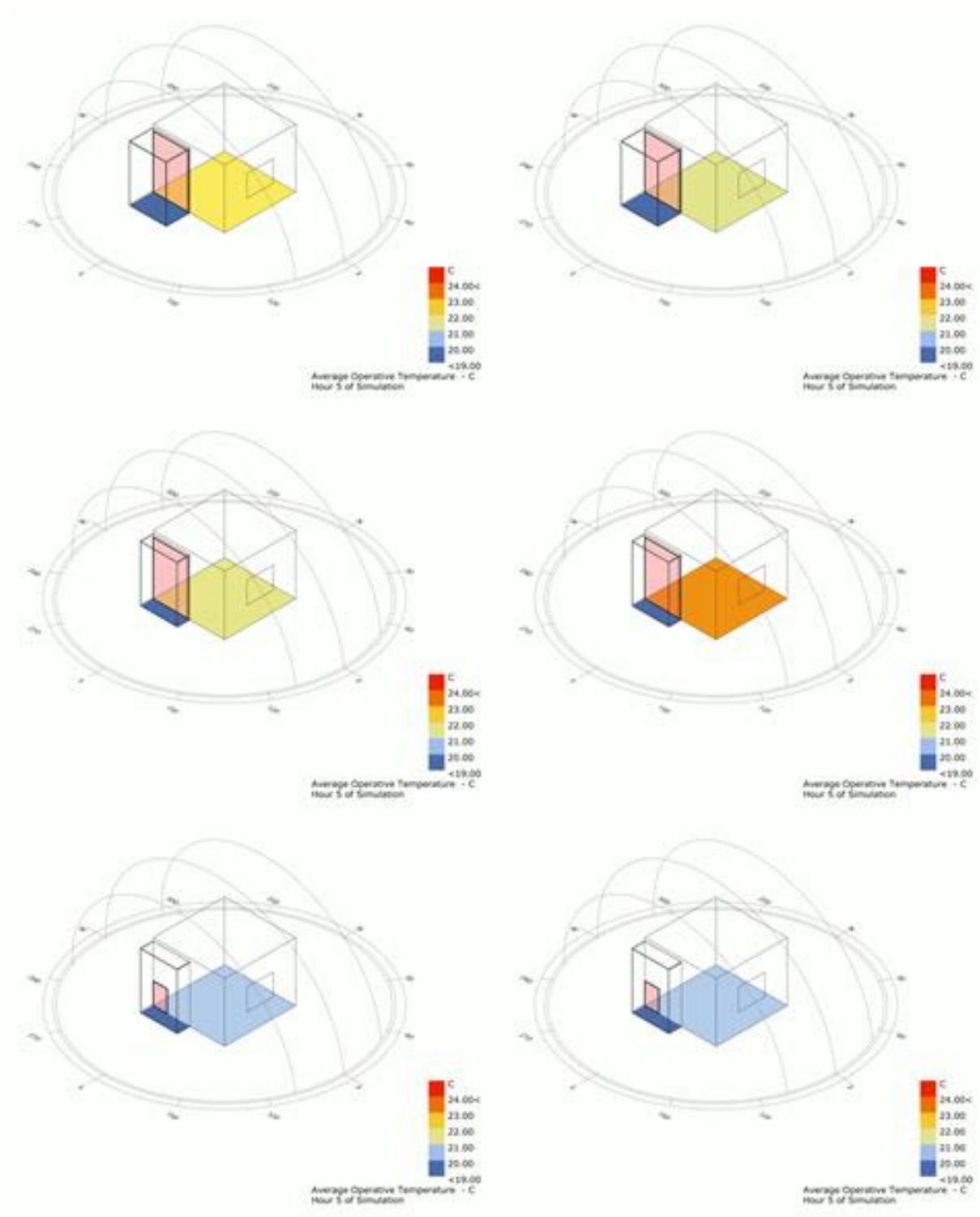


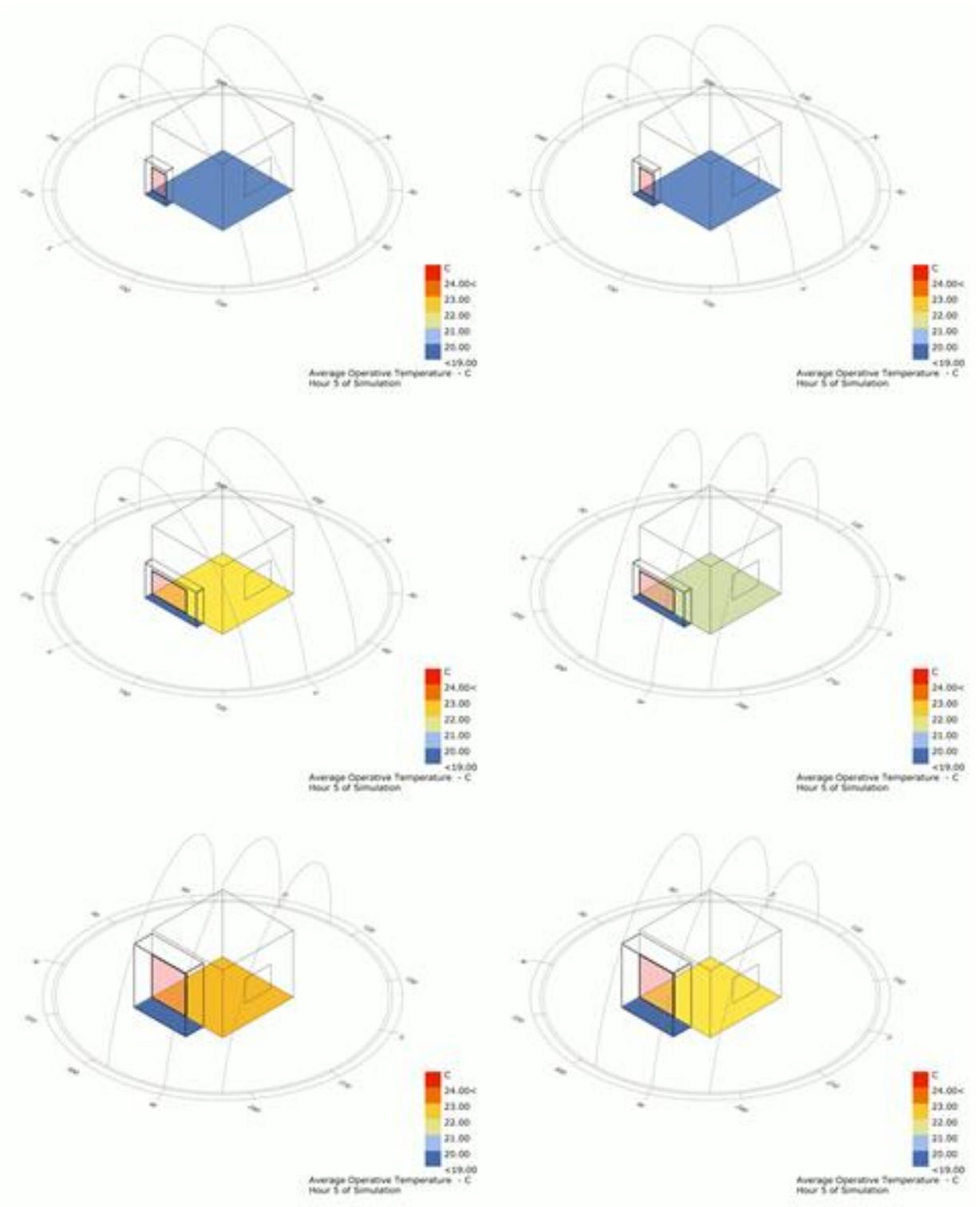


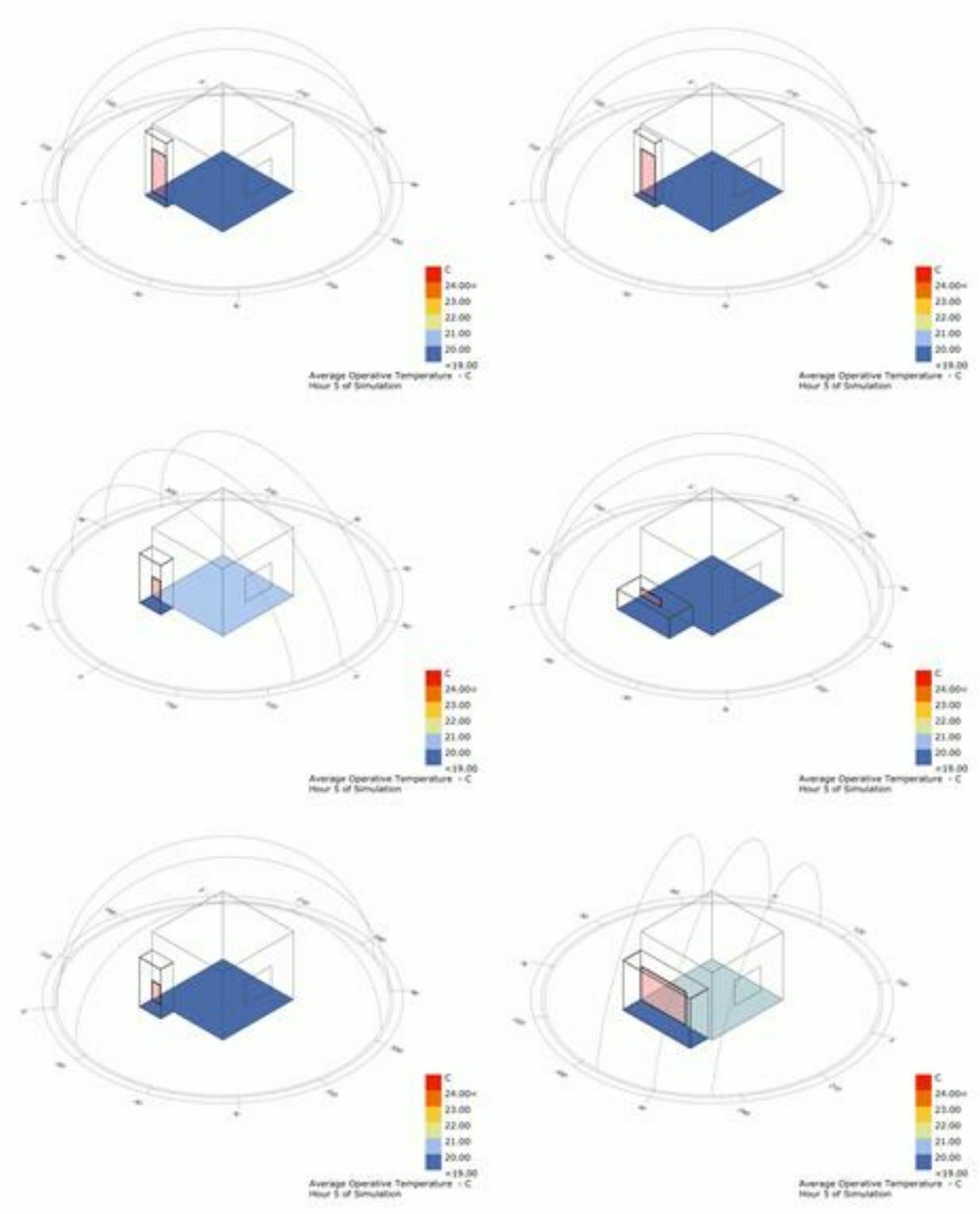


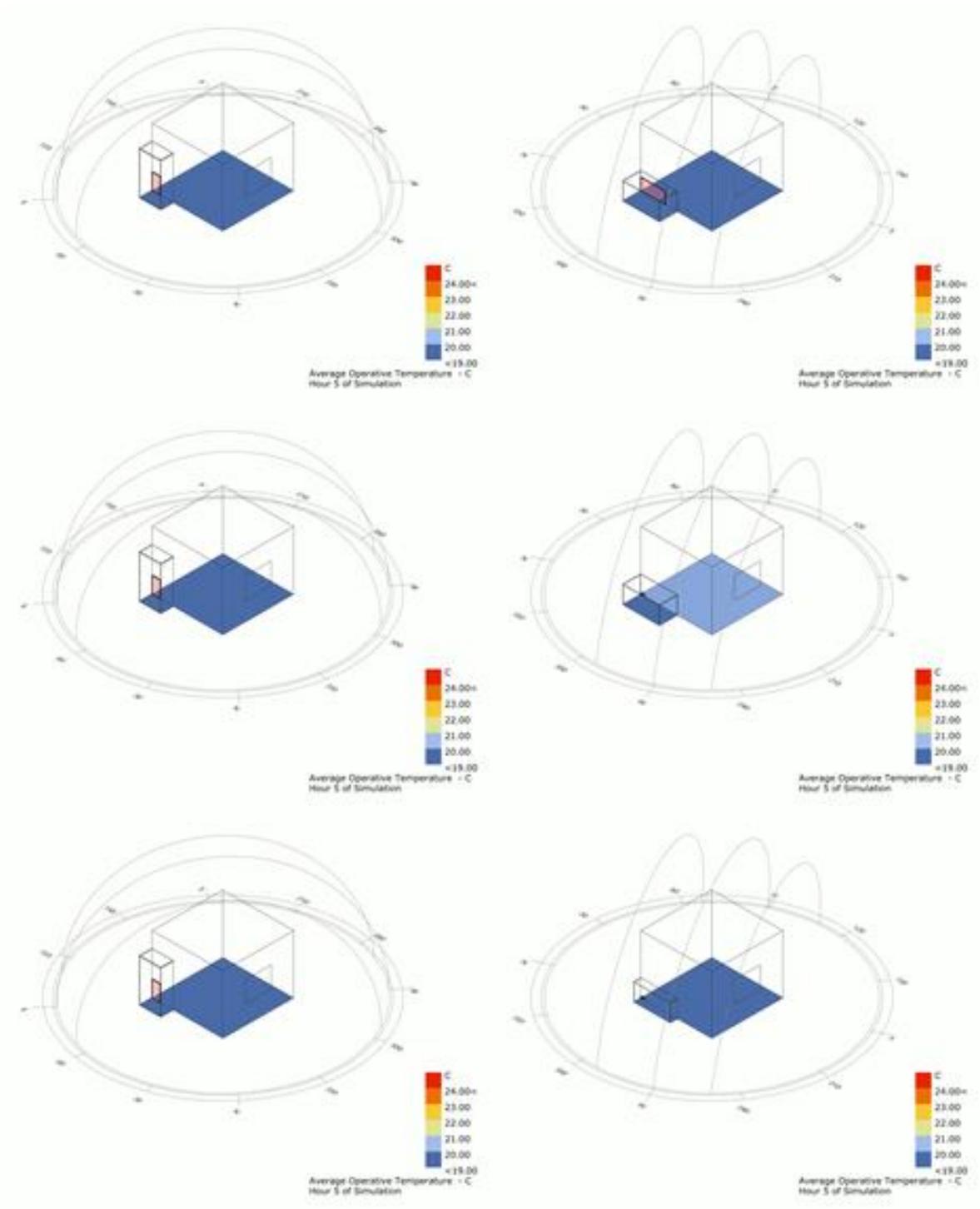


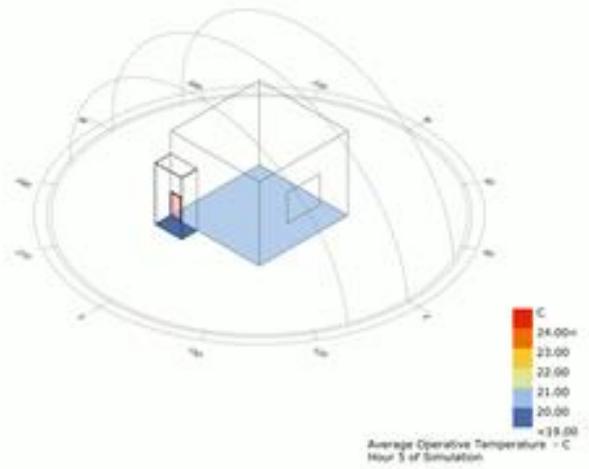
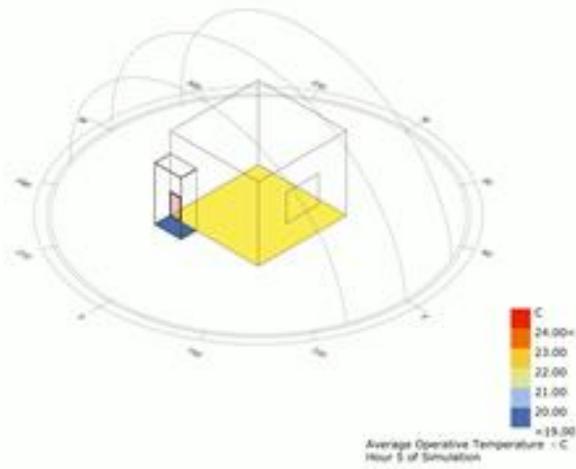
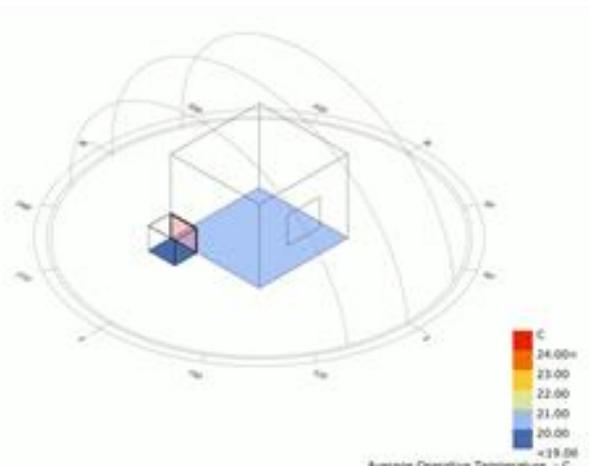
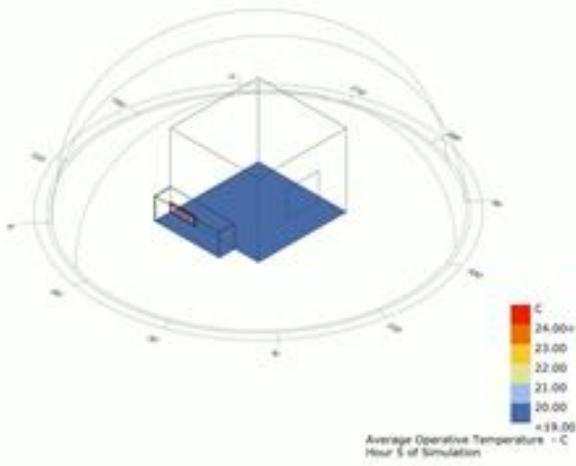
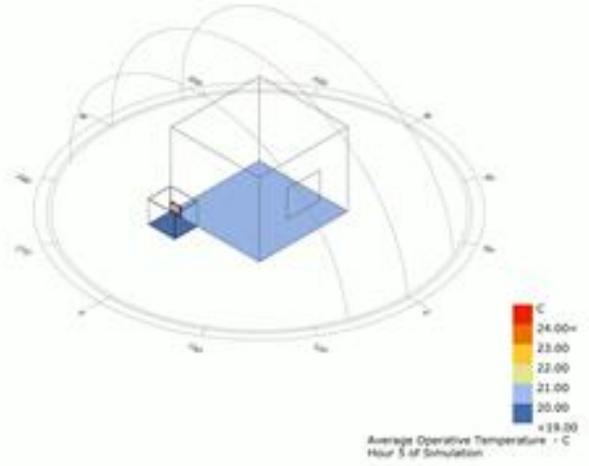
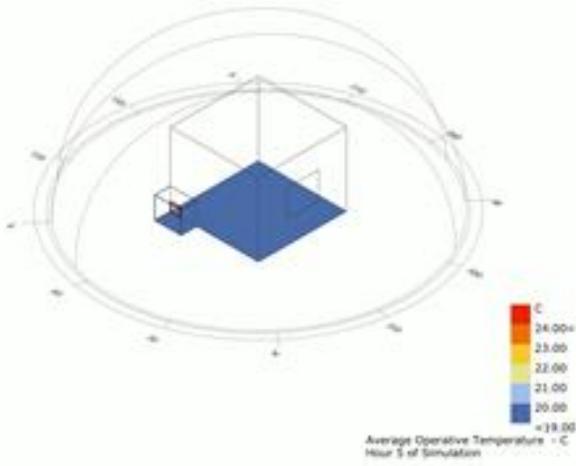


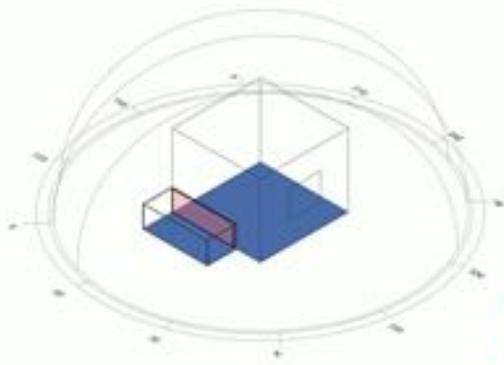




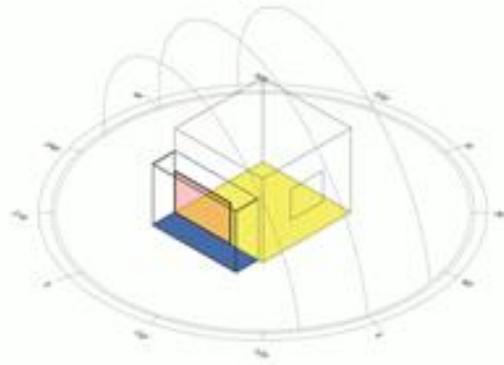




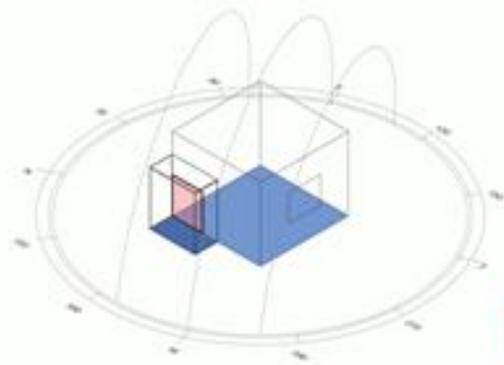




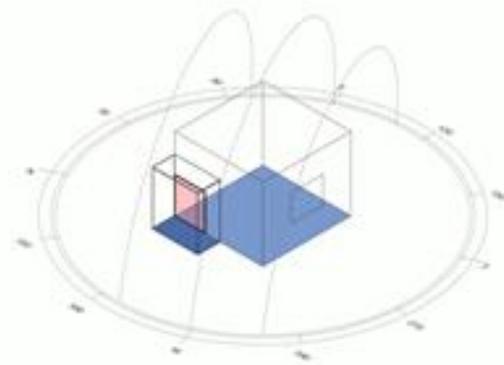
Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation



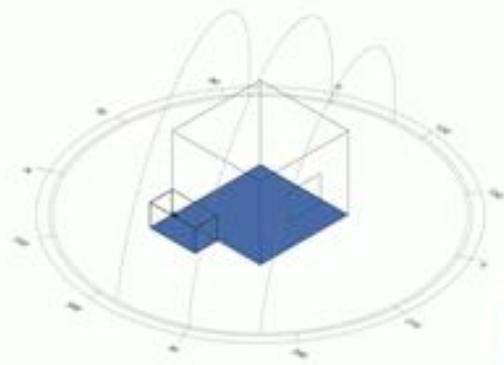
Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation



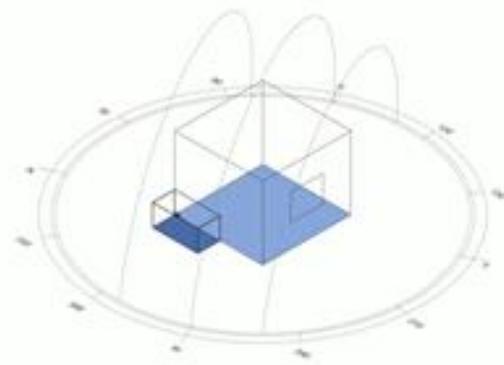
Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation



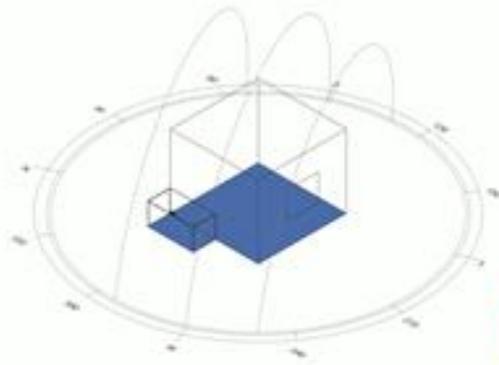
Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation



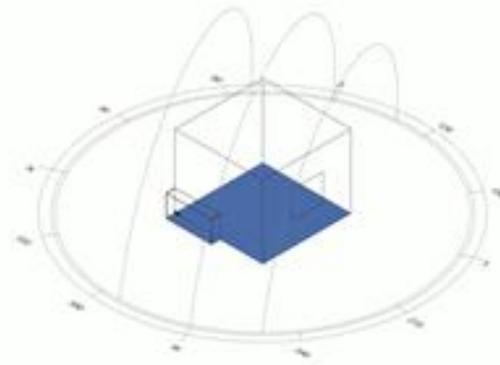
Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation



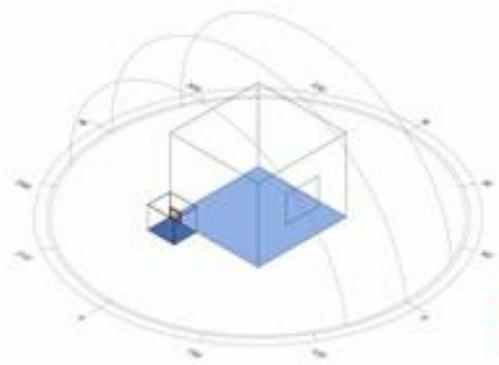
Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation



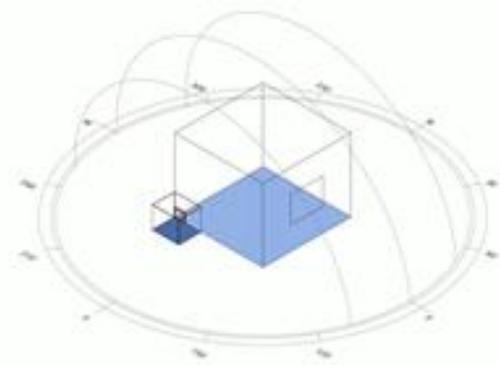
Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation



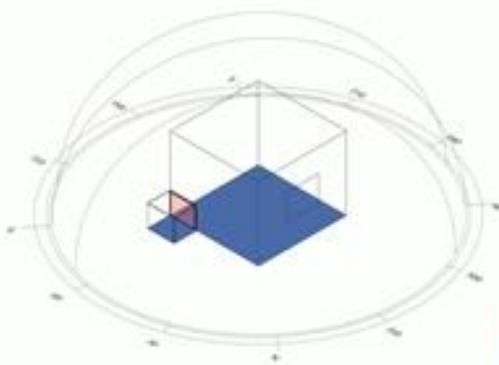
Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation



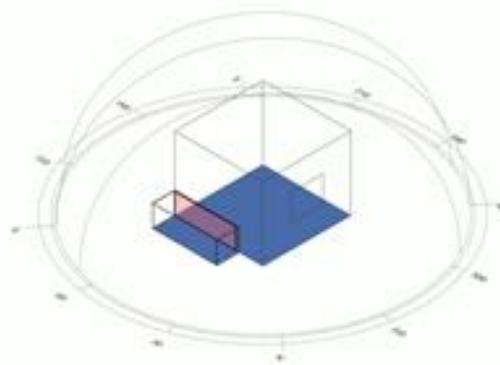
Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation



Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation



Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation



Average Operative Temperature - C  
Hour 5 of Simulation

