

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Arquitectura y Urbanismo

Carrera de Arquitectura

Propuesta de una Fachada Adaptativa mediante programación en Rhino y Grasshopper para la Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca

Trabajo de titulación previa a la obtención del título de Arquitecto

Autores:

Marco Andrés Álvarez Bonilla

Víctor Edmundo Guerrero Coronel

Director:

Francisco Elías Valdez Apolo

ORCID:  0000-0001-9853-2811

Cuenca, Ecuador

2023-04-04



Universidad de Cuenca

Facultad de Arquitectura y Urbanismo

Carrera de Arquitectura

Propuesta de una Fachada Adaptativa mediante programación en Rhino y Grasshopper para la Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca

Trabajo de titulación previa a la obtención del título de Arquitecto

Autor:

Marco Andrés Álvarez Bonilla
Víctor Edmundo Guerrero Coronel

Director:

Francisco Elías Valdez Apolo
ORCID: 0000-0001-9853-2811

Cuenca, Ecuador

2023-04-04

Resumen

En la Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca la falta de confort térmico y lumínico provoca en el ocupante fatiga visual, dolores de cabeza, irritabilidad, entre otros. Lo expuesto anteriormente es a causa del diseño de la fachada, visto que no solo es un elemento que separa el interior del exterior, sino también un componente que interacciona con el exterior. Frente a esta problemática, las fachadas estáticas no son una respuesta óptima para brindar dicho confort. No obstante, las fachadas móviles tras varios estudios se ha visto que aumentan el grado de confort. Por consiguiente, esta investigación aborda una propuesta de fachada cinética respondiente. La fachada cinética consigue ser un elemento que se relaciona directamente con el clima exterior, para adaptarse a las necesidades dependiendo de la exigencia de las condiciones interior y exterior. En este trabajo se utiliza un enfoque metodológico cuantitativo, en el cual se analizan a breves rasgos tres referentes pertinentes al clima en que se ubica la construcción, esto con la finalidad de tener bases para una solución. Resultado que se obtiene a través de la parametrización mediante las simulaciones y la construcción de una maqueta a escala 1:10. Todo esto apoyado con el software Rhino-Grasshopper y el micro-controlador Arduino. Para terminar, la comparativa entre la fachada actual con la propuesta evidencia la notable mejora del ambiente térmico y lumínico, análisis contrastado en el aula J-105 y J-106.

Palabras clave: confort térmico, confort lumínico, Ladybug Tools, Wallacei, Arduino

Abstract

In the Faculty of Psychology of the University of Cuenca, the lack of thermal and lighting comfort causes visual fatigue, headaches, irritability, among others, in the occupant. The above is due to the design of the facade, since it is not only an element that separates the interior from the exterior, but also a component that interacts with the exterior. Faced with this problem, static facades are not an optimal response to provide such comfort. However, after several studies, movable facades have been shown to increase the degree of comfort. Therefore, this research addresses a responsive kinetic façade proposal. The kinetic facade manages to be an element that relates directly to the outside climate, to adapt to the needs depending on the demand of indoor and outdoor conditions. This allows for individual control of each module in order to promote optimal shading and maximize the use of daylight. In this work a quantitative methodological approach is used, in which three pertinent references to the climate in which the building is located are analyzed in brief, in order to have a basis for a solution. The result is obtained through the parameterization by means of simulations and the construction of a 1:10 scale model. All this is supported by the Rhino-Grasshopper software and the Arduino micro-controller. Finally, the comparison between the current façade and the proposed one shows the remarkable improvement of the thermal and lighting environment, analysis contrasted in the J-105 and J-106 classrooms.

Keywords: thermal comfort, lighting comfort, Ladybug Tools, Wallacei, Arduino

Índice de contenido	
1. Introducción.....	1
1.1. Introducción.....	14
1.2. Problemática.....	15
1.3. Estado de arte.....	17
1.3.1. Fachada dinámica	17
1.3.2. Fachada respondiva	18
1.4. Hipótesis	18
1.5. Objetivos	18
1.5.1. Objetivos Específicos	18
1.6. Conclusión capítulo 1	19
2. Marco teórico.....	20
2.1. Envoltorios cinéticas.....	22
2.1.1. Antecedentes.....	22
2.1.2. Arquitectura cinética.....	23
2.1.3. Fachada cinética.....	23
2.1.3.1. Fachada cinética adaptativa.....	24
2.1.3.1.1. Funcionamiento de fachada adaptativa no convencional	24
2.1.3.1.2. Fachada adaptativa respondiva, componentes y elementos	26
2.1.4. Referentes	27
2.1.4.1. Adaptive Solar Facade	28
2.1.4.2. ThyssenKrupp Quarter	29
2.1.4.3. Showroom	30
2.2. Confort térmico.....	32
2.2.1. Método de Fanger (PMV)	33

2.2.2. Modelo Adaptativo	34
2.2.3. Terminología	35
2.2.3.1. Mecanismos de transferencia de calor.....	35
2.2.3.2. Variables del confort adaptativo	35
2.2.3.2.1. Variables físicas	36
2.2.3.2.2. Variables personales.....	37
2.2.3.3. Propiedades térmicas de los materiales.....	37
2.2.3.3.1. Resistencia térmica (Rt).....	38
2.2.3.3.2. Transmitancia térmica (U)	38
2.2.3.3.3. Infiltraciones de aire	38
2.2.4. Valores de referencias y normas	39
2.3. Confort lumínico	41
2.3.1. Luz natural	42
2.3.1.1. Espectro electromagnético	42
2.3.1.2. La luz y su incidencia en las superficies.....	42
2.3.1.3. Unidades fotométricas	43
2.3.1.4. Fuentes de luz natural	44
2.3.2. Caracterización de luz natural	44
2.3.2.1. Duración del día	44
2.3.2.2. Geometría solar.....	44
2.3.2.3. Nubosidad y turbidez	47
2.3.2.3.1. Modelos de cielo	47
2.3.3. Tratamiento cuantitativo de la luz natural	48
2.3.3.1. Métodos de análisis estáticos.....	48
2.3.3.1.1. Iluminancia	49
2.3.4. Normativas	49
2.3.4.1. ISO 8995: 2002 – CIE S 008/E	49
2.3.4.2. UNE 12464-2:2012	49
2.4. Recursos	50
2.4.1. Softwares	50
2.4.2. Hardwares	52
2.5. Arquitectura y su relación con el clima.....	54
2.5.1. Variables del clima externo	56
2.6. Metodología	60
2.7. Conclusión capítulo 2	62
3. Propuesta de estudio y simulaciones	64
3.1. Validación del modelo	66
3.1.1. Análisis térmico.....	67
3.1.1.1. Instalación y calibración de instrumentos	67
3.1.1.2. Recolección y tratamiento de datos	67
3.1.1.3. Modelado en Software	70
3.1.1.4. Simulación del modelo	72
3.1.1.5. Validación del modelo	74
3.1.2. Análisis lumínico	75
3.1.2.1. Instalación y calibración de Instrumentos	75
3.1.2.2. Recolección y tratamiento de datos	75
3.1.2.3. Modelo en software	77
3.1.2.4. Simulación del modelo	81
4. Modelo a escala.....	116
4.1. Funcionamiento del sistema cinético	118
4.2. Modelo a escala (hardware y software)	120
4.3. Elaboración de prototipo	121
4.3.1. Vinculación entre Hardware y Software	123
4.4. Medición de iluminancia en la maqueta	124
4.5. Balance y análisis de resultados entre maqueta - modelo virtual.....	125
4.6. Conclusión capítulo 4	126
5. Conclusiones y recomendaciones	128
5.1. Conclusiones.....	130
5.2. Recomendaciones	134
6. Anexo.....	142

Índice de figuras

Figura 1. Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca.....	14
Figura 2. Diagrama de confort adaptativo de la fachada actual _Aula J-105.....	16
Figura 3. Diagrama de confort adaptativo de la fachada actual _Aula J-106.....	16
Figura 4. Diagrama Envolventes cinéticas	22
Figura 5. SDU Campus Kolding	23
Figura 6. Posibles combinaciones físicas relacionadas con las envolventes de edificios.....	24
Figura 7. Fachada Intrínseca / Extrínseca.....	25
Figura 8. Tipos de movimiento	25
Figura 9. Componentes de la fachada adaptativa responsiva	26
Figura 10. Adaptive Solar Facade	28
Figura 11. ThyssenKrupp Quarter	29
Figura 12. Showroom	30
Figura 13. Diagrama de Confort Térmico	32
Figura 14. Método PMV	33
Figura 15. Función del proceso de adaptación	34

Figura 31. Diagrama de humedad relativa en Cuenca.....	57
Figura 32. Diagrama de radiación solar total en Cuenca	57
Figura 33. Incidencia de Irradiación solar sobre la superficie exterior de la Facultad de Psicología	58
Figura 34. Diagrama solar estereográfico y 3D	58
Figura 35. Diagrama del porcentaje de nubosidad en Cuenca	59
Figura 36. Diagrama de la Iluminancia global horizontal en Cuenca	59
Figura 37. Proceso metodológico	60
Figura 38. Aula J-105 - Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca	66
Figura 39. Aula J-105 – ubicación de sensor DHT22	67
Figura 40. Diagrama de temperatura interior aula J-105 – datos recolectados desde el 11 al 24 de septiembre.....	68
Figura 41. Diagrama de caja y bigotes – temperatura interior aula J-105.....	68
Figura 42. Diagrama de temperatura exterior de la ciudad de Cuenca frente a la temperatura interior del aula J-105 desde el 11 al 24 de septiembre.....	69
Figura 43. Diagrama de caja y bigotes – temperatura exterior ciudad de Cuenca	69
Figura 44. Proceso en software Grasshopper y Rhino (nodos y superficie codificadas)	71
Figura 45. Diagrama de la temperatura externa simulada frente a la temperatura medida por la estación meteorológica (EPW).....	73
Figura 46. Diagrama de temperatura interior simulada	73
Figura 47. Diagrama de la temperatura interna simulada frente a la temperatura medida en campo.....	74
Figura 48. Aula J-105 – ubicación de los sensores BH1750	75
Figura 49. Diagrama de iluminancia de sensores internos.....	76
Figura 50. Diagrama de cajas y bigotes de iluminancia de sensores internos.....	76
Figura 51. Diagrama de iluminancia de sensor externo y sin obstrucciones (a) y diagrama de cajas y bigotes (b), Iluminancia Global Horizontal (IGH).....	77
Figura 52. Diagrama de iluminancia de sensores internos en días específicos (datos insitu tomados en cuenta para validación de modelo 3d)	78
Figura 53. Especificaciones de simulación lumínica	80
Figura 54. Diagrama de iluminancia simulación en días específicos (datos simulados tomados en cuenta para validación de modelo 3d)	82
Figura 55. Diagrama de iluminancia en días específicos (datos insitu y simulados tomados en cuenta para validación de modelo 3d). Figura 55. Diagrama de iluminancia en días específicos (datos insitu y simulados tomados en cuenta para validación de modelo 3d).	83
Figura 56. Variables de confort térmico adaptativo	85
Figura 57. Análisis de confort térmico aula J-105_21 de Marzo 9:00	86

Figura 58. Análisis de confort térmico aula J-106_21 de Marzo 9:00 ...	87
Figura 59. Análisis de confort lumínico	88
Figura 60. Trazado de fuente de luz natural	88
Figura 61. Análisis de confort lumínico aula J-105	89
Figura 62. Análisis de confort lumínico aula J-106.....	90
Figura 63. Fotomontaje de Propuesta 1 en la Facultad de Psicología .	93
Figura 64. Módulo de Propuesta 1	93
Figura 65. Módulo de Propuesta 2	94
Figura 66. Fotomontaje de Propuesta 2 en la Facultad de Psicología .	94
Figura 67. Fotomontaje de Propuesta 3 en la Facultad de Psicología .	95
Figura 68. Módulo de Propuesta 3	95
Figura 69. Trazado de fuente de luz natural fachada propuesta 1	97
Figura 70. Análisis de confort térmico aula J- 105_Fachada 1_ 21 de Diciembre 12:00	98
Figura 71. Análisis de confort térmico aula J-105_Fachada 2_21 de Diciembre 12:00	99
Figura 72. Análisis de confort térmico aula J- 105_Fachada 3_21 de Diciembre 12:00	100

Figura 73. Análisis de fachadas confort lumínico aula J-105_21 de Diciembre12:00	101
Figura 74. Análisis de confort térmico aula J-105_21 de Diciembre 12:00 m	104
Figura 75. Análisis de confort térmico aula J-106_21 de Diciembre 12:00 m.....	105
Figura 76. Análisis de confort lumínico aula J-105	106
Figura 77. Análisis de confort lumínico aula J-106	107
Figura 78. Diagrama de comparación de temperaturas entre fachada propuesta y la actual _Aula J-105	109
Figura 79. Diagrama de comparación de temperaturas entre fachada propuesta y la actual _Aula J-106	109
Figura 80. Diagrama de comparación de Iluminancia entre fachada propuesta y la actual _Aula J-105	110
Figura 81. Diagrama de comparación de Iluminancia entre fachada propuesta y la actual _Aula J-106	111
Figura 82. Diagrama de funcionamiento.....	118
Figura 83. Fachada propuesta.....	119
Figura 84. Detalle de fachada propuesta.....	119
Figura 85. Script de Grasshopper para maqueta (hardware)	120
Figura 86. Diagrama Envolventes cinéticas	122
Figura 87. Vinculación Maqueta y Grasshopper	123
Figura 88. Resultados mediante Wallacei	124
Figura 89. Sensores de iluminancia y vista interior de la maqueta	124
Figura 90. Diagrama de iluminancia de maqueta y modelo virtual	125
Figura 91. Mapas de iluminancia de maqueta y modelo virtual.....	125
Figura 92. HDRI / False Color de los niveles de luminancia de maqueta y modelo virtual	125
Figura 93. Elaboración de maqueta.....	134

Tabla 1. Tabla resumen referentes	27
Tabla 2. Características de fachadas referentes	31
Tabla 3. Valores de conductividad térmica de los de materiales de construcción	38
Tabla 4. Estándares de iluminancia	49
Tabla 5. Características principales de sensores	52
Tabla 6. Características principales de sensores	53
Tabla 7. Zonas climáticas según la KOPPEN.....	55
Tabla 8. Zonas climáticas según la INAMHI	55
Tabla 9. Tabla resumen del tratamiento de datos de temperatura interior y exterior.....	70
Tabla 10. Propiedades térmicas de materiales utilizados para la simulación.....	71
Tabla 11. Propiedades térmicas de materiales utilizados para la simulación.....	72
Tabla 12. Validación de datos tomados in-situ.....	79
Tabla 13. Especificaciones de materiales opacos y ventanas para la simulación lumínica	81

Agradecimientos

Primero agradecemos a Dios por permitirnos vivir una experiencia amena en el transcurso de la universidad, gracias a la misma por forjar nuestro carácter y convertirnos en profesionales de lo que nos apasiona, a cada docente que hizo parte de nuestra formación y a todas las personas que han caminado junto a nosotros en este proceso, en especial nuestra familia.

Tabla 14. Propuestas de fachada cinética responsiva.....	92
Tabla 15. Parámetros para simulación y resultados mediante Wallacei96	
Tabla 16. Puntuación para las fachadas cinéticas	102
Tabla 17. Tabla resumen con puntuación de cada propuesta.....	103
Tabla 18. Resumen de iluminancia fachada actual_Aula J-105	112
Tabla 19. Resumen de iluminancia fachada propuesta_Aula J-105..	112
Tabla 20. Resumen de iluminancia fachada actual_Aula J-106	113
Tabla 21. Resumen de iluminancia fachada propuesta_Aula J-106..	113
Tabla 22. Comparación confort térmico_Aula J-105	132
Tabla 23. Comparación confort térmico_Aula J-106	132
Tabla 24. Comparación confort luminico_Aula J-105.....	133
Tabla 25. Comparación confort luminico_Aula J-106.....	133

Dedicatoria

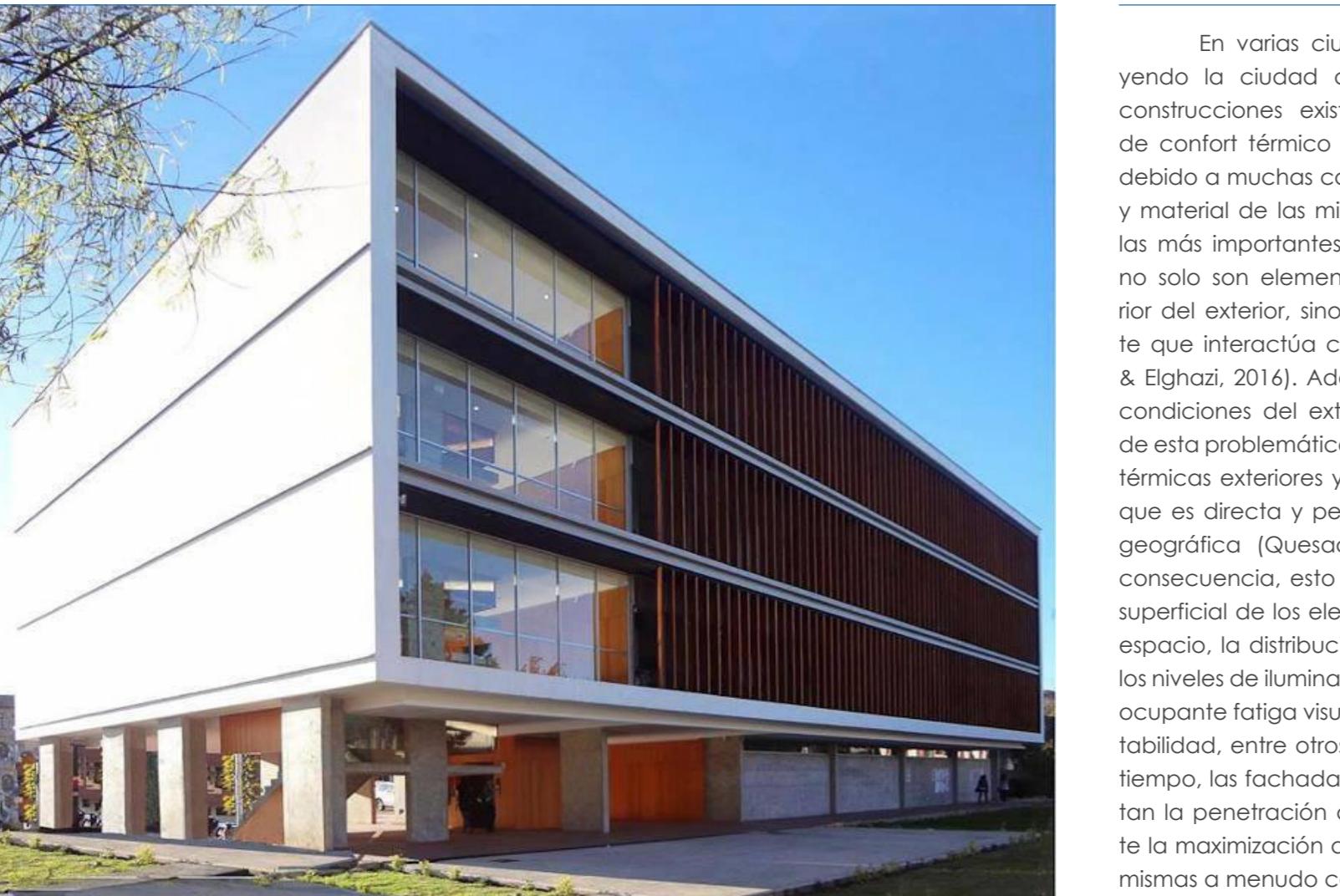
Dedicado a todas las personas que influyen de una u otra manera en nuestro desarrollo. Para los que están, los que ya no nos acompañan y los que vendrán.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

- 1.1 Introducción
- 1.2 Problemática
- 1.3 Estado de arte
- 1.4 Hipótesis
- 1.5 Objetivos
- 1.6 Conclusión



Figura 1. Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca

1.1. Introducción

En varias ciudades del mundo incluyendo la ciudad de Cuenca-Ecuador, las construcciones existentes crean problemas de confort térmico y lumínico a sus usuarios debido a muchas causas inherentes al diseño y material de las mismas edificaciones. Entre las más importantes sus fachadas. Visto que no solo son elementos que separan el interior del exterior, sino también un componente que interactúa con el exterior (Mahmoud & Elghazi, 2016). Además, los cambios de las condiciones del exterior también son causa de esta problemática, dado a sus oscilaciones térmicas exteriores y al efecto del sol, misma que es directa y permanente en esta latitud geográfica (Quesada & Bustillos, 2018). En consecuencia, esto afecta a la temperatura superficial de los elementos que circundan el espacio, la distribución, calidad de la luz y a los niveles de iluminación; lo cual genera en el ocupante fatiga visual, dolores de cabeza, irritabilidad, entre otros (James, 2007). Al mismo tiempo, las fachadas no flexibles que aumentan la penetración de la luz del día mediante la maximización de la transparencia de las mismas a menudo conducen a problemas de deslumbramiento o sobrecalentamiento en el

interior de la edificación (Tabadkani, Roetzel, Li, & Tsangrassoulis, 2021).

Lo manifestado anteriormente ha llevado a enunciar soluciones en nuestro medio, entre ellas la necesidad de mecanismos que permitan la modificación de algunas características de la vivienda, como la fachada, para hacer frente a las variaciones de temperaturas exteriores y la incidencia del sol; pues una fachada estática hace vulnerable al usuario ante las inclemencias del tiempo.

La arquitectura realizada en la ciudad de Cuenca debe poseer sistemas flexibles que pueda cambiar fácilmente la acción ambiental según la oscilación térmica diaria. Siendo recomendable por tanto sistemas que proporcionen sombra pero que a su vez sean móviles para que permitan controlar la radiación, admitiéndola solo cuando sea necesaria, y permitiendo al mismo tiempo el ingreso de iluminación natural suficiente que evite el derroche energético por la utilización de iluminación artificial (Encalada, 2013, p.185-186).

A pesar de que optimizar el confort visual y térmico paralelamente es un tema arduo a causa de los conflictos recíprocos entre

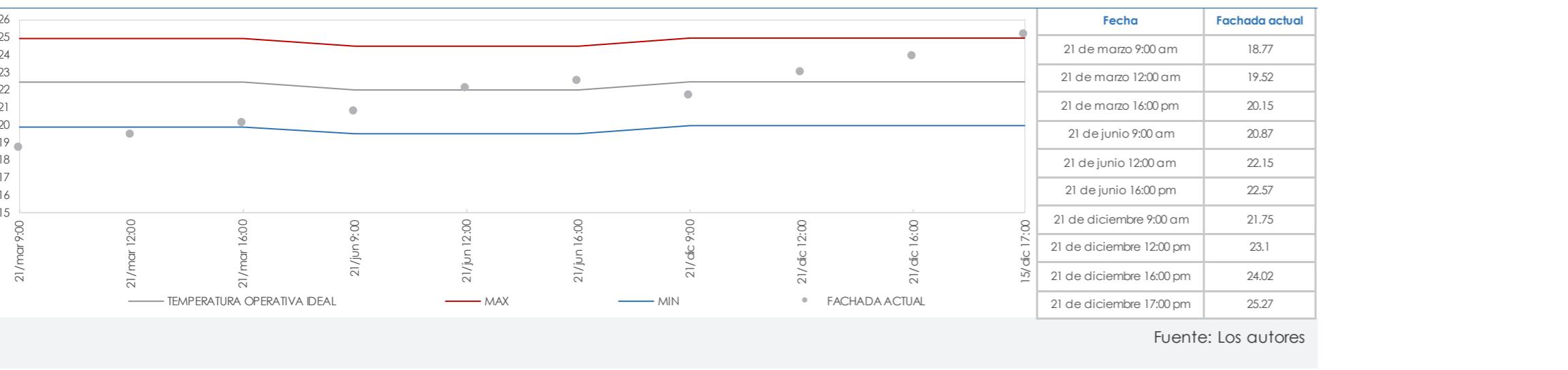
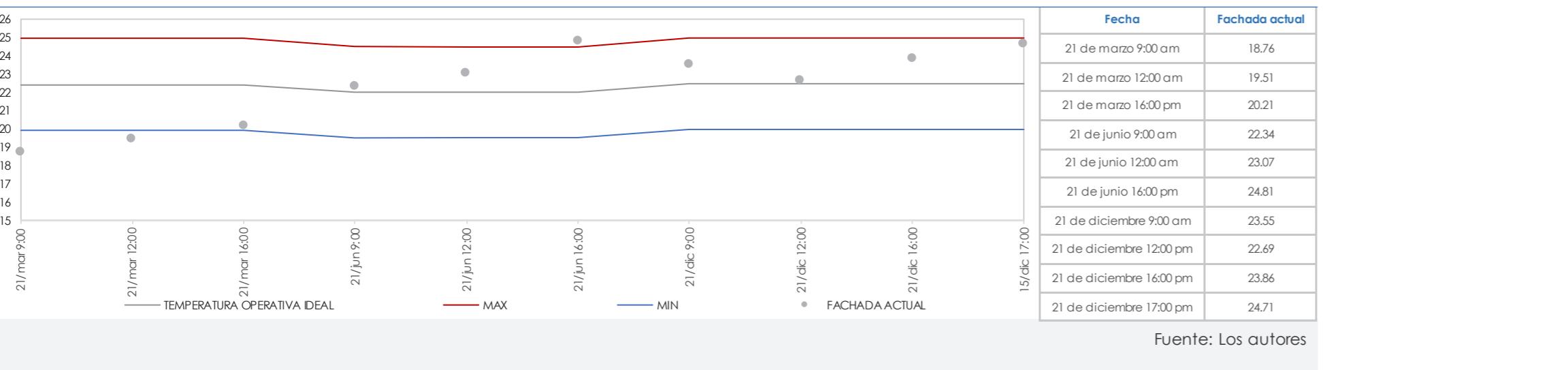
ellos, alrededor del mundo se ha llegado a proponer ideas innovadoras y soluciones óptimas de fachadas cinéticas con la ayuda del diseño paramétrico. Estas son manejadas por el usuario, asistido de un mecanismo y hasta tienen la capacidad de responder a estímulos ambientales, como son las fachadas adaptativas a través de la luz natural con variación diaria de la geometría solar. Estos hacen funcionales y prácticos a los elementos. (Hosseini, Mohammadi, Rosemann, Schröder, & Lichtenberg, 2019).

El panorama expuesto explica el enfoque de la presente tesis, misma que desarrolla un módulo cinético y responde a condiciones del exterior por medio de sensores que a su vez da confort a la Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca. Todo esto desde su validación de modelo de las condiciones actuales, seguido del diseño y simulación en el programa Grasshopper; finalmente, su elaboración y puesta a prueba en un modelo físico. El proceso mencionado anteriormente debe ser analizado a través de elementos de medición para entregar resultados cuantitativos, y así, saber el alcance verdadero de esta propuesta; en cuanto a la optimización del confort térmico y lumínico.

1.2. Problemática

Las edificaciones son espacios donde la gente pasa gran parte del tiempo, a partir de aquello las características que el espacio brinde, dotará de comodidad y salud al usuario (Alhor et al., 2016; Vargas & Gallego, 2005). Para llegar al acometido se debe evaluar la calidad térmica, de iluminación y del aire (Quesada & Bustillos, 2018). Sin embargo, en nuestro medio estos parámetros se ven afectados por varios elementos entre ellos la fachada (Encalada, 2013); debido a que su diseño no toma en cuenta las oscilaciones térmicas exteriores que se encuentran entre 7°C y 25°C, las condiciones cambiantes del cielo desde totalmente nublado hasta despejado en cuestión de minutos, la implantación del edificio, materialidad de la fachada y las condiciones preexistentes de la edificación.

La Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca cuenta con una fachada estática que al ver sus datos cuantitativos de confort térmico y lumínico; no tiene un diseño pertinente en el tema de confort. A causa de varias razones como la incidencia de radiación que en ocasiones entra directamente y otras no permite su ingreso, ya que su forma y orientación no son analizadas, además no contem-

Figura 2. Diagrama de confort adaptativo de la fachada actual _Aula J-105**Figura 3.** Diagrama de confort adaptativo de la fachada actual _Aula J-106

pla sistemas flexibles que puedan cambiar fácilmente la acción ambiental (Encalada, 2013).

En el confort térmico se tiene datos simulados de las aulas J-105 y J-106 —opuestas entre sí—en la presente investigación, con un modelo 3d calibrado. Dichas temperaturas interiores corresponden a los solsticios y al equinoccio de marzo en horas específicas donde el espacio es usado: a las nueve de la mañana, al medio día y a las cuatro de la tarde; también del momento más caliente (15 de diciembre 5pm). A partir de ello se determina mediante la norma ASHRAE 55 de confort adaptativo que algunos datos no se encuentran dentro del 90% de aceptabilidad (ver figura 2 y 3).

Al mismo tiempo, en el tema de confort lumínico se puede apreciar que el aula J-105 en iluminancia tiene un área en confort entre el 17% al 33% y una uniformidad entre 0.021 hasta 0.124. En cuanto al aula J-106 su área de confort va desde 6% al 27% y una uniformidad con un rango de 0.009 hasta 0.024. Cabe recalcar que, el confort lumínico para este espacio según el estudio concluido bajo las normas ISO 8995: 2002 en la tesis de doctorado de Pérez (2007) se encuentra entre 300 a 750 luxes y una uniformidad de 0.7.

Con las simulaciones que se realizan en el programa de Grasshopper en ese trabajo, se busca generar un mayor confort térmico y lumínico manteniendo la formalidad de la edificación, pero sustituyendo el sistema estático por el cinético debido a que esta podría dar el movimiento preciso mediante el complemento de motor evolutivo.

1.3. Estado de arte

El tema de las fachadas cinéticas en investigaciones realizadas mayormente en Asia y Europa han tenido un gran repunte desde el año 2011 debido a las herramientas algorítmicas y paramétricas como Grasshopper y sus complementos ambientales (Tabadkani et al., 2021). En este tipo de investigaciones han abarcado cuatro principales temáticas que son: 1. Confort lumínico, 2. deslumbramiento, 3. Confort térmico y 4. el ahorro de energía (Escolano, 2018). Al mismo tiempo, el objetivo principal en estos estudios fue enfocarse en no más de un tema. Por lo mismo, esto provoca un desbalance en los resultados óptimos de los temas que no se toman en cuenta. Sin embargo, las herramientas de simulación permiten trabajar con más de una variable, por lo tanto, ayuda a desarrollar sistemas no convencionales (Tabadkani et al., 2021).

1.3.1. Fachada dinámica

La fachada o envolvente de una edificación desde el punto de vista arquitectónico es en particular el primer elemento que tiene contacto con el exterior y por lo cual un gran peso a la hora de la percepción del confort interno por parte del usuario. Así, la envolvente opera como un intermediario entre el ambiente interior y exterior; con la cual podría reducir las cargas de calefacción/refrigeración y mejorar el confort térmico y lumínico, gracias al control de ingreso de la luz solar que esta proporciona (Nagy et al., 2016). Se sabe que “La zona de confort podría describirse como el punto en el que el hombre gasta la energía mínima para adaptarse al entorno” (James, 2007,p.38). Es decir, mientras estos cambios sean adoptados por los elementos de la edificación como “la piel”, se ayudaría a un anhelado confort que es equilibrado durante el día. Para que aquel confort sea estable, implica que la envolvente debe estar sujeta a frecuentes ajustes para adaptarse a la meteorología variable. (Meagher,2015). Esto es, un sistema de protección solar dinámico.

En cuanto a la energía que usa para su funcionamiento, el sistema de fachada se puede dividir en pasivos, al mismo tiempo, por

su morfología y materialidad; también están los activos que pueden ser centralizados o autónomos. Esta última es a la que se dirige el tema de la investigación ya que son los más desarrollados hoy en día (Escolano, 2018). Se denomina sistemas de protección solar dinámico autónomo debido a los controles de mecanismo que trae consigo para que funcione como tal. Entre los mecanismos de control se tienen: el interno, directo, indirecto, indirecto responsivo, entre otros. El mecanismo de control indirecto responsivo, categoría a abordarse, se fundamenta en la retroalimentación de un sistema de sensores que puede reaccionar a los cambios ambientales como la luz, aire o movimiento con el fin de conseguir el confort, estas son denominadas como fachadas responsivas (Coellar, 2018).

1.3.2. Fachada responsive

Un sistema de fachada autónoma responsable está conformado por uno o varios elementos del sistema de revestimiento, que a su vez se dividen en módulos móviles los cuales tienen una posibilidad limitada de moverse, cambiar o girar sin permutaciones importantes en la configuración de la edificación (Ramzy & Fayed, 2011). La movilidad de dichos módulos es coherente con la altitud solar —varía

a lo largo del día y año— de esta manera se ajusta al cambio de la posición del sol. Todo esto permite un control individual de cada módulo, para poder propiciar un sombreado óptimo y la maximización del uso de la luz del día (Barozzi, Lienhard, Zanelli, & Monticelli, 2016). Aquello se da gracias a un flujo de trabajo, donde los sistemas de control están basados en actuadores, sensores (dispositivos electromecánicos) y el procesador. Los sensores son los que registran las señales entrantes del cambio externo y traslada la información al procesador; siendo un vínculo entre el espacio exterior y la fachada adaptativa. Paso seguido, la información es procesada mediante una unidad de control de manera dinámica a las condiciones medioambientales para que los actuadores, elementos que convierten la energía en movimiento ayuden, al cambio de la geometría o características principales de la fachada respetando los requisitos del diseño inicial (Barozzi et al., 2016).

1.4. Hipótesis

Las fachadas cinéticas responsivas compensan los cambiantes factores del ambiente exterior para lograr un confort lumínico y térmico estable en el transcurso del día den-

tro de la Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca.

1.5. Objetivos

Desarrollar un módulo cinético responsive que optimice el confort térmico y lumínico a través de softwares de parametrización y sus complementos ambientales aplicados a la edificación de la Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca.

1.5.1. Objetivos Específicos

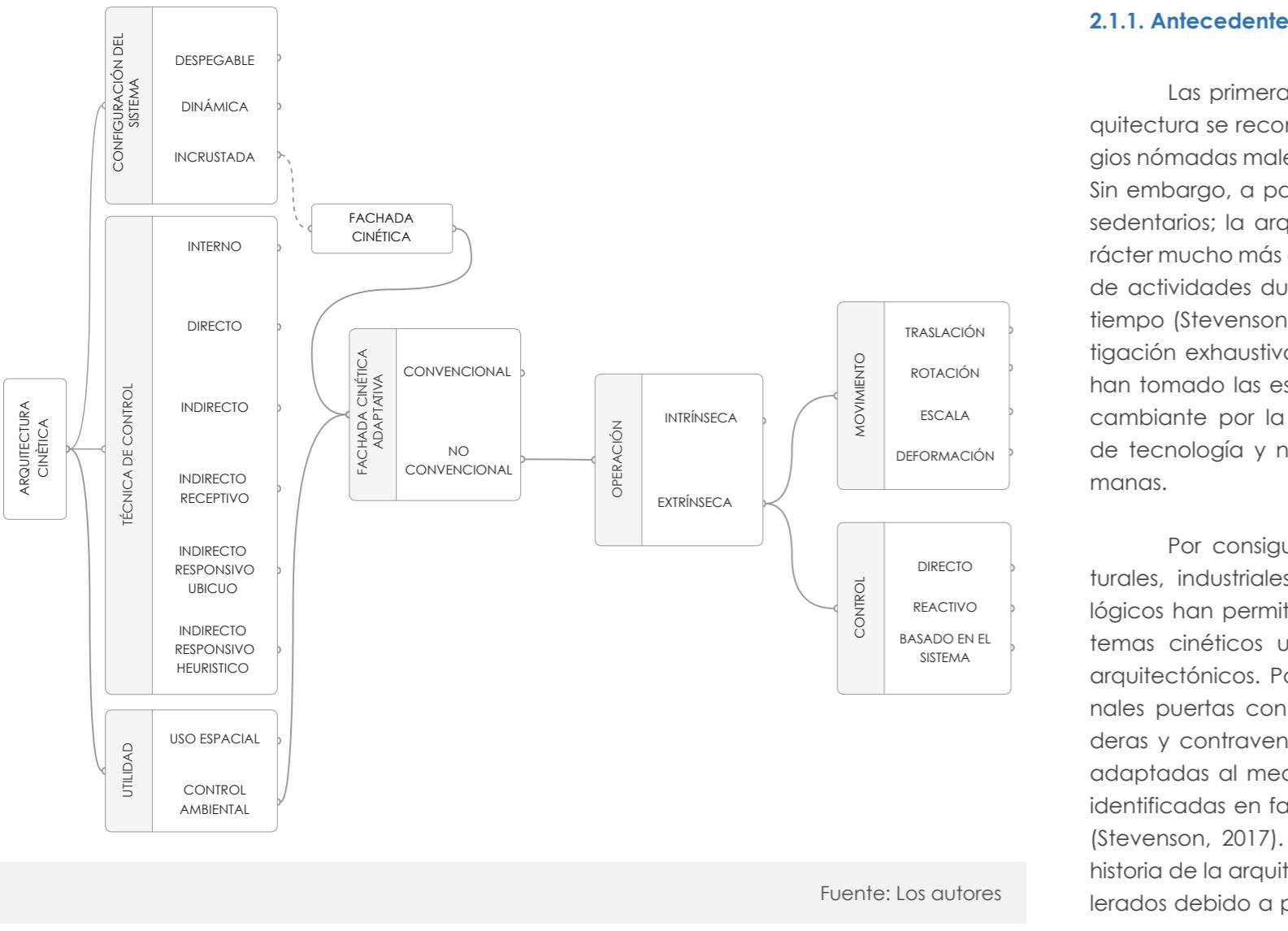
- Definir el modelo óptimo que cubra el confort térmico y lumínico en el transcurso del día a partir de sistemas cinéticos responsivos.
- Determinar las variables de movimiento por medio de simulaciones en el software Grasshopper y sus complementos Ladybug y HoneyBee para optimizar el confort térmico y lumínico.
- Evaluar el sistema de automatización aplicando el sistema responsive a escala.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

-
- 2.1 Envolventes cinéticas
 - 2.2 Confort térmico
 - 2.3 Confort lumínico
 - 2.4 Recursos
 - 2.5 Arquitectura y su relación con el clima
 - 2.6 Metodología
 - 2.7 Conclusión

Figura 4. Diagrama Envolventes cinéticas



jerados debido a p

s cinéticas en ar-
los antiguos refu-
e fácil transporte.
nvertirse en seres
adquiere un ca-
para el desarrollo
plios períodos de
en efecto, la inves-
tionalidad que
cinéticas ha sido
nación constante
es biológicas hu-

lvo del diseño e
de la crisis del pe-
cambio climático
el medio para re-
a la par de las ex-
fines de ahorro e
De ahí que la inv
y sistemas para
das evolucionan

2.1.2. Arquitectura

Las edificios
su composición

Por consiguiente, estos aspectos culturales, industriales y principalmente tecnológicos han permitido la evolución de los sistemas cinéticos utilizados como elementos arquitectónicos. Pasando desde las tradicionales puertas con bisagras, ventanas correderas y contraventanas, hasta edificaciones adaptadas al medio y totalmente portátiles; identificadas en fachadas y módulos móviles (Stevenson, 2017). Conviene subrayar, en la historia de la arquitectura hubo períodos acelerados debido a perspectivas mencionadas.

edificio en c óptima son a ambiental y re algunas de la arquitectura B, 2011).

2.1.3. Facha

ético (Stevenson, 2017).
on de nuevos materiales
amble de estas facha-
rantemente.

Ética

de la nueva
de acuerdo a
se emplace.
tica" a la ex-
la proveniente
(kinēsis) la mu-
de mover (Re-
do, las fachadas
aquellas que
se configuran
constante.

La pa-
fachadas tan
lumínico con
cuando su fo-

entes lugares, la circulación, los sistemas inteligentes, el control y el mantenimiento para los espacios son los niveles de confort de una persona en un lugar determinado. Por lo mismo, como señala Coellar (2018)

Este concepto de investigación se sustenta por la necesidad de investigar tipologías constructivas arquitectónicas que respondan de mejor manera a la relación entre la arquitectura y medio ambiente, ya que a diferencia de una fachada estática, la fachada cinética explora la posibilidad de convertirse en un elemento que interactúa de manera activa con el medio ambiente adaptándose a las necesidades según se demande de las condiciones exteriores.

Figura 5. SDU Camp



Fuente: Aelenei et al. (2018)

2.1.3.1. Fachada cinética adaptativa

Las fachadas adaptativas se distinguen por dos enfoques: convencionales y no convencionales (Tabadkani et al., 2021). El primer grupo se debe a sistemas que pueden aprovechar algunas condiciones del medio ambiente, por ejemplo, las persianas venecianas mecánicas con las cambiantes direcciones angulares de la luz solar; no obstante, no pueden reaccionar de forma independiente ante dichas variaciones. El segundo conjunto, las fachadas adaptables no convencionales, son capaces de cambiar su configuración en función de las condiciones ambientales de forma independiente y a corto plazo; pero lo más importante, mantiene el bienestar de los ocupantes según los límites o preferencia del usuario. El presente trabajo se centra en el último enfoque de las fachadas adaptativas.

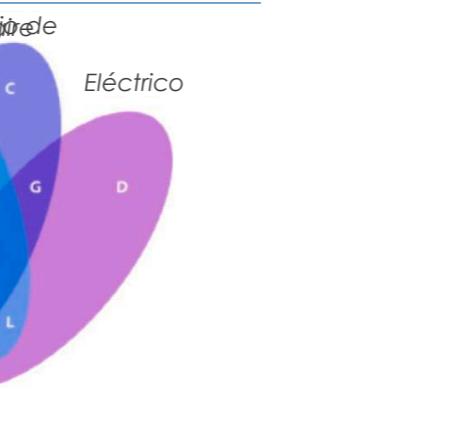
Según la Investigación de Tabadkani et al. (2021), el término de las fachadas adaptativas no convencionales fue usado por primera vez en el año 2007. Desde entonces, se ha tratado de definir a esta fachada; en la actualidad, se define como: el potencial de un sistema para ofrecer criterios de comodidad multiobjetivo en condiciones ambientales inciertas cambiando sus características físicas en una escala temporal corta" (Tabadkani et

al., 2021,p.2). Así pues, con el pasar del tiempo ha existido un interés por incorporar tecnologías ajustables que puedan responder a las cambiantes condiciones ambientales y dotar de una composición dinámica. Además, los sistemas de envoltura en edificios han sido ampliamente estudiados e investigados por los diseñadores para contribuir en gran medida a la huella de carbono de los edificios (Luo et al. 2019).

Hasta la fecha, las envolventes de las edificaciones han logrado interactuar con el contexto exterior en cuatro dominios físicos: térmico, óptico, flujo de aire y eléctrico. De estos, el campo termo-óptico existe en la mayoría de las fachadas adaptativas; debido a que el entorno térmico está cambiando y la iluminación natural son inherentes a estas envolventes (Tabadkani et al., 2021; Luo et al., 2019). Estas fachadas se transforman respondiendo a los cambios del entorno, no solo dejando una experiencia visual al público a

través de la belleza en las geometrías cambiantes; sino también reduciendo la ganancia solar en el interior de un edificio mientras deja huecos para la entrada de luz natural y mantener la iluminación interior (Kolarevic y Parlac, 2015).

Figura 6. Posibles combinaciones físicas relacionadas con las envolventes de edificios



Fuente: Tabadkani et al., 2021)

2.1.3.1.1. Funcionamiento de fachada adaptativa no convencional

La fachada adaptativa no convencional trabaja en dos fases para lograr un rendimiento deseado (Tabadkani et al., 2021). En la primera fase se recopila información de las condiciones ambientales internas como externas y patrones de ocupación. Es en esta fase que se define los parámetros, para cada variable lograr los deseos de comodidad humana y el rendimiento del edificio; la fachada bien puede cumplir con uno o ambos de los cometidos. La segunda fase,

Figura 7. Fachada Intrínseca / Extrínseca



Fuente: Aelenei et al. (2018)

bien no permiten retroalimentación, pueden ajustarse o activarse por las entradas ambientales a un nivel local sin la necesidad de intervenciones externas; aquello también se lo denomina "control interno basado en materiales". A pesar del nulo consumo de energía en el segundo grupo; el primero permite un mayor grado de adaptación y la opción de ser intervenido manualmente por el usuario. Además, los sistemas de operación extrínseca denominados también "sistemas activos" son los más desarrollados hasta el momento (Escolano, 2018).

Operación extrínseca

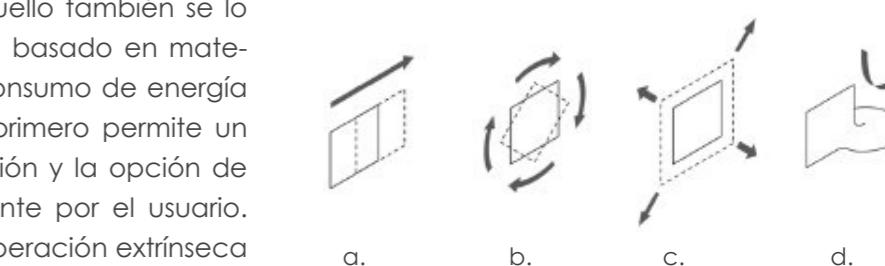
tiene que ver con el procesamiento de datos a través de herramientas computacionales y estrategias de operación. Una operación efectiva, repercute en el funcionamiento exitoso del sistema.

En cuanto a los grupos de operación, que puede tener una fachada adaptativa no convencional tenemos: operación extrínseca y operación intrínseca (Tabadkani et al., 2021). La primera intervención se debe a un sistema automatizado, el mismo que puede optar por uno u otro movimiento con ayuda de los actuadores. El otro modo de operación se debe a reacciones de materiales especiales que, si

es el incremento o disminución del tamaño de la unidad. Finalmente, la deformación se debe a la transformación del elemento dado principalmente por la composición del material. Los movimientos pueden estar enfocados en más de una, denominados híbridos.

Por otro lado, el control de un sistema se diferencia en tres niveles, con relación a su complejidad: nivel 1 (directo), nivel 2 (reactivo) y nivel 3 (basado en el sistema) (Velasco et al., 2015). En el primer nivel, la envolvente se debe a repuestas programadas con anterioridad en una unidad lógica sin ayuda de un receptor de datos. El siguiente nivel está basado

Figura 8. Tipos de movimiento



Nota. a. Traslación; b. Rotación; c. Escala; d. Deformación

Fuente: Moloney (2011)

en sensores de los cuales obtiene información y toma decisiones predecibles. El último nivel, el grado más complejo, se da por el procesamiento significativo de datos del contexto y la optimización de un objetivo o multiobjetivo por parte de procesos computacionales como: autómatas celulares, algoritmos evolutivos o redes neuronales.

2.1.3.1.2. Fachada adaptativa responsiva, componentes y elementos

La fachada adaptativa no convencional que cuenta con una operación extrínseca y control de nivel dos o tres, se la designa como fachada adaptativa responsiva; debido a su respuesta automática al entorno exterior (Tabadkani et al., 2021).

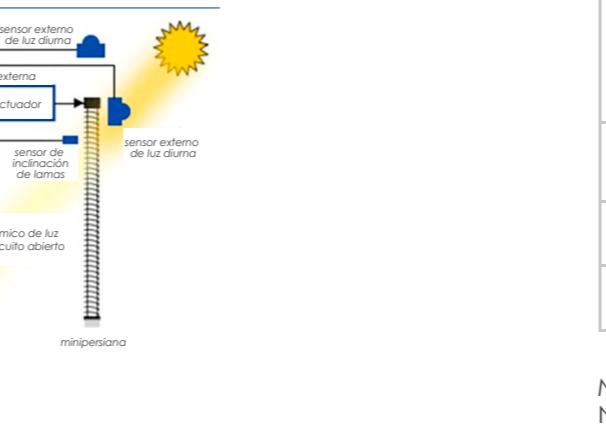
La fachada adaptativa responsiva es un sistema que se compone de dos capas: física y operativa, y un elemento de electrónica digital (Al-Masrani & Al-Obaidi, 2019). Para comenzar, la capa física es un componente arquitectónico (parte estática) y una mecánica (parte dinámica). La segunda capa se refiere a lo eléctrico. Por último, el elemento de electrónica digital se encarga de la automatización y el control de la fachada.

El primer componente, el arquitectónico, es el diseño de la fachada; hay que tomar en cuenta la forma geométrica del dispositivo y una clara percepción de los movimientos de sus elementos. Además, debe reflejar requisitos del sitio y responder a diversos datos climáticos como: la posición del sol, temperatura y humedad, luz natural tanto la directa como difusa y la nubosidad; todo esto para configurar una fachada efectiva. El siguiente componente, la parte dinámica, da el movimiento a la fachada. Esto se da a través de varios dispositivos y accesorios, como las válvulas o motores, conocidos comúnmente como actuadores. El último componente, el eléctrico, es una parte inherente del funcionamiento; pues es el encargado de dotar energía al componente mecánico para que el sistema funcione. La energía requerida puede depender del peso de los elementos estáticos, la elección del actuador y su ubicación estructural (Al-Masrani & Al-Obaidi, 2019).

Por último, el elemento de electrónica digital, está basado principalmente en una serie de aparatos como sensores, controladores y unidades lógicas, junto con un sistema de gestión (Al-Masrani & Al-Obaidi, 2019). Así, los sensores proporcionan todos los datos de entrada del clima exterior. Paso seguido,

toda la información que ingresa es procesada por un hardware e impulsada por un software, el cual optimiza un resultado multiobjetivo y envía comandos a los actuadores para su movimiento. Todo este proceso se realiza a través de una estrategia de bucle abierto, debido a los datos empleados del momento para obtener resultados óptimos.

Figura 9. Componentes de la fachada adaptativa responsiva



Fuente: Al-Masrani & Al-Obaidi (2019)

2.1.4. Referentes

Prowler y Bourg (como se citó en Al-Masrani & Al-Obaidi, 2019) expone al respecto de las fachadas cinéticas responsivas que, si bien en climas diferentes la luz natural puede ser regulable con estos sistemas; regular la temperatura es diferente en cada zona climática. Esto se da porque en una zona tropical existe una correlación entre el

Tabla 1. Tabla resumen referentes

Fachada referente	Orientación	Propósito de envolvente		Tipo de estímulo				Distribución uniforme de luz		Control de la radiación solar			Control de sistema			Complejidad			Tipo de movimiento		Tiempo de respuesta	
		CT	CL	AE	PS	TH	LN	NU	SI	NO	N1	N2	N3	ALTO	MEDIO	BAJO	1G	HB	S	M	H	
1	Sur y Oeste																					
2	Sur, Este, Oeste																					
3	Sur																					

Nota. CT. Confort térmico; CL. Confort Lumínico; AE. Ahorro Energético; PS. Posición del Sol; TH. Temperatura y Humedad; LN. Luz Natural; NU. Nubosidad; N1. Nivel 1; N2. Nivel 2; N3. Nivel 3; 1G. 1 grado; HB. Híbrido; S. Segundos; M. Minutos; H. Horas.

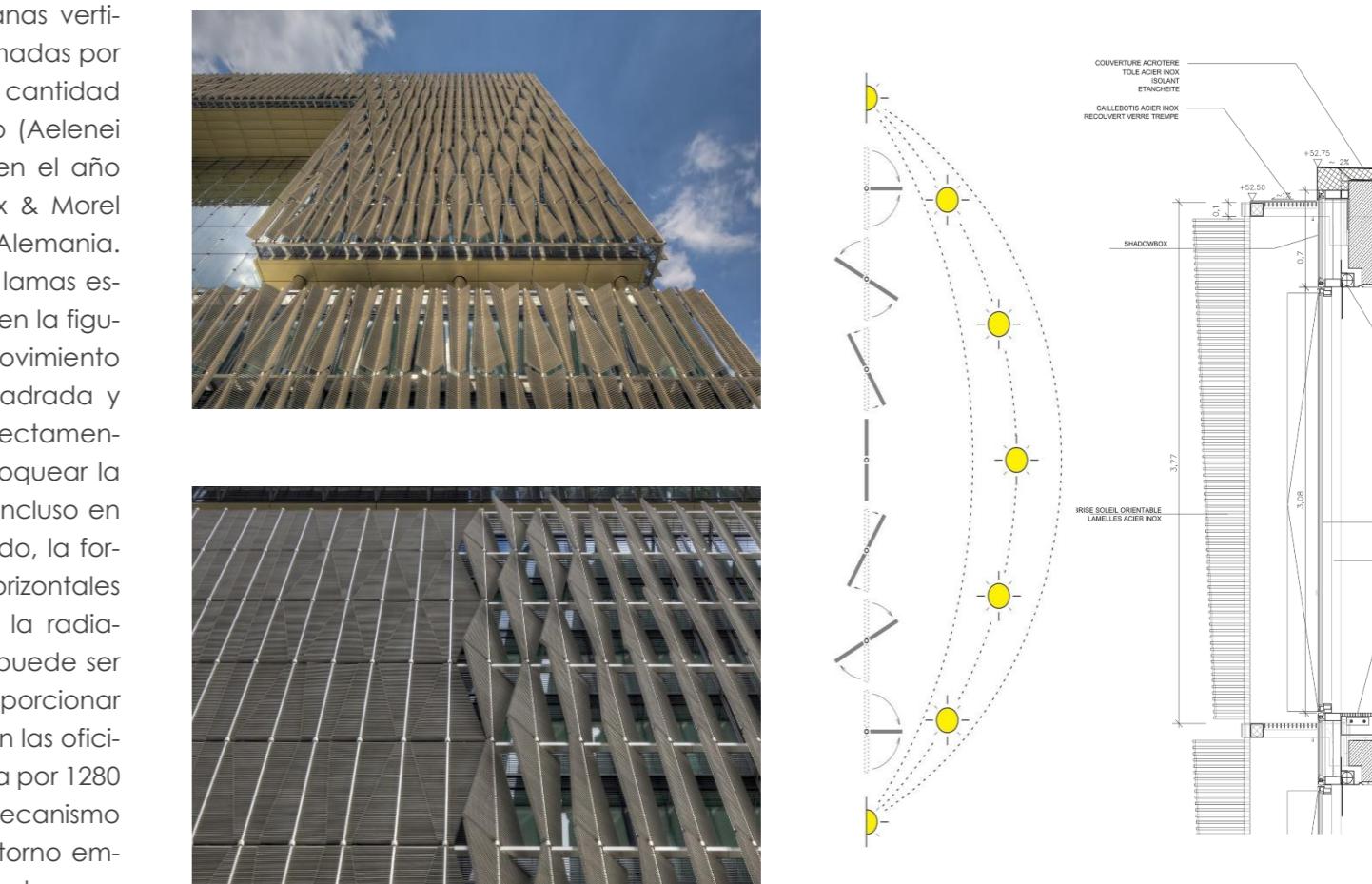
Fuente: Los autores

Figura 10. Adaptive Solar Facade

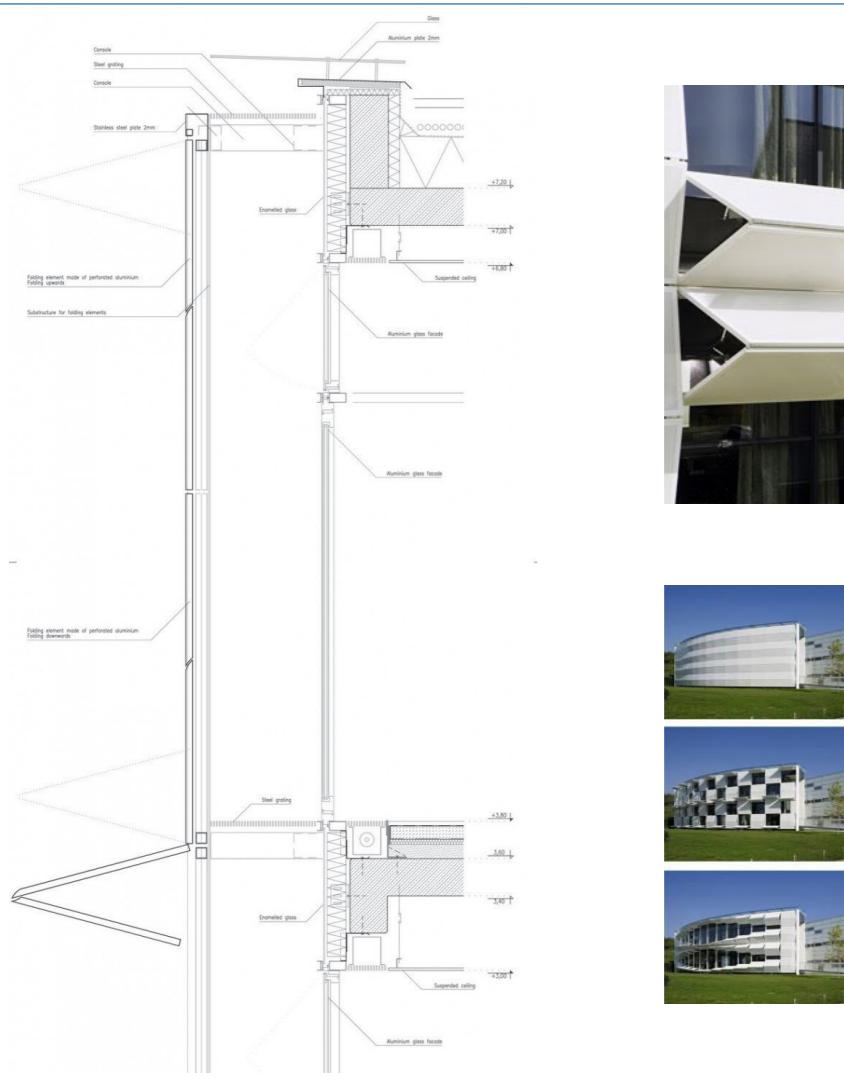
Fuente: Aelenei et al. (2018)

2.1.4.1. Adaptive Solar Facade

La Adaptive Solar Facade es un prototipo de módulos fotovoltaicos de espesor delgado desarrollado por Nagy et al. (2016). Este prototipo está pensado para ser ubicado en Dumbendorf, Suiza. La fachada está conformada por actuadores neumáticos suaves sujetos a una estructura de tensores que rotan con referencia a los tres ejes (figura 10); al tener varios grados de libertad, dan seguimiento a la luz solar. El movimiento híbrido por separado de cada celda del sistema permite un control tanto térmico como lumínico. Esto se logra gracias a la mediación de la radiación solar; visto que tiene el potencial de controlar la temperatura interior, al mismo tiempo, distribuye la luz del día de acuerdo con los deseos de los ocupantes.

Figura 11. ThyssenKrupp Quarter

Fuente: Plataforma Arquitectura (2013)

Figura 12. Showroom

Fuente: Begle (2015)

2.1.4.3. Showroom

Ernst Giselbrecht + Socio en 2007 genera una fachada inteligente con paneles de yeso deslizados a través de rieles en perifería de aluminio y controlados como persianas electrónicas. Esto permite al usuario personalizar la percepción del espacio (figura 12). En efecto, el movimiento de los módulos permite regular el ambiente tanto térmico como lumínico para el uso de oficinas corporativas (Coellar, 2018). El proyecto se da en Austria, una fachada cinemática, evoluciona la tradicional solución de ventanas con un movimiento de traslación y rotación mediante 56 motores conectados a un sistema central; la finalidad es lograr un solo sistema de alta protección contra la incidencia del sol mediante el movimiento de paneles inteligentes para así controlar la iluminación interior y la incidencia de radiación solar directa.

El sistema utilizado para la creación de la fachada dinámica ha sido determinante; debido a la evidente mejora en temas energéticos, equilibrio lumínico y térmico. Esto se consigue por medio de la modulación adecuada y elección de material, color y forma para obtener resultados óptimos. Además, el movimiento de estos 124 paneles proporciona el cambio formal constante a experimentar. (Estupiñan, 2020).

Tabla 2. Características de fachadas referentes

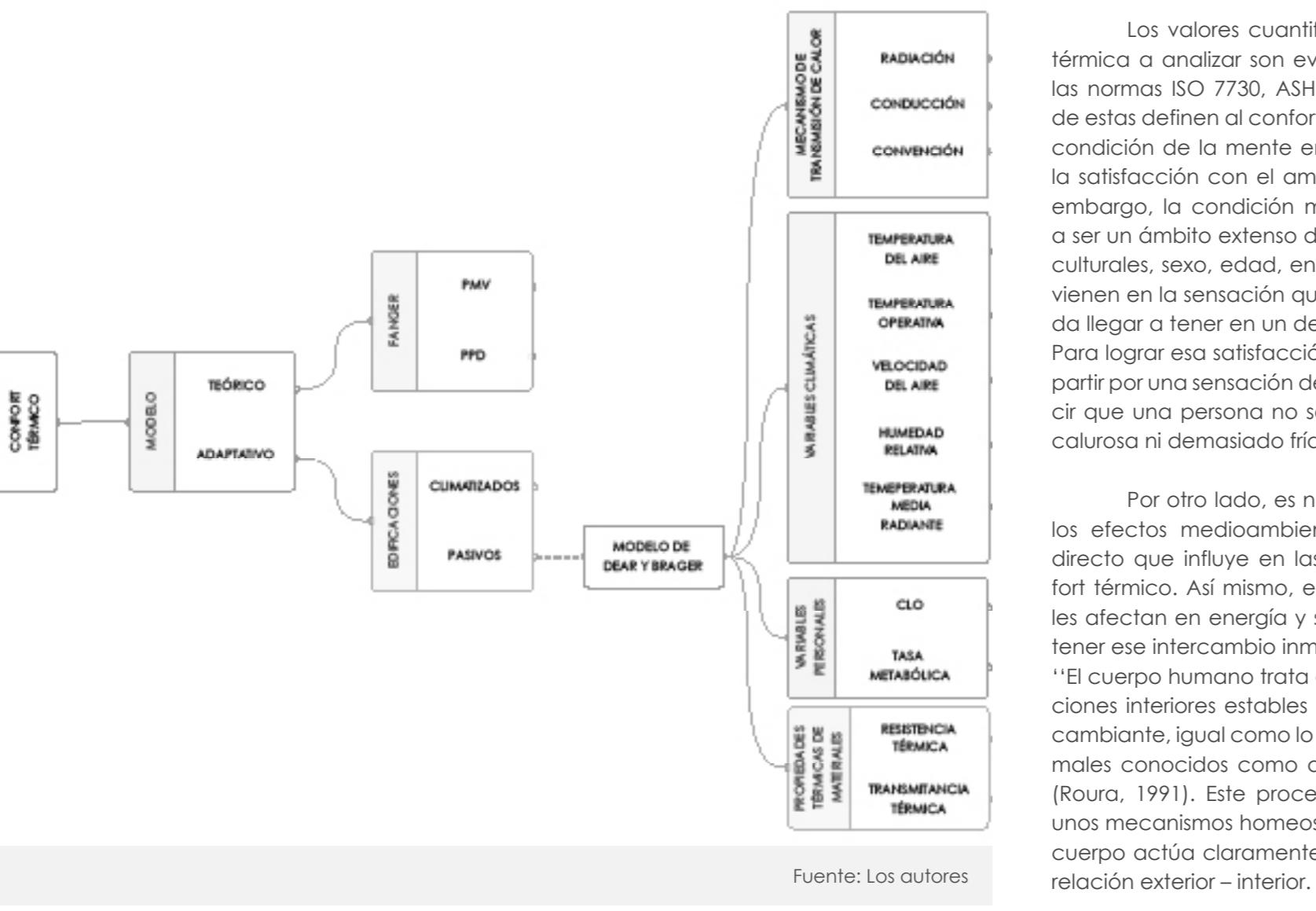
	Módulo	Movimiento	Parametrización	Trazado de fuente de luz natural
Adaptive Solar Facade				
ThyssenKrupp Quarter				
Showroom				

Nota. En la fachada Adaptive Solar Facade se puede apreciar que la libertad de movimiento y la forma de distribuirlos permite filtrar la luz natural de una manera eficaz a lo alto y ancho de la fachada.

La ThyssenKrupp Quarter tiene más restricciones a la hora de filtrar la luz, debido a que lo hace solo a largo de la fachada.

La tercera fachada tiene los mismo resultados a la hora de distribuir la luz natural que la primera fachada, pero este cuenta con menos elementos y con dos

Fuente: Los autores

Figura 13. Diagrama de Confort Térmico

2.2. Confort térmico

Los valores cuantificables de la parte térmica a analizar son evaluados a partir de las normas ISO 7730, ASHRAE y NEC en donde estas definen al confort térmico como “Esa condición de la mente en la que se expresa la satisfacción con el ambiente térmico”. Sin embargo, la condición mental puede llegar a ser un ámbito extenso debido a los factores culturales, sexo, edad, entre otros; estos intervienen en la sensación que una persona pueda llegar a tener en un determinado espacio. Para lograr esa satisfacción total es necesario partir por una sensación de neutralidad, es decir que una persona no se sienta demasiado calurosa ni demasiado fría.

Por otro lado, es necesario mencionar los efectos medioambientales como factor directo que influye en las variantes del confort térmico. Así mismo, estos efectos naturales afectan en energía y salud del hombre al tener ese intercambio inmediato. Por lo tanto, “El cuerpo humano trata de mantener condiciones interiores estables frente a un entorno cambiante, igual como lo hacen todos los animales conocidos como de sangre caliente” (Roura, 1991). Este proceso se da mediante unos mecanismos homeostáticos en donde el cuerpo actúa claramente en el control de la relación exterior – interior.

La cantidad de calor o frío que se tiene en una habitación influye en el comportamiento del usuario. En efecto, las actividades se ven afectadas a causa del nivel de desconfort que la persona llegue a tener al disminuir la energía, los procesos físicos y mentales; esto depende del tiempo y el clima en el que se encuentre el espacio. En consecuencia, cuando se tienen bajas temperaturas se consiguen reacciones físicas en las personas; por lo que la concentración comienza a ser nula, y así el desempeño no puede completarse. Por otro lado, las altas temperaturas generan otro tipo de reacciones como sudoración y falta de aire; los efectos mencionados en altas o bajas temperaturas responden a una falta de sensación confortable. Al respecto, (Encalada, 2013) refiere “La arquitectura adecuadamente diseñada es entonces nuestra mejor herramienta para conseguir las mejores condiciones de confort y protegernos de las condiciones medioambientales desfavorables”.

Los tipos de modelo existentes según (Chávez del Valle, 2002) para medir el confort térmico en las edificaciones son: teóricos, empíricos y adaptativos. No obstante, en la norma ASHRAE (2010) se respaldan tanto los modelos teóricos como adaptativos. Los primeros con el PMV-PPD para casos estacio-

narios con un ambiente climatizado. Por otro parte, los adaptativos por medio del modelo de De Dear y Brager, para edificaciones con ventilación natural.

2.2.1. Método de Fanger (PMV)

El modelo de Fanger es el más práctico y completo para el cálculo del confort térmico en un espacio determinado siempre este no se encuentre ventilado naturalmente (Muñoz, 2012). En efecto, las variables tanto fisiológicas y de termorregulación son incidentes para poder encontrar un rango de temperaturas donde las personas que van a ocupar la edificación tengan la sensación de confort.

Estas variables específicas como la ropa y el nivel de actividad realizado en un espacio corresponden a características fisiológicas. Por otro lado, la temperatura seca del aire, la velocidad relativa del viento, la humedad relativa y la temperatura radiante media pertenece a la termorregulación del ambiente a analizar.

El PMV o también conocido como Voto medio estimado es un índice que refleja el valor de los votos emitidos por una muchedumbre respecto de una escala de sensación térmica de 7 niveles denominados como: muy caluroso, caluroso, ligeramente caluroso, neutro, ligeramente fresco, fresco y frío; estos nive-

los están basados en el equilibrio térmico del ser humano (Turner et al., 2008). Convine subrayar, el PPD se denomina como el porcentaje previsto de personas insatisfechas en cada PMV. Sin embargo, se trata de un modelo estacionario (Chávez del Valle, 2002). Como resultado, el modelo no reflexiona la variación de la temperatura en el transcurso de un día. Esto obedece a condiciones constantes en un período amplio de tiempo, por lo que en ocasiones es puesto por parte de algunos autores a juicio de valor en análisis de edificio reales. Incluso, en algunos casos generar u optar por otro modelo.

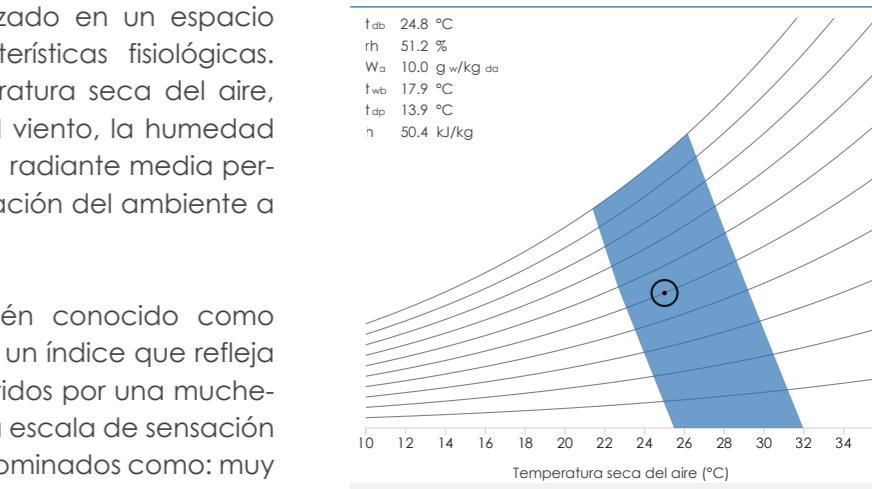
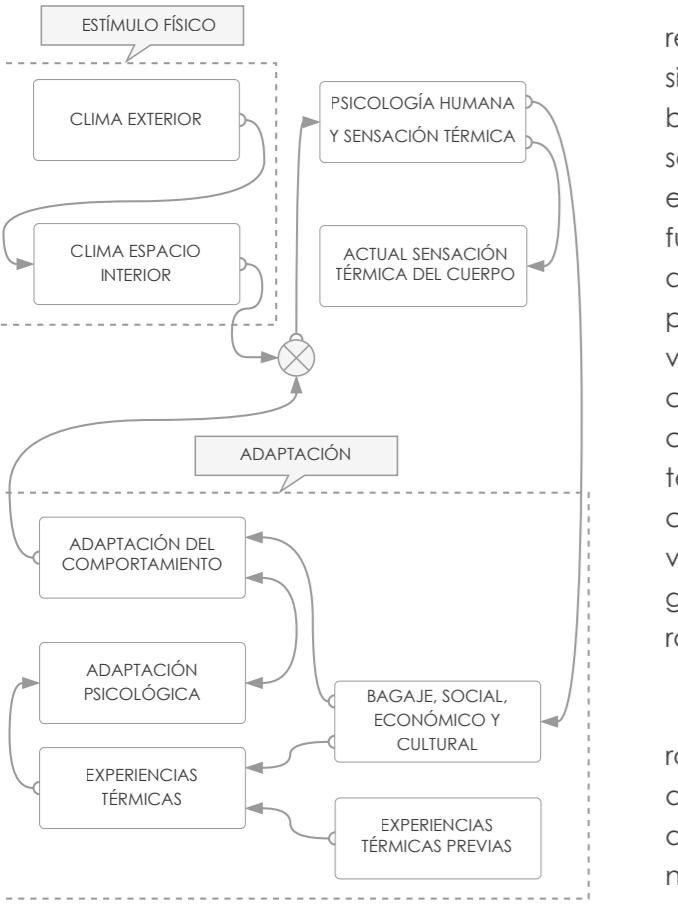
Figura 14. Método PMV

Figura 15. Función del proceso de adaptación

Nota. Proceso de adaptación considerado para el diseño de la investigación.

Fuente: Moloney (2011)

2.2.2. Modelo Adaptativo

El criterio del confort adaptativo es el resultado de estudios de campo, cuyo propósito es analizar la real aceptabilidad de ambientes térmicos, sus variables dependientes son el comportamiento de los ocupantes y sus expectativas (Muñoz, 2012). Así mismo, este se fundamenta en tres aspectos principales que al mismo tiempo se interrelacionan. Primero, los psicológicos hacen referencia a la expectativa y habituación de confort en relación con el clima interior y exterior. Segundo, aspecto de comportamiento o conductual refiere a estrategias de restitución de la situación de confort como apertura de ventanas, puertas, uso de ventiladores, pérgolas. Finalmente, los fisiológicos con conceptos como la aclimatación, ropa e ingesta alimenticia.

Nicol & Humphreys, (2002) determinaron los rangos de aceptabilidad térmica por lo que se señala en su texto "si ocurre un cambio que genera desconfort, las personas reaccionan llevando a cabo acciones para volver al estado de confort". Por lo mismo, la sensación de las personas en el entorno dependerá de la interacción que estas tengan entre sí. Además, los usuarios que tiendan a adaptarse al ambiente, o adapten al ambiente según sus

requerimientos; posean menos posibilidad de sufrir de falta de confort. A partir de ello, los autores identifican tres variables conceptuales que tienen gran impacto en el confort adaptativo:

El clima

Las diferentes posibilidades ambientales tienen una influencia para la adaptación de las personas en grupos grandes a su entorno.

El tiempo

Las actividades de las personas en el transcurso de un día dependen de un marco temporal lo que conduce a variaciones en las condiciones ambientales, por ello continuos requerimientos para lograr el confort.

El edificio

Las características físicas afectan de manera directa al comportamiento de las personas con respecto a los cambios ambientales. De ahí que un edificio bien diseñado provoca menor consumo energético, y así mismo se aprovecha de las estrategias arquitectónicas para lograr acciones como abrir persianas, desplegar ventanas, girar parasoles.

A partir de algunos estudios realizados por los autores De Dear y Brager (2002) acerca del confort adaptativo en edificaciones de oficinas en diferentes ciudades de los cuatro continentes. Estas características cumplen con un gran rango de condiciones climáticas óptimas. Igualmente, Moloney (2011) el modelo a utilizar y planteado por De Dear y Brager (2002), se establece en la norma de confort térmico ASHRAE 55 en donde se obtiene un método para el cálculo de edificaciones en condiciones pasivas, es decir, con ventilación natural. En consecuencia, se establece la siguiente ecuación:

$$T_{\text{conf}} = 0.31 \times T_{\text{p.ext}} + 17.8$$

Donde:

T_{conf} = Temperatura de confort,

$T_{\text{p.ext}}$ = Temperatura promedio exterior de bulbo seco.

Añadir que existen otros autores como Nicol and Roaf, Humphreys, Auliciems, los cuales también han propuesto su modelo. Aunque, en esta investigación se considera el modelo de De Dear y Brager. Es importante tener en cuenta las siguientes condicionantes para el uso del método.

- Niveles de actividad entre 1.0 y 3.0 met,

- Vestimenta 0.5 y 1.0 clo.

La temperatura media mensual debe encontrarse entre 10 y 33.5 °C cuando se trata de espacios cerrados. Es posible incrementar el límite superior de las temperaturas de confort hasta 1K si se demuestran velocidades del aire entre 0.6 y 1.2 m/s.

2.2.3. Terminología

2.2.3.1. Mecanismos de transferencia de calor

La fachada siendo el medio de interacción entre los factores naturales y el interior, es decir, relación exterior – interior hablando espacialmente. Esta relación hace que cada edificación de acuerdo a materialidad, piel, estructura y otras características físicas, generen variaciones en ganancia o pérdida de calor.

Nicol and Roaf, Humphreys, Auliciems, los cuales también han propuesto su modelo. Aunque, en esta investigación se considera el modelo de De Dear y Brager. Es importante tener en cuenta las siguientes condicionantes para el uso del método.

Fuente: Paniza (2014)

2.2.3.2. Variables del confort adaptativo

Las variables a examinar en el confort adaptativo son físicas o personales. Las primeras tienen que ver con las condiciones ambientales del entorno en el que se va a trabajar. Es decir, temperatura del aire, velocidad del aire, humedad relativa y temperatura media radiante. Las personales son aquellas que interviene la vestimenta denominado clo y la actividad física conocido como met.

2.2.3.2.1. Variables físicas

Temperatura del aire

La temperatura del aire es la que se encuentra rodeando al individuo, regula la cesión de calor por conducción, convección y por respiración (Paniza, 2014). Además, la temperatura del aire depende fundamentalmente de la temperatura de las superficies, que se calientan o enfrian al recibir o emitir radiación y que ceden calor al aire por convección. Pero, tiene factores que afectan su condición como: altura sobre el nivel del mar que disminuye la temperatura en 0.5 °C; la latitud influye en la masa atmosférica; la relación masa tierra – agua y morfología del terreno condicionan la inercia térmica; y la exposición a vientos que permiten condiciones más o menos frías. Para su medición, es recomendado ubicar sensores a la altura de trabajo 1.1 metros desde el nivel del piso y al centro geométrico del plano de estudio.

Temperatura operativa

Para el cálculo de la temperatura operativa es necesario determinar el promedio de la temperatura del aire, y la temperatura radiante media ponderada (ASHRAE, 2010).

Humedad relativa

La humedad es el contenido de vapor de agua que contiene el aire (Paniza, 2014). Así

Dado que, esto viene determinado por el coeficiente de transferencia de calor convectivo y radiante para el ocupante. Se expresa de la siguiente manera:

$$t_o = (t_a + t_r)/2$$

Donde:

t_o = Temperatura operativa,

t_a = Temperatura del aire,

t_r = Temperatura media radiante.

Velocidad del aire

Esta variable influye en los espacios mediante el intercambio de calor entre una persona y el entorno en el que realice una actividad determinada. Por lo tanto, afecta de manera directa al bienestar térmico general a causa de la pérdida de calor y a la incomodidad térmica local por las corrientes de aire. La unidad de medida es el metro por segundo (m/s). Es importante mencionar que no existe una velocidad de aire mínima necesaria para el confort térmico (NTE INEN - ISO 7730, 2014).

Humedad relativa

La humedad es el contenido de vapor de agua que contiene el aire (Paniza, 2014). Así

pues, un valor de humedad que interviene en el ambiente térmico es la humedad relativa, la misma que se define como la razón entre la presión del vapor de agua que se encuentra presente en ese instante y la presión de vapor en saturación de agua a igual temperatura; se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$HR = (e(T) e_s(T)) \times 100\%$$

Donde:

HR = humedad relativa [%],

$e(T)$ = presión parcial real del vapor de agua en aire húmedo [Pa],

$e_s(T)$ = presión parcial de vapor de agua en aire húmedo saturado [Pa].

La temperatura de un espacio va a depender del porcentaje de humedad relativa. Por lo mismo, sus valores se deben mantener entre 45% y 65% para no afectar a la salud del usuario (Ramos, J. 2006). Conviene subrayar, cuando se tiene datos inferiores al rango establecido se producen alteraciones fisiológicas perjudiciales para el bienestar humano. Igualmente, al sobrepasar el límite superior provoca falta de atención y destreza. Por lo cual, es condicionante para aportar de manera positiva al confort de las personas.

Variables personales

Clo

Las personas desempeñan un valor considerable en el confort térmico. Por esa razón, la ropa utilizada influye directamente al comportamiento térmico interno. Así pues, la ropa a utilizar puede significar resistencia térmica a las pérdidas de calor con

Temperatura media radiante

Se debe partir definiendo "temperatura radiante" como la cantidad de energía sobre una superficie representada en su unidad de medida más utilizada —como el Kelvin (K), luego la escala Celsius (°C), en mucha menor medida la escala Fahrenheit (°F)—, localizada en el interior de un local cerrado. Por eso, la temperatura media radiante se conceptualiza como el promedio de todas las temperaturas superficiales relacionadas con sus áreas (Pesantes Moyano, 2012).

Por otro lado, Chávez del Valle, (2002) ha señalado que medir la

temperatura de todas las superficies de la habitación tomaría mayor tiempo, y su complejo cálculo de los factores del ángulo correspondientes.

Tasa metabólica

El metabolismo es considerado como el medio para que el cuerpo obtenga energía y esta puede ser liberada a través del ejercicio muscular. Asimismo, la actividad muscular que una persona pueda realizar en su mayoría se ve reflejada en calor. Entonces, Ruiz & Correa (2009) refieren como el nivel de actividad un parámetro externo que influye en el cálculo

respecto a la superficie del envolvente y ambiente (Alvear, 2017). También, las unidades de medida son el Clo y los metros cuadrados Celsius por vatio ($m^2 \text{ C/W}$). Para finalizar, la equivalencia de estas unidades señaladas es (1 Clo = 0.155 $m^2 \text{ °C/W}$).

Al mismo tiempo, la ropa puede ser calculada mediante la sumatoria de los coeficientes de prendas que habitan los usuarios. Los valores clasificados por tipo de prenda se encuentran en la norma ASHRAE (2012). En otras palabras, el valor de clo en cero representa una persona desnuda. Por el contrario, al tener 1.0 clo hablamos de una persona con traje comercial; mientras más ropa se lleva, más impacto tiene en la temperatura interior.

2.2.3.3. Propiedades térmicas de los materiales

Los materiales tienen la capacidad de adquirir, almacenar y transmitir el calor mediante diferentes mecanismos como: conducción, convección y radiación. Así pues, estas son respuestas que presentan frente a las variaciones de temperatura. Al mismo tiempo, al combinar estas tres formas de transmisión de calor, se produce el flujo de calor el cual depende de las diferencias de temperatura del área considerada (Encalda, 2013).

En efecto, es el factor principal para que se desarrollen las diferentes formas de presentarse el calor en los materiales.

2.2.3.3.1. Resistencia térmica (R_t)

Es importante partir por definir la conductividad térmica (λ) como la propiedad de los materiales que transfieren calor medido por unidad de tiempo en un metro de superficie (Dalencon, 2008). Conviene señalar, los valores de conductividad de materiales comúnmente utilizados, se presentan en la (tabla 3).

2.2.3.3.2. Transmitancia térmica (U)

Es el valor que expresa la capacidad de los materiales en transmitir calor a través de su composición. Por lo mismo, el calor que fluye por la materia prima permite que exista variaciones de temperatura debido al cambio de espacio en el mismo elemento. Al mismo tiempo, tiene la capacidad de interactuar con otros cuerpos. Para su cálculo se utiliza la unidad W/ (mk). De manera que, la cuantía de transmitancia térmica (U) es inversamente proporcional a la resistencia térmica final (R_t) (Vásquez, 2019).

Añadir, la transmitancia de los componentes de la piel del edificio es directamente proporcional con respecto a las pérdidas de calor en invierno y ganancias en verano (Contreras, 2017).

2.2.3.3.3. Infiltraciones de aire

Estas se dan a través de hendiduras y grietas que causan fugas en la edificación, mismas que se dan en nuestro medio en mayor medida por el viento, diferencias de temperatura entre el exterior y el interior. Su unidad es 1/h Cambios de aire por hora, dado por sus siglas en inglés, ACH Air Exchange per Hour. En el

cambio de aire existen don procesos infiltración y ventilación (Brito Peña & Villa Enderica, 2020).

ASHRAE 90.1-2013 recomienda la siguiente tasa general de infiltración en función del área de la fachada expuesta al exterior 0.4 cfm/sf (pies cúbicos por minuto/pie cuadrado) a una presión de 75 Pa; en la cual se toma en cuenta de referencia una velocidad del viento de 4,47 m/s. Cabe destacar que se convertirán a las unidades apropiadas para el programa de simulación. Caso contrario si no se usa dicho factor se debería realizar cálculos independientes del programa de simulación de energía.

Tabla 3. Valores de conductividad térmica de los de materiales de construcción

Material	Densidad Aparente (Kg/M ³)	Conductividad Térmica λ (W/Mk)
Aire quieto a 0°C	0.0012	0.024
Aluminio	2700	210
Fibrocemento	1000	0.23
Fundición y acero	7850	58
Hormigón armado	2400	1.63
Ladrillo macizo hecho a mano	-	0.50
Ladrillo macizo hecho a máquina	1400	0.60
Madera de álamo	380	0.091
Madera de pino	410	0.104
Vidrio plano	2500	1.20
Yeso cartón	700	0.26

Fuente: Dalencon (2018)

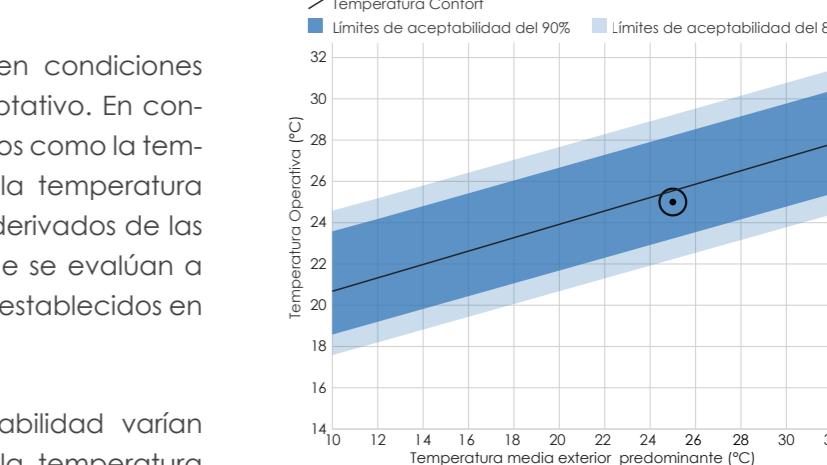
que intervienen en el microclima de los espacios habitables.

Además, estas cumplen condiciones señaladas en el método adaptativo. En consecuencia, los parámetros físicos como la temperatura operativa interior y la temperatura exterior media los cuales son derivados de las variables indicadas son los que se evalúan a partir de los rangos de confort establecidos en la figura 17.

- Temperatura del aire ambiente: entre 18 y 26 °C.
- Temperatura radiante media de superficies del local: entre 18 y 26 °C.
- Velocidad del aire: entre 0,05 y 0,15 m/s.
- Humedad relativa: entre el 40 y el 65 %.

De manera análoga, afirma que siempre que haya un estudio técnico, estos valores pueden ser alterados con la finalidad de dar paso a nuevos estándares de confort. Sin embargo, las normas internacionales permiten estimar mayor cantidad de variables, una de ella es ASHRAE, (2010) donde se menciona un modelo para edificios pasivos el cual considera variables tanto climáticas como personales

Figura 17. Modelo Adaptivo



Fuente: CBE (2020)

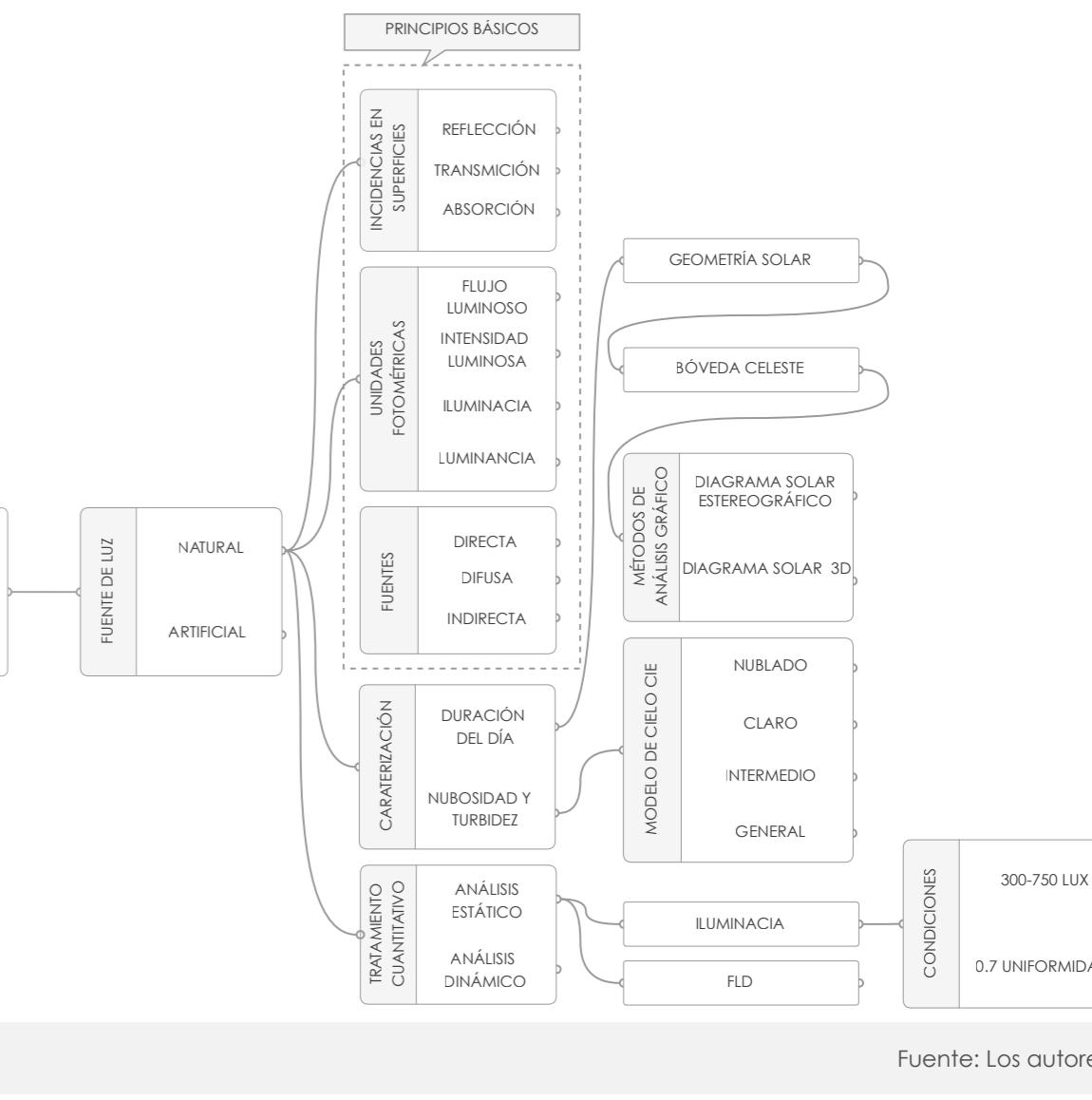


2.3. Confort lumínico

Con respecto al confort lumínico, se establece como la sensibilidad de la vista hacia la luz. Aquella percepción afecta de gran manera en el bienestar físico, fisiológico y psicológico de la persona (EADIC, 2013). Como resultado, una mala iluminación produce fatiga visual, dolores de cabeza, irritabilidad, errores y accidentes (Pezzi, 2012). Esta gran cantidad de consecuencias se debe a que del total de información que proviene de nuestro cuerpo, un 80% proviene de la vista (Sierra, 2017). Por tal razón, es conveniente disponer de una iluminación idónea al trabajo que se realiza en el lugar, teniendo en cuenta factores de tipo normativo, tecnológico, fisiológico, entre otros (Sierra, 2017).

De acuerdo con The European Commission, Architects' Council of Europe, Energy Research Group, Softech y Suomen Arkkiyhdistys (como se cita en Sigüencia & Tola, 2019); la fuente de luz puede ser natural, artificial o ambas. No obstante, la luz que proviene de las ventanas ofrece claras ventajas. Conviene subrayar, que los niveles de la iluminación natural varían de acuerdo con la actividad que se realiza. Igualmente, la iluminación debe contar con una buena

Figura 18. Diagrama confort lumínico



distribución; como la percepción de la claridad se ve afectada por efecto del contraste o deslumbramiento.

De ahí que la iluminación natural sea un tema crucial en el diseño de espacios educativos (Lahdari, Sriti, & Painter, 2021). Visto que, la luz del día ayuda a los estudiantes a aprender y retener información. Así mismo, los beneficios que se pueden esperar de las estrategias de iluminación natural son: mayor sociabilidad, concentración de los estudiantes, un ambiente menos estresante para los alumnos y un mejor rendimiento académico; es decir, existe una clara relación entre el desempeño humano en el entorno del aula y la luz natural.

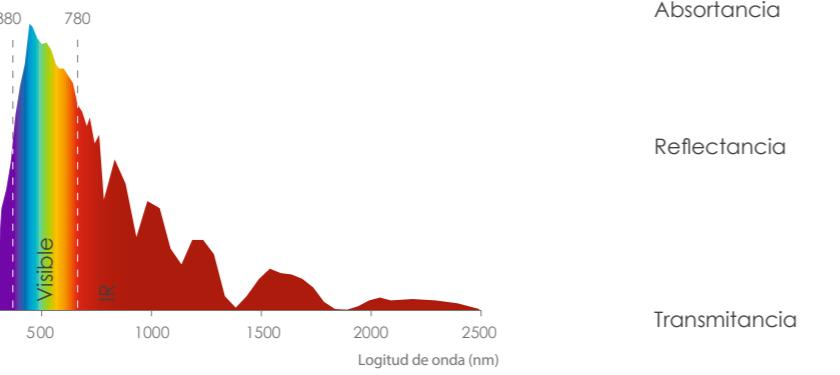
2.3.1. Luz natural

Para la elaboración de este estudio es significativo tener claro que es la luz natural, de donde y como proviene, saber de qué está compuesta, cuáles son sus características, los parámetros que utilizamos para medirla y los requerimientos humanos para obtener condiciones de confort.

2.3.1.1. Espectro electromagnético

La radiación electromagnética, conformada por ondas emitidas por el sol, transfieren energía por unidad de tiempo. Dentro de la radiación solar, según la longitud de onda del espectro, se puede apreciar una pequeña porción comprendida por longitudes de onda entre 380 nm y 780 nm, esta porción se denominada luz visible. La visión humana puede absorber esta parte de energía a través de los fotorreceptores, proceso necesario para el inicio de la visión (Chi, 2021).

Figura 19. Espectro electromagnético - visible

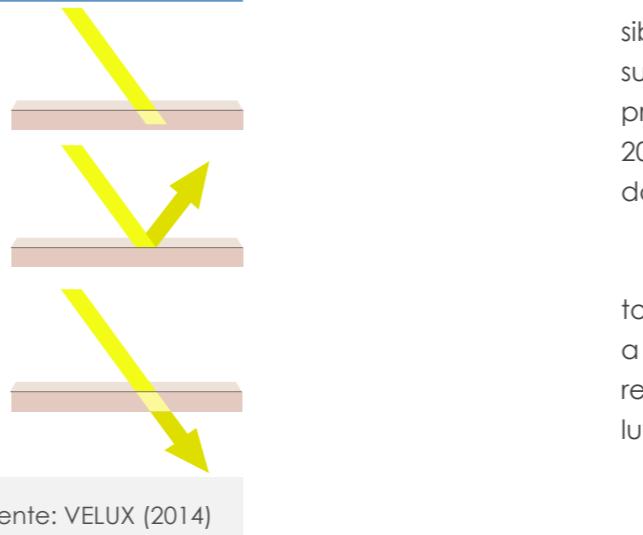


Fuente: VELUX (2014)

2.3.1.2. La luz y su incidencia en las superficies

"La dirección tomada por la luz es la del trayecto que demanda menos tiempo, es decir, el más corto", así definió Pierre de Fermat en el siglo XVII al comportamiento de la trayectoria de la luz. Cuando un rayo de luz da con un objeto, tres posibles fenómenos pueden ocurrir con el rayo: reflectancia, transmitancia y absorbancia; las propiedades del material definirán cuál y cómo ocurrirá (Guzmán, 2018).

Figura 20. La luz y su incidencia en las superficies



Fuente: VELUX (2014)

La reflectancia es cuando la luz incide sobre una superficie y esta es reflejada. La reflexión puede ser especular, difusa o mixta. Es especular cuando el ángulo de incidencia de la luz es igual al ángulo reflejado, característica de los espejos. En cambio, La reflexión difusa se da cuando el ángulo reflejado no es igual al ángulo de incidencia; esto es por materiales compuestos por partículas, propio de materiales opacos. En consecuencia, las superficies pueden presentar variaciones intermedias de estas dos clases de reflexión, es decir, no es ni completamente especular o difusa, es conocido como reflexión mixta (Celis, 2018).

En cuanto a la transmitancia, la luz visible pasa a través de la superficie y cambia su dirección ligeramente. Este fenómeno es propio de las superficies como los vidrios (Celis, 2018). Su índice de refracción aumenta cuando el material es más denso (Marsh, 2015).

La absorbancia se debe a la absorción total o parcial de una superficie, con respecto a la luz incidente. Su índice está dado por la relación del flujo luminoso absorbido y el flujo luminoso incidente (Celis, 2018).

2.3.1.3. Unidades fotométricas

La luz visible se cuantifica mediante las magnitudes luminotécnicas, las más elementales son flujo luminoso, Iluminancia, intensidad luminosa y luminancia.

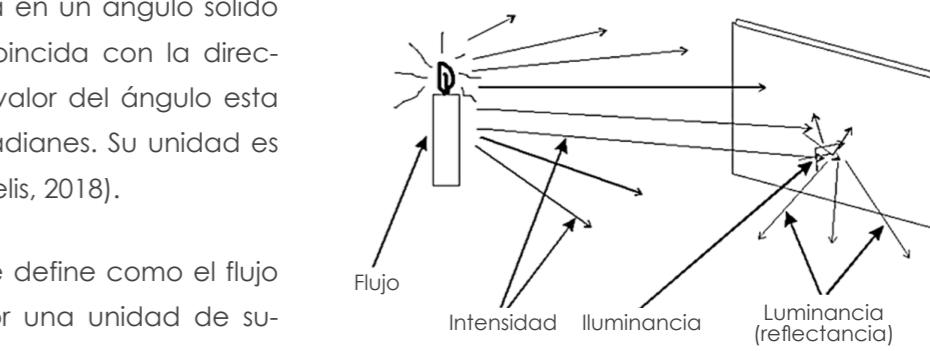
Se define el flujo luminoso como la cantidad de energía luminosa radiada por una fuente en cada segundo emitida en todas las direcciones, medida en lúmenes (Φ). Por consiguiente, esta produce sensación visual (Chi, 2021).

La intensidad luminosa de una fuente de luz se puede expresar en relación al flujo luminoso contenido en un ángulo sólido cualquiera, cuyo eje coincide con la dirección considerada, y el valor del ángulo está expresado en estereoradianes. Su unidad es la candela ($I = \Phi / \omega$) (Celis, 2018).

La iluminancia se define como el flujo luminoso que incide por una unidad de superficie, uniformemente repartido. El Lux es su unidad. Además, es muy importante para el diseñador, pues le permite medir la luz que lle-

ga a un espacio ($E = \Phi / s$) (Chi, 2021). El brillo de las fuentes de luz o de los objetos iluminados está determinado por la sensación visual producida por los objetos, denominado como luminancia o brillo fotométrico. Esta magnitud está dada entre la intensidad luminosa por la incidencia de luz en la superficie. Se mide en candelas/superficie ($L = I / s$) (Celis, 2018).

Figura 21. Diagrama magnitudes fotométricas



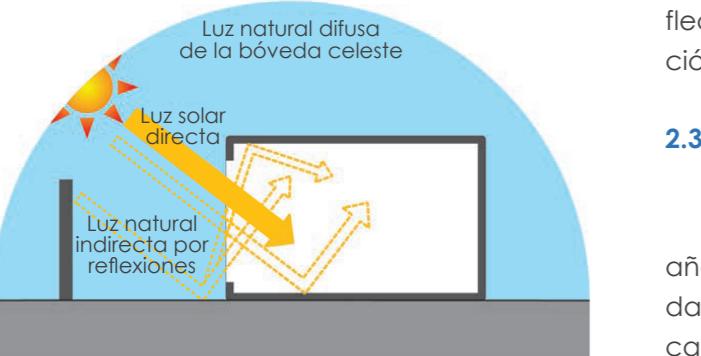
Fuente: Cuevas (2012)

2.3.1.4. Fuentes de luz natural

La investigadora Pattini (2007) ha señalado que en la iluminación natural se puede disponer de dos fuentes, el sol y el cielo. Por lo mismo, la luz natural puede llegar al interior de una edificación de manera directa o difusa y reflejada por las superficies del contexto natural o artificial. Es decir, en un espacio interior se puede aprovechar de la luz natural de tres fuentes principales: directa, difusa e indirecta.

Una porción de la luz natural es la luz solar directa, proviene directamente del sol e

Figura 22. Diagrama de principales fuentes de luz natural en el interior de los espacios



Fuente: Chi (2021)

incide en un lugar específico. Esta luz se caracteriza por su continuo cambio de dirección, posibilidad de ocurrencia, la iluminancia que produce en una superficie horizontal no obstruida y su temperatura de color (Pattini, 2007).

La luz natural que proviene de la bóveda celeste, cielo sin tomar en cuenta al Sol, se considera luz natural difusa. Así mismo, ésta puede tener la misma intensidad en diferentes direcciones, según su grado de nubosidad (Chi, 2021).

La luz solar indirecta llega al interior del espacio por la reflexión, generalmente a través de muros, pisos o cielos rasos. En climas soleados es de vital importancia la luz natural indirecta; dado que mediante superficies reflectoras se puede mejorar cantidad y distribución de luz natural (Pattini, 2007).

2.3.2. Caracterización de luz natural

La luz natural a lo largo de las horas del año se diferencia por su dinamismo en intensidad y color. Esta variabilidad como lo especifica Chi (2021) se debe a dos factores principalmente:

- duración del día

- condiciones de nubosidad y turbidez.

2.3.2.1. Duración del día

El primer factor, la duración del día, es el lapso de tiempo de exposición de la superficie terrestre a luz solar (Chi, 2021). Para concebir esta variabilidad es indispensable entender el movimiento existente de la Tierra alrededor del Sol, geometría solar.

2.3.2.2. Geometría solar

Según Víctor Armando Fuentes (como se cita en Cordero & Guillén, 2012), dentro de los elementos más importantes para el diseño de la arquitectura está la geometría solar. Puesto que, a través de la comprensión del comportamiento de la trayectoria de los rayos solares, se obtiene un dispositivo óptimo de control solar con efectos directos en el confort lumínico y térmico.

En la geometría solar se puede definir dos movimientos significativos (Fuentes, 2009). El primero, es la traslación orbital del planeta Tierra alrededor del Sol, este dura alrededor de 365 días. Otro movimiento es la rotación de la Tierra sobre su propio eje con una duración de aproximadamente 24 horas. Este eje está

inclinado $23^{\circ}27'$ con relación a la órbita terrestre, también conocido como plano de la elíptica. Visto que, la rotación siempre es paralela al eje y se da largo del desplazamiento orbital, los rayos solares inciden perpendicularmente sobre la superficie terrestre en un punto distinto cada día del año.

A causa de la inclinación del eje con el plano elíptico, en el desplazamiento de la Tierra con respecto al Sol se puede distinguir cuatro momentos principales que ocurren en distintas fechas del año (Marsh, 2019). — De acuerdo a la ubicación de la ciudad de Cuenca—, están los equinoccios donde los rayos solares inciden perpendicularmente sobre el período de la órbita anual del planeta—.

Figura 23. Diagrama Geometría Solar



Fuente: Marsh (2019)

Bóveda Celeste

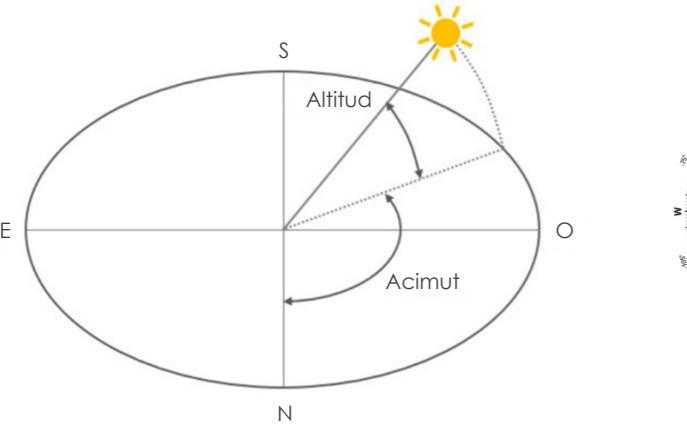
Lo descrito anteriormente, hace referencia que la Tierra se mueve y no el Sol; sin embargo, para fines prácticos se considera el movimiento del Sol alrededor de la Tierra (Fuentes, 2009). Como resultado, hay el mismo fenómeno que el real, gracias al carácter relativo del movimiento de la Tierra con el Sol.

Así pues, se tiene una superficie plana llamada horizonte y el desplazamiento del sol. Esta trayectoria, ruta del sol, se da sobre una esfera denominada bóveda celeste; en la cual forma órbitas circulares paralelas a lo largo de todo el año. En esta representación todo rayo se dirige al centro de la tierra, sin importar la posición del sol.

Para un estudio de asoleamiento en el diseño arquitectónico es necesario localizar el Sol en la bóveda celeste (Fuentes, 2009). Para ello, se emplea dos coordenadas denominadas horizontales o celestes, Altura y Acimut. Primero, Altura es el ángulo que se forma por el rayo solar y el plano del horizonte; se mide a partir del plano horizontal al Cenit, punto

vertical más alto de la bóveda celeste. Segundo, Acimut es el ángulo formado por la proyección del rayo solar sobre el horizonte con el eje norte-sur verdadero en manera horaria si se está en la zona norte y antihoraria en la zona sur. Estas coordenadas dependen de una posición en específico, un punto sobre la superficie terrestre, para las cuales se usan coordenadas geográficas: Latitud y Longitud.

Figura 24. Diagrama de Bóveda celeste

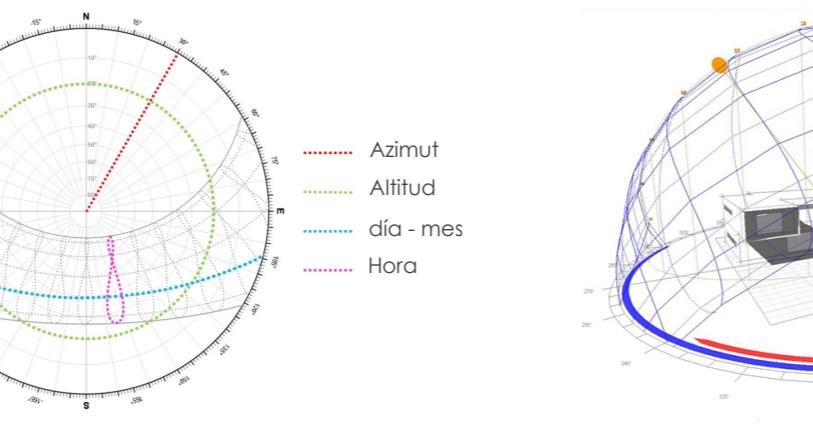


Fuente: Lewy (2020)

Métodos de análisis

La investigación de Arquitectura bioclimática (Fuentes, 2009) ha señalado que existen tres métodos para conocer y examinar el comportamiento del sol. En primer lugar, el método gráfico representa una información clara que se usa en el diseño arquitectónico. También, el método matemático utilizado para el diseño de sistemas y dispositivos solares activos, por su información precisa. Finalmente, a través de modelos físicos de simulación, otorga una visión cualitativa del comportamiento del edificio.

Figura 25. Diagrama Solar proyección estereográfica y gráfica solar tridimensional



Fuente: Ordóñez (2021)

Dentro del método gráfico podemos encontrar entre los más relevantes: el diagrama solar estereográfico y las gráficas tridimensionales de recorridos solares (Ordóñez, 2021).

El diagrama solar de proyección estereográfico es el más empleado en la actualidad. Entre los principales componentes se pueden dividir dos tipos de líneas:

- Las que establecen la posición del Sol, altura y el acimut.
 - Las que nos permiten identificar el tiempo, día-mes y hora.
- Este diagrama es muy útil para el estudio de sombras y el análisis y evaluación de dispositivos de control solar.

Al mismo tiempo, la gráfica tridimensional puede visualizarse las posiciones solares trazadas sobre una semiesfera, misma que incluyen las líneas del mes-día y hora. A pesar de que las gráficas solares tridimensionales no sustituyen a las bidimensionales; es necesaria para ciertos análisis. Su gran ventaja está en la observación intuitiva de la posición del sol en un determinado sitio.

2.3.2.3. Nubosidad y turbidez

Este segundo factor es el encargado de dar una luz natural difusa o una luz solar directa (Chi, 2021). Este efecto, se debe a la difusión o absorción de la atmósfera; condición dada por la nubosidad y turbidez atmosférica. Al tratarse de un elemento variable durante el año, hace que la iluminancia exterior se modifique constantemente. Por esto, la iluminancia que llega por reflexión o transmitancia a los espacios interiores también varía.

2.3.2.3.1. Modelos de cielo

Los modelos de cielo se dan por una formulación teórica, apoyado en la caracterización de las fuentes de luz (Chi, 2021). La importancia del apartado en la evaluación de iluminación natural en espacios interiores; ha

hecho que esta ciencia se desarrolle desde hace unas décadas como lo describe Kocifaj & Kómar (2021) basado en los estudios de Richard Kittler de 1985. Por ende, La Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) en 2003 ha desarrollado 15 cielos homogéneos, que son usados para la evaluación de disponibilidad de luz diurna. No obstante, los 15 cielos se pueden reunir en tres grupos básicos: cielo nublado, cielo claro y cielo intermedio (Kocifaj & Kómar, 2021).

Cielo nublado estándar CIE

El cielo nublado, también conocido como cielo uniformemente nublado, toma la distribución de luminancias de la bóveda celeste como constantes, descartando la luz directa del sol (Chi, 2021). Este cielo tiene cubierto el 90% de nubes, aunque, otras investigaciones dan un cielo con un rango de nubes del 70 al 100%. Las características más importantes de este tipo de cielo son: considerar la iluminancia exterior sin obstrucciones sobre una superficie horizontal, en un valor de 5000 lux; la luminosidad del cenit es de 2.5 a 3 veces más que el horizonte; y tratar a la luminancia del cielo como isotrópicas, —independientemente de la dirección de donde provienen—,

por tanto, este modelo es independiente de la ubicación geográfica.

Cielo claro estándar CIE

El cielo en el cual no se tiene en cuenta la obstrucción de nubes o está en un porcentaje menor al 30%, se lo conoce como cielo claro (Chi, 2021). Este consiste en dos componentes: la componente directa dada por el sol y la componente indirecta incorporada por la reflexión y dispersión de la luz solar en la atmósfera. Al mismo tiempo, entre las características más relevantes de este cielo están: tener la luminancia en una relación de 1 por 0.5, en donde la parte más brillante se encuentra el Sol y la más oscura a 90° del astro; y ser dependiente de la posición del sol, ya que, la distribución luminosa de un cielo despejado no es uniforme.

Cielo intermedio

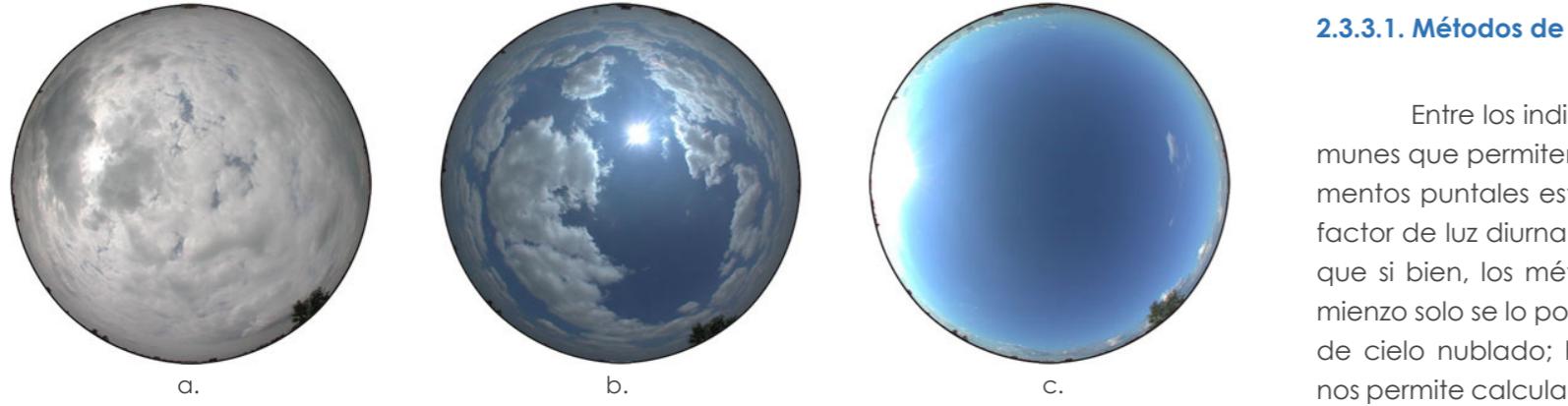
Es el que más se acerca a la realidad, porque toma en cuenta la presencia estacional del sol con alteraciones de nubosidad variable (Ramírez, 2020). Este tipo de cielo tiene del 30 % al 80 % de la bóveda celeste oscurecida por nubes. También, la iluminancia de una superficie exterior no obstruida puede

variar de 10000 a 100000 lux, con nubes y sin nubes interceptando el sol correspondiente mente.

Cielo general estándar CIE

Los anteriores tres cielos engloban la totalidad de los descritos por la CIE (2003); pero existe otro tipo, el cual toma datos como la radiación solar (directa y difusa) de los ar chivos climáticos recogidos de estaciones me teorológicas locales. Es un gran avance, por su manera fiable y precisa la distribución de

Figura 26. Modelos de cielos según la CIE



Nota. a. cielo nublado; b. cielo intermedio; c. cielo claro

Fuente: Marsh (2018)

luminancias para el clima y lugar de emplazamiento del espacio arquitectónico. Dicho modelo es desarrollado por R.Perez, R.Seals y J.Michalskyse en 1993 al cual se lo denomina All-Weather y normado por las CIE como cielo general estándar (Chi, 2021).

Para evaluar el rendimiento de la luz natural dentro de los espacios arquitectónicos es necesario basarse en un criterio objetivo y cuantificable. Este análisis puede ser mediante métodos estáticos y dinámicos. Los análisis estáticos se basan en cálculos para momentos puntuales; por otro lado, los análisis dinámicos son capaces de evaluar las condiciones de luz diurna durante todo el año (Ordóñez, 2021). Como, la utilización de índices a largo plazo impide una evaluación puntual de las pieles cinéticas (Abdollahi & Eltawee, 2021); el presente estudio solo se centra en el tratamiento de datos a través de los análisis estáticos.

2.3.3.1. Métodos de análisis estáticos

Entre los indicadores estáticos más comunes que permiten la cuantificación en momentos puntuales están: la iluminancia (E) y el factor de luz diurna (FLD). Conviene subrayar, que si bien, los métodos estáticos en un comienzo solo se lo podían realizar bajo modelos de cielo nublado; hoy en día, la tecnología nos permite calcular los valores de iluminancia y FLD empleando otros modelos de cielo (Ordóñez, 2021).

2.3.3. Tratamiento cuantitativo de la luz natural

A través de este indicador se mide directamente el nivel de iluminación en un espacio determinado. Su unidad es el Lux, equivalente a 1 lumen por metro cuadrado. El análisis se basa en una malla en la cual calcula el nivel de iluminancia de cada celda. Dicha malla abarca toda el área del espacio a analizar y esta ubica a la altura de superficie de trabajo. Podemos adicionar, el valor de iluminancia de cada celda indica por valores numéricos o escala de colores. De manera que, establece los valores mínimos y máximos, porcentaje de áreas y hasta el nivel de uniformidad de luxes de la malla (Ordóñez, 2021).

2.3.3.1.1. Iluminancia

Además, de establecer los parámetros cuantitativos para un confort lumínico, es necesario saber como se representa en el espacio. De ahí que sea indispensable basarse en una norma para representar los valores de iluminancia y FLD en los planos de trabajo. La Norma Europea 12464-1 establece un máximo de tamaño para la rejilla, esta se consigue con la

siguiente fórmula:

$$p = 0,2 \times 5^{\log_{10}(d)}$$

Donde:

d = dimensión más larga del área calculada (m),
p = tamaño de celda de rejilla máximo (m).

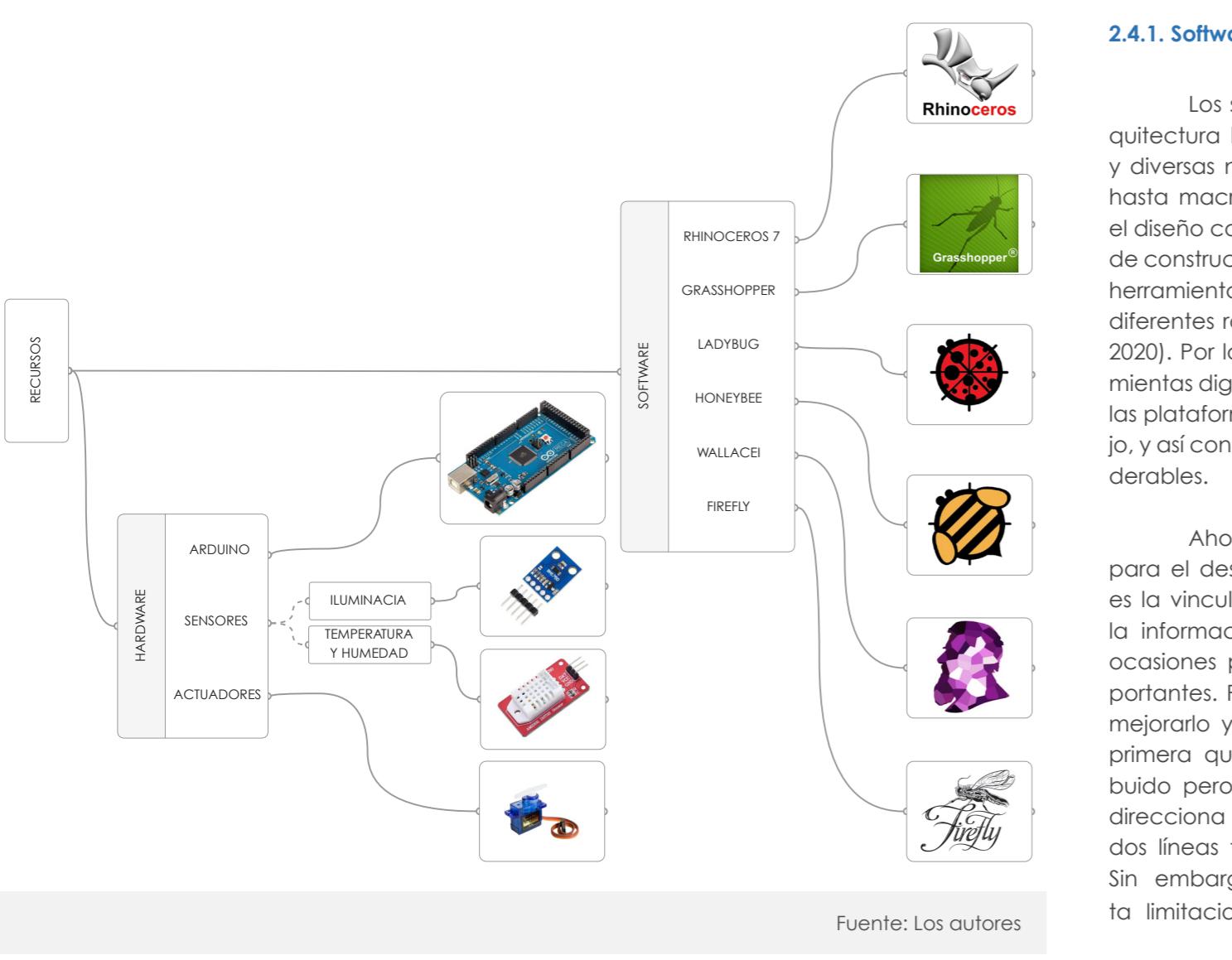
2.3.4.2. UNE 12464-2:2012

Además, de establecer los parámetros cuantitativos para un confort lumínico, es necesario saber como se representa en el espacio. De ahí que sea indispensable basarse en una norma para representar los valores de iluminancia y FLD en los planos de trabajo. La Norma Europea 12464-1 establece un máximo de tamaño para la rejilla, esta se consigue con la

Tabla 4. Estándares de iluminancia

Tareas y clases de locales	Iluminancia media en servicio (lux)		
	Mínimo	Recomendado	Óptimo
Aulas, laboratorios	300	400	500
Bibliotecas, salas de estudio	300	500	750

Fuente: Pérez (2007)

Figura 27. Softwares y hardwares

2.4. Recursos

2.4.1. Softwares

Los softwares en la disciplina de la arquitectura han evolucionado por las nuevas y diversas necesidades para satisfacer micro hasta macroproyectos. Esto se da mediante el diseño como la coordinación de elementos de construcción e incorporación de sistemas y herramientas de análisis de rendimiento en las diferentes ramas que esto implica (Estupiñán, 2020). Por lo tanto, la demanda de las herramientas digitales y su constante innovación en las plataformas para mejorar el flujo de trabajo, y así conseguir trabajos con calidad considerables.

Ahora bien, el principal problema para el desarrollo óptimo de estos softwares es la vinculación entre los mismo. En efecto, la información no puede ser utilizada y en ocasiones provoca la pérdida de datos importantes. Por esta razón, se ha considerado mejorarlo y se ha optado por dos áreas: la primera que proporciona un enfoque distribuido pero desconectado y la otra que se dirige en un sistema centralizado. Las dos líneas tienen sus bases fundamentadas. Sin embargo, cada una de ellas presenta limitaciones (Mackey & Roudsari, 2018).

Es conveniente decir, existen métodos que han buscado un punto intermedio como es Rhinoceros 7. Este programa mediante el uso de componentes permite una infinidad de opciones en modelos; en otras palabras, la posibilidad de un análisis para un número de variables infinitas, como es el caso de un análisis ambiental. Por lo mismo, las limitaciones no se observan en la generación del modelado 3D, si no más bien en el tema de hardware (Estupiñán, 2020). Es importante mencionar, la base de visualización para este estudio en tanto al espacio es generado en esta plataforma. Aunque, el modelo presentado es simple, los complementos como Grasshopper son el refuerzo de este software.

Grasshopper es un complemento paramétrico que genera dibujos y geometrías complejas con variados parámetros ajustables mediante cables que conectan herramientas entre sí para permitir funciones dentro de Rhinoceros 3D. Al mismo tiempo, su aplicación reflejada en elementos que responden a disciplinas tales como arquitectura, urbanismo, estudio estructural, análisis ambiental, ingeniería mecánica, optimización, estudio sónico, decoración, entre otras (Eltawee & Su, 2017). Concretamente, Ladybug al ser un complemento se centra en el estado ambiental mediante el uso de variables y herramientas climáticas.

Ladybug Tools es un conjunto de aplicaciones informáticas que apoyan el diseño y la formación ambiental. Este grupo se encuentra entre los más completos y conecta interfaces de diseño asistido por computadora con una gran cantidad de motores de simulación con certificación. De ahí que Ladybug ya como un componente realiza un análisis minucioso de los antecedentes ambientales para presentar información clara y detallada para obtener un óptimo diseño basado en el medio ambiente. Además, al agregarse junto con Honeybee al Grasshopper como complementos. Estos tienen la capacidad de funcionar como un motor para comunicarse con los conocidos softwares de simulación de edificios Radiance, DAYSIM y EnergyPlus (Eltawee et al., 2020).

Por otra parte, Honeybee al encontrarse en el mismo grupo de Ladybug analizan factores ambientales. Sin embargo, Honeybee es considerado para realizar simulaciones en investigaciones y tiene la función de desarrollar ejercicios en iluminación detallada, así como modelos termodinámicos. Mientras Ladybug importa archivos meteorológicos propor-

tos arbitrarios para cada iteración del diseño (Torres et al., 2021).

La conexión entre el computador y el Arduino es una conexión física (USB). Así pues, el enlace se establece con Firefly. Este complemento es un software de código abierto que se puede descargar para trabajarla como intermediario entre Grasshopper y el microcontrolador. Así mismo, las distintas funciones de movimiento son traducidas hacia la placa de Arduino desde la información creada en Grasshopper (Eltaweeel et al., 2020). En este caso, la rotación y translación son variables para el movimiento del objetivo.

2.4.2. Hardwares

Para llevar a cabo el traspaso de la simulación al modelo real, se necesita de un dispositivo que permita la interacción entre software y hardware. Esto se lo realiza mediante un controlador. En este caso, se hace referencia a Arduino MEGA 2560; a razón de que Firefly es un puente específico para dicho módulo y Grasshopper. El microcontrolador Arduino está basado en circuitos integrados y de lenguaje abierto, que admite diferentes usos. Por su parte, cuenta con 54 pines digitales y

16 entradas/salidas analógicas, este gran número tolera controlar varios parámetros. Así, la placa es capaz de vincularse con diferentes componentes, como los sensores que le permiten leer datos y también controlar la acción de actuadores (Eltaweeel et al., 2021).

Los sensores que se pueden conectar a la placa de Arduino son analógicos o de circuito integrado. Aquellos poseen una buena precisión al momento de tomar medidas y la posibilidad de obtener datos entre lapsos cortos por la velocidad de respuesta.

Cabe mencionar, Texas Instrument (como se citó en Muñoz & Prado, 2018) señala que los sensores digitales no requieren de calibraciones externas o ajustes para obtener precisiones en sus mediciones.

Las magnitudes físicas o químicas son medidas con variables de instrumentación, que los dispositivos transforman en valores; Tales como temperatura, humedad, iluminancia, entre otros (Escolano, 2018). Las características de los instrumentos usados en este estudio se muestran en la siguiente lista.

Tabla 5. Características principales de sensores

Dispositivo	Monitorea	Rango de medición	Precisión de medición	Resolución de medición
DHT22	Temperatura	De -40°C a 80°C	<± 0.5°C	0.1°C
	Humedad	De 0 a 100% RH	2% RH	0.1% RH
BH1750	Iluminancia	1 a 65 535 lux	Respuesta espectral similar a la del ojo humano	0.5 lux

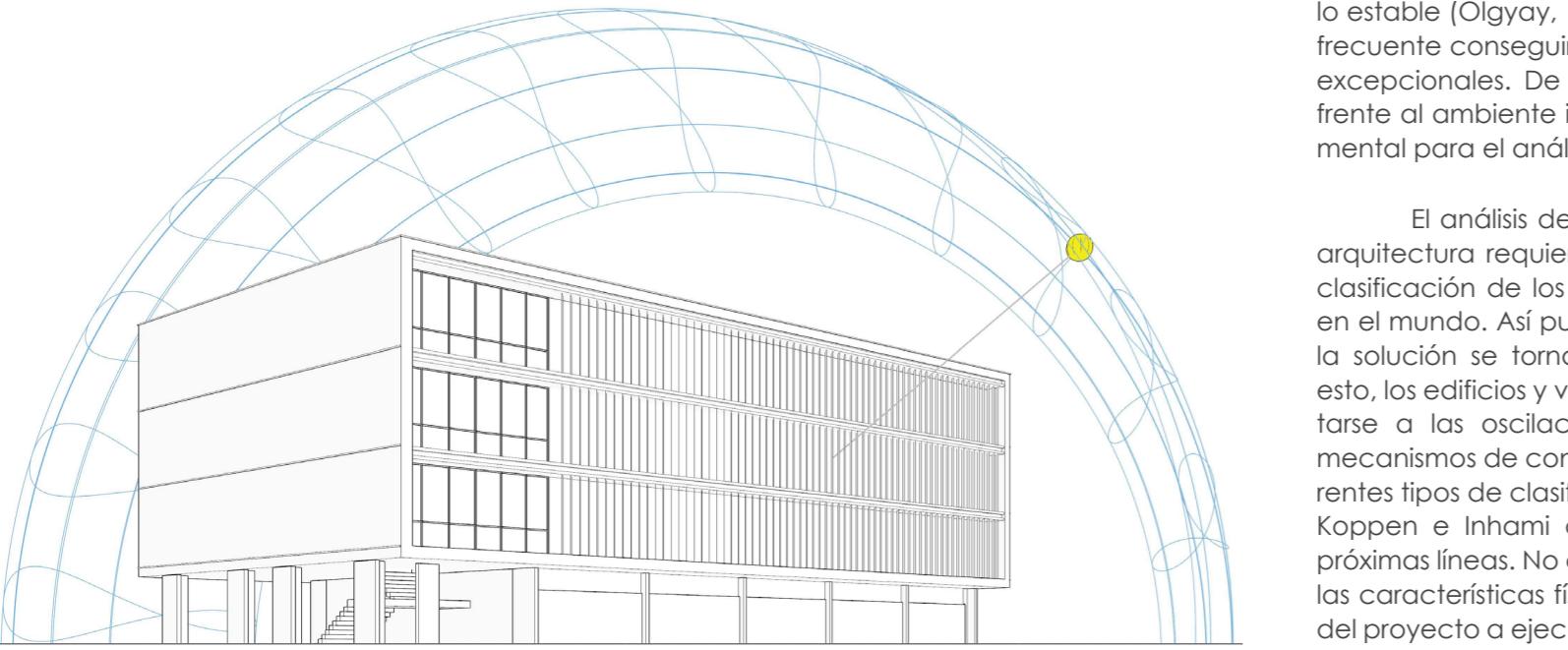
Fuente: ISO (2002)

Con respecto a los actuadores, existe una gran variedad de tipo electromagnético que pueden ser controlados mediante Arduino. Entre los más conocidos están: motores paso a paso, motores DC, relé electromagnético y servo-motor. Este último es el más utilizado en aplicaciones donde una dinámica elevada, velocidad precisa y posicionamiento son factores decisivos. El funcionamiento es a través de pulsos, mismos que definen cuando avanzar. Así, puede girar su eje hasta completar los 360 grados y mantener su posición (Arrué, 2017). Las especificaciones del servomotor que mueven la parte arquitectónica de la fachada se observan en la tabla 6.

Tabla 6. Características principales de sensores

Dispositivo	Grados de libertad	Rango de movimiento	Velocidad
MICRO SERVO SG90	Uno	360°	0.1 seg/60°

Fuente: ISO (2002)

Figura 28. Gráfica tridimensional de recorrido solar en la Facultad de Psicología

Fuente: Los autores

2.5. Arquitectura y su relación con el clima

El clima es un factor esencial para las simulaciones energéticas en edificios, debido a la influencia directa en su variabilidad. Por lo tanto, lo correcto es trabajar con los componentes naturales para así conseguir un modelo estable (Olgay, 1998). En cambio, es poco frecuente conseguir condiciones ambientales excepcionales. De ahí que evaluar al clima frente al ambiente interior y exterior es fundamental para el análisis de confort.

El análisis de la relación del clima y la arquitectura requiere el entendimiento de la clasificación de los diferentes tipos presentes en el mundo. Así pues, lo templado es donde la solución se torna un poco compleja. Por esto, los edificios y viviendas tienen que adaptarse a las oscilaciones térmicas mediante mecanismos de control. Para ello, existen diferentes tipos de clasificación por autores como Koppen e Inhami que serán citados en las próximas líneas. No obstante, primero describir las características físicas y de emplazamiento del proyecto a ejecutar. El edificio de la Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca tiene la función de albergar actividades de conocimiento. En la planta baja, el área administrativa y los tres pisos superiores destinadas a aulas. Aunque, la orientación de sus fachadas principales en dirección al noreste y sureste buscan captar la mayor iluminación hacia el interior; estas consiguen generar

discomfort en estos espacios. La materialidad influye directamente a la variación ambiental interna por el alto uso de vidrio en sus ventanales, los mismos que producen grandes pérdidas de calor. Así mismo, el ladrillo hueco, la madera y los muros de hormigón armado tienen los valores U superan el límite que determina la NEC-11 (Encalada, 2013).

Al desarrollar el proyecto en un clima como el de Cuenca, Ecuador. Esta ciudad está definida en la zona 3 denominada "Húmeda Lluviosa" en términos utilizados por la INAMHI. Conviene subrayar, a partir de datos proporcionados por estaciones meteorológicas, se puede obtener los grados por día de calefacción y refrigeración necesarios para la realización de un mapa de zonificación climática en el Ecuador, donde se establece lo siguiente (tabla 8). Sin embargo, los niveles que establece Koppen son utilizados de manera global. Primero, parte de nomenclatura con las iniciales letras del abecedario para clasificarlos en seco, tropical, boreal, entre otros (tabla 7). Además, el autor analiza el régimen de temperatura en diferentes climas, el régimen de lluvia, límites de temperatura de climas polares y rangos de oscilación. Estos se ven reflejados en literales, los tipos principales de clima (García, 2004). Así mismo, Cuenca se encuentra categorizada dentro del grupo Cfb a causa de sus condiciones climáticas (Delgado, 2020).

Tabla 7. Zonas climáticas según la KOPPEN

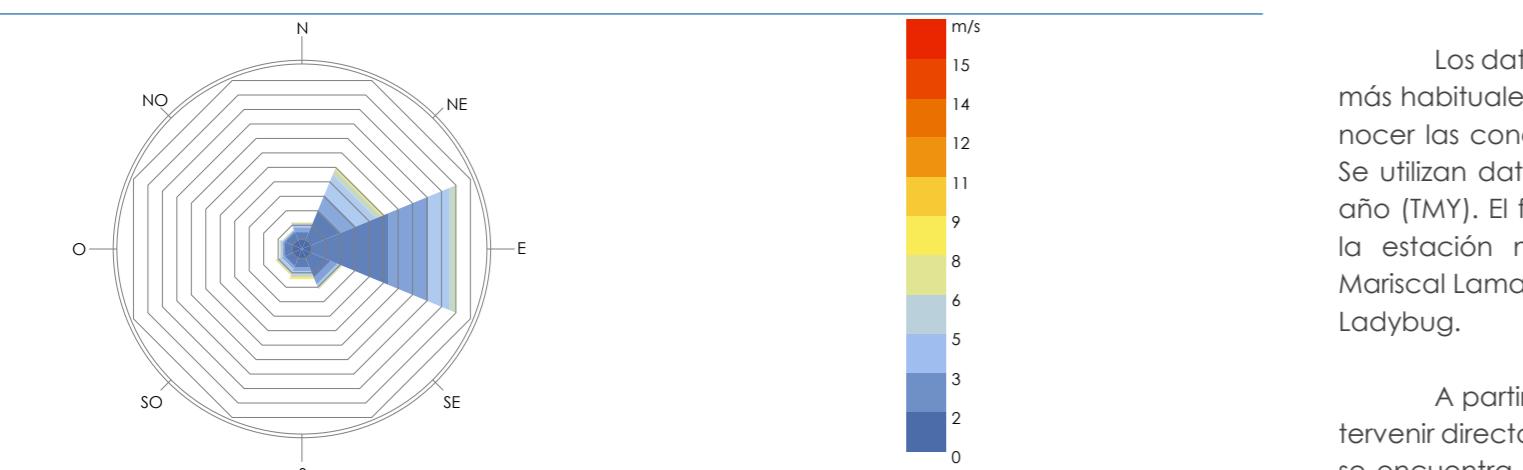
Zona climática	Nomenclatura	Tipos principales de clima
Clima tropical lluvioso	A	Af – clima de selva Aw – Clima de sabana
Clima seco	B	BS – Clima de estepa BW – Clima de desierto
Clima templado lluvioso	C	Cw – Clima sínico Cs – Clima mediterráneo Cf – Clima templado Cfa – Clima virginiano húmedo Cfb – Clima de las hayas
Clima boreal	D	Dw – Clima continental boreal Df – Clima ruso canadiense
Clima frío o polar	E	ET – Clima de tundra EF – clima de hielos perpetuos

Fuente: KOPPEN

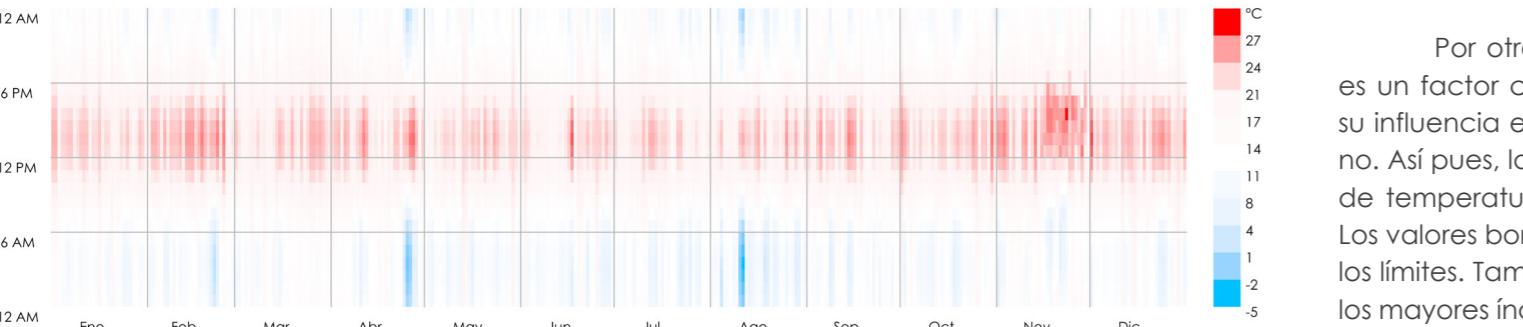
Tabla 8. Zonas climáticas según la INAMHI

Zona climática	Nombre	Localidades de referencia	Criterio térmico
1	Húmeda muy calurosa	Guayaquil, Esmeraldas	5000 < CDD 10°C
2	Húmeda calurosa	Tena, Puyo	3500 < CDD 10°C ≤ 5000
3	Húmeda lluviosa	Quito, Loja, Cuenca	CDD 10°C ≤ 2500 y HDD 18°C ≤ 2000
4	Continental templada	Ibarra, Ambato, Azogues	2000 < HDD 18°C ≤ 3000
5	Fría	Latacunga, Riobamba	3000m < altura ≤ 5000
6	Muy fría	Páramos	5000m < altura

Fuente: INAMHI

Figura 29. Diagrama de velocidad del viento en Cuenca

Fuente: Estación meteorológica del Aeropuerto Mariscal Lamar

Figura 30. Diagrama de temperatura de bulbo seco en Cuenca

Fuente: Estación meteorológica del Aeropuerto Mariscal Lamar

2.5.1. Variables del clima externo

Los datos climáticos en las condiciones más habituales son la mejor manera para conocer las condiciones actuales (Perez, 2007). Se utilizan datos meteorológico típicos en un año (TMY). El fichero climático es tomado de la estación meteorológica del Aeropuerto Mariscal Lamar y sus diagramas generados en Ladybug.

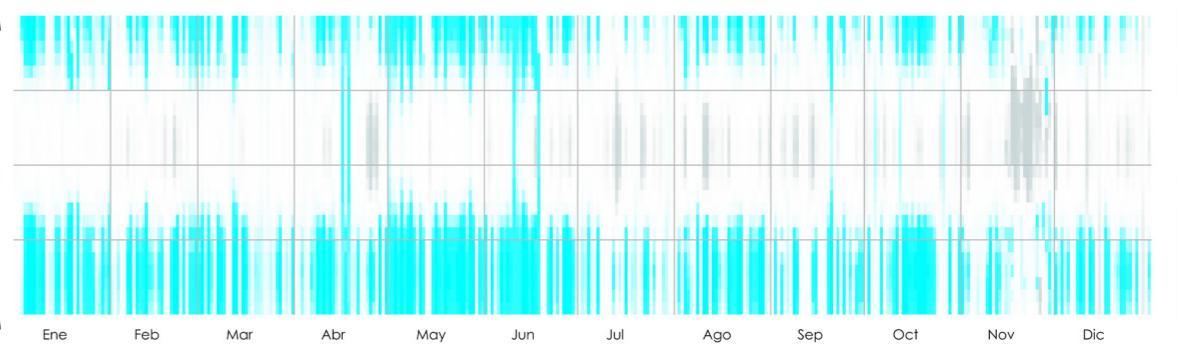
A partir de ello, entre las variables a intervenir directamente en un ambiente térmico se encuentra la velocidad del aire, la misma que se puede evidenciar en la figura 29 como este alcanza velocidades de 15 m/s y cuya dirección predominante es desde el Este. El mes de mayor flujo del viento es mayo, por sus temperaturas alcanzadas.

Por otro lado, la temperatura del aire es un factor considerado para el análisis por su influencia en la sensación de confort interno. Así pues, la figura 30 representa los rangos de temperatura en el transcurso de un año. Los valores bordean los -5 a 27°C, siendo estos los límites. También, es importante acotar que los mayores índices de temperatura se dan en el medio día (Marsh, 2020). En consecuencia, las mañanas y noches presentan pérdidas de calor. Los meses con menor temperatura son abril y agosto.

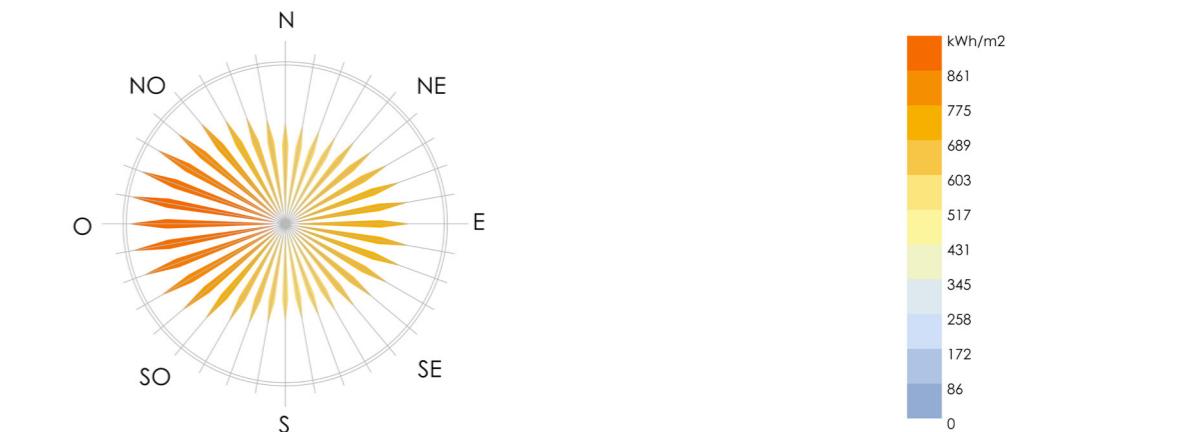
Los niveles registrados en horas de la mañana (entre las 7am y 12m) difieren unos 8°C aproximadamente. Esto evidencia un clima templado en la ciudad de Cuenca, donde la oscilación diaria es más relevante que la anual (Encalada, 2013). Pero, la cantidad de humedad presente en los espacios cambia la percepción térmica de los usuarios.

De modo que, las precipitaciones en el Austró tienen un ciclo de ocho meses entre octubre y mayo. El período seco es menor entre junio y septiembre. Por consiguiente, la humedad relativa se presenta temprano y en la noche, con niveles altos de aproximadamente el 95%, mientras que, por la tarde baja a un 50 %. El mes con mayor humedad registrado en noviembre a razón de sus altas precipitaciones.

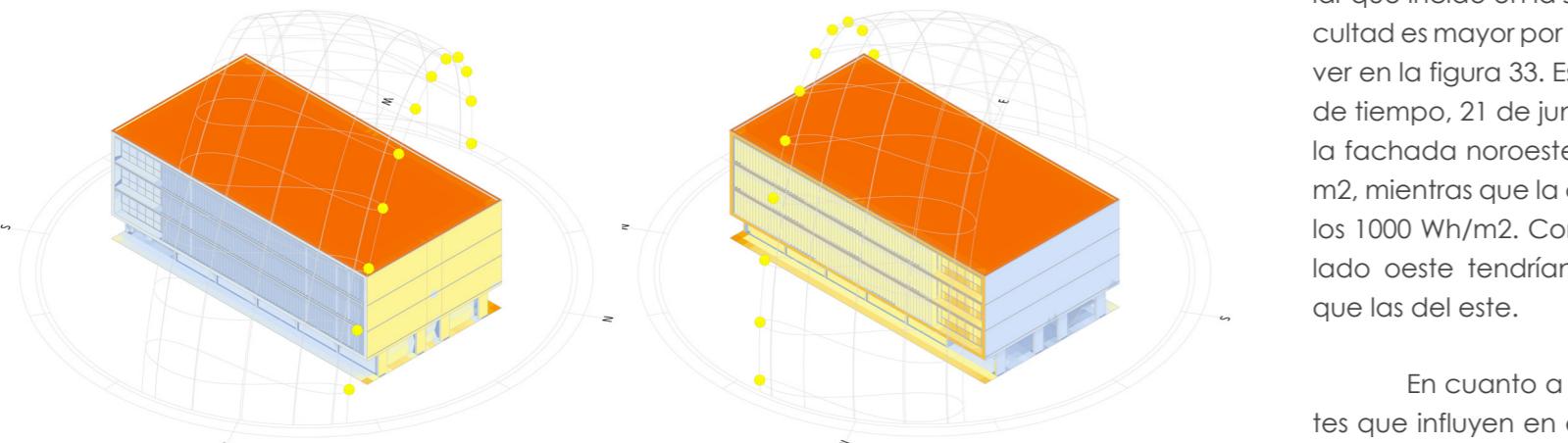
Por otra parte, la radiación solar se puede presentar como difusa cuando es proyectada desde el cielo o como directa desde el disco solar. Como contrapartida, las dos son importantes para conocer la radiación solar total. La figura 32 representa la cuantía total de radiación recibida desde el oeste, es decir, en horas de la tarde refleja la atención a considerar en el estudio, ya que sus índices son altos. Los kWh/m² alcanzan los 1088 en Cuenca. Por lo cual, el mes de noviembre es donde se presentan estos picos más altos, con un promedio de 240 Wh/m², siendo el mes con mayor radiación solar.

Figura 31. Diagrama de humedad relativa en Cuenca

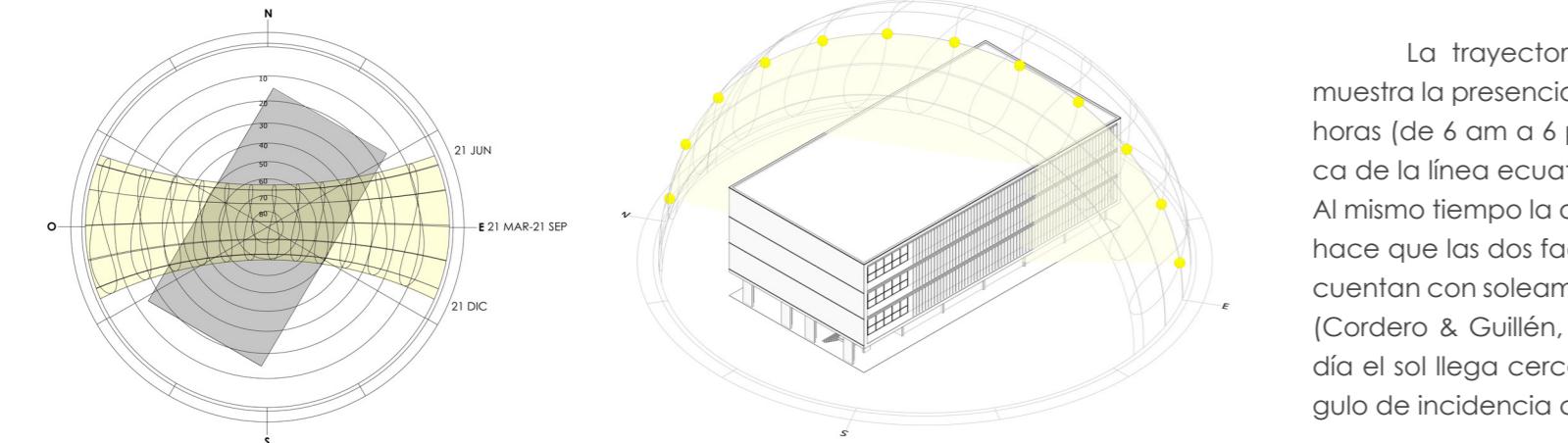
Fuente: Estación meteorológica del Aeropuerto Mariscal Lamar

Figura 32. Diagrama de radiación solar total en Cuenca

Fuente: Estación meteorológica del Aeropuerto Mariscal Lamar

Figura 33. Incidencia de Irradiación solar sobre la superficie exterior de la Facultad de Psicología

Fuente: Los autores

Figura 34. Diagrama solar estereográfico y 3D

Fuente: Los autores

Cabe señalar que, la Irradiación solar que incide en la superficie exterior de la facultad es mayor por las tardes, como se puede ver en la figura 33. Esta muestra en un periodo de tiempo, 21 de junio de 6 am a 6 pm, como la fachada noroeste llega hasta los 3640 Wh/m², mientras que la cara sureste no sobrepasa los 1000 Wh/m². Como resultado, las aulas del lado oeste tendrían más altas temperaturas que las del este.

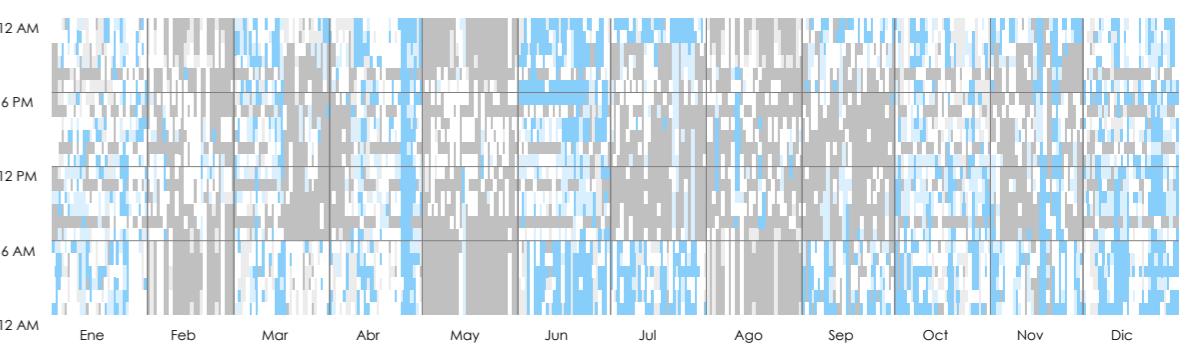
En cuanto a las variables más relevantes que influyen en el confort lumínico está la trayectoria solar, la nubosidad y la iluminancia global horizontal, este último esta relacionado con los dos primeros análisis, ocasionado por la fuente de luz directa y difusa (Pattini, 2007).

La trayectoria solar, en la figura 34, muestra la presencia de luz natural durante 12 horas (de 6 am a 6 pm) por su ubicación cerca de la línea ecuatorial (latitud 2°53'12" Sur). Al mismo tiempo la orientación de la facultad, hace que las dos fachadas noroeste y sureste cuentan con soleamiento durante todo el año (Cordero & Guillén, 2012). Inclusive, al medio día el sol llega cerca de los 90° de como ángulo de incidencia con respecto al horizonte.

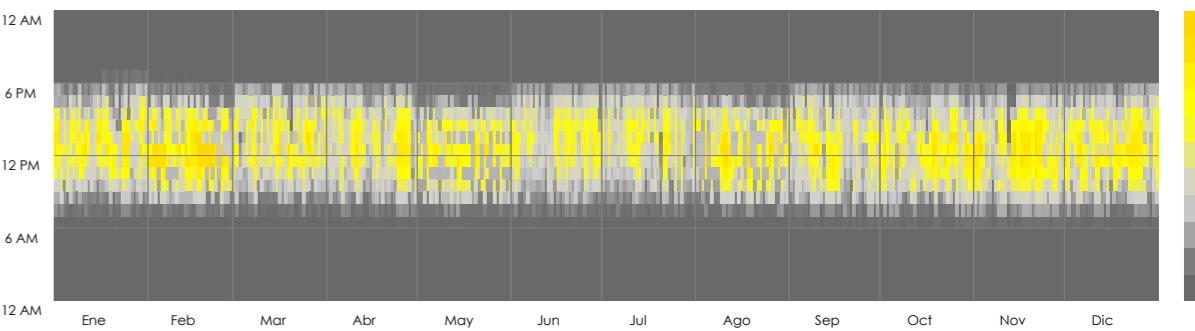
La nubosidad en Cuenca (figura 35) a lo largo del año y día es variado. De esta variabilidad se puede percibir que, los meses con el porcentaje más alto de nubosidad son: febrero, mayo y agosto. A lo largo de todo año y con la presencia de luz natural el porcentaje de incidencia de nubosidad según la clase de cielo son: cielo claro 12,80%, cielo intermedio 40,21% y cielo nublado 46,99%

En cuanto a la iluminancia global se puede percibir en la figura 36 que sus valores son igualmente variables, pero a lo largo del día siguen una tendencia, producto del trayecto solar. Los índices más altos de iluminancia —en su gran mayoría— se dan alrededor del mediodía. Si bien dichos valores de iluminancia global son los máximos con respecto al día, la presencia de nubes en el cielo hace variar este de 37400 hasta los 130000 luxes.

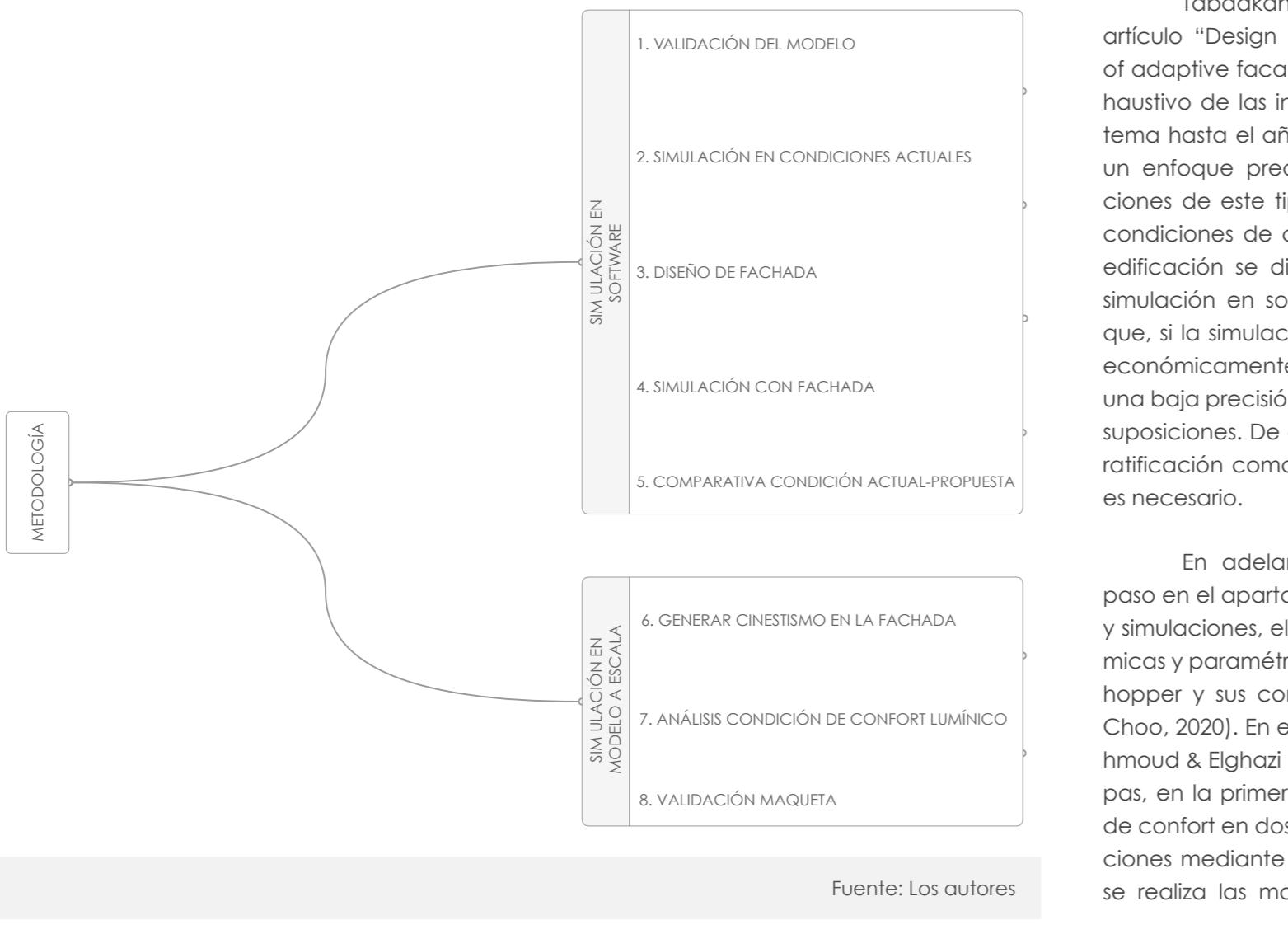
Cabe destacar que los factores externos que inciden en el tema lumínico pueden ser cambios de hora a hora como la trayectoria solar. Ahora bien, la variación de la nubosidad se da en minutos (Tabadkani et al., 2021). Aquello se debe tomar en cuenta para conseguir el confort.

Figura 35. Diagrama del porcentaje de nubosidad en Cuenca

Fuente: Estación meteorológica del Aeropuerto Mariscal Lamar

Figura 36. Diagrama de la Iluminancia global horizontal en Cuenca

Fuente: Estación meteorológica del Aeropuerto Mariscal Lamar

Figura 37. Proceso metodológico

2.6. Metodología

Tabadkani et al., (2021) presenta en su artículo “Design approaches and typologies of adaptive facades: A review” un análisis exhaustivo de las investigaciones pertinentes al tema hasta el año 2020, señalan lo siguiente: un enfoque predominante en las investigaciones de este tipo que requiere mejorar las condiciones de confort en el interior de una edificación se divide en dos grandes fases: simulación en software y validación. De ahí que, si la simulación por software es rápida y económicamente efectiva, son propensas a una baja precisión debido a simplificaciones y suposiciones. De esta manera, un proceso de ratificación como la medición en un modelo es necesario.

En adelante, tenemos como primer paso en el apartado de propuesta de estudio y simulaciones, el uso de herramientas algorítmicas y paramétricas, específicamente Grasshopper y sus complementos (Panya, Kim, & Choo, 2020). En esta fase la investigación Mahmoud & Elghazi (2016), propone dos sub-etapas, en la primera se analiza las condiciones de confort en dos aulas existentes sin modificaciones mediante simulaciones; paso seguido, se realizan las modificaciones pertinentes de

cómo responde las aulas con la fachada responsive. Esto busca que su diseño sea óptimo y por ende mejore las condiciones de confort en este espacio, además de ser un procedimiento aplicable en otras edificaciones (Mahmoud & Elghazi, 2016). En efecto, al inicio de esta etapa es importante llevar a cabo un proceso de validación con una comparativa entre datos tomados en *in situ* y los obtenidos en el programa (Celis, 2018).

Para complementar, la fase de software es necesario realizar simulaciones en fechas representativas como solsticios y equinoccios en donde los rayos de la radiación solar inciden de diferente manera con respecto a la Tierra (Encalda, 2013); la finalidad es corroborar la falta de confort en la facultad de Psicología en la primera sub-etapa. A continuación, conseguir el ambiente óptimo interno comienza a ser el objetivo principal a través del diseño de la fachada. La misma que es trazada tomando en cuenta los referentes, el confort lumínico, térmico. Además, la herramienta Wallacei por medio de su interfaz ayuda a conseguir parámetros de control (movimiento de la fachada eficaz) por medio de la evaluación de condicionantes de luz como: aumentar su zona de confort y uniformidad; Luego de varios análisis al mismo problema, se encuentran

soluciones con un buen desempeño. Esto proporciona una amplia variedad de soluciones adecuadas a escoger para los diseñadores (Chi et al., 2021).

Para finalizar esta etapa se realiza una comparativa entre los datos de la fachada actual con la propuesta, en donde se puede confirmar una mejora en el tema térmico ubicándose dentro del 90% de adaptabilidad, al mismo tiempo un aumento del área y uniformidad para el confort lumínico.

En cuanto a la segunda etapa, modelo a escala, llevamos a cabo por medio de un método experimental. Se traslada los datos de la simulación al espacio físico con la ayuda del controlador Arduino; gracias al complemento de Grasshopper, Firefly. Para finalmente, controlar los valores con herramientas de medición y así poder evaluar el desempeño de la fachada responsive con datos lumínicos (Eltawee et al., 2020). El flujo de trabajo para tener una fachada que cumpla los cometidos del confort térmico y lumínico se puede apreciar en la figura 37 (Al-Masrani & Al-Obaidi, 2019).

Por último, la representación de un modelo real a escala abarca las partes utili-

2.7. Conclusión capítulo 2

A partir del conocimiento de la Fachada que se estudia, permite conocer sus componentes de hardware y software necesarios para llevar a cabo una propuesta que permita conseguir el confort térmico y lumínico. Para llegar al confort térmico se opta por normas como la ASHRAE 55 que se basa en que el humano puede adaptarse al ambiente, este es el confort adaptativo. En lo lumínico, se toma en cuenta el estudio de doctorado de Pérez la cual define rangos según la norma ISO 8995:2002 para evaluar la iluminancia. Estos conceptos proporcionan parámetros necesarios para desarrollar la fachada óptima y mejorar el confort.

A partir del estudio del confort térmico y lumínico se revisa las condiciones del clima de nuestro medio. Para conocer cuáles son las deficiencias de la fachada actual y la orientación de la edificación con respecto las condiciones externas, como la radiación que en ocasiones ingresa directamente al aula sin que la fachada aporte en algo.

Así se logra tener una metodología que se basa en dos grandes fases: simulación en software y en modelo a escala. Estas abarcan un proceso donde se valida el modelo, para acercarnos a la realidad. De ahí se simula las condiciones actuales de la fachada para saber las falencias. Luego se propone tres soluciones a partir de los referentes. La de mejores resultados es comprada con la actual para evidenciar la mejora de confort térmico y lumínico. Además, mediante la elaboración de la maqueta validar la funcionalidad del sistema.

CAPÍTULO 3

PROUESTA DE ESTUDIO Y SIMULACIONES

- 3.1 Validación del modelo
- 3.2 Análisis de confort de fachada actual
- 3.3 Diseño, aplicación y análisis de la fachada
- 3.4 Resultados térmico y lumínico de la fachada seleccionada
- 3.5 Balance y análisis de resultados térmico y lumínico
- 3.6 Conclusión

Figura 38. Aula J-105 - Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca

Fuente: Los autores

3.8. Validación del modelo

Esta sección de la investigación se plantea en dos partes: la primera está enfocada en la recolección y tratamientos de datos in situ. La segunda consiste en la simulación del modelo en el software Grasshopper. Para luego comparar los datos simulados con los de la situación actual del establecimiento (ASHRAE, 2010).

Para la recolección de datos se utiliza sensores tanto de temperatura como de iluminancia. Estos han sido empleados en el aula J-105, seleccionada como referencia por la semejanza y disponibilidad frente a los otros salones. Al mismo tiempo, se realiza el tratamiento de los datos, pues es necesario para verificar la existencia de datos atípicos; esto se da mediante las medidas de tendencia central (ASHRAE, 2010). Además, se establecen gráficas representativas de los datos puestos en juicio de valor para así poder trabajar sobre condiciones reales.

Por otra parte, la simulación empieza con el modelado 3D para luego editar sus condiciones físicas y personales, y así obtener valores mediante los motores Energy Plus y Radiance. Los mismos ratifican la maqueta virtual. En consecuencia, el modelo validado es utilizado para llegar al confort planteado con una alta fiabilidad.

Figura 39. Aula J-105 – ubicación de sensor DHT22

Fuente: Los autores

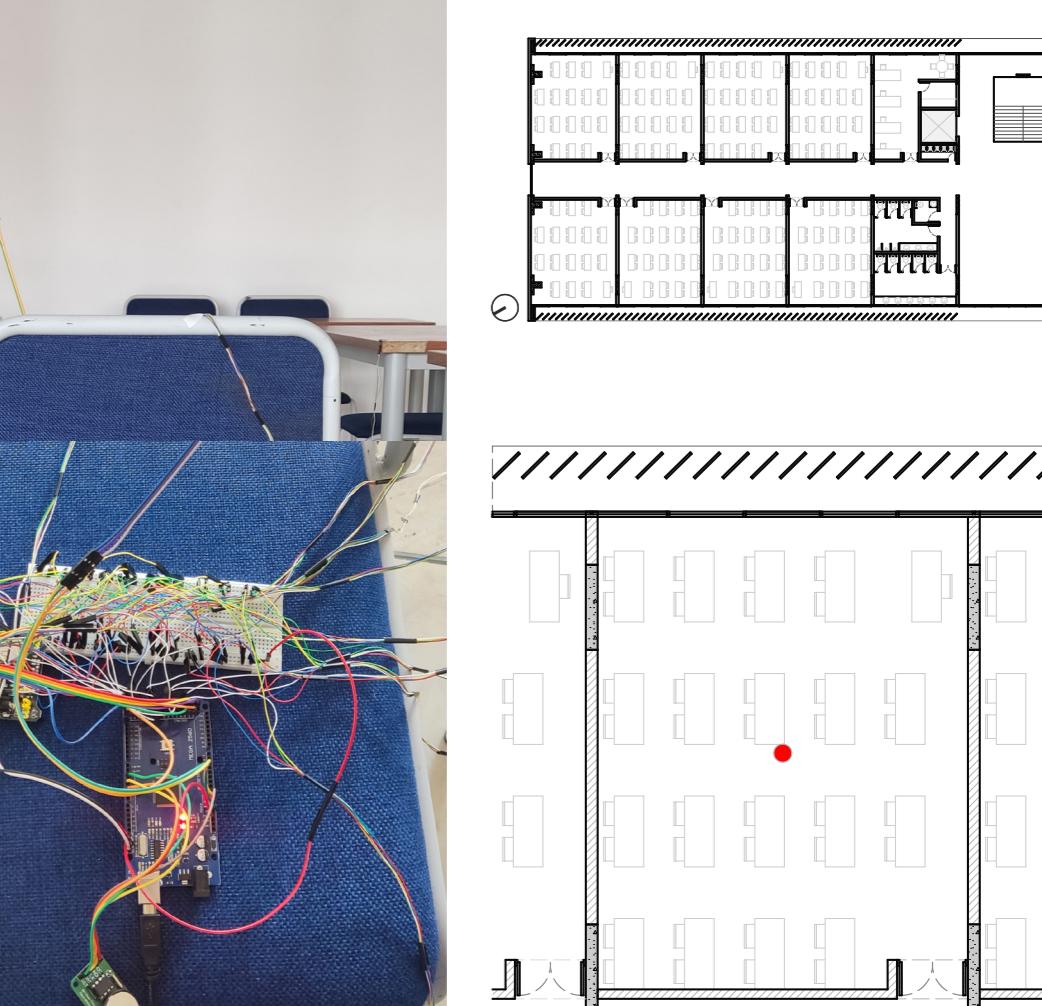
3.8.1. Análisis térmico

3.8.1.1. Instalación y calibración de instrumentos

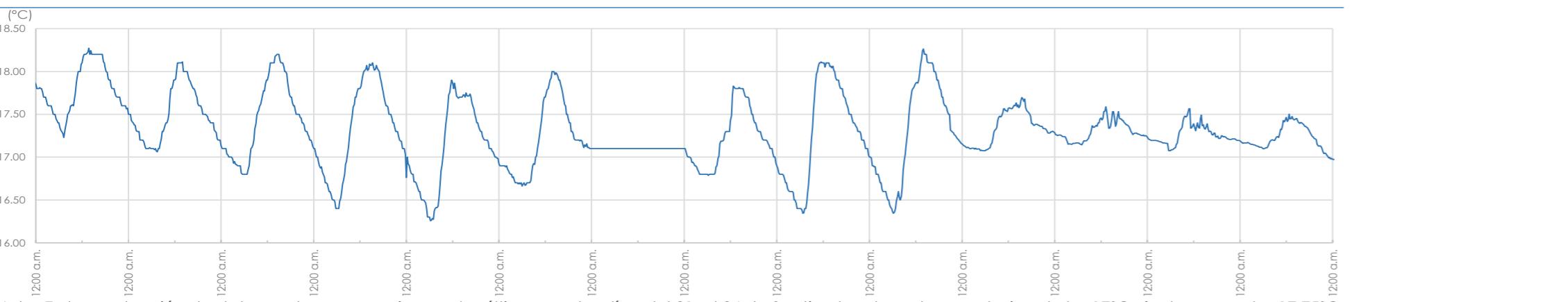
La instalación de los instrumentos se realiza el día 10 de septiembre a causa del clima de la ciudad. La condicionante de selección temporal fue debido al equinoccio de primavera, 21 de septiembre. Así mismo, este mes es semejante al promedio anual de temperaturas. Por lo tanto, los valores obtenidos se consideran a partir del día 11 hasta el 24. Concluyendo con el almacenamiento y la desinstalación de los equipos ocasionado por la disponibilidad del aula. El sensor DHT22 es ubicado en el baricentro del salón a 1.10 m del piso como se muestra en la figura 39 según la ASHRAE 55. Por otro lado, el temporizador para la captura de cada valor se lo calibra cada tres minutos (ASHRAE, 2010). Sin embargo, al momento de analizar los datos se ha realizado un promedio para poder trabajar en rangos más amplios.

3.8.1.2. Recolección y tratamiento de datos

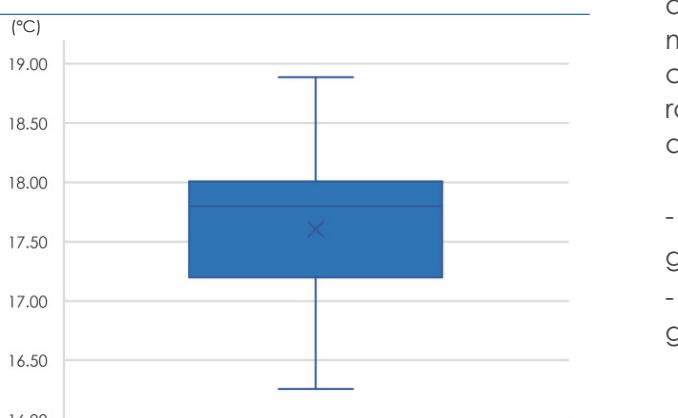
La información recaudada bordea los 6720 datos de temperaturas en intervalos de 15 minutos correspondientes a los 14 días. Al realizar un análisis térmico es necesario ejecutar un tratamiento con la finalidad de verificar la validez y corregir datos atípicos mediante la sustitución de estos por la media, moda o interpolación lineal (Montes, 2018).



Fuente: Los autores

Figura 40. Diagrama de temperatura interior aula J-105 – datos recolectados desde el 11 al 24 de septiembre

Nota. En la recolección de datos podemos apreciar que los últimos cuatro días, del 21 a 24 de Septiembre, los valores no bajan de los 17°C ni sobrepasan los 17.75°C; a causa de las condiciones externas, temperatura exterior, como se puede ver en la figura 42, esta se corresponde.

Figura 41. Diagrama de caja y bigotes – temperatura interior aula J-105

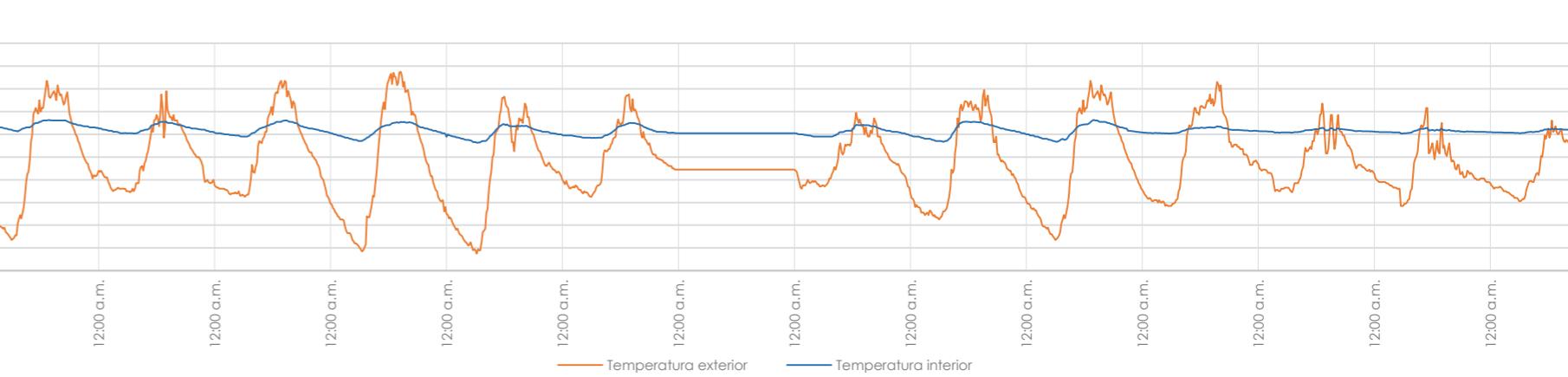
Fuente: Los autores

Para ello, primero se calcula las medidas de tendencia central como la mediana, moda, media aritmética. Aquello permite ubicar los cuatro cuartiles y por ende las fronteras, límites en los que se deben encontrar los datos (ASHRAE, 2010).

- Límite superior = Tercer cuartil + 1.5 Rango Inter cuartil
- Límite inferior = Primer cuartil - 1.5 Rango Inter cuartil

Asimismo, el diagrama de caja y bigotes que se observa en la figura 41 ayuda a co-

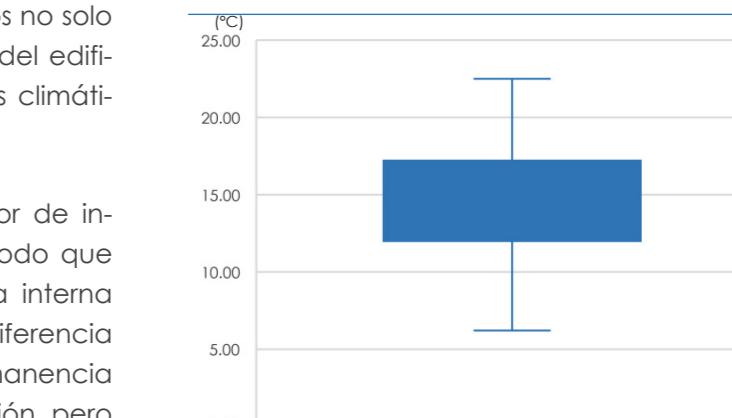
Fuente: Los autores

Figura 42. Diagrama de temperatura exterior de la ciudad de Cuenca frente a la temperatura interior del aula J-105 desde el 11 al 24 de septiembre

Fuente: Los autores

Por otra parte, en la ciudad de Cuenca se encuentran situados tres estaciones meteorológicas. La que se utiliza para el estudio se encuentra ubicada junto al Coliseo Jefferson Pérez, debido a la cercanía. Los datos presentan condiciones similares al edificio de Psicología. Así pues, en la figura 43 los valores siguen el proceso estadístico y en la gráfica se observa como respetan los límites siendo el reflejo de información veraz de IBM (2021).

La radiación solar es el factor de incidencia sobre las superficies, de modo que este influye en la sensación térmica interna (anexo A). Conviene subrayar, la diferencia de amplitud es causada por la permanencia de calor interno ya que existe variación, pero en un rango inferior a la temperatura exterior, notable en la tabla 9.

Figura 43. Diagrama de caja y bigotes – temperatura exterior ciudad de Cuenca

Fuente: Los autores

Tabla 9. Tabla resumen del tratamiento de datos de temperatura interior y exterior

Temperatura	Media	Moda	STD	1Q	2Q	3Q	IQR	MIN	MAX	LÍM. SUP.	LÍM. INF.
Interior	17.61	17.10	0.53	17.20	17.80	18.01	0.81	16.26	18.89	19.22	15.99
Exterior	14.39	12.20	3.60	12.00	17.20	17.97	5.97	6.20	22.50	26.92	3.05

Nota. Desviación estándar; 1Q. Primer cuartil; 2Q Segundo Cuartil o mediana; 3Q. Tercer cuartil; IQR. Rango Inter cuartil; MIN. Valor Mínimo; MAX. Valor Máximo

3.8.1.3. Modelado en Software

El modelo se efectúa en el programa Rhino con la ayuda de la extensión Grasshopper para determinar las zonas que son parte del análisis. El aula J-105 es considerada zona principal para el estudio. La misma tiene 8.00 m de largo, 6.27m de ancho y una altura de 2.93 m.

Así también, las aulas restantes y oficinas administrativas se toman como zonas adyacentes; influyen en la temperatura del edificio. De manera que los materiales son relevantes por la diferencia en sus propiedades térmicas. Las características de materia-

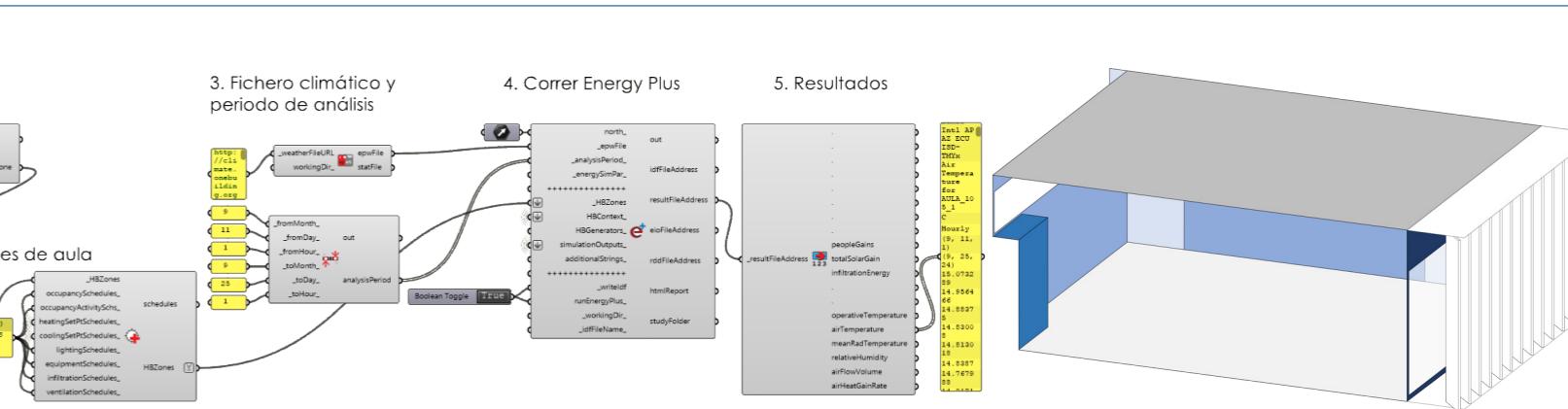
les opacos como el ladrillo hueco, hormigón, aluminio, madera, piedra, yeso cartón y porcelanato aportan a la ganancia de calor del espacio; aunque los materiales claros como el vidrio proporcionan la capacidad de ganar como perder energía térmica rápidamente (Encalada, 2013).

Las superficies de la zona principal se han codificado con colores como se observa en la tabla 10. Esto se realiza por la intervención de diferentes componentes.

Así, se toma en cuenta las infiltraciones del espacio según la norma ASHRAE 90.1-2013 con un tasa general de infiltración en función

del área de la fachada expuesta al exterior 0,4 cfm/sf a una presión de 75 Pa.

Las personas no son tomadas en cuenta en el modelo, por ende, no hay un horario, ya que al momento de ejecutar las mediciones hay ausencia de individuos por el confinamiento y los protocolos de bioseguridad de la Universidad de Cuenca. Sin embargo en las simulaciones de análisis del confort de fachada actual y propuesta si se toma en cuenta a los individuos. A pesar de ello, el mobiliario como sillas, escritorios, lámas y aleros se colocan como superficies de contexto con la finalidad de acercarse a las condiciones actuales del establecimiento.

Figura 44. Proceso en software Grasshopper y Rhino (nodos y superficie codificadas)**Tabla 10.** Propiedades térmicas de materiales utilizados para la simulación

Materiales Opacos						
Color	Superficie	Material	Asperoza	Resistencia térmica, R (m²k/W)	Abstinencia térmica (0-1)	Absorción de luz visible (0-1)
	Piso	Hormigón y piedra con acabado de porcelanato	Medio áspero	0.315	0.5	0.7
	Cielo raso	Yeso cartón	Medio áspero	0.459	0.07	0.7
	Muro 1	Hormigón	Áspero	0.369	0.58	0.7
	Muro 2	Ladrillo hueco	Áspero	0.602	0.02	0.7
	Puerta	Madera maciza	Medio áspero	0.549	0.03	0.7
	Persiana	Aluminio	Liso	0.004	0.01	0.95

Tabla 11. Propiedades térmicas de materiales utilizados para la simulación

Materiales de ventana					
Color	Superficie	Material	Transmitancia térmica, U (W/ m ² k)	Coeficiente de ganancia de calor solar, SHGC (0-1)	Transmitancia visible, VT (0-1)
	Ventana exterior	Vidrio 6mm	0.185	0.94	0.753
	Ventana callejón	Vidrio 4mm	0.181	0.94	0.753

Fuente: Los autores

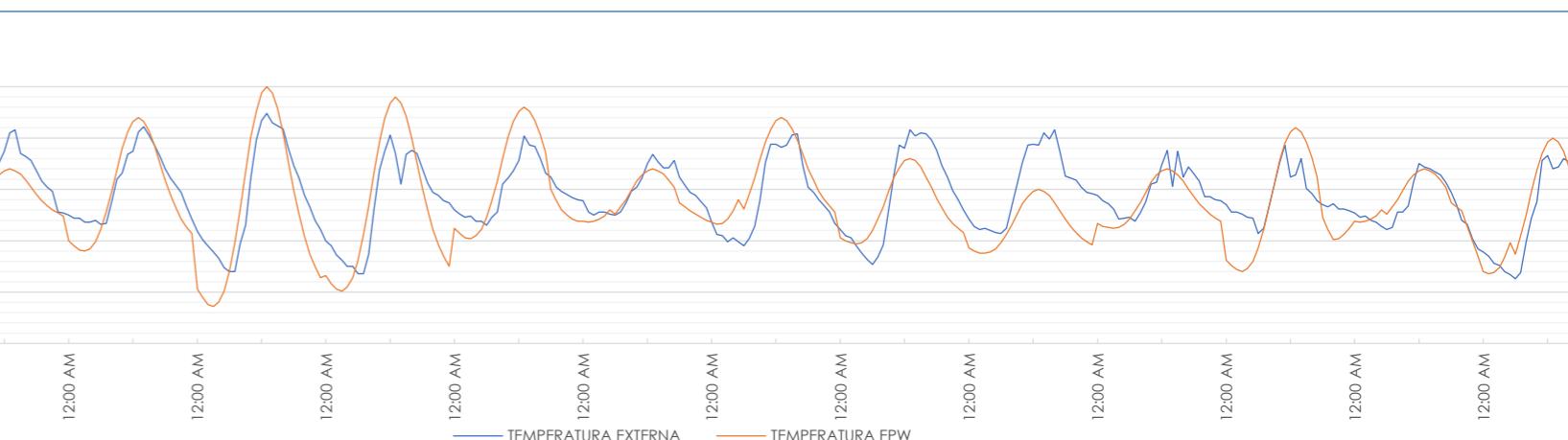
3.8.1.4. Simulación del modelo

La simulación se basa en un proceso de configuración de diferentes parámetros para cumplir los valores estadísticos establecidos en la ASHRAE (2010).

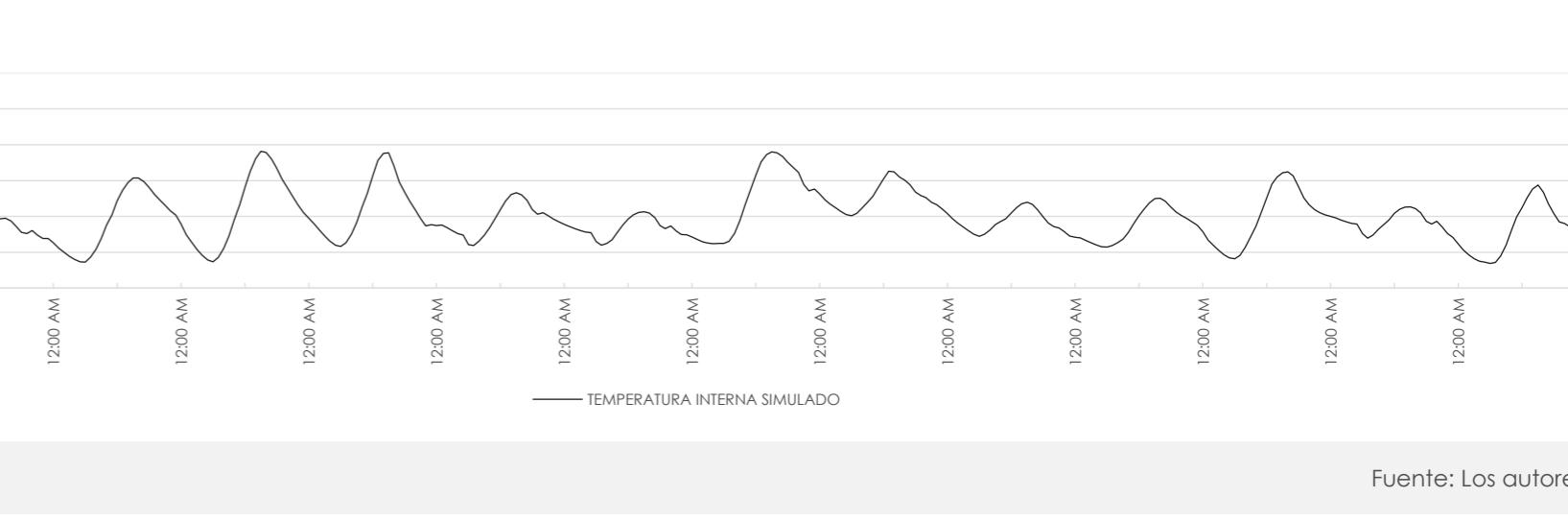
Primero, se debe identificar la zona de estudio para luego determinar los cargos de ocupación, iluminación, equipo. Ahora bien, al analizar las condiciones del modelo es necesario establecer horarios de zona para Energy Plus. Se define el período de análisis desde el 11 de septiembre a partir de la 1 am hasta el 25 de septiembre a la 1 am.

Al tener fijados los factores como el norte, las zonas, el contexto, infiltraciones y el período de tiempo se puede correr Energy Plus. Este motor nos permite obtener resultados de varias características del ambiente. La temperatura del aire es la considerada para el estudio. Conviene subrayar, los valores obtenidos son en intervalos de una hora por lo que para realizar la comparativa frente a los datos medidos se tiene que promediar diez valores por hora.

La figura 45 representa como la variación de la temperatura exterior simulada es mínima con respecto a la del fichero climático. La temperatura interna simulada se encuentra en un rango de 14 a 18 °C como respuesta de las condiciones ambientales del entorno.

Figura 45. Diagrama de la temperatura externa simulada frente a la temperatura medida por la estación meteorológica (EPW)

Fuente: Los autores

Figura 46. Diagrama de temperatura interior simulada

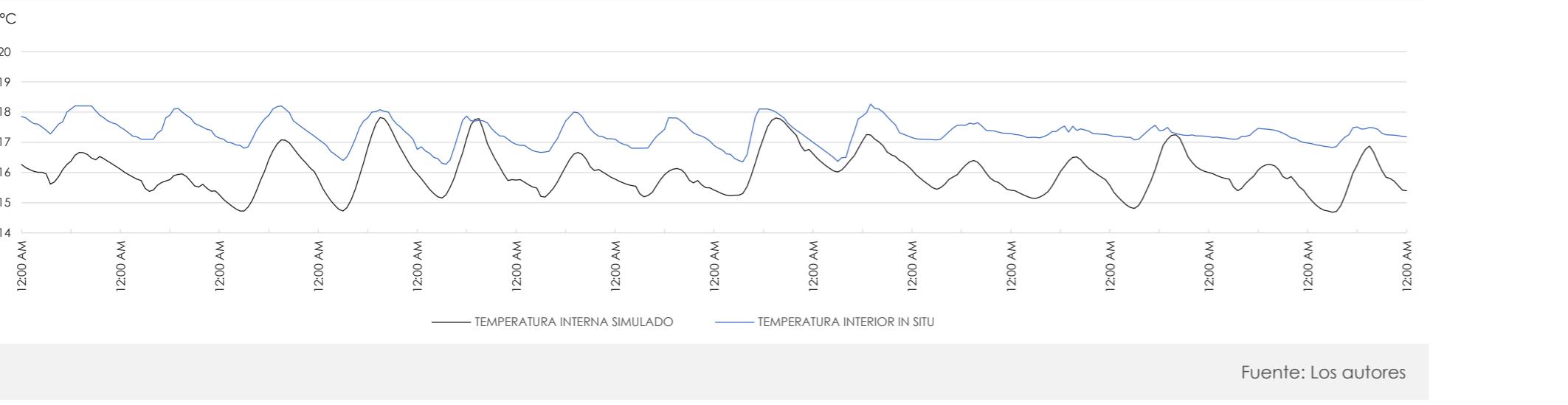
Fuente: Los autores

3.8.1.5. Validación del modelo

Al momento de realizar la validación según la norma ASHRAE 14 (2014) recomienda utilizar el método estadista y gráfico.

En el ámbito estadístico se utilizan dos índices que ayudan a verificar las condiciones del modelo. Por un lado, está el Mean Bias Error (MBE) o conocido como error de sesgo medio el mismo que debe encontrarse dentro de $\pm 10\%$. El modelo del estudio se encuentra dentro del rango establecido con 9.14%. La ecuación para su cálculo se establece como:

Figura 47. Diagrama de la temperatura interna simulada frente a la temperatura medida en campo



3.8.2. Análisis lumínico

3.8.2.1. Instalación y calibración de Instrumentos

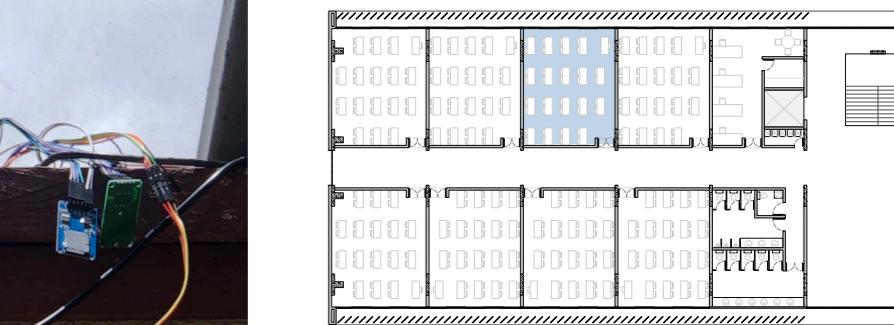
La toma de datos in situ que se requiere para el análisis lumínico es de un salón, Aula J-105; las condiciones de los materiales son las mismas en todas las aulas. La recolección de datos se lo hace al mismo tiempo que el térmico, pero en diferentes lapsos, puesto que las fluctuaciones de la temperatura se perciben en horas y las de iluminancia en minutos (Tabadkani et al., 2021).

Los sensores BH1750 para medir los niveles de iluminancia son ubicados a la altura de trabajo, 75cm. La rejilla que se utiliza para el establecimiento de los mismos está definida según la norma EN 12464-1 (2012); por consiguiente, al tener un aula de 8 por 6, 27 metros, se obtiene una celda de 0,8 por 0,784 metros. Los medidores de luxes se deben poner al centro de cada cuadrangular, pero por falta de recursos se colocan 20 sensores, de manera que pueda ser monitoreada la mayor área posible. De modo accesorio, se coloca un sensor al exterior a 400 m de la facultad debido a la necesidad de tomar datos sin obstrucciones.

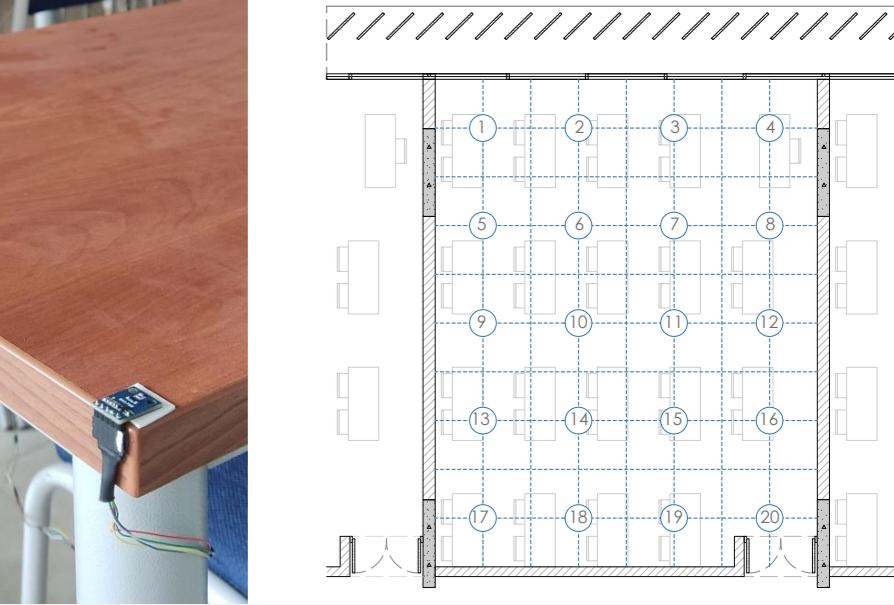
La recolección de datos está programada en un Arduino Mega, se toma cada 2 minutos en las horas de luz natural, de 6 de la mañana hasta las 6 de la tarde; como se realiza en el estudio de Celis (2018).

Figura 48. Aula J-105 – ubicación de los sensores BH1750

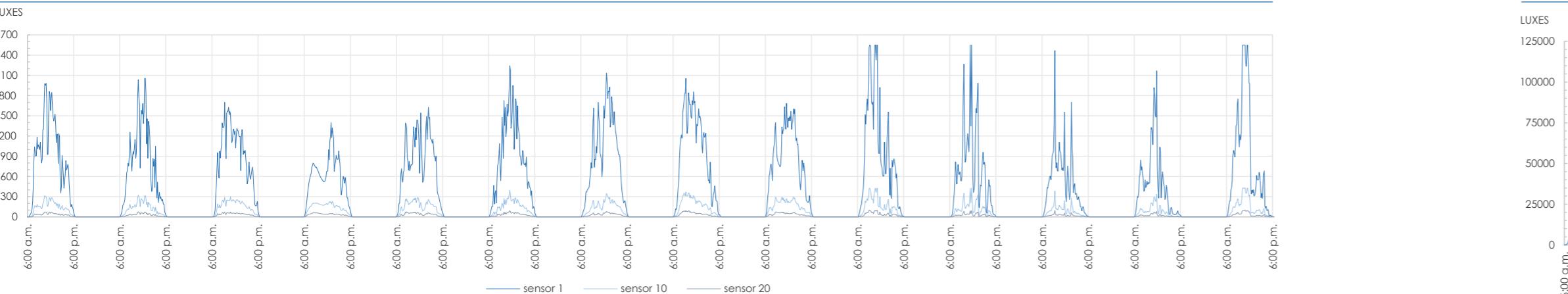
Los siguientes datos tiene dos objetivos, dar un primer acercamiento a las condiciones-



()

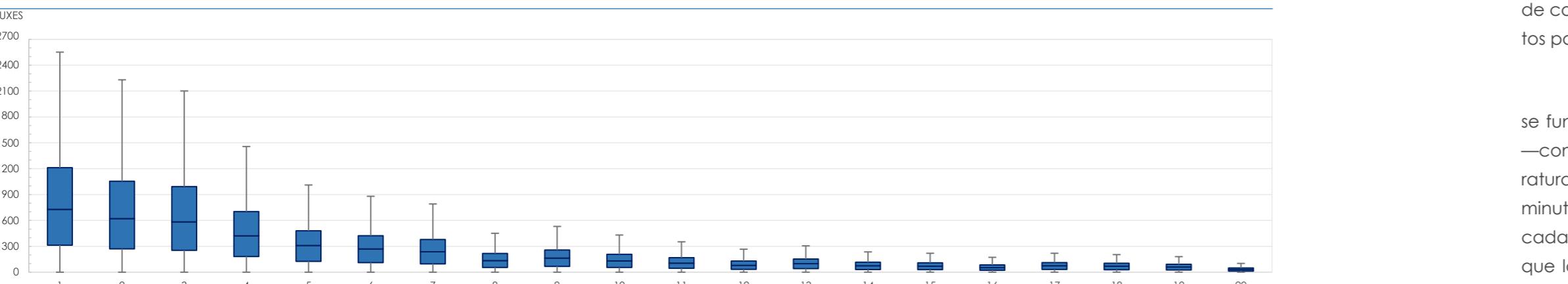


Fuente: Los autores

Figura 49. Diagrama de iluminancia de sensores internos

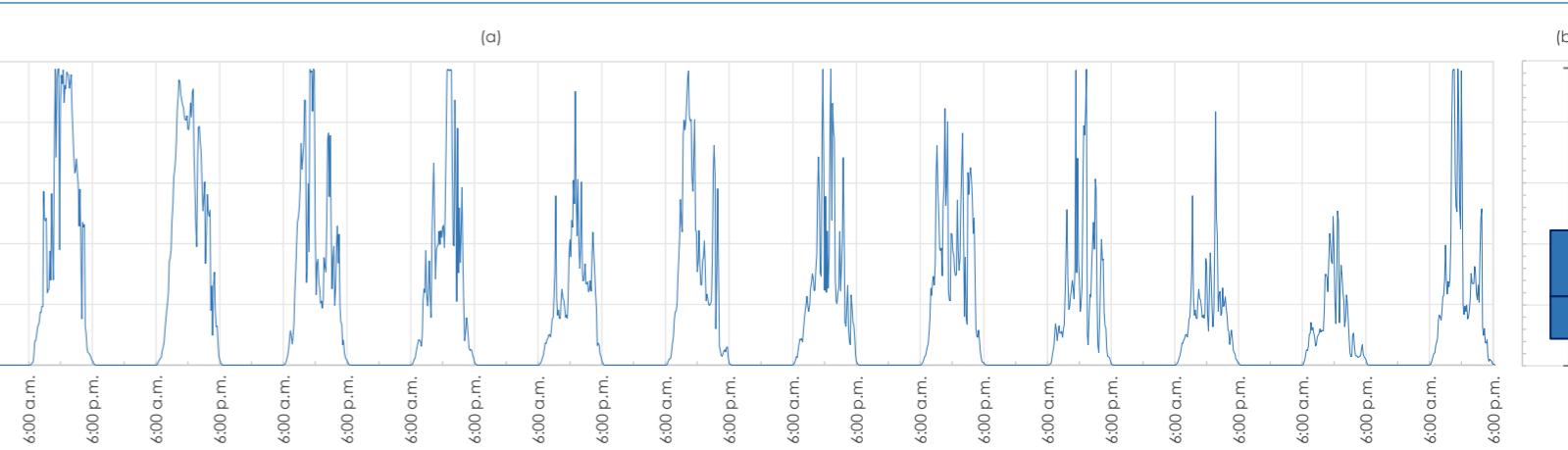
Nota. Se muestran los sensores 1, 10 y 20 para una mejor lectura; estos nos dan una vista global de los demás sensores. Se puede apreciar que en la mayoría de los

Fuente: Los autores

Figura 50. Diagrama de cajas y bigotes de iluminancia de sensores internos

Nota. Los rangos máximos de los sensores del 12 al 20 no alcanzan los 300 luxes, es decir la mitad del aula siempre está por debajo del confort, mientras que los senso-

Fuente: Los autores

Figura 51. Diagrama de iluminancia de sensor externo y sin obstrucciones (a) y diagrama de cajas y bigotes (b), Iluminancia Global Horizontal (IGH)

Fuente: Los autores

de confort lumínico de las aulas y obtener datos para la validación del modelo virtual.

La validez de los datos recolectados se fundamenta en un tratamiento estadístico —como se lo realiza con los datos de temperatura—. Los datos son promediados cada 10 minutos y en total se obtuvo 1021 datos de cada sensor. En la tabla 12 se puede notar que los valores máximos y mínimos no superan del límite superior e inferior, condición necesaria para que no exista cifras atípicas.

En cuanto al sensor que está ubicado en el exterior, mismo que recopila valores de iluminancia horizontal global (ver figura 51),

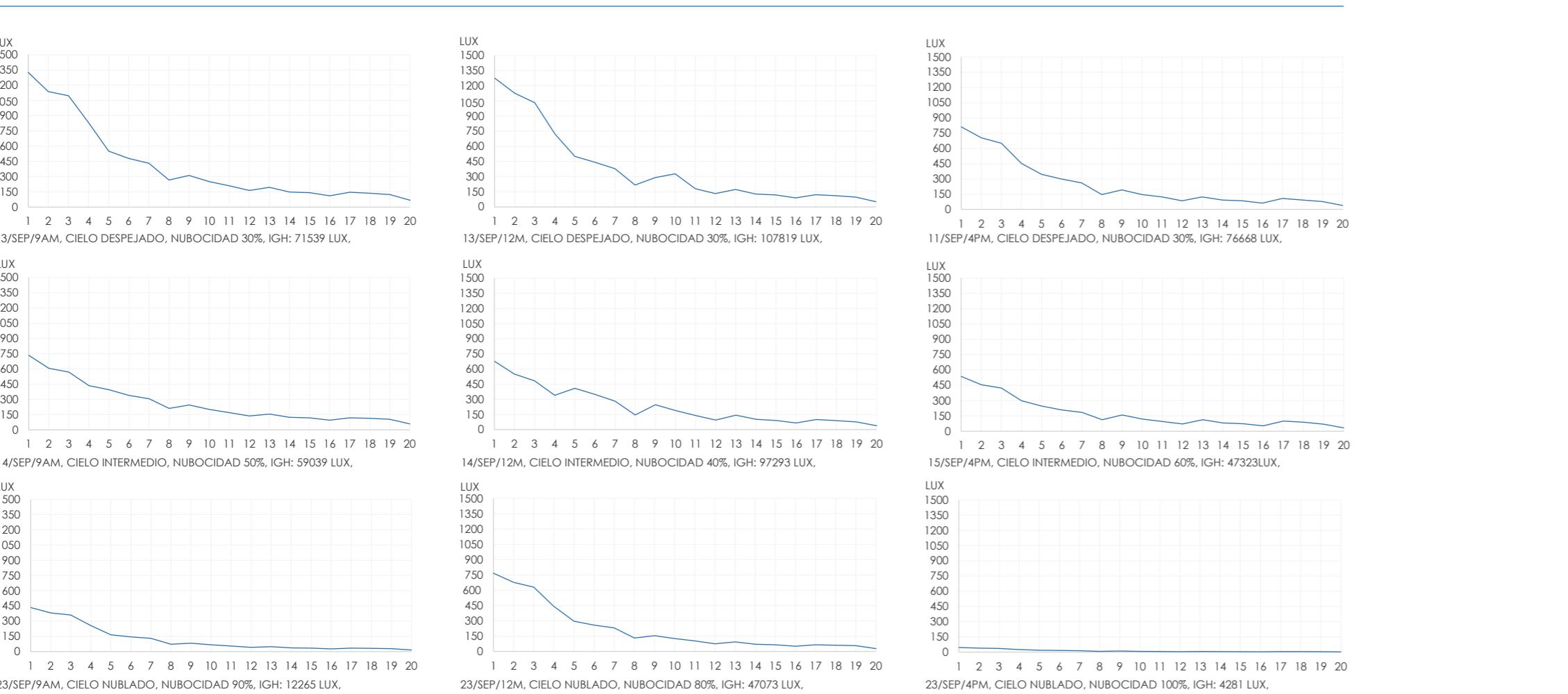
Esto también se puede apreciar en las figuras

50 y 51b.

por sus valores cambiantes se deduce que el aula pasa por diferentes tipos de cielos, debido a la estrecha relación que existe entre estos valores y los tipos de cielo (Saudita, 2016).

Por otro lado, a medida que los sensores se alejan de la ventana, baja el valor de iluminancia. Desde el sensor 12 en adelante todos los datos recolectados no pasan de los 300 luxes, valor mínimo para el confort lumínico (ver figura 49 y 50).

3.8.2.3. Modelo en software

Figura 52. Diagrama de iluminancia de sensores internos en días específicos (datos insitu tomados en cuenta para validación de modelo 3d)

Nota. IGH: Iluminancia Global Horizontal

Fuente: Los autores

Tabla 12. Validación de datos tomados in-situ

Iluminancia	Media	Moda	STD	1Q	2Q	3Q	IQR	Min	Max	Lím. Sup.	Lím. Inf.
Sensor 1	801	0	591	313	728	1212	899	0	2551	2561	-1036
Sensor 2	697	0	520	270	621	1055	784	0	2230	2231	-906
Sensor 3	657	0	492	253	584	993	740	0	2101	2102	-856
Sensor 4	469	0	351	182	421	702	520	0	1457	1483	-598
Sensor 5	323	0	230	126	310	480	354	0	1011	1011	-405
Sensor 6	284	0	203	111	269	423	312	0	880	892	-357
Sensor 7	252	0	182	97	237	379	282	0	791	803	-327
Sensor 8	145	0	105	55	134	217	162	0	451	460	-187
Sensor 9	171	0	120	68	164	257	189	0	531	540	-216
Sensor 10	138	0	98	55	131	208	153	0	431	437	-175
Sensor 11	112	0	80	45	106	169	124	0	353	354	-140
Sensor 12	84	0	61	33	79	129	96	0	266	273	-112
Sensor 13	102	0	70	42	99	152	110	0	306	318	-124
Sensor 14	77	0	54	31	74	116	84	0	235	242	-95
Sensor 15	73	0	50	30	70	109	79	0	219	228	-89
Sensor 16	56	0	40	22	53	85	63	0	172	179	-72
Sensor 17	75	0	50	31	75	111	80	0	219	231	-89
Sensor 18	70	0	47	29	69	104	75	0	204	216	-83
Sensor 19	61	0	42	25	60	92	66	0	180	191	-74
Sensor 20	33	0	23	13	31	49	36	0	102	104	-42
Sensor Ext.	37391	0	32967	11133	28564	55581	44448	0	122095	122254	-55539

Nota. STD: Desviación estándar, 1Q: Primer cuartil, 2Q: Segundo Cuartil o mediana, 3Q: Tercer cuartil, IQR: Rango Inter cuartil, MIN: Valor Mínimo, MAX: Valor Máximo

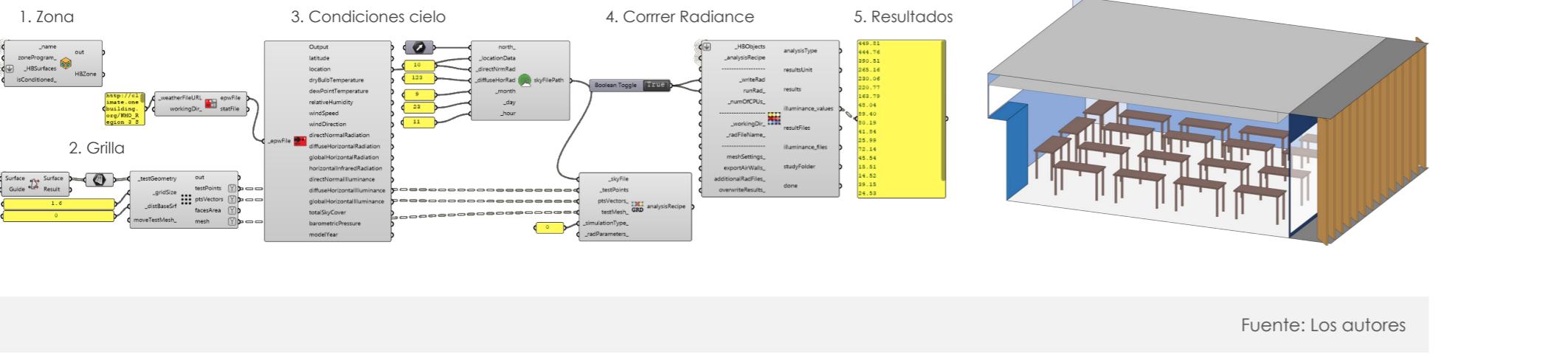
Fuente: Los autores

El modelo se realiza en el mismo software que del apartado térmico. Éste toma en cuenta todas las superficies, una grilla de análisis con las mismas condiciones de los datos tomados in situ y las condiciones para generar un cielo.

Se ejecutan todas las superficies como zonas y contexto (aquellas que no conforman las zonas) como las mesas, las lamas y los aleños. De todas las superficies, tanto de la zona como del contexto, se toma las propiedades

físicas en base a la información proporcionada por Encalada (2013) y la base de datos en lí-

Figura 53. Especificaciones de simulación lumínica



nea de Colour Picker for Radiance (2021). Las superficies cuentan con las siguientes configuraciones mostradas en la Figura 53 y la Tabla 13. Estos datos deben acercarse lo más posible a la realidad, pues una diferencia de 0.1 en factores de reflectancia tendría un efecto en la precisión de los resultados (Kharvari, 2020).

En cuanto a la superficie de análisis se crea manualmente para tener 20 celdas de 0,8 por 0,784 metros, esto consigue el mismo número de los datos tomados en el aula.

Acerca de las condiciones de cielo para la simulación, es ejecutada con el generador de cielo personalizado, en el cual se toma en cuenta el mes, día, hora, radiación directa y difusa.

Por último, se define los parámetros de Radiante por defecto, estos valores están avalados por CIE (Kharvari, 2020). Sus datos son: ab_2, ad_512, as_128, ar_16 y aa_0.25.

Tabla 13. Especificaciones de materiales opacos y ventanas para la simulación lumínica

Color	Superficie	Superficies contexto	Material acabado	Reflectancia_R	Reflectancia_G	Reflectancia_B	Asperezza	Especularidad
	Piso		Porcelanato	0.726	0.706	0.633	0.100	0.080
	Cielo raso		Pintura blanca	0.900	0.900	0.900	0.070	0.090
	Muro 1		Hormigón	0.493	0.510	0.499	0.200	0.000
	Muro 2		Pintura blanca	0.900	0.900	0.900	0.070	0.090
	Puerta		Madera maciza	0.329	0.163	0.087	0.090	0.100
	Perfil ventana		Aluminio cepillado	0.700	0.700	0.700	0.050	0.350
		Lamas	Madera laminada	0.329	0.199	0.100	0.100	0.100
		Mesas	Madera melamina	0.246	0.100	0.068	0.100	0.150
		Alero	Hormigón pintado	0.034	0.034	0.034	0.200	0.000
Color	Superficie	Material	Transmitancia_R	Transmitancia_G	Transmitancia_B	Índice de refracción		
	Ventana exterior	Vidrio 6mm	0.753	0.753	0.753	0.990		
	Ventana callejón	Vidrio 4mm	0.753	0.753	0.753	0.990		

Fuente: Los autores

3.8.2.4. Simulación del modelo

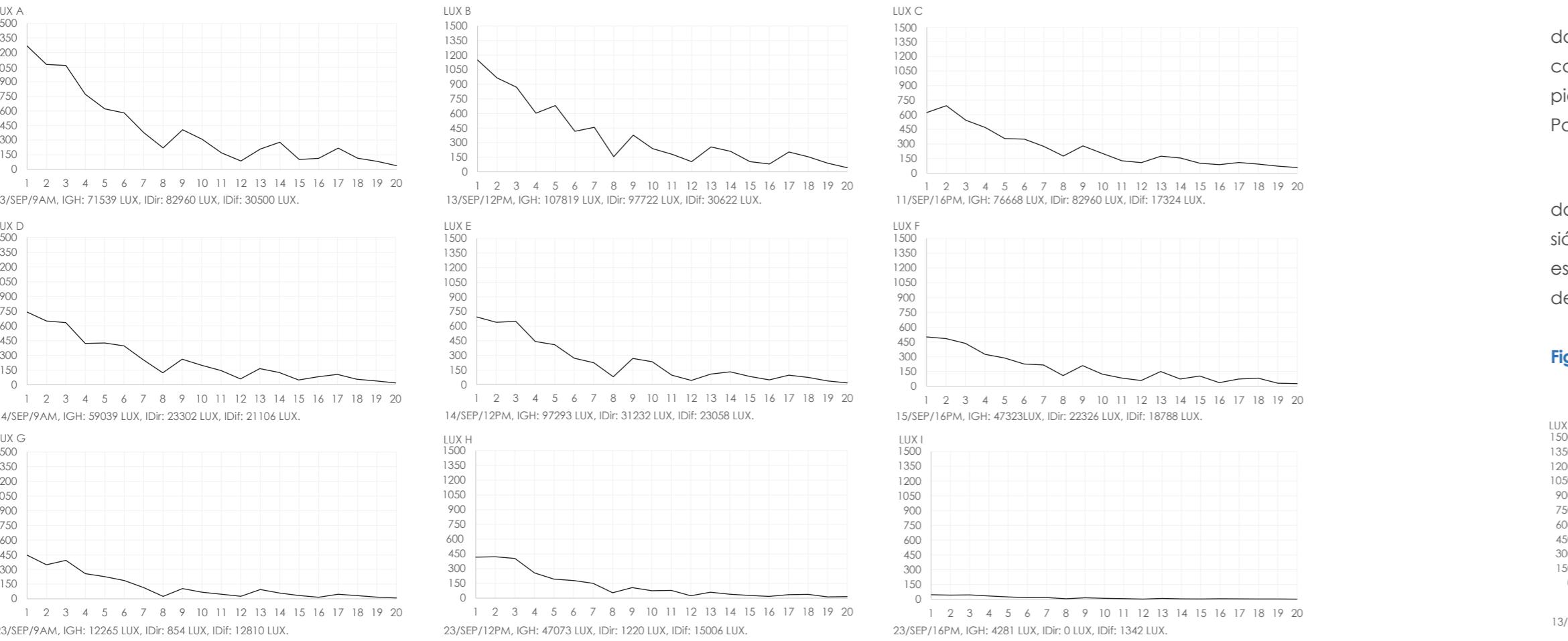
Por lo que se refiere a la simulación, una de las partes esenciales para unos resultados cercanos a la realidad es configurar bien los parámetros del cielo. Para ello, los antecedentes de irradiancia se apoyan en los datos generados por Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL, 2021) —para su mayor entendimiento se hace la conversión de irradiancia a iluminancia, basado en la equivalencia de $1\text{w/m}^2 = 122 \text{ lux}$ del estudio de Michael, Johnston, & Moreno (2020)—.

La simulación nos permite obtener iluminancia, radiación y luminancia. Los siguientes resultados son mostrados en luxes con el fin de poder comparar los datos tomados y simulados en el siguiente apartado.

Como resultado, se obtiene un dato de iluminancia por cada una de las 20 celdas

que conforman la grilla, 180 datos que van desde 1 lux hasta 1325 luxes (ver figura 54).

Figura 54. Diagrama de iluminancia simulación en días específicos (datos simulados tomados en cuenta para validación de modelo 3d)



Nota. IGH: Iluminancia Global Horizontal, IDir: Iluminancia Directa, IDif: Iluminancia Difusa

Fuente: Los autores

3.8.2.5. Validación del modelo

Si bien no existe una norma en la validación de modelos para simulaciones lumínicas, varios estudios que se basan en los principios de la norma ASHARE 14 (Lakhdari, Sriti, & Painter, 2021).

En los estudios analizados por Lakhdari et al., (2021), concluyen que la precisión de la investigación rara vez se informa, es decir no se establecen valores de margen de error, tanto en el error de sesgo medio y

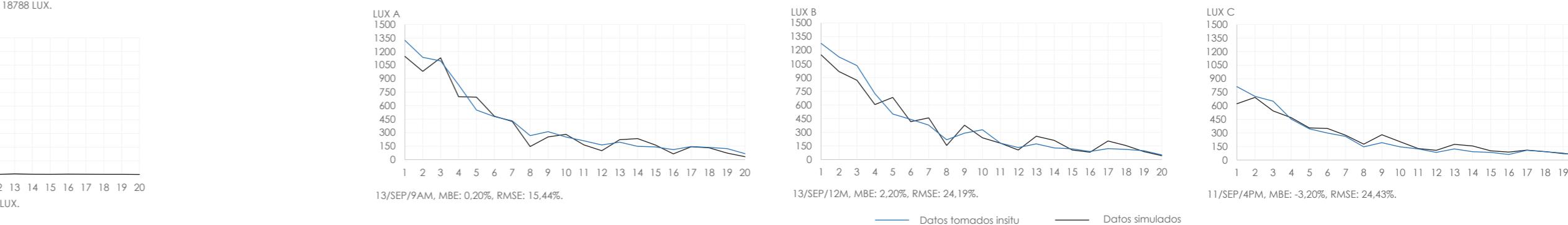
el error cuadrático medio. Los márgenes de error son de hasta el 28% en el MBE y 42,05%

La razón de estas diferencias más notables en condiciones de nubosidad por debajo del 30% se debe a que cuando mayor es la Iluminancia Global Horizontal del cielo, los valores de reflectancia en la superficie tienen más importancia (Kharvari, 2020).

En cuanto a la comparación de los datos tomados in situ y los resultados de la simulación; las diferencias máximas que se obtiene

del 5,43% y en el RMSE es del 24,43% (ver figura 55). En otras palabras, el modelo es válido para las siguientes simulaciones.

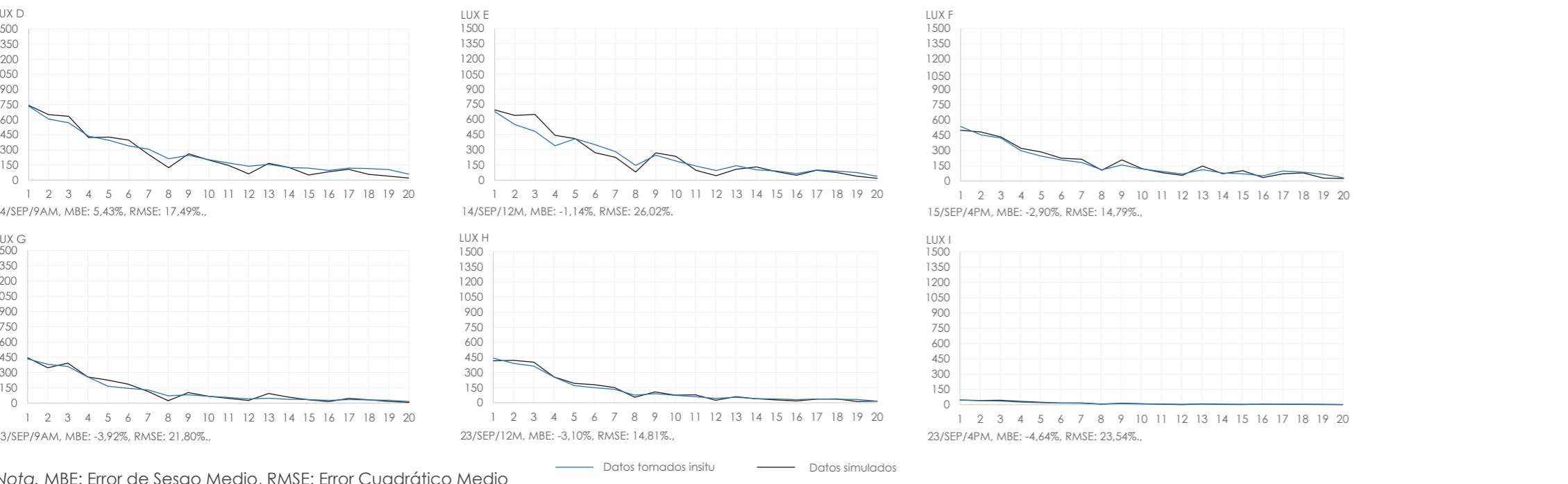
Figura 55. Diagrama de iluminancia en días específicos (datos insitu y simulados tomados en cuenta para validación de modelo 3d).



Nota. MBE: Error de Sesgo Medio, RMSE: Error Cuadrático Medio

Fuente: Los autores

Figura 55. Diagrama de iluminancia en días específicos (datos insitu y simulados tomados en cuenta para validación de modelo 3d).



Nota. MBE: Error de Sesgo Medio, RMSE: Error Cuadrático Medio

En las gráficas donde el Error de sesgo medio son positivos se da por que los datos insitu son mayores a los simulados y viceversa. Además se aprecia que debido a las diferentes condiciones de cielo las iluminancias cambian drásticamente.

Fuente: Los autores

3.9. Análisis del confort de fachada actual

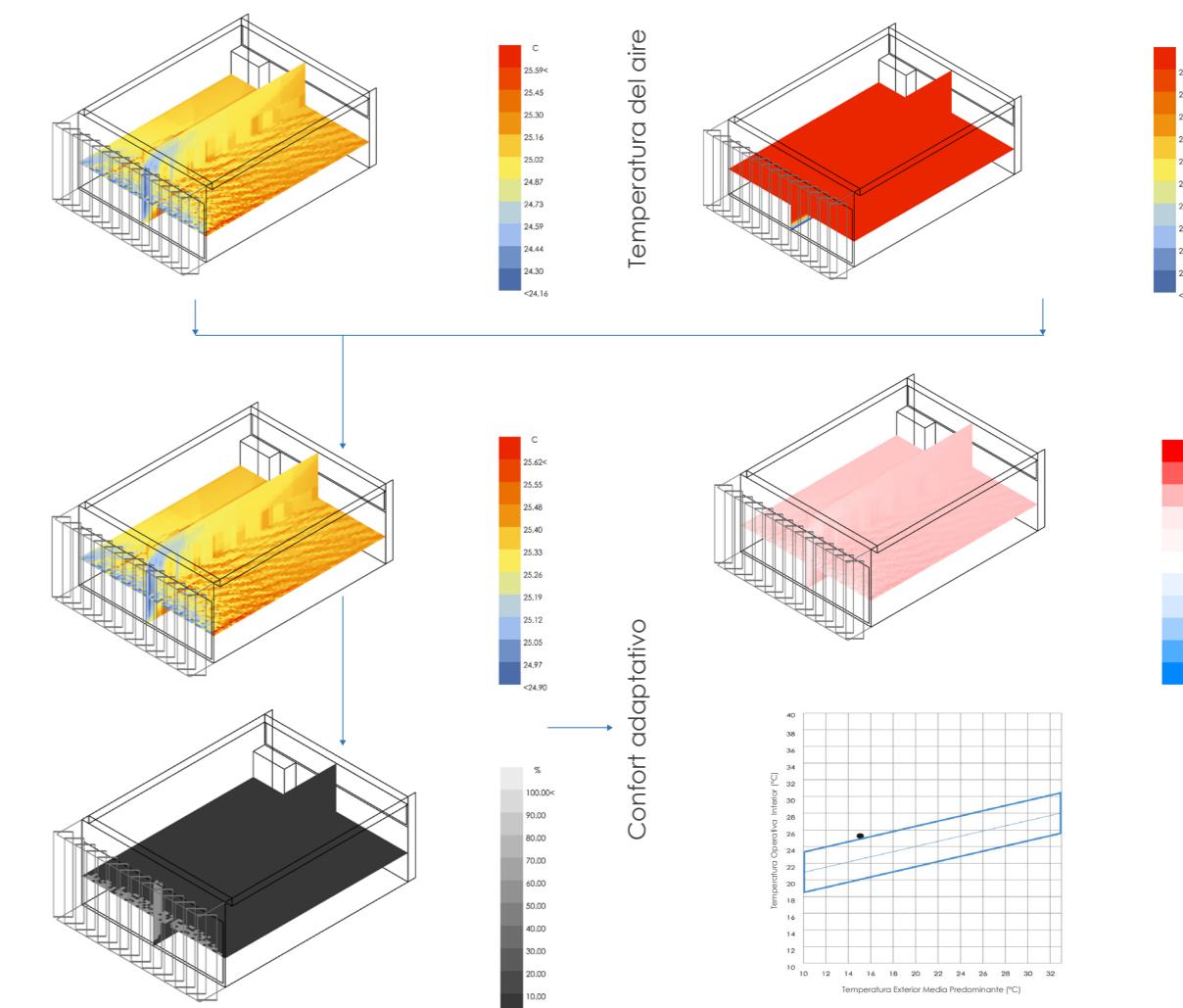
3.9.1. Análisis del confort térmico

A partir de un modelo térmico y su correspondiente archivo meteorológico se definen las variables para determinar el confort térmico adaptativo. Las mismas parten de la temperatura radiante y la temperatura del aire. Estas generan la temperatura operativa con la que podemos establecer si la habitación se encuentra en confort o no. Además, se obtiene el porcentaje de personas que alcanzan el confort y la gráfica establecida por la ASHRAE 55 con los estándares de temperatura operativa para un confort con el 90% de aceptabilidad.

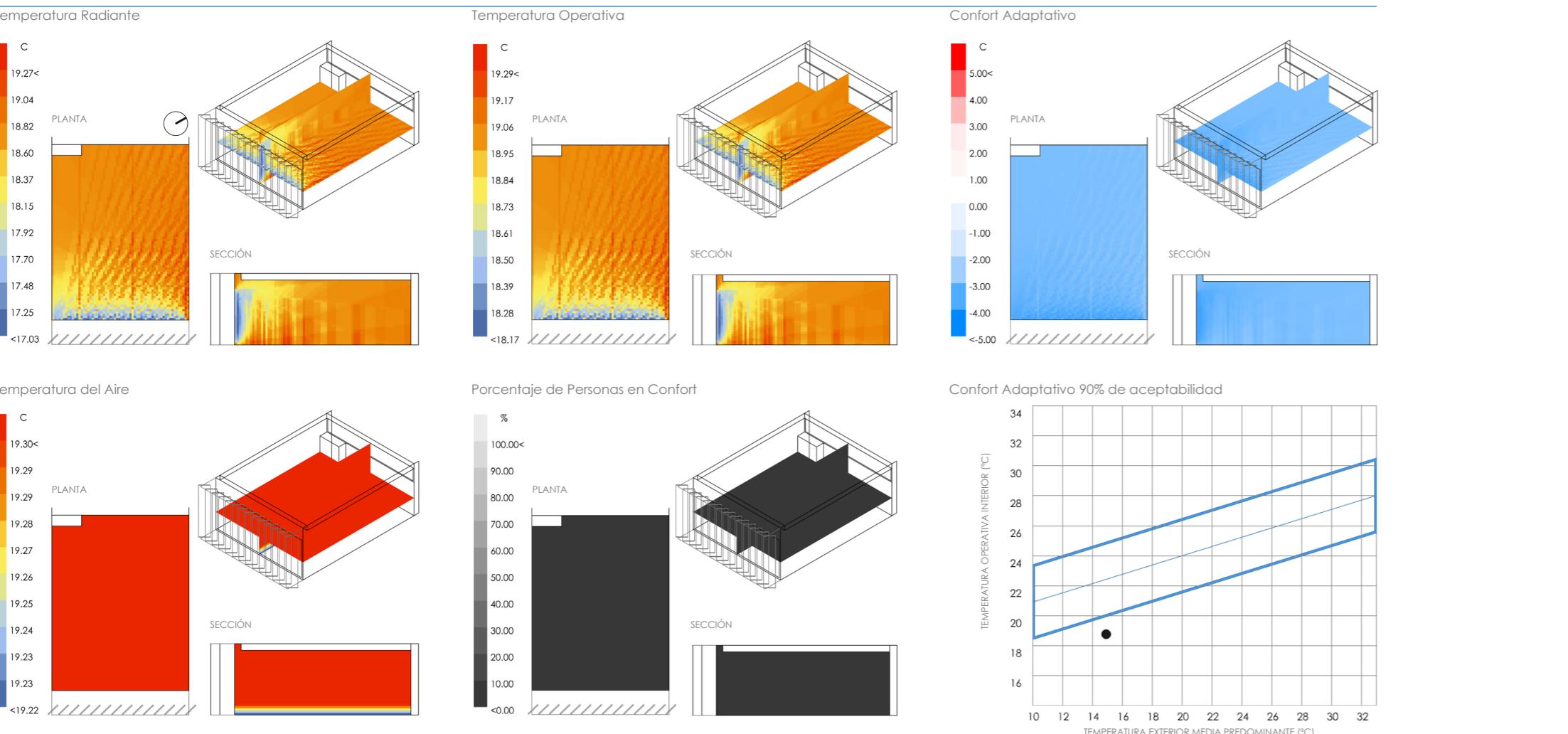
La figura 56 representa el proceso del aula J-105 en la que se evidencia el día más caliente donde las temperaturas bordean los 26°C. Así pues, el porcentaje de personas en confort es casi nula y el confort adaptativo se encuentra fuera del rango de aceptabilidad.

A continuación, se exponen resultados en diferentes vistas para solsticios y equinoccio de marzo en diferentes horas (9am, 12m y 4pm) y del momento más cálido (15 de diciembre a las 5pm) de las aulas J-105 y J-106, semejantes en su geometría y de orientación opuesta. La finalidad es demostrar la falta de confort debido a las altas o bajas temperaturas que no pueden ser controladas por las lámpas.

Figura 56. Variables de confort térmico adaptativo

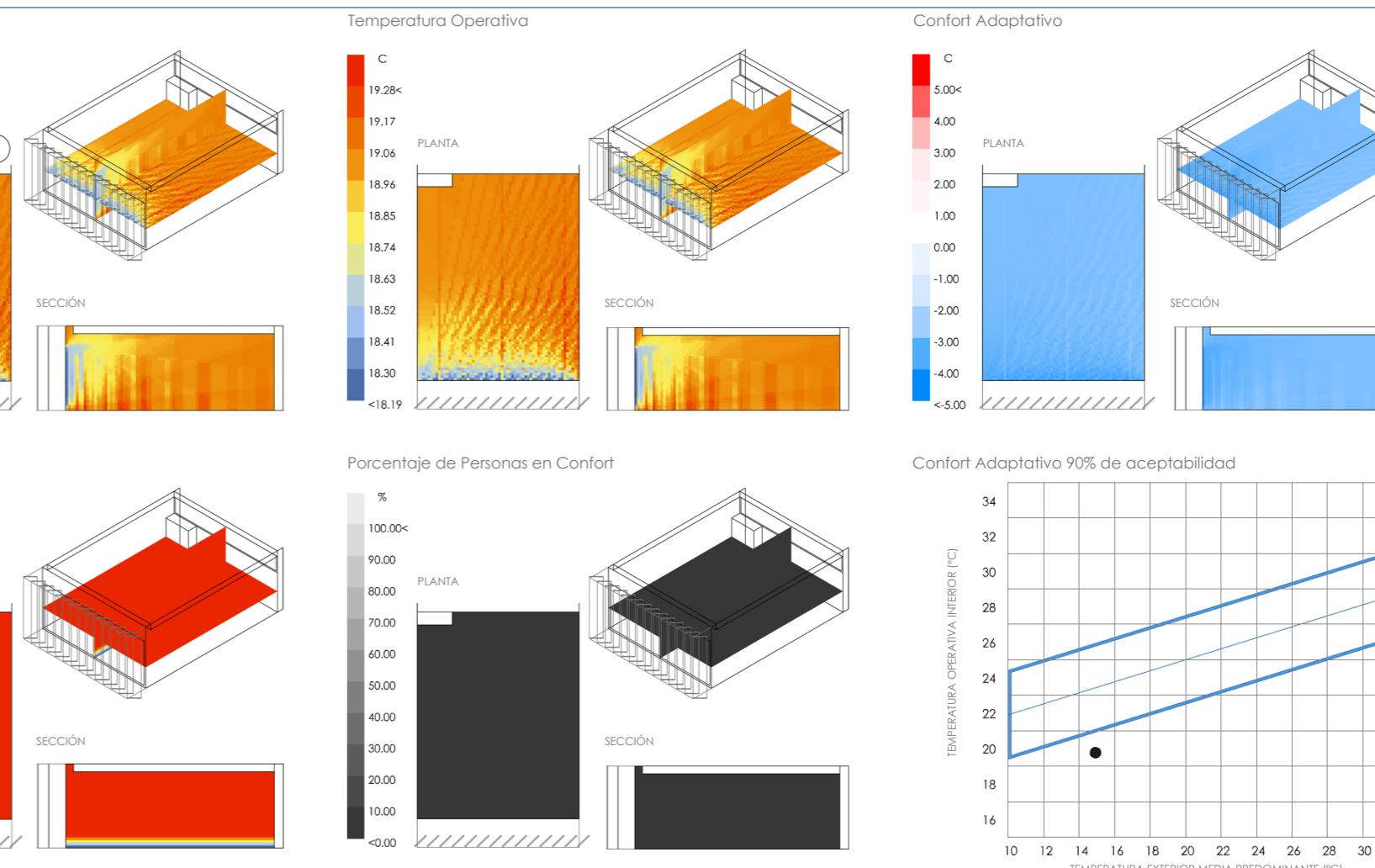


Fuente: Los autores

Figura 57. Análisis de confort térmico aula J-105_21 de Marzo 9:00

Nota. En la gráfica de confort adaptativo se aprecia que toda el aula esta por debajo de la zona de confort, aquello hace que el diagrama de confort adaptativo del 90% este fuera de los límites; esto se da por la una temperatura externa baja.

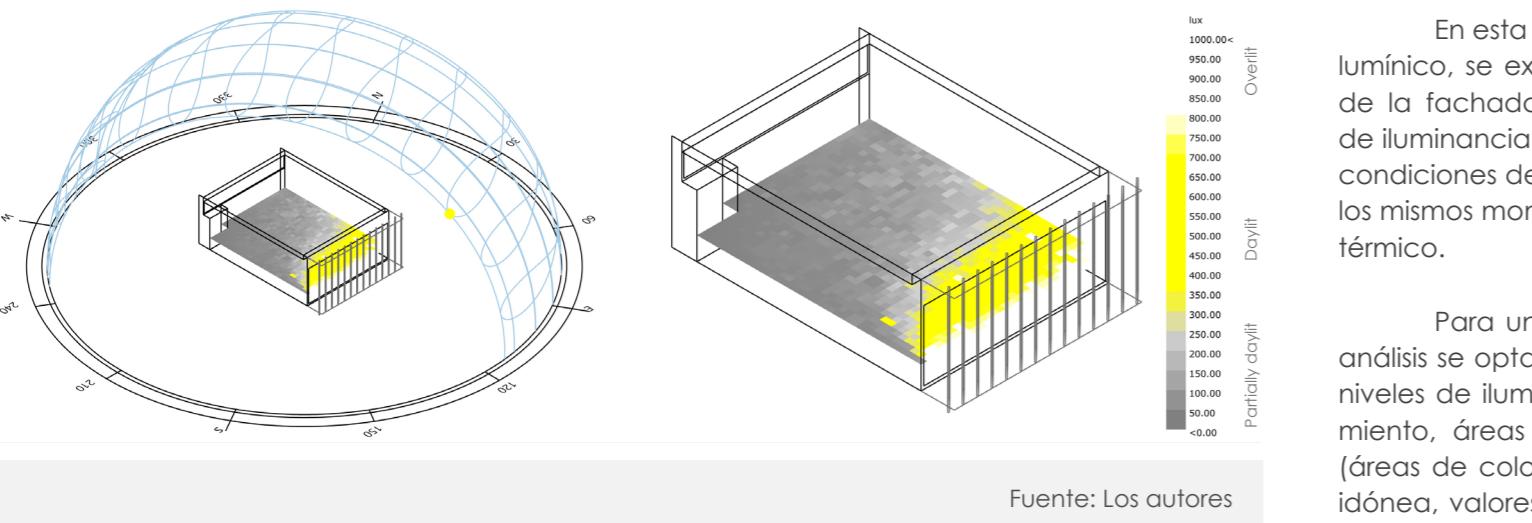
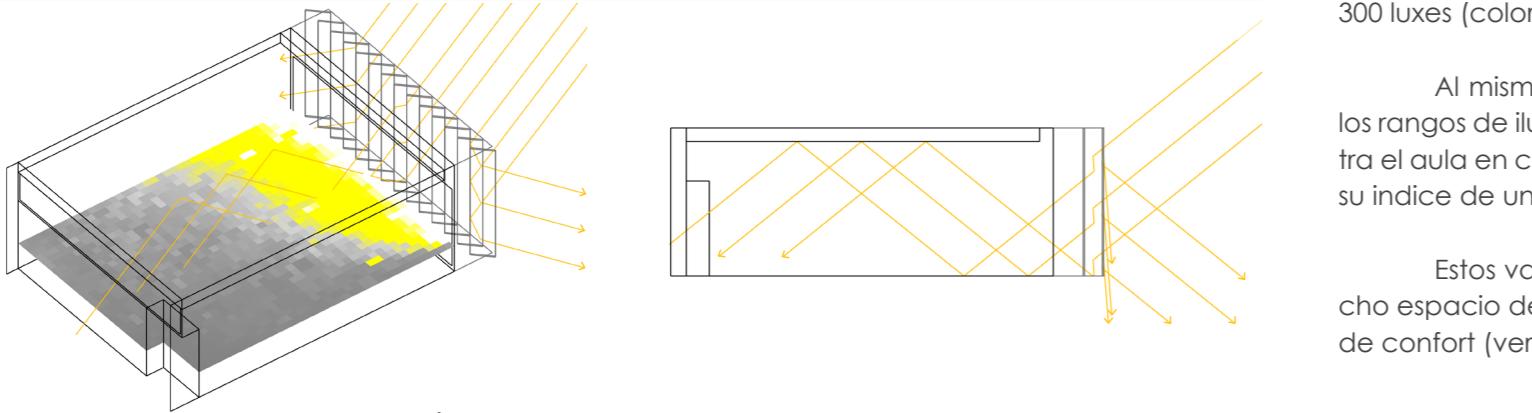
Fuente: Los autores

Figura 58. Análisis de confort térmico aula J-106_21 de Marzo 9:00

Nota. A pesar de la orientación opuesta de la aula J-106 las condiciones son casi idénticas con respecto al aula J-105. Así

también se evidencia que las temperatu-

Fuente: Los autores

Figura 59. Análisis de confort lumínico**Figura 60.** Trazado de fuente de luz natural

Nota. El trazado de rayo de luz no está entrando al aula de una forma coherente para que esta se distribuya uniformemente. Eso hace que haya deslumbramiento cerca de la ventana y zonas bajo confort a

Fuente: Los autores

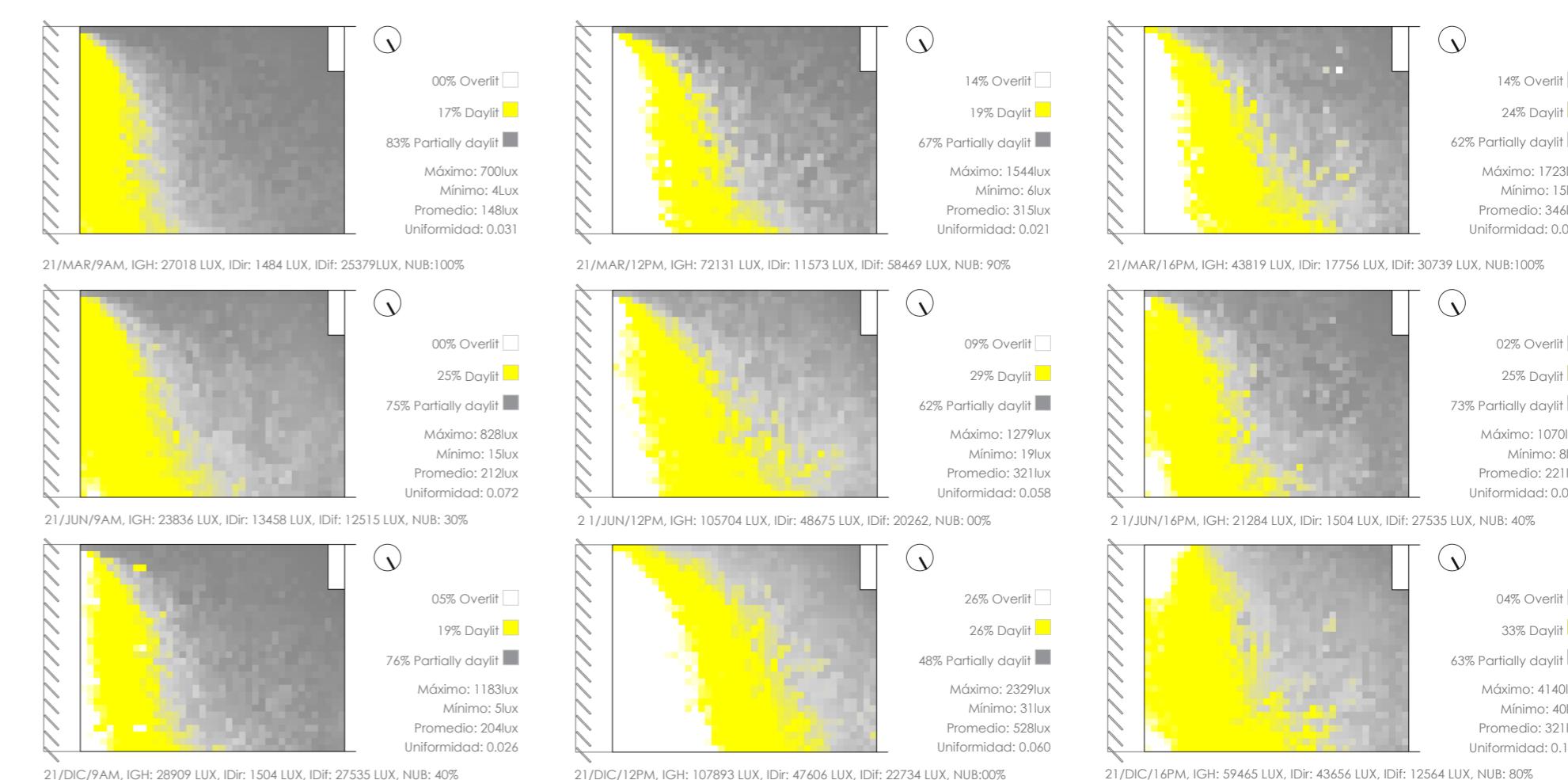
3.9.2. Análisis de confort lumínico

En esta fase de análisis de confort lumínico, se examina como afecta el diseño de la fachada en los niveles y uniformidad de iluminancia en las aulas J-105 y J-106, bajo condiciones de cielo basado en el clima y en los mismos momentos que se realiza el análisis térmico.

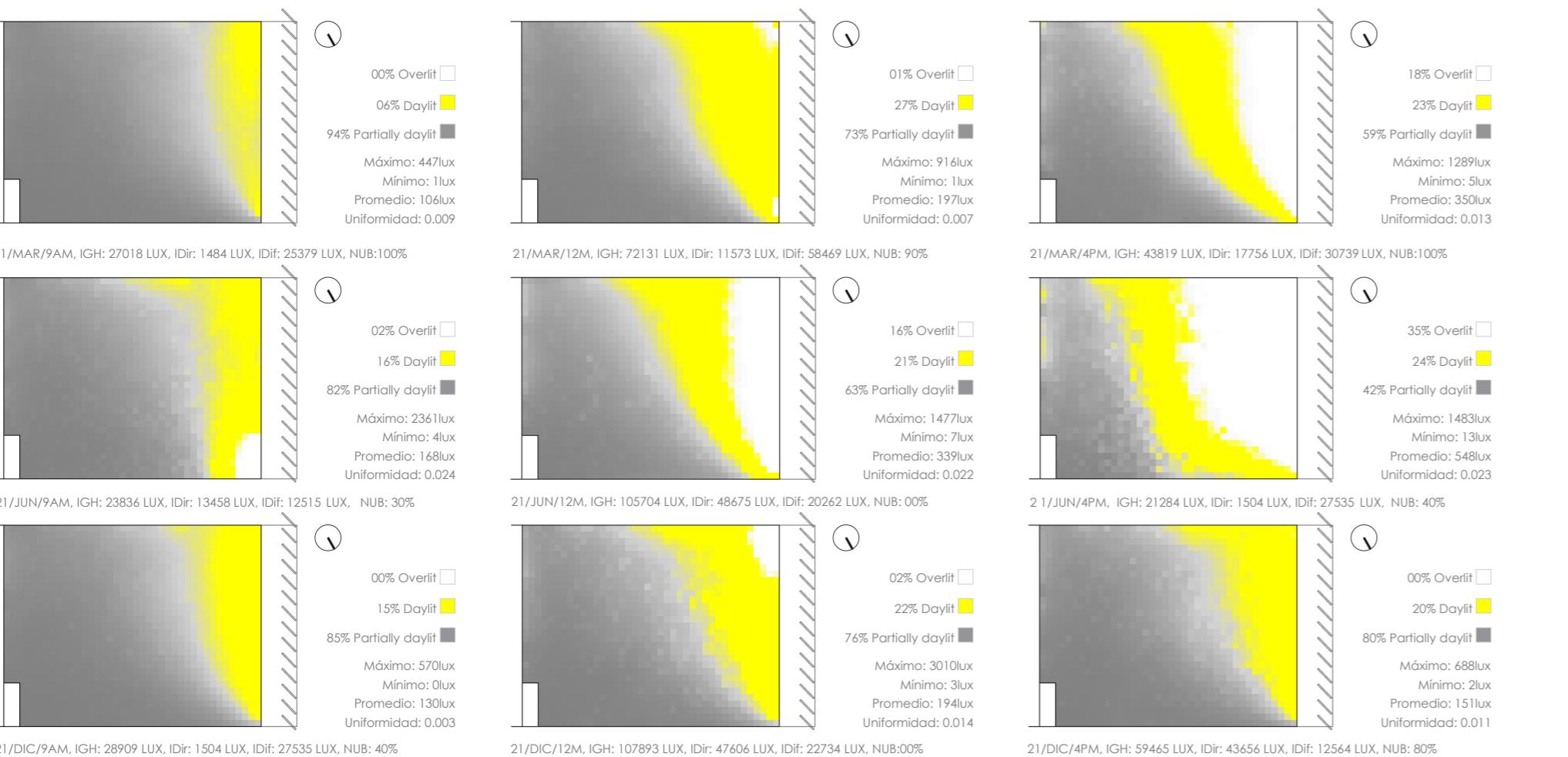
Para un mejor entendimiento de este análisis se opta por clasificar en tres zonas los niveles de iluminancia "Overlit" o deslumbramiento, áreas que sobrepasa los 750 luxes (áreas de color blanco); "Daylit" iluminancia idónea, valores que van desde los 300 a 750 luxes (color amarillo) y "Partially daylit" iluminancia no suficiente, su rango es inferior a los 300 luxes (color gris) (Coellar, 2018).

Al mismo tiempo, se indica cuales son los rangos de iluminacia en los que se encuentra el aula en cada lapso de tiempo, así como su indice de uniformidad.

Estos valores permiten determinar si dicho espacio de trabajo está dentro del rango de confort (ver figuras 61-62 y anexos 41-42).

Figura 61. Análisis de confort lumínico aula J-105

Nota. IGH: Iluminacia Global Horizontal, IDir: Iluminancia Directa, IDif: Iluminancia Difusa, Nub: Nubosidad. Las lamas no son efectivas en todos los momentos debido que en las mañanas no deja entrar suficiente luz, al medio día causa deslumbramiento hasta en un 26% y en las tardes tiene su mejor comportamiento, pero no sobrepasa el 33% de confort.

Figura 62. Análisis de confort lumínico aula J-106

*Nota. IGH: Iluminación Global Horizontal, IDir: Iluminancia Directa, IDif: Iluminancia Difusa, Nub: Nubosidad
En el aula J-106 se tiene lo contrario del aula J-105 en las tardes, pues en ese momento se tiene zonas de hasta un 35% en deslumbramiento; a causa la luz externa en el solsticio de junio que entra directamente al aula.*

Fuente: Los autores

3.9.3. Análisis de resultados para fachada actual

Con relación a los valores de confort lumínico basado en el uso para sala de estudio, rangos de iluminancia de 300 a 750 luxes y una uniformidad mínima de 0.7, podemos ver lo siguiente.

Al hacer referencia a los índices de confort adaptativo —respaldado en el análisis de la fachada actual— podemos ver que el diseño de las lamas no siempre logra estar dentro de los rangos de confort térmico.

Los resultados que se encuentran en la figura 57 y 58, además los anexos del B al 19, indican los análisis de confort térmico de las aulas J-105 y J-106, en los tiempos antes indicados. En estos se puede apreciar que los mapas de temperatura radiante en ocasiones no reflejan un correcto nivel y siempre la falta de distribución uniforme de la radiación. Por lo tanto, la fachada actual no siempre actúa eficientemente al paso de radiación.

Así, podemos ver que en ciertas fechas el confort de las aulas se encuentra dentro del rango de aceptabilidad, pero en fechas como el 21 marzo a lo largo de todo el día están por debajo de los límites y en otras fechas como en el mes de diciembre por la tarde se encuentran sobre el límite superior.

Conviene subrayar que los momentos más calientes en el aula del J-106 es debido a la orientación de la fachada. Esta hace que por las tardes entre enteramente la radiación directa.

Por lo antes mencionado según el análisis térmico y lumínico de la fachada actual, se pretende mediante la fachada responsive optimizar las condiciones ambientales en el área de trabajo dentro de las normas ASHRAE 55 e ISO 8995.

Los gráficos que se encuentran en la figura 61 y 62, incluido los anexos AO y AP; muestran claramente que las zonas en niveles de confort van desde 6% hasta 33%, mientras que el área por debajo de 300 luxes tiene un rango del 42% al 94% y los valores sobre el nivel de confort abarcan un espacio del 0% hasta 35%. La uniformidad en todos los casos no sobrepasa el 0.072.

Por otro lado, con relación a los resultados de confort térmico se ve una estrecha relación en la fecha del 21 de junio a las 16:00. A causa de la incidencia de luz directa sobre el espacio en análisis se tiene un salón sobre el 90% de aceptabilidad y una área con el 53% en deslumbramiento.

Estos resultados dan una clara visión de que las aulas siempre tiene un mayor espacio de trabajo en condiciones de “Partially daylit”; aquello se debe a que las lamas no dan una adecuada distribución de la luz indirecta y rechaza la luz directa, como se puede apreciar en la simulación de la figura 60.

3.10. Diseño, aplicación y análisis de la fachada

En este apartado se diseña, aplica y analiza la fachada propuesta. Para empezar, se plantea propuestas de diseño para la construcción paramétrica de la fachada cinética — similares a las fachadas referentes del capítulo 2—. Segundo, esta se aplica en la fachada de la Facultad de Psicología en condiciones similares a la actual. Para terminar, las variables tanto térmicas como lumínicas deben encontrarse dentro de los rangos establecidos en la normativa como lo es ASHRAE 55 e ISO 8995 respectivamente. Como resultado, se obtiene el diseño óptimo en condiciones de forma, función y formalidad del proyecto.

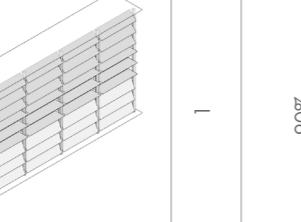
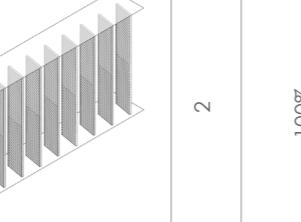
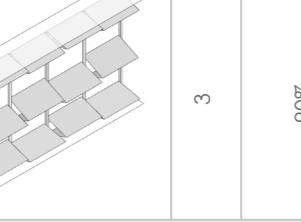
En concordancia, se definen los siguientes procedimientos para llegar al confort térmico y lumínico de las aulas.

3.10.1. Factores principales de diseño

El planteamiento de parámetros es indispensable para definir variables y así conseguir el objetivo principal del estudio, obtener el confort. Por esta razón, se ha determinado la forma, movimiento, materialidad, tipo de control y respuesta como se presenta en la tabla 14. Esto se da mediante el uso de un módulo y la parametrización para optimizar el tiempo y las condiciones ambientales del aulario (Coeillar, 2018).

A continuación, se exponen las propuestas que corroboran la optimización del confort, cabe aclarar que las formas complejas evidencian no ser la solución (Velasco et al, 2015).

Tabla 14. Propuestas de fachada cinética responsiva

Propuestas	#	Confort Térmico (Porcentaje de personas satisfechas)	CONFORT LUMÍNICO (Área entre 300 y 750 lux)	Tipo de movimiento		Sistema de control	Modulación del Sistema envolvente	Tiempo de respuesta
	1	90%	70.33%	Rotación x	1° de movimiento	Nivel 3	Módulo tipo	Minutos
	2	100%	63.38%	Rotación x, z	2° de movimiento	Nivel 3	Módulo tipo	Horas
	3	90%	45.92%	Traslación z	2° de movimiento	Nivel 3	Módulo tipo	Minutos

Fuente: Los autores

Figura 63. Fotomontaje de Propuesta 1 en la Facultad de Psicología



Nota. El diseño de la Fachada 1 corresponde a la variedad de resultados a lo ancho y alto de la misma, esto permite filtrar la luz en tres diferentes niveles por piso. Esta además corresponde a la fachada referente

Figura 64. Módulo de Propuesta 1

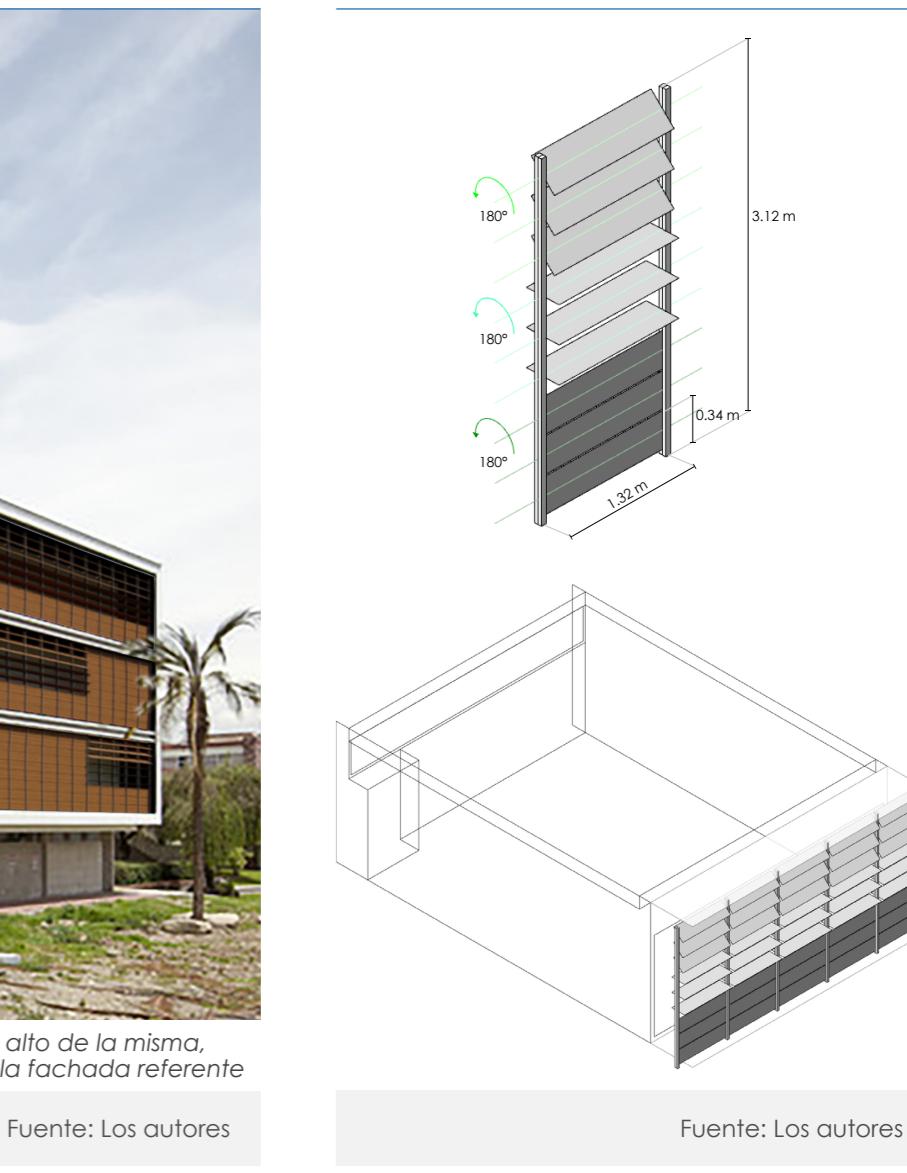
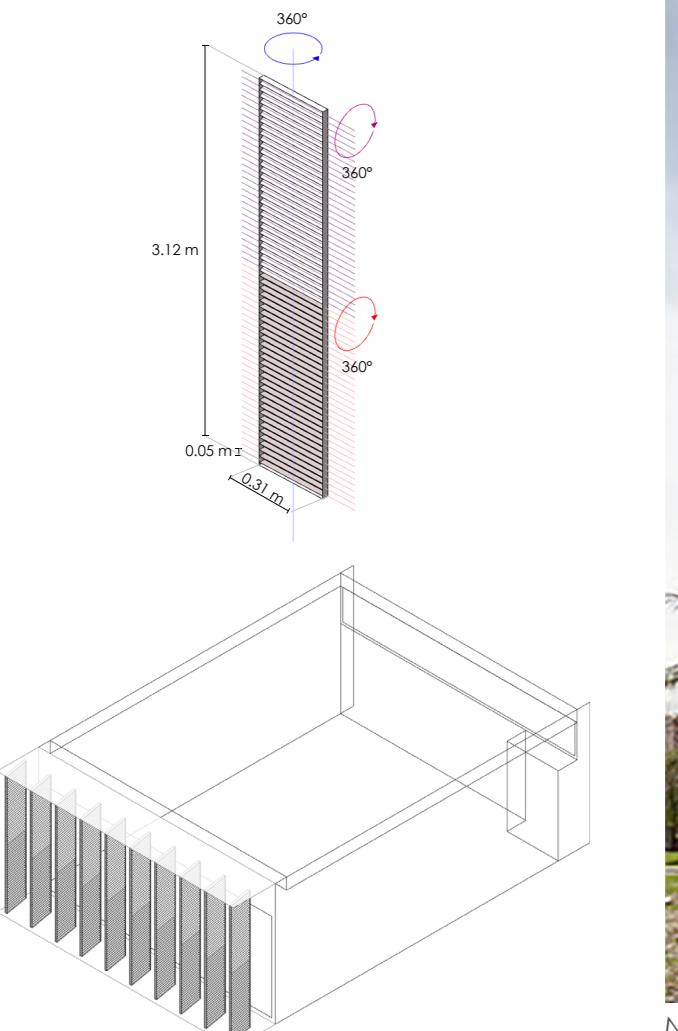
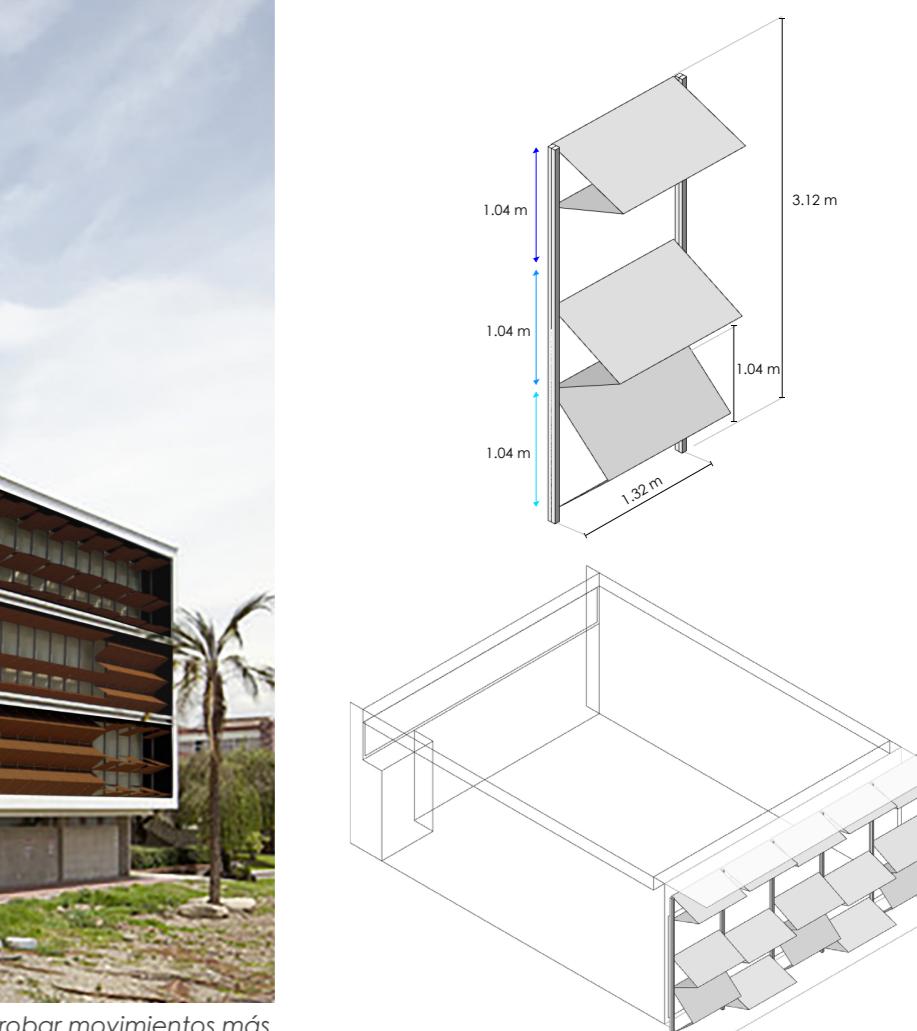


Figura 65. Módulo de Propuesta 2**Figura 66.** Fotomontaje de Propuesta 2 en la Facultad de Psicología**Figura 67.** Fotomontaje de Propuesta 3 en la Facultad de Psicología**Figura 68.** Módulo de Propuesta 3

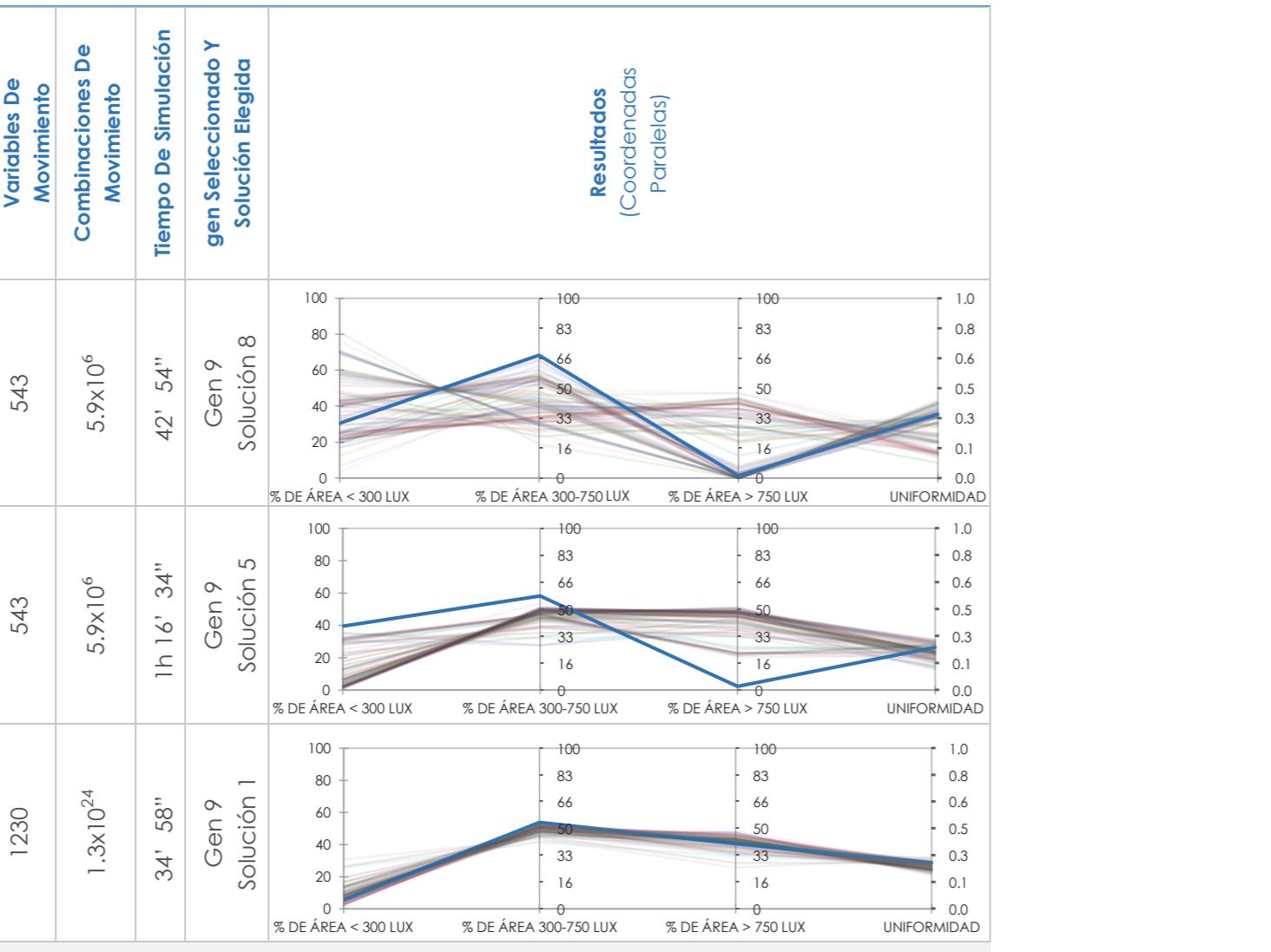
3.10.1.1. Configuración del control para el sistema

El sistema de control empleado para las propuestas es de nivel 3 por ser el más complejo y tener la capacidad de procesar múltiples datos, así como la optimización multiobjetivo mediante algoritmos evolutivos que en este caso es Wallacei (Velasco et al., 2015).

Cabe recalcar, cuando en una investigación se necesita optimizar diversos objetivos para obtener una o más soluciones se habla de una optimización multiobjetivo. Por lo tanto, al hablar de multiobjetivo refiere a considerar de igual relevancia unos objetivos con otros, esto consigue soluciones que favorezcan a cada uno de ellos (Correa, 2008).

El algoritmo utilizado es NSGA-II, mismo que se encarga de realizar una selección dentro de un conjunto de datos con la finalidad de elegir los que más satisfagan a los objetivos planteados. Así pues, en la busca de soluciones para la fachada se evalúan tres objetivos: maximizar la uniformidad, área de confort y minimizar el área de desconfort (todos los parámetros son en iluminancia). La simulación parte de 10 generaciones con 10 soluciones cada uno, un tamaño de población de 100 respuestas. Además, los parámetros de algoritmo se mantienen por defecto. En consecuencia, los resultados de la tabla 15.

Tabla 15. Parámetros para simulación y resultados mediante Wallacei



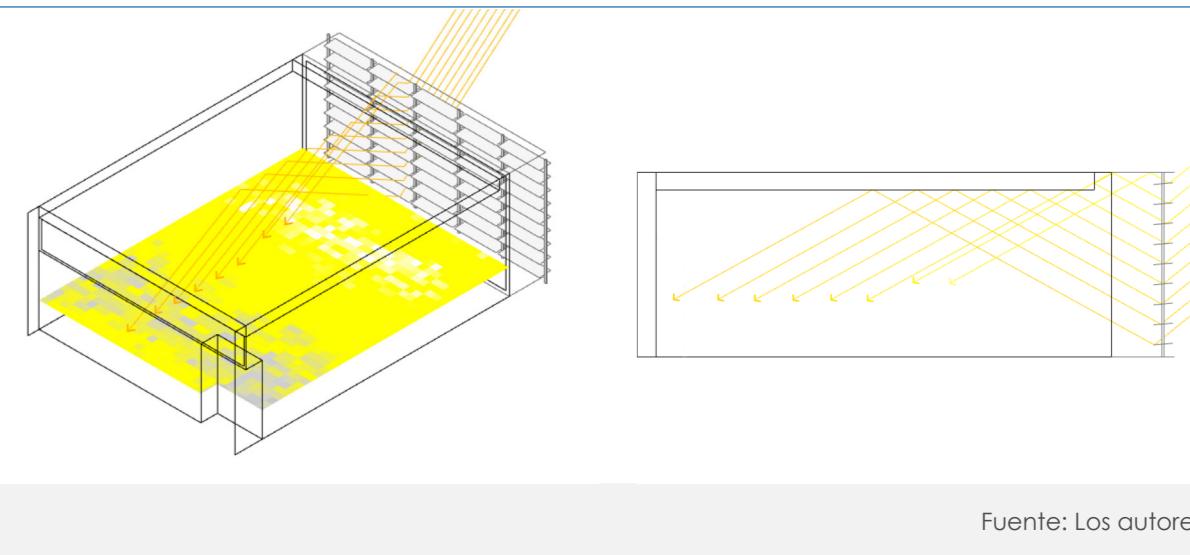
Fuente: Los autores

3.10.2. Aplicación y análisis de confort de la fachada cinética

Para identificar el comportamiento ante las condiciones ambientales de las fachadas propuestas, se realiza simulaciones en una fecha específica, 21 de diciembre a las 12:00 m. (con el mismo estado de clima exterior en el que se simula la fachada actual). Estas buscan alcanzar la mayor cantidad de área dentro del confort y una alta uniformidad, ya que se plantea primero mejorar el factor lumínico con el objetivo de generar un proceso optimizado debido a la relación entre la iluminancia y la radiación (Encalada, 2013). Por consiguiente, la variación de movimientos en las fachadas son los mismo que brindan confort lumínico y térmico.

Por otra parte, el sistema de certificación LEED v4 BO+M es considerada para operación y mantenimiento de edificios educativos y establece parámetros para la iluminación interna natural. Sin embargo, el estudio difiere en algunos parámetros, entre ellos se encuentra el tipo de cielo, rejilla, entre otros. Por lo tanto, se ha tomado la referencia de que los valores deben ser iguales o superiores al 50% de área entre 300 y 750 luxes para el confort lumínico (Pérez, 2007). Así mismo, el porcentaje de confort térmico se sustenta en la ASHRAE 55.

Figura 69. Trazado de fuente de luz natural fachada propuesta 1

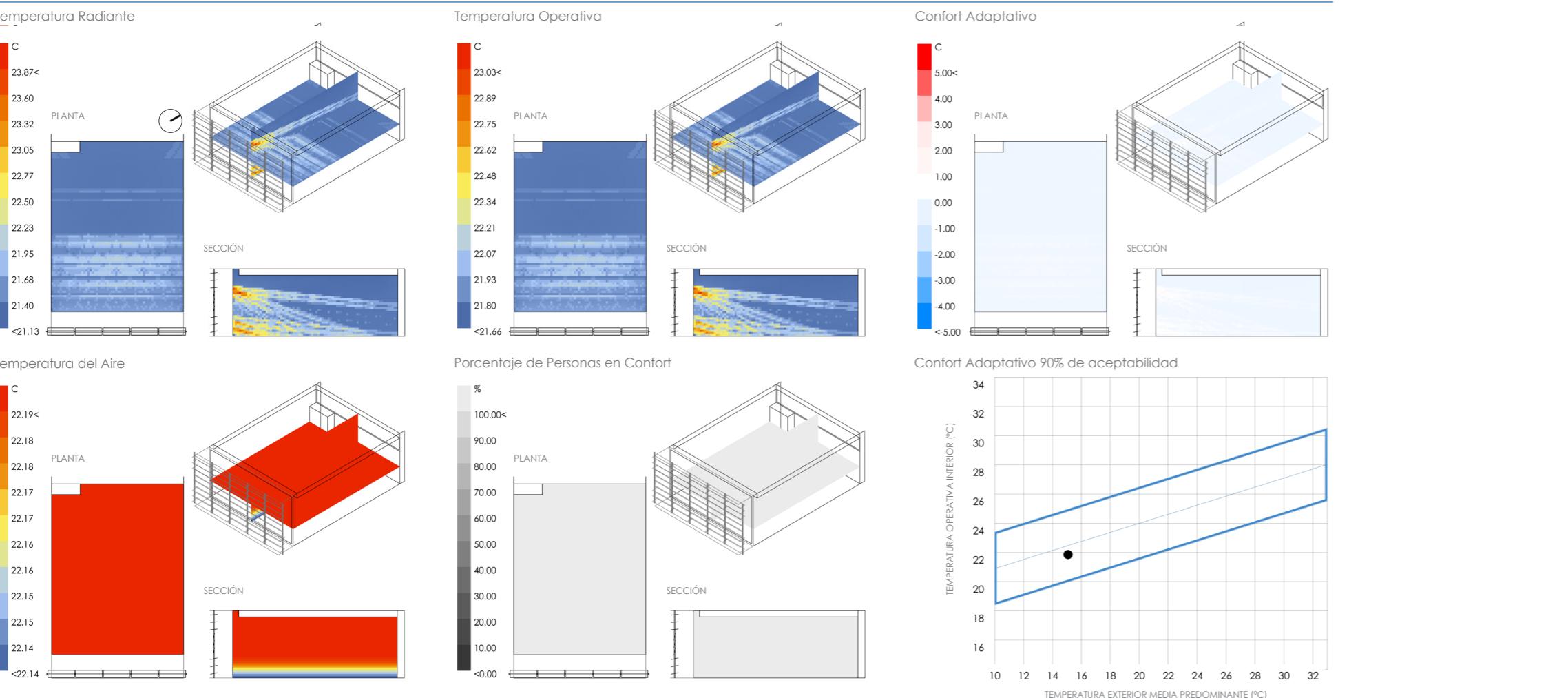


Fuente: Los autores

comparar condiciones de fachada estática y cinética.

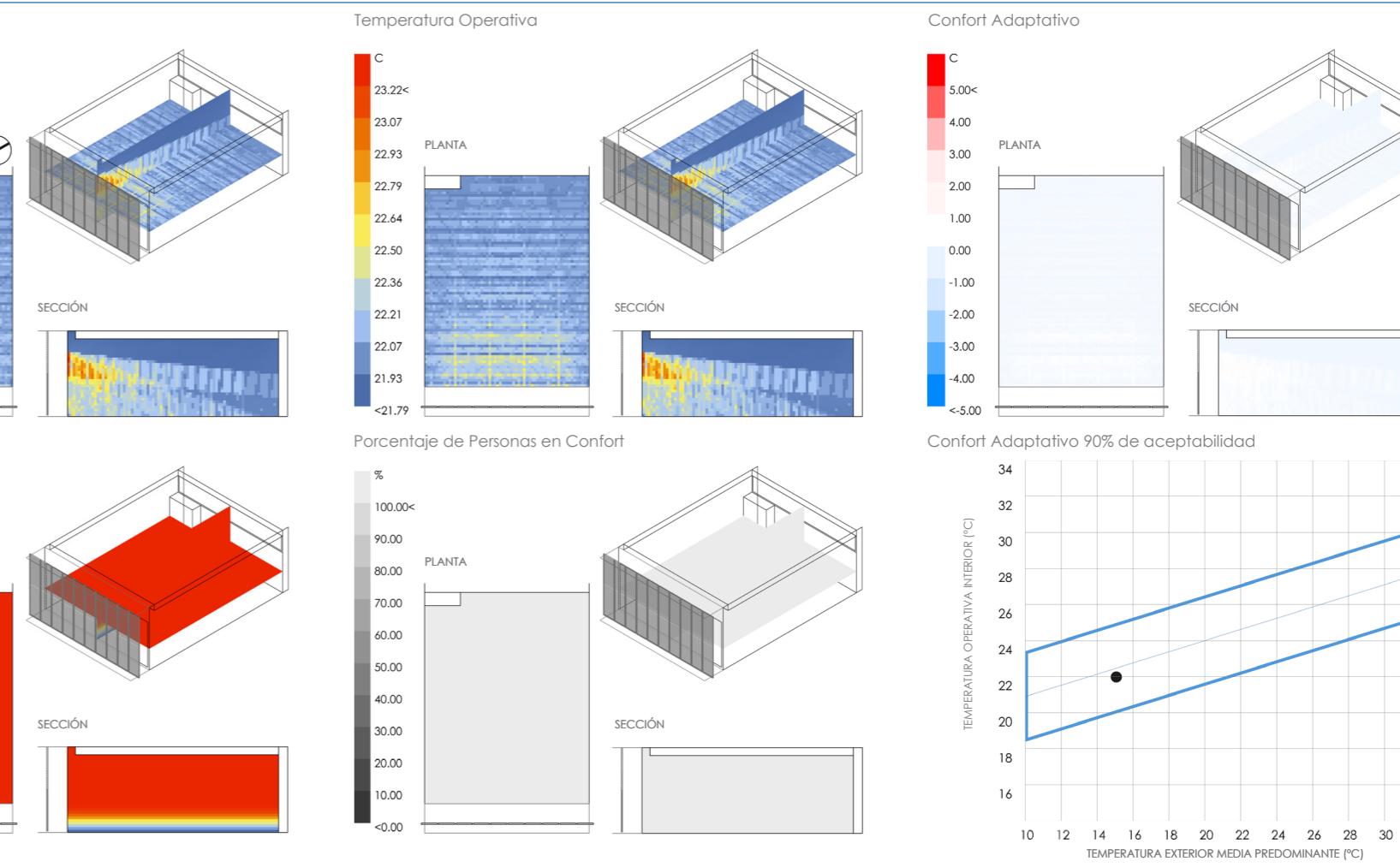
Para terminar, se expone los resultados de luz y temperatura de cada una de las fachadas. Todas las propuestas presentan una mejora en el confort, aunque cada una difiere en resultados.

La materialidad utilizada para las simulaciones tiene las mismas propiedades físicas que las actuales, con el fin de respetar el aspecto del edificio y tener la capacidad de

Figura 70. Análisis de confort térmico aula J- 105_Fachada 1_21 de Diciembre 12:00

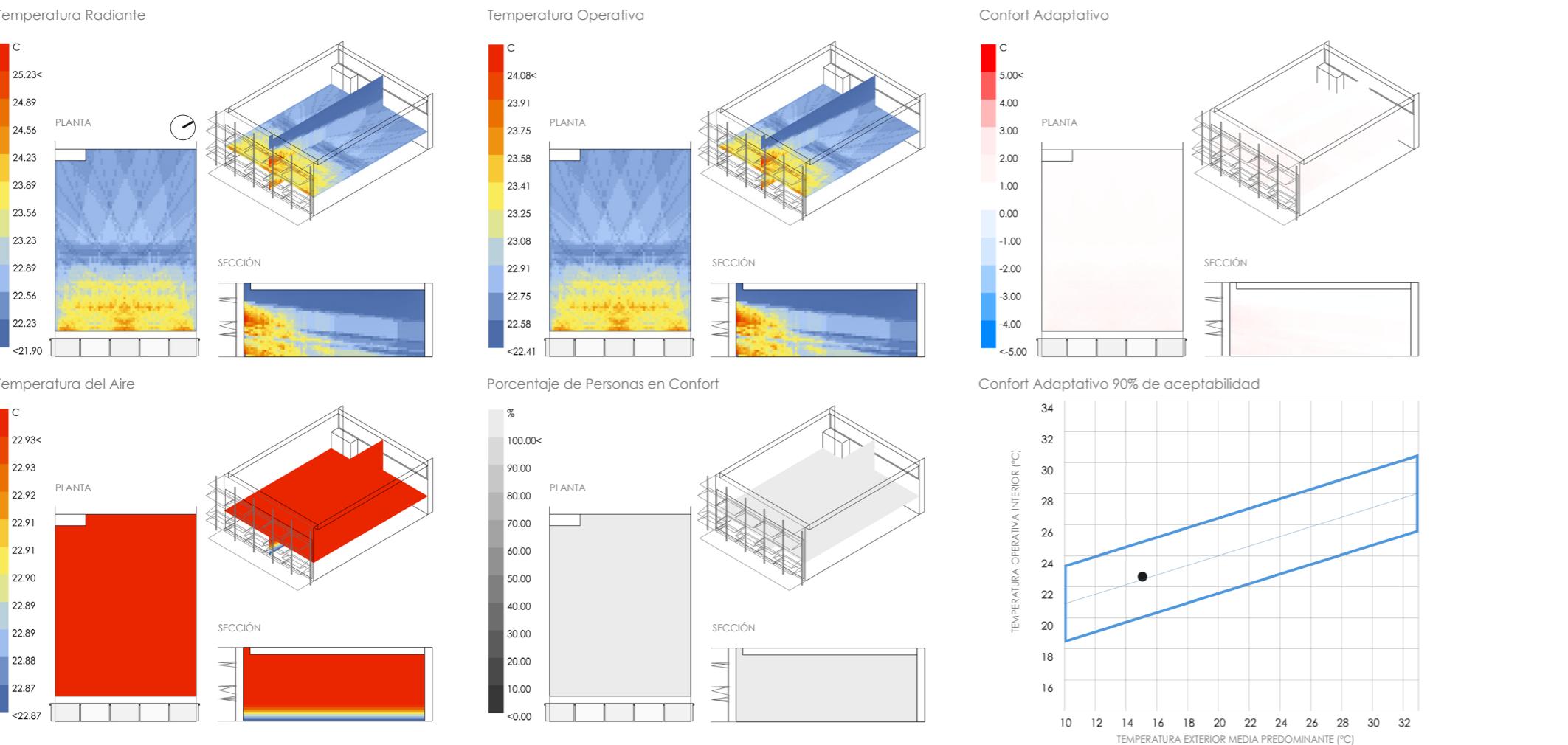
Nota. La distribución de la radiación como se puede ver en el gráfico de la temperatura radiante en diferente en los tres niveles, esto permite una distribución uniforme

Fuente: Los autores

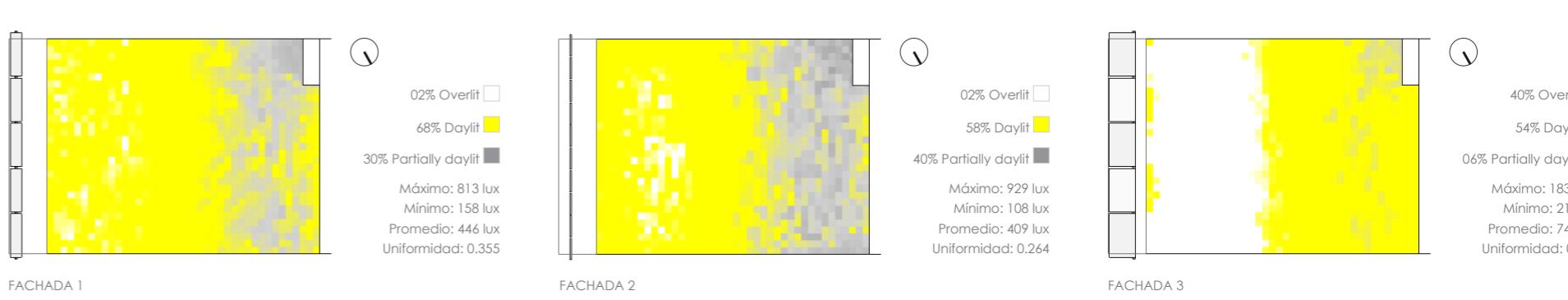
Figura 71. Análisis de confort térmico aula J-105_Fachada 2_21 de Diciembre 12:00

Nota. La distribución de la radiación de la fachada propuesta 2 es la mejor de las tres, por ende el diagrama de confort Adaptativo llega al 100% de personas con

Fuente: Los autores

Figura 72. Análisis de confort térmico aula J- 105_Fachada 3_21 de Diciembre 12:00

Fuente: Los autores

Figura 73. Análisis de fachadas confort lumínico aula J-105_21 de Diciembre 12:00

Nota. Iluminancia global horizontal: 107893 LUX, Iluminancia directa: 47606 LUX, Iluminancia difusa: 22734, Nubosidad: 00%.

3.10.2.1. Parámetros de valoración de las fachadas propuestas.

A partir de un análisis descriptivo de las referencias presentadas en el capítulo 2 sección 1 y apartado 4 se ha logrado determinar medidas de selección enfocados en parámetros de confort lumínico y térmico, criterios generales en los sistemas de envolventes cinéticas.

Los resultados responden a las condiciones ambientales de cada una de las propuestas. Dicho de otra manera, en la figura 73 se evidencia una clara diferencia de uniformidad lumínica entre las fachadas misma que influye en el comportamiento térmico del aula. Al mismo tiempo, la tabla 17 refleja en la puntuación las situaciones. No obstante, los valores obtenidos con todas las propuestas mejoran los escenarios actuales de la edifica-

a Stevenson (2017) en tanto a la materialidad y transformación. Por otra parte, Velasco et al. (2015) refieren al movimiento y control especialmente de las envolventes cinéticas.

ción. De ahí que los valores totales no difieran demasiado.

Ante lo mencionado, para el análisis de cada propuesta se define a partir de los parámetros lumínicos por la incidencia de la iluminancia con respecto a la radiación solar (Encalada, 2013). Como resultado, se opta por la fachada 1 que satisface de mejor manera las necesidades de confort de las aulas.

Tabla 16. Puntuación para las fachadas cinéticas

Parámetros de valoración	Atributo	Puntuación
Cualidades del sistema de envolvente	Valor visual	+1
	Control del ocupante	+2
Confort térmico	Confort térmico (Desfase de la línea de confort)	0 - ±0.83, +3; ±0.83 - ±1.66, +2; ±1.66 - ±2.5 +1
Confort lumínico	Confort lumínico (% de área en confort)	0-33%, +1; 33-66%, +2; 66-100%, +3
Tipo de estímulo	Otros estímulos	+1
	Radiación solar	+3
Control de cierre	Menor del 70%	+1
	Entre el 70% a 90%	+2
	Mayor o igual a 90%	+3
Complejidad del mecanismo	Actuador de 1° de movimiento	+3
	Actuador de 2° de movimiento	+2
	Actuador de múltiple grado de movimiento	+1
Sistema de control parcial o general	Complejidad alta: Nivel 3	+1
	Complejidad Media: Local directo	+2
	Complejidad Baja: Nivel 1, Nivel 2	+3
Modulación del sistema de envolvente	Módulo de alta complejidad	+1
	Módulo de mediana complejidad	+2
	Módulo tipo	+3
Tiempo de respuesta	Horas	+1
	Minutos	+2
	Segundos	+3

Fuente: Los autores

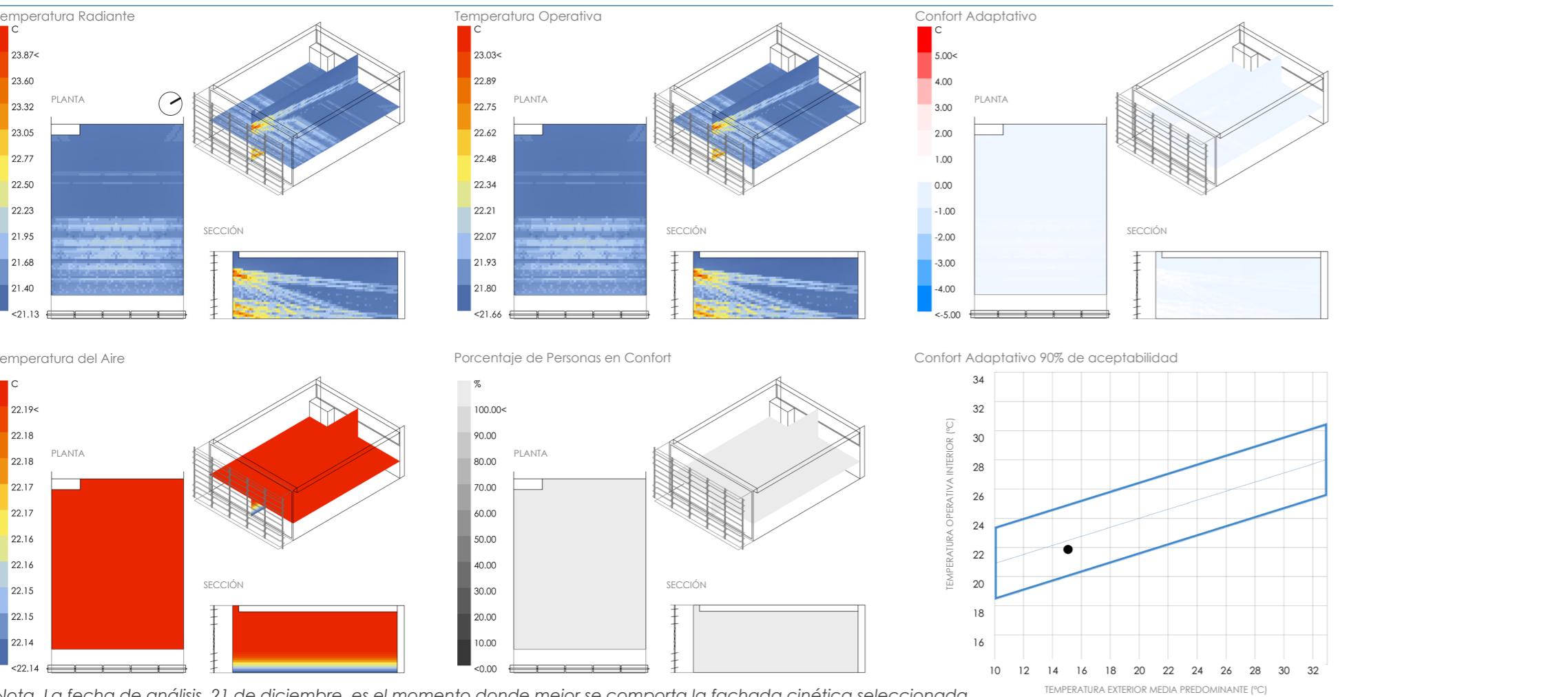
Tabla 17. Tabla resumen con puntuación de cada propuesta

Propuesta	Cualidades de envolvente	Confort térmico	Confort lumínico	Tipo de estímulo	Control de cierre	Complejidad del mecanismo	Sistema de control parcial o general	Modulación del sistema de envolvente	Tiempo de respuesta	Puntuación total /27
	+3	+3	+3	+3	+3	+3	+1	+3	+2	24
	+3	+3	+2	+3	+3	+2	+1	+3	+1	21
	+3	+3	+2	+3	+3	+2	+1	+3	+2	22

Fuente: Los autores

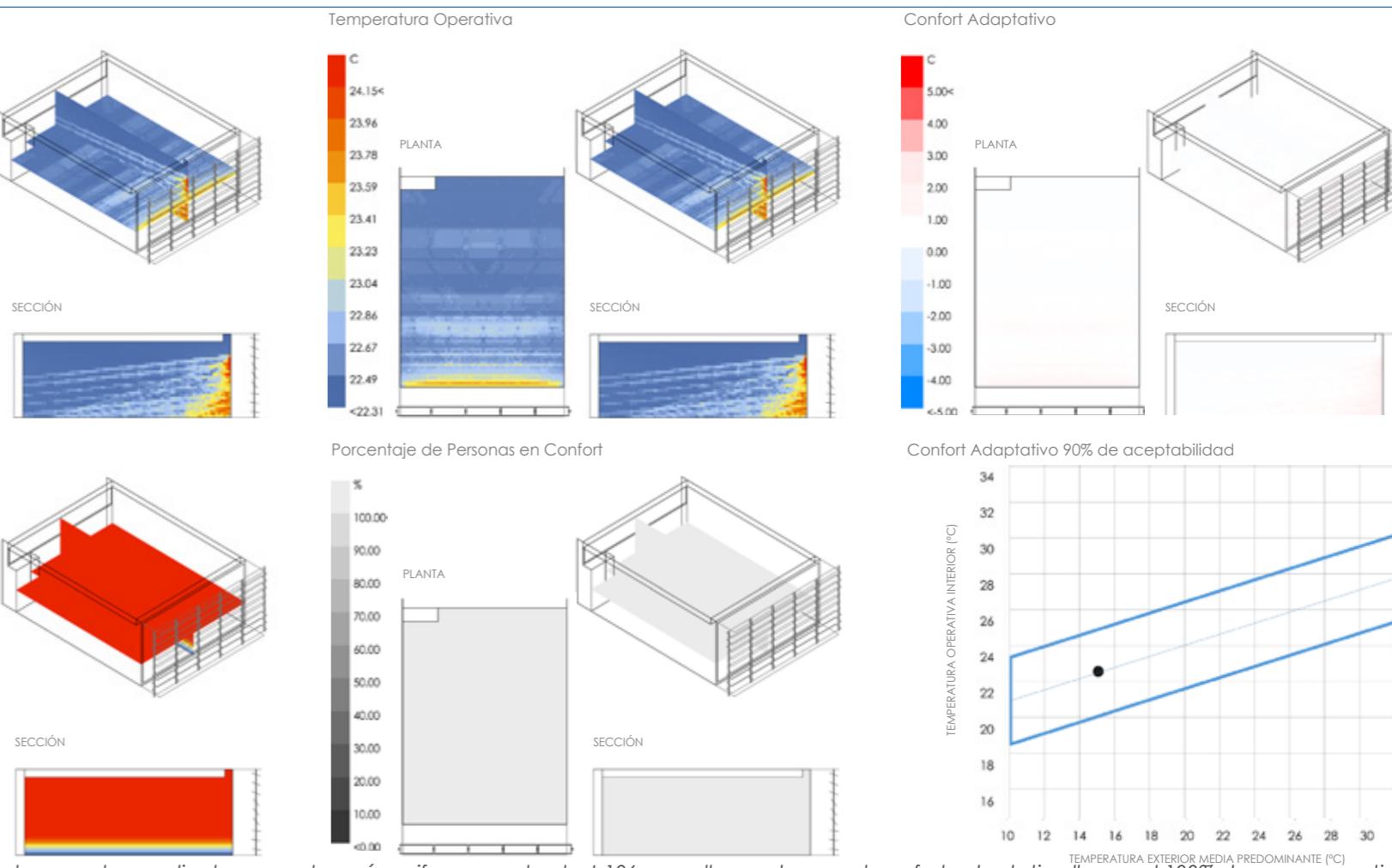
3.11. Resultados térmico y lumínico de la fachada seleccionada

Figura 74. Análisis de confort térmico aula J-105_21 de Diciembre 12:00 m

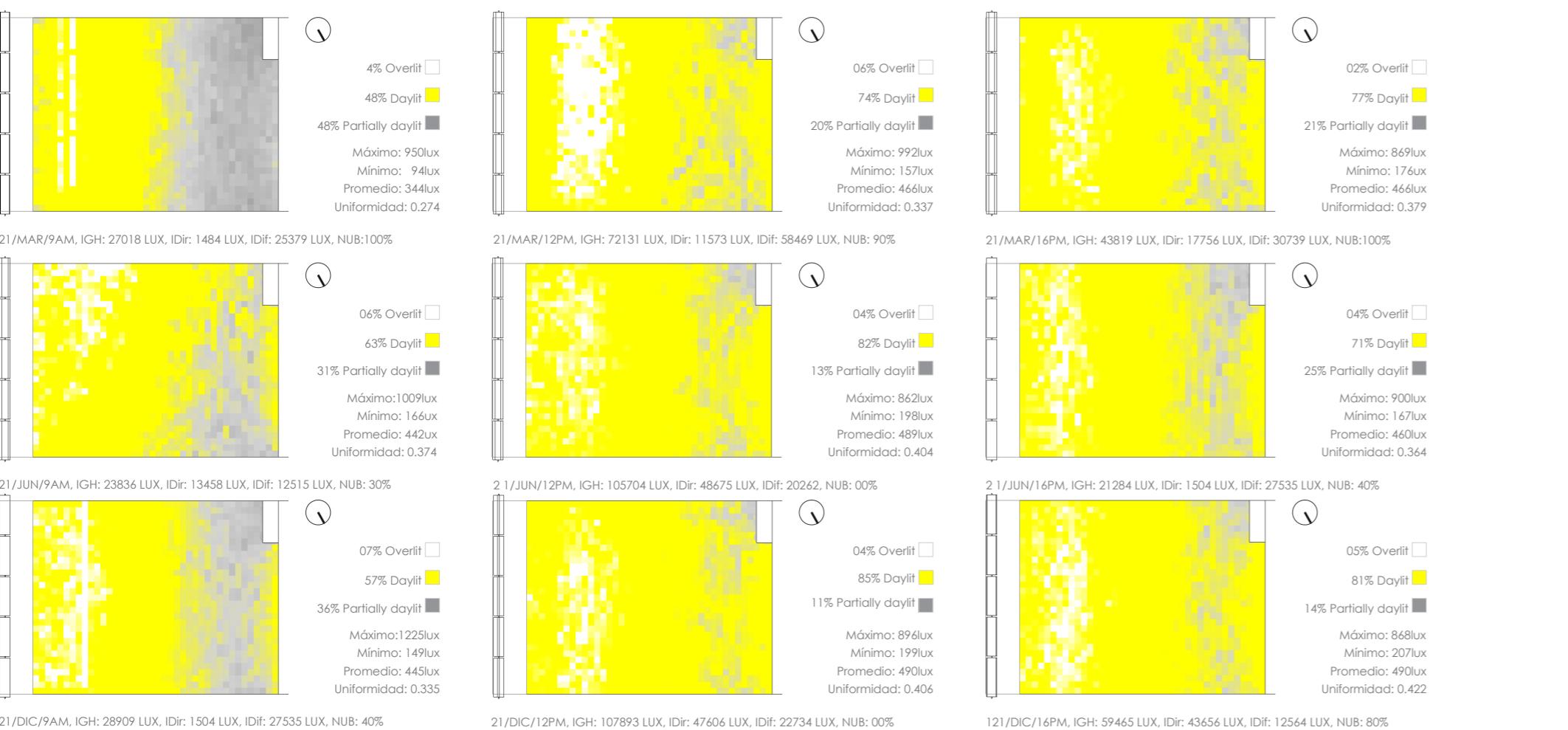


Fuente: Los autores

Figura 75. Análisis de confort térmico aula J-106_21 de Diciembre 12:00 m

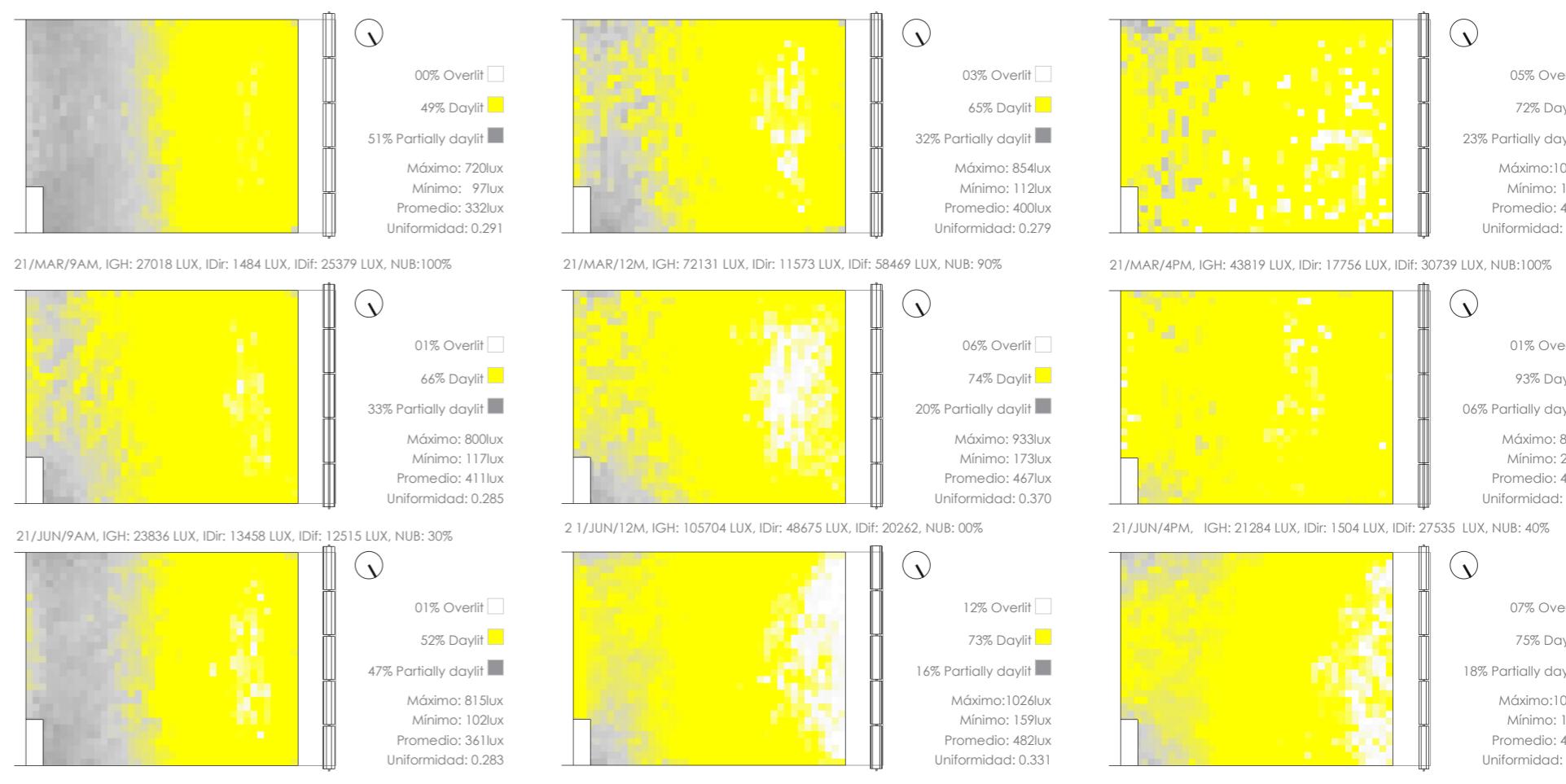


Fuente: Los autores

Figura 76. Análisis de confort lumínico aula J-105

Nota. IGH: Iluminancia global horizontal, IDir: Iluminancia directa, IDif: Iluminancia difusa, NUB: Nubosidad

Fuente: Los autores

Figura 77. Análisis de confort lumínico aula J-106

Nota. IGH: Iluminancia global horizontal, IDir: Iluminancia directa, IDif: Iluminancia difusa, NUB: Nubosidad
En las mañanas la única luz que entra en la aula J-106 es difusa, aquello repercute en la falta de iluminancia llegando cerca del 50% con zonas bajo la zona de confort.

Fuente: Los autores

3.12. Balance y análisis de resultados térmico y lumínico

El balance y análisis de resultados entre la fachada actual y de la fachada propuesta se respaldan en 20 simulaciones térmicas y 20 lumínicas cada una (con un total de 20 mapas lumínicos 100 de temperatura y 20 diagramas de confort adaptativo). Es necesario recalcar que, se analiza el aula J-105 y J-106 a causa de su orientación opuesta y así identificar su comportamiento.

La fachada propuesta consigue bajar la temperatura del aire y radiante de las aulas. Por ende, la temperatura operativa disminuye. Sin embargo, en el clima templado por las bajas temperaturas esto puede llegar a ser un problema. Por esto, el mes de marzo presenta valores fuera de los límites de confort para esta zona (figura 78 y 79).

En adelante, la diferencia de temperaturas entre la fachada actual y la propuesta es de aproximadamente 0.7°C . A su vez, los resultados no superan el límite superior de confort. Conviene señalar la evidente mejora en el aula J-106 el 21 de junio a las 4pm al dismi-

nir la temperatura en 3.5°C , entra en el rango de 90 % de adaptabilidad (ASHRAE, 2010).

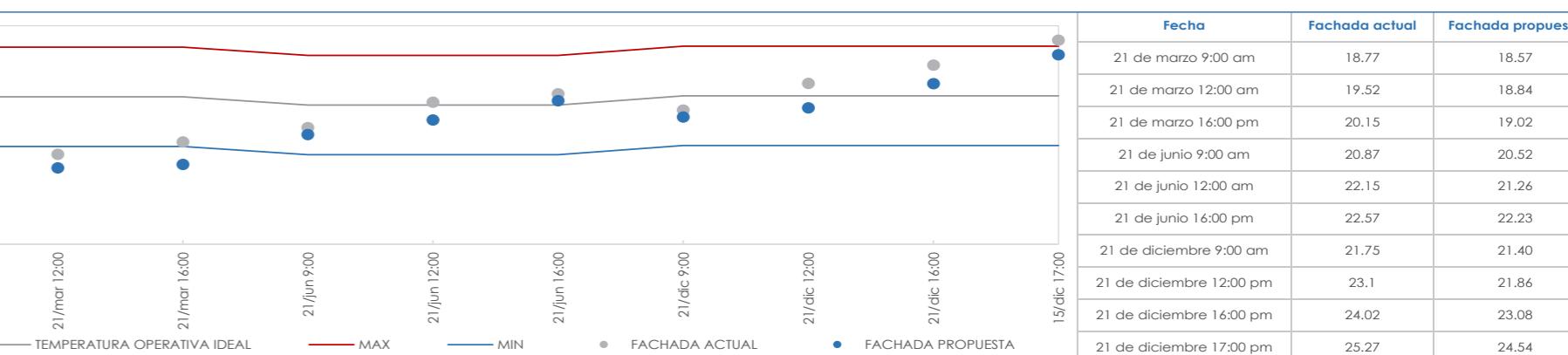
Por otro lado, los niveles de iluminancia se logran controlar con la fachada cinética. La uniformidad mejora considerablemente y deja de existir deslumbramiento. En comparativa, el porcentaje del área confort lumínico ha aumentado como mínimo 31% y como máximo 69% y la uniformidad ha logrado potenciarse entre 0,243 y 0,453 (ver tabla 18, 19, 20 y 21)

Las gráficas de frecuencia relativa justifican la optimización ambiental por medio de mecanismos móviles. Los valores de la fachada propuesta, en su mayoría, bordean los datos ideales para un ambiente educativo entre 300 y 750 luxes (Pérez, 2007); a su vez, las iluminancias suben en porcentaje a las áreas cercanas de la zona de confort. Valores que con la fachada actual cuenta con datos extremos. Debido a dos causas: la permeabilidad y la falta de la misma. No se pueden controlar por la permeabilidad excesiva en ciertas horas resultado de su condición estática —esto permite el paso de radiación y así eleva los datos de iluminancia— (figura 80 y

81) y las mismas lamas permiten un efecto inverso, aumento de penumbra.

Otro rasgo de la fachada propuesta es la capacidad de redireccionar la luz natural por medio de la reflectancia de las persianas. Como resultado, los rayos inciden en el cielo y la luz indirecta se distribuye uniformemente en el área de trabajo (ver figura 69) (Pattini, 2007).

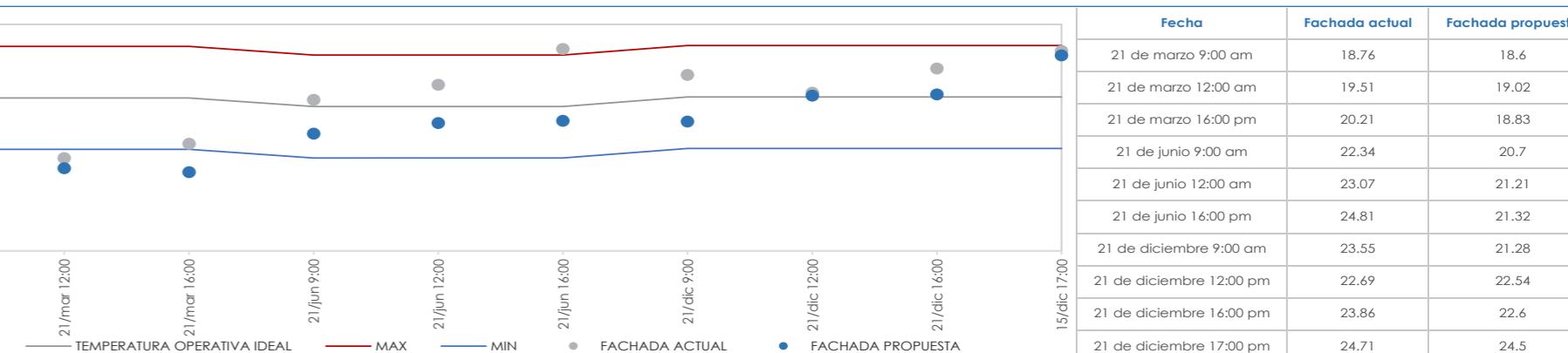
Figura 78. Diagrama de comparación de temperaturas entre fachada propuesta y la actual _Aula J-105



Nota. La fachada cinética logra bajar la temperatura operativa en todos los momentos, pero eso llega a ser un inconveniente en instantes de frío hasta ponerse fuera del

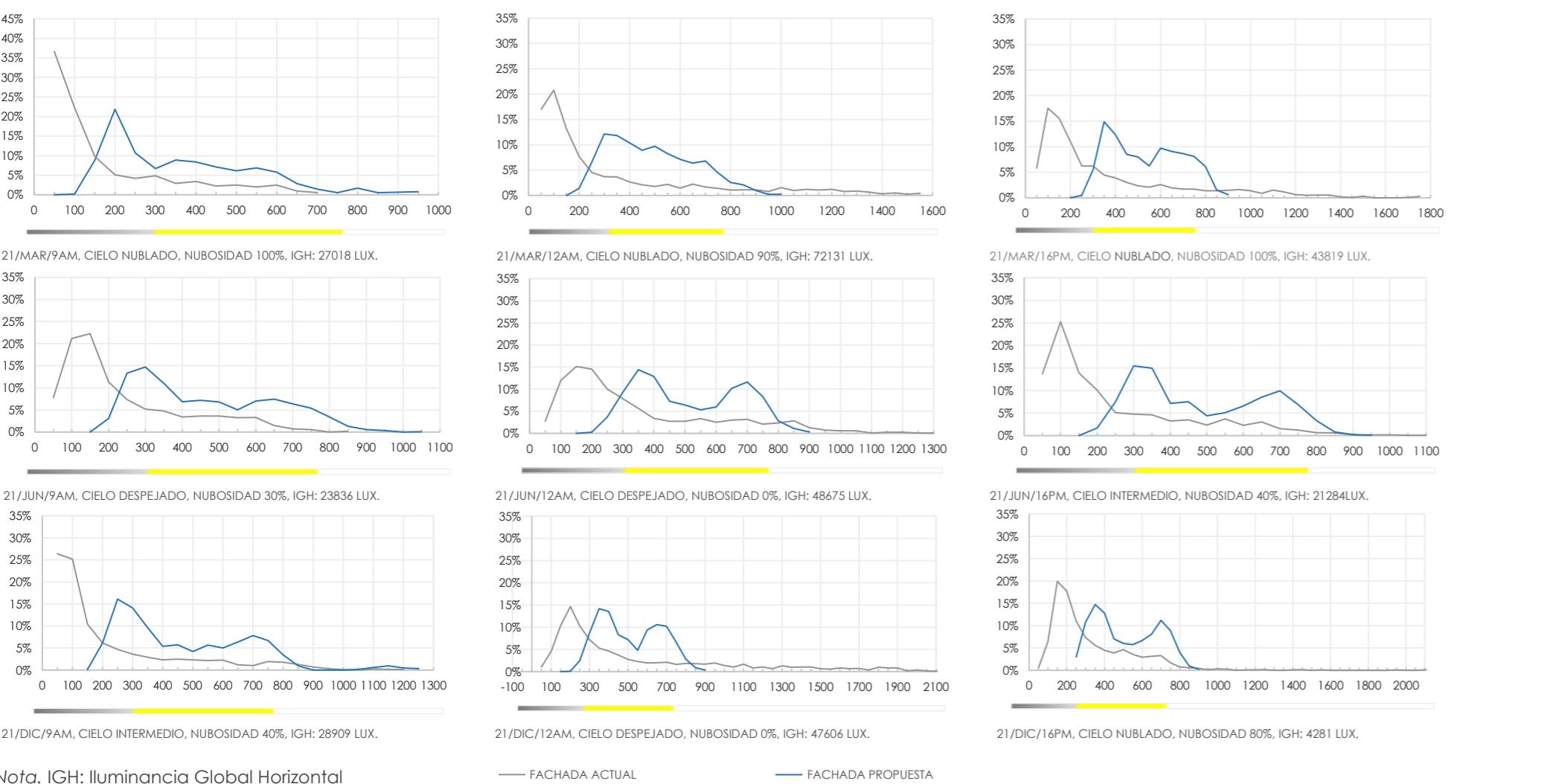
Fuente: Los autores

Figura 79. Diagrama de comparación de temperaturas entre fachada propuesta y la actual _Aula J-106



Nota. La fachada cinética logra bajar la temperatura operativa en todos los momentos, esto llega a ser beneficioso en ciertos instantes con altas temperaturas externas

Fuente: Los autores

Figura 80. Diagrama de comparación de Iluminancia entre fachada propuesta y la actual _Aula J-105

Fuente: Los autores

Figura 81. Diagrama de comparación de Iluminancia entre fachada propuesta y la actual _Aula J-106

Fuente: Los autores

Tabla 18. Resumen de iluminancia fachada actual_Aula J-105

Fecha	< 300 lux	300-750 lux	> 750 lux	Mínimo (lux)	Máximo (lux)	Promedio (lux)	Uniformidad
21 de marzo 9:00 am	83%	17%	0%	4	700	148	0.031
21 de marzo 12:00 m	67%	19%	14%	6	1544	315	0.021
21 de marzo 4:00 pm	62%	24%	14%	15	1723	346	0.043
21 de junio 9:00 am	75%	25%	0%	15	828	212	0.072
21 de junio 12:00 m	62%	29%	9%	19	1279	321	0.058
21 de junio 4:00 pm	73%	25%	2%	8	1070	221	0.036
21 de diciembre 9:00 am	76%	19%	5%	5	1183	204	0.026
21 de diciembre 12:00 m	48%	26%	26%	31	2329	528	0.060
21 de diciembre 4:00 pm	63%	33%	4%	40	4140	321	0.124
15 de diciembre 5:00 pm	69%	28%	3%	28	1532	347	0.081

Fuente: Los autores

Tabla 19. Resumen de iluminancia fachada propuesta_Aula J-105

Fecha	< 300 lux	300-750 lux	> 750 lux	Mínimo (lux)	Máximo (lux)	Promedio (lux)	Uniformidad
21 de marzo 9:00 am	48%	48%	4%	94	950	344	0.274
21 de marzo 12:00 m	20%	74%	6%	157	992	466	0.337
21 de marzo 4:00 pm	21%	77%	2%	176	869	466	0.379
21 de junio 9:00 am	31%	63%	6%	166	1009	442	0.374
21 de junio 12:00 m	13%	82%	4%	198	862	489	0.404
21 de junio 4:00 pm	25%	71%	4%	167	900	460	0.364
21 de diciembre 9:00 am	36%	57%	7%	149	1225	445	0.335
21 de diciembre 12:00 m	11%	85%	4%	199	896	490	0.406
21 de diciembre 4:00 pm	14%	81%	5%	207	868	490	0.422
15 de diciembre 5:00 pm	36%	63%	1%	139	813	417	0.334

Fuente: Los autores

Tabla 20. Resumen de iluminancia fachada actual_Aula J-106

Fecha	< 300 lux	300-750 lux	> 750 lux	Mínimo (lux)	Máximo (lux)	Promedio (lux)	Uniformidad
21 de marzo 9:00 am	94%	6%	0%	1	447	106	0.009
21 de marzo 12:00 m	73%	27%	1%	1	916	197	0.007
21 de marzo 4:00 pm	59%	23%	18%	5	1289	350	0.013
21 de junio 9:00 am	82%	16%	2%	4	2361	168	0.024
21 de junio 12:00 m	63%	21%	16%	7	1477	339	0.022
21 de junio 4:00 pm	42%	24%	35%	13	1483	548	0.023
21 de diciembre 9:00 am	85%	15%	0%	0	570	130	0.003
21 de diciembre 12:00 m	76%	22%	2%	3	3010	194	0.014
21 de diciembre 4:00 pm	80%	20%	0%	2	688	151	0.011
15 de diciembre 5:00 pm	82%	18%	0%	2	605	143	0.012

Fuente: Los autores

Tabla 21. Resumen de iluminancia fachada propuesta_Aula J-106

Fecha	< 300 lux	300-750 lux	> 750 lux	Mínimo (lux)	Máximo (lux)	Promedio (lux)	Uniformidad
21 de marzo 9:00 am	51%	49%	0%	97	720	332	0.291
21 de marzo 12:00 m	32%	65%	3%	112	854	400	0.279
21 de marzo 4:00 pm	23%	72%	5%	163	1081	468	0.348
21 de junio 9:00 am	33%	66%	0%	117	800	411	0.285
21 de junio 12:00 m	20%	74%	6%	173	933	467	0.370
21 de junio 4:00 pm	6%	93%	1%	220	805	462	0.476
21 de diciembre 9:00 am	47%	52%	1%	102	815	361	0.283
21 de diciembre 12:00 m	16%	73%	12%	159	1026	482	0.331
21 de diciembre 4:00 pm	18%	75%	7%	183	1014	460	0.397
15 de diciembre 5:00 pm	41%	50%	9%	142	1472	463	0.307

Fuente: Los autores

3.13. Conclusión capítulo 3

La validación del modelo se realiza bajo la comparativa de datos tomados in-situ y los datos simulados, aquello permite tener un modelo calibrado correctamente, tanto en las propiedades físicas de los materiales, las infiltraciones y las condiciones meteorológicas.

A través del primer paso se puede conseguir un análisis real de las condiciones de confort con la fachada actual, mismas que no llegan a un confort tanto en lo térmico como en lo lumínico, bien sea por que la fachada no deja pasar suficiente luz natural o viceversa.

Al mirar los resultados es imperante la reformulación de la fachada actual. La solución por la cual se opta es un sistema flexible, la fachada cinética responsiva. La cual mediante la parametrización y el respeto a la formalidad del proyecto se obtiene tres soluciones basadas en los referentes, mismas que se han realizado en la zona climática CFB según Koppen.

Mediante una valoración cuantitativa de las fachadas propuestas se elige a las más

óptima. Esta es comparada en términos térmicos y lumínicos durante los mismos momentos contra la fachada actual. Aquello evidencia que el uso de la fachada cinética responsiva para solucionar el problema actual es preciso.

CAPÍTULO 4

MODELO A ESCALA

- 4.1 Funcionamiento del sistema cinético
- 4.2 Modelo a escala (hardware y software)
- 4.3 Elaboración de prototipo
- 4.4 Medición de iluminación en la maqueta
- 4.5 Balance y análisis de resultados entre maqueta - modelo virtual
- 4.6 Conclusión

4.1. Funcionamiento del sistema cinético

La geometría y modulación se define a partir del beneficio de confort para el edificio y el panel del muro cortina respectivamente. Así pues, cada módulo de fachada contiene tres grupos de tres lamas cada uno que se mueven por conjunto. Estas lamas tienen dimensiones de 1.20x0.34x0.02m, cuya materialidad es madera sintética con la finalidad de mejorar el mantenimiento y respetar la formalidad del proyecto.

La estructura resistente para el módulo consta de perfiles IPE 140, ubicados cada 1.29m. Conviene subrayar, el espacio entre el alma de cada perfil es aprovechado para colocar el mecanismo cinético, es decir, con fines formales.

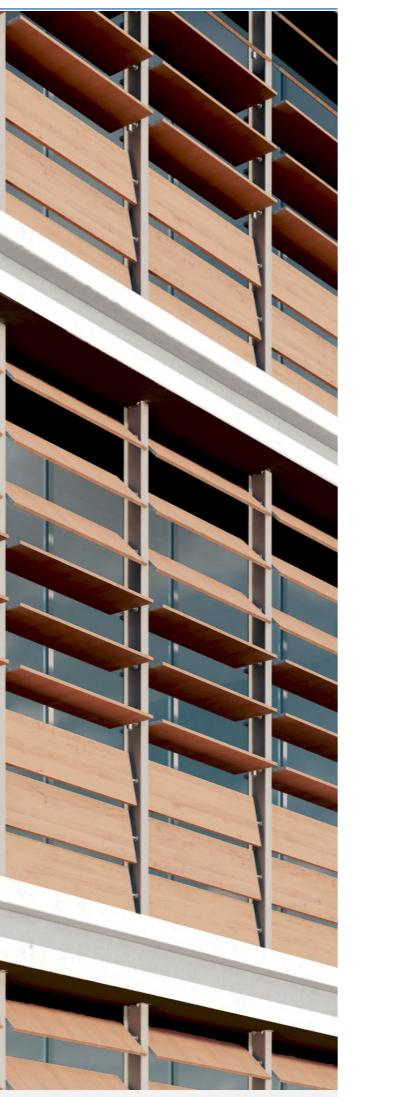
El mecanismo empieza su funcionamiento con su sensor de radiación al receptar las condiciones ambientales y enviar datos al controlador. Wallacei interpreta la mejor solución en ángulos y ordena a los actuadores o servomotores de 12 kg, apto para el giro de tres lamas, accionar los piñones y polea a través de una banda. Los tableros se posicionan en el ángulo indicado y así se consigue brindar el mayor porcentaje de confort térmico y lumínico para el aula.

Figura 82. Diagrama de funcionamiento



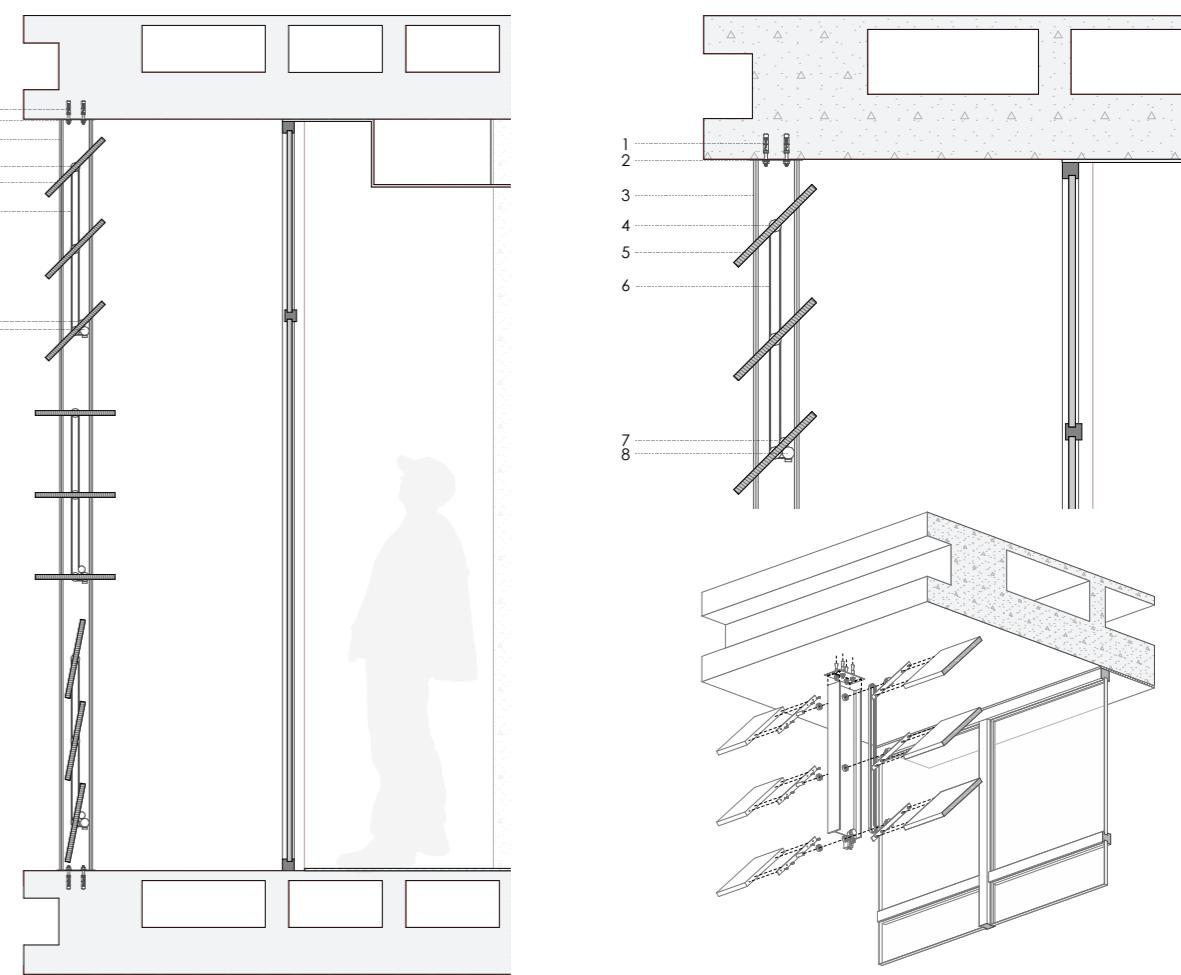
Fuente: Los autores

Figura 83. Fachada propuesta



Fuente: Los autores

Figura 84. Detalle de fachada propuesta

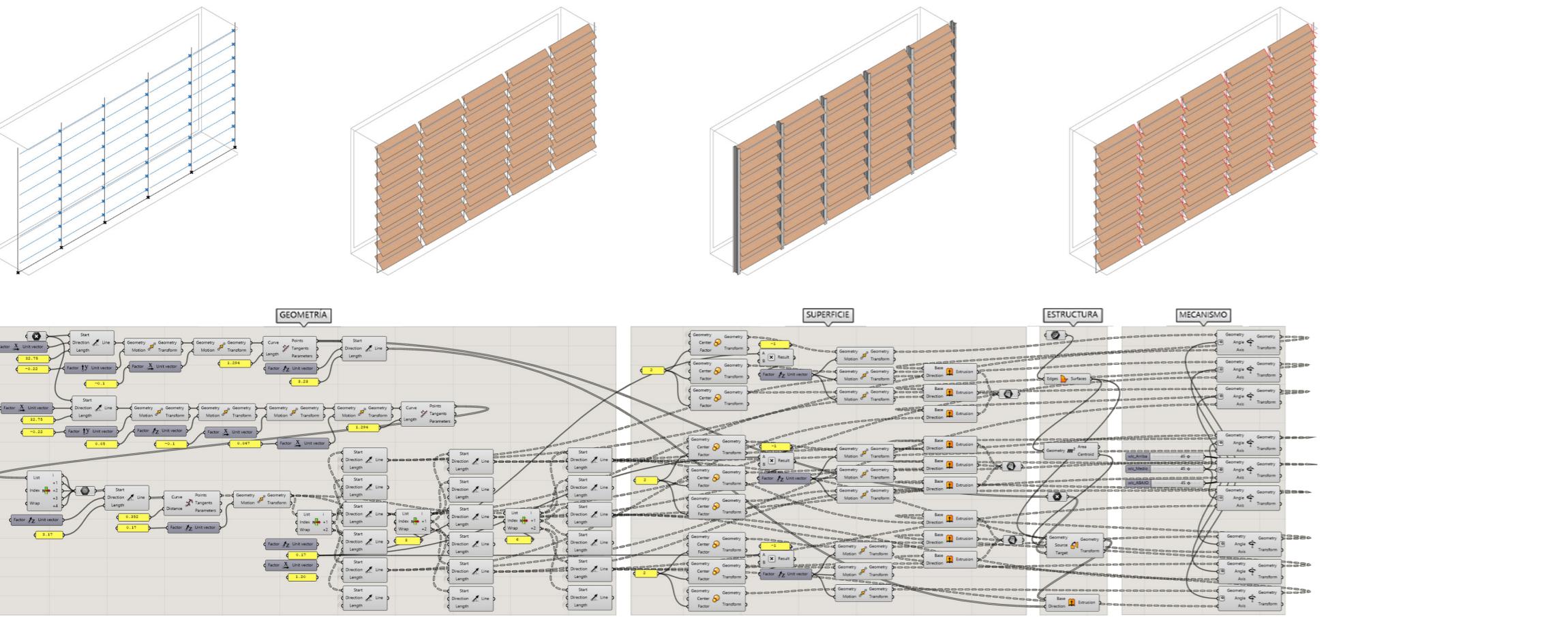


Nota. 1. Perno de expansión, 2. Placa metálica 3mm, 3. Perfil IPE 140, 4. Rodamiento 12mm y Piñón XL 12mm, 5. Madera plástica 2x34x120cm, 6. Banda XL 12mm,

Fuente: Los autores

4.2. Modelo a escala (hardware y software)

Figura 85. Script de Grasshopper para maqueta (hardware)



Nota. El Script muestra los nodos necesarios para representar la parte física de la maqueta y así poder vincularla con el Grasshopper. Éste representa las partes esenciales de la maqueta que interactúan entre sí, misma que cuenta con una geometría, superficie, estructura y mecanismo.

Fuente: Los autores

4.3. Elaboración de prototipo

"La creación de prototipos es la actividad fundamental que encapsula innovación, colaboración y actividad en el diseño. Todo esto es necesario para obtener datos más cercanos a los resultados del programa y, por ende, a la realidad" (Björn & Gee, 2006, p. 1)

El prototipo representa la parte física del análisis, puesto debe estar conectada al Grasshopper (software), con el fin de comprobar cómo funciona el movimiento cinético y su configuración bajo una variedad de condiciones como el clima. (Sharaidin, 2014). El modelo es diseñado a escala 1:10, tamaño preciso para poder analizar la incidencia del confort lumínico de la fachada cinética en el aula (Kesten et al., 2010).

Las partes que respetan el prototipo, son las mismas que se toma en cuenta en la simulación. En efecto, las características físicas de las superficies que forma el modelo son lo más cercano que se presentan en el modelo virtual. Las paredes y cielo raso son hechos de cartón gris y pintado con acrílico blanco; la base del piso forrado con una impresión que

contenga el mismo mosaico que el original; el vidrio está realizado con un vidrio simple de 2mm de espesor, su marco pintado con spray de color aluminio y la puerta recubierta con melamina.

Todo esto es necesario para obtener datos más cercanos a los resultados del programa y, por ende, a la realidad.

Al mismo tiempo, el tamaño de la escala del modelo permite interactuar con la fachada y el mecanismo cinético para verificar su configuración y rendimiento de respuesta eficazmente (Sharaidin, 2014).

Por consiguiente, en la realización de la fachada se toma en cuenta: geometría, estructura que soporta la superficie y el mecanismo. La estructura se elabora con cartón gris y recubierto con pintura de spray color aluminio; la superficie está representado por una lámina de cartón gris y recubierto con melamina, que permite representar una madera plástica y la parte mecánica se realiza con nueve servomotores SG90 9g, estos mueven la fachada con ayuda de varillas de cobre de 3 mm de diámetro. El mecanismo si bien nos es el mismo que se encuentra en el detalle constructivo, debido al tamaño del modelo, se trata de in-

cluir el mayor número de partes que estas la componen, sin que esto afecte el movimiento (ver figura 86).

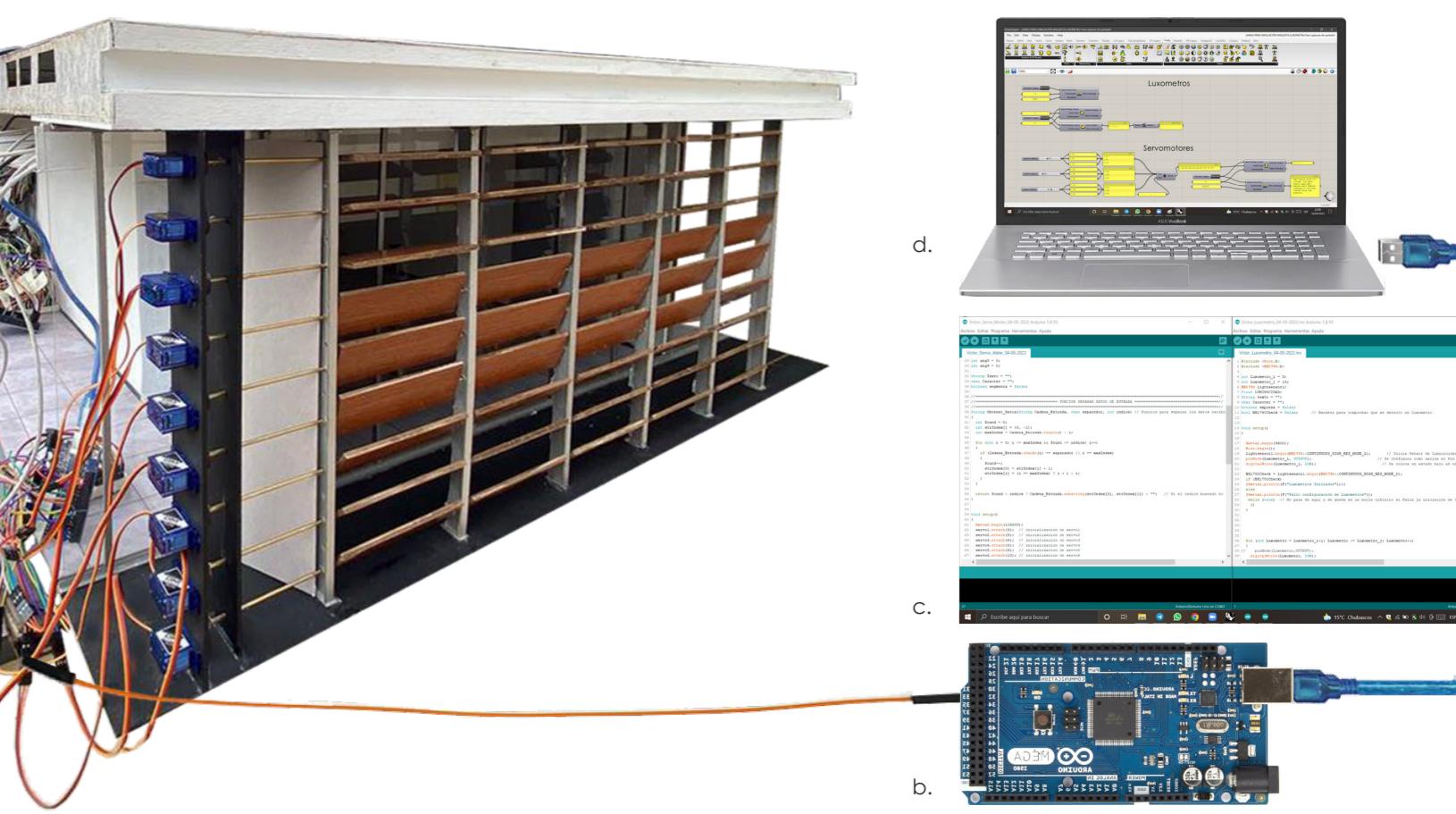
Por último, al realizar de tal forma el prototipo permite conocer a profundidad el funcionamiento; así mismo, acercarnos a las condiciones actuales del aula, hace del análisis de confort lumínico confiable.

Figura 86. Diagrama Envolventes cinéticas

Nota. a. aula sin fachada, b. estructura de la fachada, c. superficie, d. mecanismo

Fuente: Los autores

4.3.1. Vinculación entre Hardware y Software

Figura 87. Vinculación Maqueta y Grasshopper

Nota. a. maqueta escala 1:10, b. placa Arduino, c. aplicación de Arduino, d. Grasshopper/Firefly

El estudio experimental de la maqueta funciona mediante una conexión de hardware y software; que sirve para enviar ángulos de rotación desde el Grasshopper a los servomotores, así como recibir valores de iluminancias desde el Grasshopper a la maqueta y viceversa.

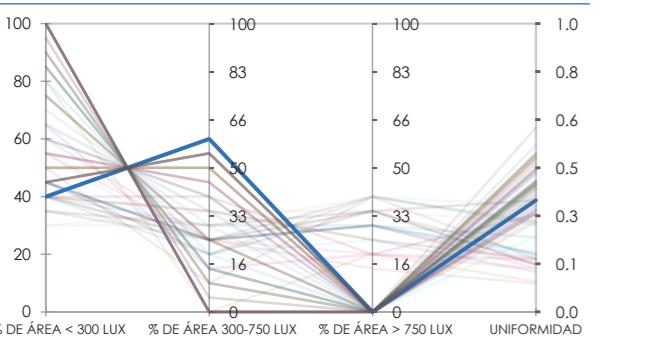
Fuente: Los autores

4.4. Medición de iluminancia en la maqueta

La investigación de fachadas cinéticas de Eltaweel et al. (2020) ha demostrado un estudio experimental en maqueta, éste tiene el fin de demostrar y validar su practicidad; para ello usan un método en el control de automatización y recolección de datos. Este apartado está basado en dicha investigación.

El proceso inicia con la recolección de las condiciones del clima al momento exacto que se realiza el trabajo (12 de mayo del medio día), se toma en cuenta el porcentaje de nubosidad y la radiación —dichos datos son recogidos de IBM (2022)— para generar

Figura 88. Resultados mediante Wallacei



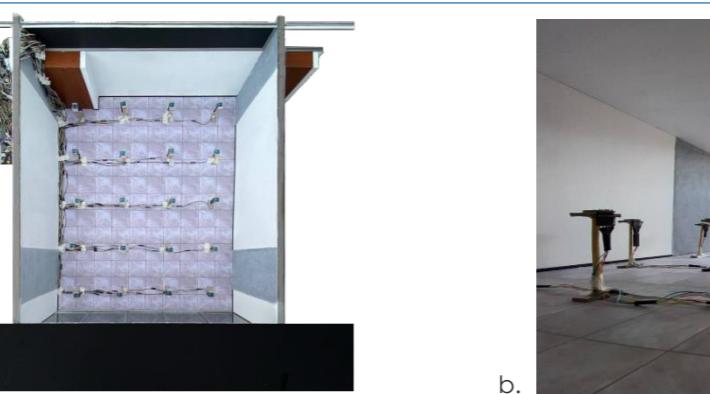
Nota. Los parámetros son los mismos que se llevan a cabo en la configuración del control en el aparato 3.3.1.1, pero en este caso el tiempo de simulación

Fuente: Los autores

las condiciones de cielo lo más parecidas en el componente Honeybee; el cielo en ese instante tiene una nubosidad del 90% con una radiación difusa de 237 W/m^2 y una radiación directa de 197 W/m^2 . En segundo lugar, se corre Wallacei para determinar los ángulos más idóneos de las lamas y obtener el máximo confort lumínico; en la figura 88 se puede observar los resultados, el más apto cuenta con un 60 % de área en confort y una uniformidad de 0.38.

Cabe destacar, que el área hace referencia a una rejilla formada por 20 cuadrículas, por la necesidad de contrastar con los datos recibidos de los sensores de iluminan-

Figura 89. Sensores de iluminancia y vista interior de la maqueta



Nota. a. distribución de sensores de iluminancia, b. vista interior

cia que están debidamente colocados en la maqueta según la norma EN 12464-1 (2012) (ver figura 89.a). Paso seguido, se procede a enviar hacia la placa de Arduino los ángulos definidos por el motor evolutivo mediante el plugin Firefly; el resultado final de las lamas giradas en una vista interior de la maqueta se puede apreciar en la figura 89.b. Finalmente, se procede a recoger los veinte datos registrados por los luxómetros —para tomar esta información se toma en cuenta la orientación que debe tener el aula, así como tapar el vidrio del callejón y los laterales de la fachada; con el fin de tener las condiciones semejantes a la realidad—.

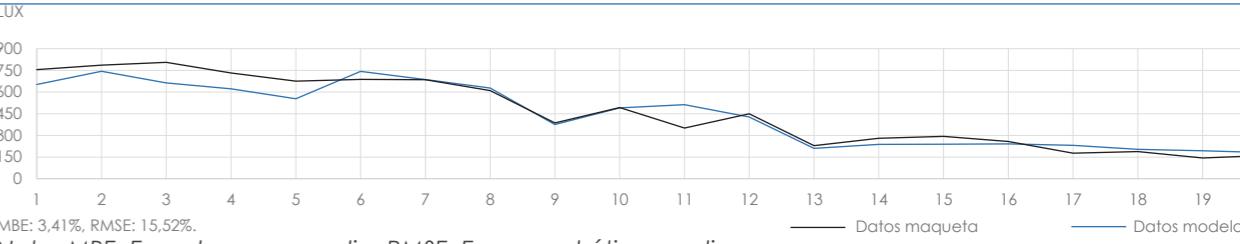
4.5. Balance y análisis de resultados entre maqueta - modelo virtual

Para validar los resultados de la maqueta se lleva a cabo la comparación de dos datos: la iluminancia y la luminancia. La comparación de luxes tiene el fin de verificar la eficiencia de la fachada física para mejorar las condiciones lumínicas. Mientras que las candelas por metro cuadrado permiten comprobar el estado de la superficie (Eltaweel et al., 2020).

De la información recogida tanto de la maqueta como del modelo 3d (ver figura 90) se compara los valores y se determina el margen error mediante la metodología utilizada en el apartado 3.1.1.5. El error de sesgo medio y el error cuadrático medio entran dentro de los rangos permitidos. Por otro lado, los mapas de iluminancia de la figura 91 si bien no son iguales, debido al porcentaje de áreas en confort, el rango de los valores no difiere en mayor medida.

Por último, las imágenes de alto rango dinámico (HDRI) tratado con el componente Honeybee False Color, la reflectancia de los materiales de ambos modelos se encuentra entre 50 a 300 Cd/m², en otras palabras sus materiales son semejantes.

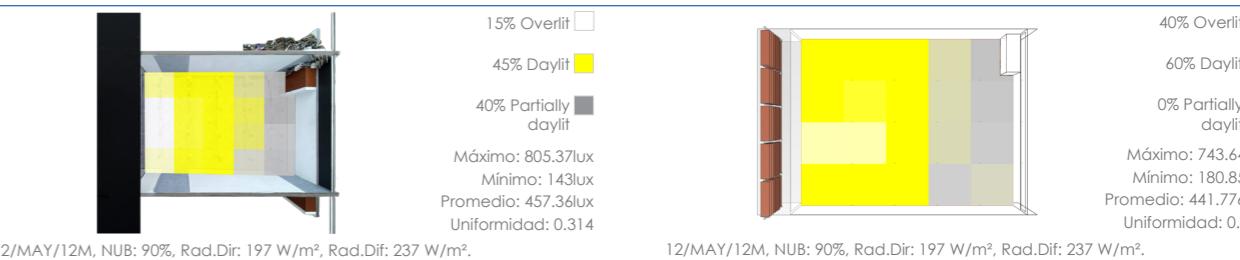
Figura 90. Diagrama de iluminancia de maqueta y modelo virtual



Nota. MBE: Error de sesgo medio, RMSE: Error cuadrático medio.

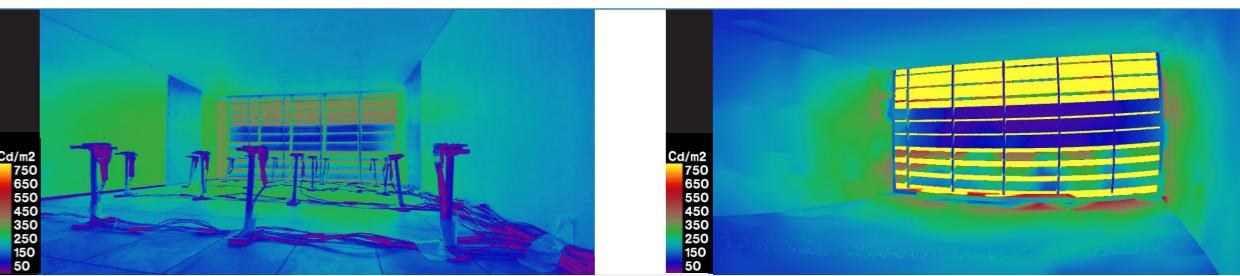
Fuente: Los autores

Figura 91. Mapas de iluminancia de maqueta y modelo virtual



Fuente: Los autores

Figura 92. HDRI / False Color de los niveles de luminancia de maqueta y modelo virtual



Fuente: Los autores

4.6. Conclusión capítulo 4

Plantear el funcionamiento de la fachada a escala real es fundamental pues a partir de ello se generan directrices para llevarlo a una escala 1:10. Es importante tomar en cuenta la geometría, superficie, estructura y mecanismo, partes de hardware; así como el sistema de control, software. Esto para que el prototipo sea lo más cercano a la realidad tanto en funcionamiento como en resultados de confort.

Una vez elaborada el modelo a escala se procede a evaluar los niveles de iluminación frente a los datos simulados. Con el fin de corroborar la fiabilidad de la fachada, procedimiento similar al del capítulo 3 cuando se validó el modelo virtual.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 5.1 Conclusiones
- 5.2 Recomendaciones



5.1. Conclusiones

El presente estudio analizó la problemática de la fachada no flexible presente en la Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca.

A partir de conocer que las fachadas cinéticas responsivas compensan los cambiantes factores del ambiente exterior para lograr en el espacio interior un confort térmico y lumínico estable en el transcurso del día. Además, estar de acuerdo a las normas ASHRAE 55 e ISO 8995 correspondientemente. Se desarrolla la investigación por etapas para cumplir los diferentes objetivos con resultados óptimos.

En primer lugar, se realizó la validación del modelo virtual en Grasshopper, misma herramienta principal para los siguientes pasos. Mediante las variables estadísticas como son error de sesgo medio (MBE) y error cuadrático medio (RMSE) se logra comparar entre datos reales y simulados; para verificar que las propiedades físicas de las superficies tanto para la simulación térmica y lumínica, dadas en el plugin Honeybee están dentro del margen de error del 10% y 30% respectivamente.

Paso seguido, se elaboró las simulaciones de análisis de confort con la fachada existente. En este apartado se obtuvo las condiciones actuales en las que se encuentra el aula J-105 y J-106, para poder tener una visión global de la facultad debido a las orientaciones opuestas entre sí. Aquí se determina que la problemática es correcta, por la falta de confort térmico y lumínico en las aulas.

A continuación, se propone tres posibles soluciones con diseños diferentes, para abarcar variedad de movimientos, así como sus resultados. Mediante algoritmos evolutivos, Wallacei, se obtiene los movimientos óptimos, este plugin utiliza las siguientes variables: porcentaje de área en "Overlit" o deslumbramiento, áreas que sobrepasa los 750 luxes; "Daylit" iluminancia idónea, valores que van desde los 300 a 750 luxes, "Partially daylit" iluminancia no suficiente, y uniformidad; las variables de Daylit y de uniformidad son las que el software busca maximizar a través del algoritmo evolutivo. En este apartado se concluye que la fachada 1 es la que mejores atributos tiene y responde a las condiciones externas.

Después, se corre nuevamente las simulaciones bajo las mismas condiciones externas, pero con la fachada propuesta. En

esta sección se ve un acercamiento al límite central del confort adaptativo, un aumento en el área de confort lumínico y uniformidad.

Luego, se realiza la maqueta de la fachada seleccionada a escala 1:10, tamaño necesario para poder corroborar su eficacia con los valores de iluminancia y cinética.

Cabe resaltar que la parte térmica en este último fragmento no se puede realizar, pues se necesita de un modelo escala 1:1. El modelo físico se vincula mediante la extensión Firefly y el Arduino, para obtener el sistema de control y mecanismo de movimiento en la fachada.

Para comprobar la idoneidad de los resultados se aplicó una comparativa de datos del prototipo y del software 3D, con las mismas herramientas estadísticas del primer paso.

Con todo esto se logra comprobar la efectividad del mecanismo cinético y su incidencia en el confort lumínico.

La utilización de fachada cinética responsiva en la Facultad de Psicología de la Universidad de Cuenca obtiene resultados favorables frente a una fachada estática. Así, la metodología utilizada en el trabajo es replicable en otras edificaciones, debido a que se respalda en investigaciones de esta índole.

La fachada actual tiene inconvenientes en su diseño, pues existen momentos donde su presencia es irrelevante para filtrar radiación; asimismo, modificar el paso de luz y distribuirla correctamente.

La presencia de la fachada actual, si bien hay instantes donde sirve para filtrar el paso de la radiación, el diseño del mismo hace que esta incida directamente en las zonas más cercanas a la ventana sin distribuir uniformemente hasta el fondo del aula, como resultado se tiene un espacio con diferencias de temperatura radiante de hasta 2,66°C en el mismo salón y con áreas de iluminancia por debajo de los 300 luxes que llegan del 42% hasta 83%, sin importar la orientación de la sala.

Cabe señalar, otro punto importante en estas fachadas estáticas es que su propósito para el cual fue puesto no cumple en un momento del año. Dicho de otra manera, la fachada del aula J-106 en el solsticio de junio por la tarde, a razón de su diseño y ubicación del sol, la radiación solar incide directamente en el salón; por lo cual la temperatura incrementalmente hasta estar fuera del rango de aceptabilidad del 90% y el área de deslumbramiento llegue hasta un 42% en el espacio de trabajo.

Con respecto al tema lumínico, la fachada cinética consigue un incremento del área de confort que está entre el 48% y 93%. Igualmente, mejorar su uniformidad con valo-

res que van desde 0,274 hasta 0,476 (ver tabla 24 y 25).

Las herramientas paramétricas como el software Rhino-Grasshopper a través del plugin Wallacei permite establecer los movimientos exactos de dicha fachada para un immejorable confort térmico y lumínico, solo estableciendo objetivos.

Acerca del modelo a escala de la propuesta se logra ver la fiabilidad del mecanismo y su vinculación con el software. De manera que existe una relación entre la simulación y la maqueta, validado con herramientas estadísticas como son el error sesgo medio y error cuadrático medio

En definitiva, todo este proceso es necesario para ver de una manera objetiva el control del medio ambiente exterior de una fachada cinética responsiva frente a una estática, para lograr optimizar el confort térmico y lumínico al interior de un espacio.

Tabla 22. Comparación confort térmico_Aula J-105

Fecha y hora	Temperatura operativa			Temperatura Fachada actual	Temperatura Fachada propuesta	Alejamiento de la zona de confort Fachada actual	Alejamiento de la zona de confort Fachada propuesta
	Límite mínimo	Ideal	Límite máximo				
21 de marzo 9:00 am	19.93	22.43	24.93	18.77	18.57	3.67	3.83
21 de marzo 12:00 am	19.93	22.43	24.93	19.52	18.84	2.92	3.41
21 de marzo 16:00 pm	19.93	22.43	24.93	20.15	19.02	2.22	3.60
21 de junio 9:00 am	19.51	22.01	24.51	20.87	20.52	0.33	1.31
21 de junio 12:00 am	19.51	22.01	24.51	22.15	21.26	1.06	0.80
21 de junio 16:00 pm	19.51	22.01	24.51	22.57	22.23	2.80	0.69
21 de diciembre 9:00 am	19.97	22.47	24.97	21.75	21.40	1.08	1.19
21 de diciembre 12:00 pm	19.97	22.47	24.97	23.1	21.86	0.22	0.07
21 de diciembre 16:00 pm	19.97	22.47	24.97	24.02	23.08	1.39	0.13
15 de diciembre 17:00 pm	19.97	22.47	24.97	25.27	24.54	2.24	2.03

Fuente: Los autores

Tabla 23. Comparación confort térmico_Aula J-106

Fecha y hora	Temperatura operativa			Temperatura Fachada actual	Temperatura Fachada propuesta	Alejamiento de la zona de confort Fachada actual	Alejamiento de la zona de confort Fachada propuesta
	Límite mínimo	Ideal	Límite máximo				
21 de marzo 9:00 am	19.93	22.43	24.93	18.76	18.6	3.67	3.83
21 de marzo 12:00 am	19.93	22.43	24.93	19.51	19.02	2.92	3.41
21 de marzo 16:00 pm	19.93	22.43	24.93	20.21	18.83	2.22	3.60
21 de junio 9:00 am	19.51	22.01	24.51	22.34	20.70	0.33	1.31
21 de junio 12:00 am	19.51	22.01	24.51	23.07	21.21	1.06	0.80
21 de junio 16:00 pm	19.51	22.01	24.51	24.81	21.32	2.80	0.69
21 de diciembre 9:00 am	19.97	22.47	24.97	23.55	21.28	1.08	1.19
21 de diciembre 12:00 pm	19.97	22.47	24.97	22.69	22.54	0.22	0.07
21 de diciembre 16:00 pm	19.97	22.47	24.97	23.86	22.60	1.39	0.13
15 de diciembre 17:00 pm	19.97	22.47	24.97	24.71	24.50	2.24	2.03

Fuente: Los autores

Tabla 24. Comparación confort luminico_Aula J-105

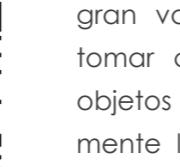
Fecha	Zona del aula entre 300-750 lux		Uniformidad	
	Fachada actual	Fachada propuesta	Fachada actual	Fachada propuesta
21 de marzo 9:00 am	17%	48%	0.031	0.274
21 de marzo 12:00 m	19%	74%	0.021	0.337
21 de marzo 4:00 pm	24%	77%	0.043	0.379
21 de junio 9:00 am	25%	63%	0.072	0.374
21 de junio 12:00 m	29%	82%	0.058	0.404
21 de junio 4:00 pm	25%	71%	0.036	0.364
21 de diciembre 9:00 am	19%	57%	0.026	0.335
21 de diciembre 12:00 m	26%	85%	0.060	0.406
21 de diciembre 4:00 pm	33%	81%	0.124	0.422
15 de diciembre 5:00 pm	28%	63%	0.081	0.334

Fuente: Los autores

Tabla 25. Comparación confort luminico_Aula J-106

Fecha	Zona del aula entre 300-750 lux		Uniformidad	
	Fachada actual	Fachada propuesta	Fachada actual	Fachada propuesta
21 de marzo 9:00 am	6%	49%	0.009	0.291
21 de marzo 12:00 m	27%	65%	0.007	0.279
21 de marzo 4:00 pm	23%	72%	0.013	0.348
21 de junio 9:00 am	16%	66%	0.024	0.285
21 de junio 12:00 m	21%	74%	0.022	0.370
21 de junio 4:00 pm	24%	93%	0.023	0.476
21 de diciembre 9:00 am	15%	52%	0.003	0.283
21 de diciembre 12:00 m	22%	73%	0.014	0.331
21 de diciembre 4:00 pm	20%	75%	0.011	0.397
15 de diciembre 5:00 pm	18%	50%	0.012	0.307

Fuente: Los autores

Figura 93. Elaboración de maqueta

Fuente: Los autores

5.2. Recomendaciones

Es preciso mencionar algunas recomendaciones con la finalidad de reforzar la información:

- La creación de un modelo 3d para simulaciones térmicas y lumínicas en el programa Rhino-Grasshopper es de gran ayuda, ya que facilita el flujo de trabajo al tratarse de un programa para modelar estructuras complejas e inclusive su presentación gráfica de nodos que permite ver todos los parámetros necesarios en la configuración de las simulaciones.

- Emplear un software de estas cualidades y de código abierto como Grasshopper, facilita el aumento de plugin sin mayor problema y complejiza el trabajo al nivel que uno requiera.

- La recolección de datos con sensores conectados a un microcontrolador sin que la persona este presente, es de gran valor. Además, los datos se pueden tomar con mayor precisión, tanto por los objetos que impiden recolectar correctamente los valores, así como en los intervalos de tiempos que deben ser recolectados.

- La utilización del motor evolutivo, Wallacei, sería ideal en la realización de futuros trabajos; a causa de su gran poder en la solución de problemas con más de una variable, y así, poder escoger objetivamente la mejor solución ante un planteamiento.

- Utilizar formas simples para el diseño de fachadas cinéticas responsivas es indispensable en su detalle constructivo y mantenimiento —en el caso de hacerlo realidad—.

-Cabe destacar que la geometría y sus movimientos frente a la variación del material son los que en verdad permiten un gran cambio en la obtención de resultados para el confort térmico y lumínico.

- Para un futuro diseño de fachada cinética se puede emprender desde la metodología empleada en la investigación.

Referencias

- Abdollahi, R., & Eltawee, A. (2021). Una fachada adaptativa detective de usuarios para mejorar el Confort Visual y térmico. 33.
- Aelenei, L., Aelenei, D., Romano, R., Mazzucchelli, E. S., Brzezicki, M., & Rico-Martinez, J. M. (2018). Case studies: adaptive facade network. In TU Delft Open. <http://repositorio.lneg.pt/handle/10400.9/3130>
- Al horr, Y., Arif, M., Katafygiotou, M., Mazroei, A., Kaushik, A., & Elsarrag, E. (2016). Impact of indoor environmental quality on occupant well-being and comfort: A review of the literature. International Journal of Sustainable Built Environment, 5(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/J.IJSBE.2016.03.006>
- Al-Masrani, S. M., & Al-Obaidi, K. M. (2019). Dynamic shading systems: A review of design parameters, platforms and evaluation strategies. Automation in Construction, 102(November 2018), 195–216. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.014>
- Alvear, J. F. U. D. K. G. J. (2017). Mejoramiento de envolventes para la eficiencia energética y Confort de viviendas en la ciudad de Cuenca.
- Arrué, M. (2017). Estudio para el control de actuadores electromecánicos vía ethernet por sistemas embebidos y tecnología NFC. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso – Chile.
- ASHRAE. (2010). Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. International Journal of Refrigeration, 2(1), 56–57. [https://doi.org/10.1016/0140-7007\(79\)90114-2](https://doi.org/10.1016/0140-7007(79)90114-2)
- ASHRAE 14. (2014). Measurement of Energy, Demand, and Water Savings. ASHRAE Guideline 14-2014, 4, 1–150. www.ashrae.org%0Awww.ashrae.org/technology.
- Barozzi, M., Lienhard, J., Zanelli, A., & Monticelli, C. (2016). The Sustainability of Adaptive Envelopes: Developments of Kinetic Architecture. Procedia Engineering, 155, 275–284. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.029>
- Björn, H., & Gee, J. (2006).
- Brito Peña, J. R., & Villa Enderica, J. D. (2020). Evaluación del confort térmico de una vivienda unifamiliar proyectada con Steel Frame optimizada acorde a la sección estructural. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/35257>
- Böke, J., Knaack, U., & B, M. H. (2020). Automatización en la construcción. 113.
- Celis, R. (2018). Estudio de sistemas pasivos para la iluminación natural del aula taller del edificio Creas en Ponzuelo de Alarcón. Universidad Politécnica de Madrid.
- Chávez del Valle, F. J. (2002). Zona variable de Confort Térmico. Capítulo 2, 36. <http://www.tdx.cat/handle/10803/6104>
- Chi, D. (2021). Iluminación natural a través de ventanas. Universidad de las Américas Puebla.
- Chi, D. A., González, M. E., Valdivia, R., & Gutiérrez, J. E. (2021). Parametric design and comfort optimization of dynamic shading structures. Sustainability (Switzerland), 13(14). <https://doi.org/10.3390/su13147670>
- Coellar Alvear, I. R. (2018). Fachada Cinética: Parametrización para optimizar el Confort Lumínico.
- Colour Picker for Radiance. (2021). Colour Picker for Radiance. http://www.jaloxa.eu/resources/radiance/colour_picker/index.shtml
- Cordero, A. X., & Guillén, V. F. (2012). Criterios bioclimáticos para el diseño de viviendas unifamiliares en la ciudad de Cuenca. Universidad de Cuenca.
- Correa, B. y M. (2008). Algoritmo Multiobjetivo Nsga-li aplicado al problema de la mochila. Scientia Et Technica, XIV(39), 206–211. <https://doi.org/10.22517/23447214.3205>
- Delgado, E. (2020). Optimización energética de un bloque de viviendas de interés social en Ecuador. Universidad de Sevilla Escuela.
- EADIC. (2013). Arquitectura bioclimática. In Arquitectura bioclimática (Vol. 1, Issue 3).
- EN 12464-1. (2012). EN 12464-1. https://www.academia.edu/28000196/UNE_en12464_1_2012pdf
- Encalada, P. (2013). Estudio de desempeño y eficiencia en los edificios de la Universidad de Cuenca. In Artículo Ecuador (Vol. 1, Issue 5). Universidad de Cuenca.
- Escolano, D. (2018). Sistemas de protección solar dinámicos.
- Estupiñán, J. (2020). Simulación de sistemas de envolventes cinéticas y su relación con el aumento de Confort Térmico – Modelo Adaptativo en espacios interiores. Caso Región Caribe, Colombia.
- Fuentes, V. A. (2009). Arquitectura Bioclimática. Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco.
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen.
- Guzmán, A. (2018). Proceso de estudio de iluminación natural para garantizar el Confort Lumínico en espacios interiores en la ciudad de Quito. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Hosseini, S. M., Mohammadi, M., Rosemann, A., Schröder, T., & Lichtenberg, J. (2019). A morphological approach for kinetic façade design process to improve visual and thermal comfort: Review. Building and Environment, 153(November 2018), 186–204. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.040>
- IBM. (2021). Weather Wunderground. <https://www.wunderground.com/dashboard/pws/ICUENC28/table/2021-11-25/2021-11-25/daily>

- IBM. (2022). Weather Wunderground. <https://www.wunderground.com/dashboard/pws/ICUENC28>
- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). Transferencia de calor. In Fundamentos de Transferencia de Calor (pp. 2-8).
- James, J. (2007). Un Vitruvio Ecológico principios y práctica del proyecto arquitectónico sostenible (Cuarta). Editorial Gustavo Gili (Ed.), GG.
- Kharvari, F. (2020). An empirical validation of daylighting tools: Assessing radiance parameters and simulation settings in Ladybug and Honeybee against field measurements. *Solar Energy*, 207, 1021–1036. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.054>
- Kocifaj, M., & Kómar, L. (2021). Physics interpretation of ISO/CIE sky types. *Solar Energy*, 225(May), 3–10. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.017>
- Lakhdari, K., Sriti, L., & Painter, B. (2021). Parametric optimization of daylight, thermal and energy performance of middle school classrooms, case of hot and dry regions. *Building and Environment*, 204(January), 108173. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108173>
- Mackey, C., & Roudsari, M. S. (2018). The Tool(s) versus The Toolkit. 2.
- Mahmoud, A. H. A., & Elghazi, Y. (2016). Parametric-based designs for kinetic facades to optimize daylight performance: Comparing rotation and translation kinetic motion for hexagonal facade patterns. *Solar Energy*, 126, 111–127. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.12.039>
- Marsh, A. (2018). CIE Sky Generator. <http://andrewmarsh.com/software/cie-sky-web/>

- Marsh, A. (2019). Significant Latitudes. <http://performativedesign.com/articles/2019/significant-latitudes/>
- Marsh, Dr. A. J. (2020). Vista de datos 2D. <https://drajmarsh.bitbucket.io/data-view2d.html>
- Meagher, M. (2015). Designing for change: The poetic potential of responsive architecture. *Frontiers of Architectural Research*, 4(2), 159–165. <https://doi.org/10.1016/j foar.2015.03.002>
- Michael, P. R., Johnston, D. E., & Moreno, W. (2020). A conversion guide: Solar irradiance and lux illuminance. *Journal of Measurements in Engineering*, 8(4), 153–166. <https://doi.org/10.21595/jme.2020.21667>
- Moloney, J. (2011). Designing Kinetics for architectural facades.
- Montes, M. C. (2018). Preprocesado de datos. In Universidad de Murcia (pp. 1–19). https://webs.um.es/juanbot/miwiki/lib/exe/fetch.php?id=ti ia0910&cache=cache&media=tiia0809_slides_prep.pdf
- Muñoz, A. G. (2012). El Confort Térmico Adaptativo aplicación en la edificación en España.
- Muñoz, J., & Prado, I. (2018). Estudio experimental del comportamiento térmico de una vivienda en Quito situada en el barrio la Vicentina.
- Nagy, Z., Svetozarevic, B., Jayathissa, P., Begle, M., Hofer, J., Lydon, G., Wilmann, A., & Schlueter, A. (2016). The Adaptive Solar Facade: From concept to prototypes. *Frontiers of Architectural Research*, 5(2), 143–156. <https://doi.org/10.1016/j foar.2016.03.002>
- NEC. (2011). Norma Ecuatoriana de la Construcción.
- NREL. (2021). Sin título. <https://maps.nrel.gov/nsrdb-viewer>
- NTE INEN - ISO 7730. (2014). Norma ecuatoriana NTE INEN-ISO 7730.
- Olgay, V. (1998). Arquitectura y Clima, manual de diseño Bioclimático para arquitectos y urbanistas (p. 215).
- Ordóñez, A. (2021). Gráficas de recorridos solares. Seiscubos. <https://www.seiscubos.com/conocimiento/graficas-de-recorridos-solares>
- Palme, M., Lobato, A., Castillo, J., Villacreses, G., & Almaguer, M. (n.d.). Estrategias para mejorar las condiciones de habitabilidad y el consumo de energía en viviendas.
- Paniza, G. M. (2014). Ergonomía Ambiental: Iluminación y confort térmico en trabajadores de oficinas con pantalla de visualización de datos. 1, 55–78.
- Panya, D. S., Kim, T., & Choo, S. (2020). A methodology of interactive motion facades design through parametric strategies. *Applied Sciences* (Switzerland), 10(4). <https://doi.org/10.3390/app10041218>
- Pattini, A. (2007). Luz natural e Iluminación de interiores. Manual de Iluminación Natural, 2–24.
- Pérez, M. (2007). Validación de la iluminancia de los métodos experimentales CIE e IES en un modelo real con ventanas en dos orientaciones. Universidad Politécnica de Madrid.
- Pesántes Moyano, M. P. (2012). Confort Térmico en el área social de una vivienda unifamiliar en Cuenca-Ecuador. Universidad de Cuenca, 43. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/393/1/tesis.pdf>
- Pezzi, C. H. (2012). Un Vitruvio Ecológico: principios y práctica del proyecto arquitectónico sostenible. Editorial Gustavo Gili (Ed.), GG.
- Quesada, F., & Bustillos, D. (2018). Indoor environmental quality of urban residential buildings in Cuenca-Ecuador: Comfort standard. *Buildings*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/buildings8070090>
- Ramírez, C. (2020). Ahorro energético y Confort Lumínico para el desarrollo laboral en oficinas. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Ramos, J. (2006). Pantallas de visualización guía técnica del INSHT. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene En El Trabajo., 1–20.
- Ramzy, N., & Fayed, H. (2011). Kinetic systems in architecture: New approach for environmental control systems and context-sensitive buildings. *Sustainable Cities and Society*, 1(3), 170–177. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2011.07.004>
- Ruiz, A., & Correa, N. (2009). Confort térmico en espacios abiertos. Comparación de modelos y su aplicabilidad en ciudades de zonas áridas. 13, 71–78.
- Saudita, A. (2016). El uso de la iluminación horizontal del cielo para clasificar el CIE Standard General Skies. 1–8.

Sharaidin, K. (2014). Kinetic Facades. Responsive Skins: An Exploration of Paratonic Surfaces in Architecture. <https://yazdanistudioresearch.wordpress.com/2011/02/10/kinetic-facade-products/>

Sierra, J. P. (2017). Medición y evaluación del Confort Lumínico, Térmico y Sonoro al que está expuesto el personal administrativo de la constructora china Gezhouba Group Company. Universidad de Cuenca.

Sigüencia, P., & Tola, D. (2019). Influencia de la ventana en el Confort Térmico, Lumínico y Calidad del aire de las viviendas unifamiliares de la ciudad de Cuenca. In Journal of Chemical Information and Modeling. Universidad de Cuenca.

Stevenson, C. M. (2017). Morphological Principles of Current Kinetic Architectural Structures. May.

Tabadkani, A., Roetzel, A., Li, H. X., & Tsangrassoulis, A. (2021). Design approaches and typologies of adaptive facades: A review. Automation in Construction, 121(November 2020). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103450>

Torres, A., Mahmoudi, B., Darras, A. J., Imanpour, A., & Driver, R. G. (2021). Easychair preprint achieving an optimized solution for structural design of single-storey steel buildings using generative design methodology single-storey steel buildings using generative design.

Velasco, R., Brakkie, P., & Chavarro, D. (2015). Dynamic façades and computation: towards an inclusive categorization of high performance Kinetic Façade Systems. 2, 172–191. https://doi.org/10.1007/978-3-662-47386-3_10

VELUX. (2014). Daylight calculations and measurements. VELUX. <https://www.velux.com/what-we-do/research-and-knowledge/deic-basic-book/daylight/daylight-calculations-and-measurements>

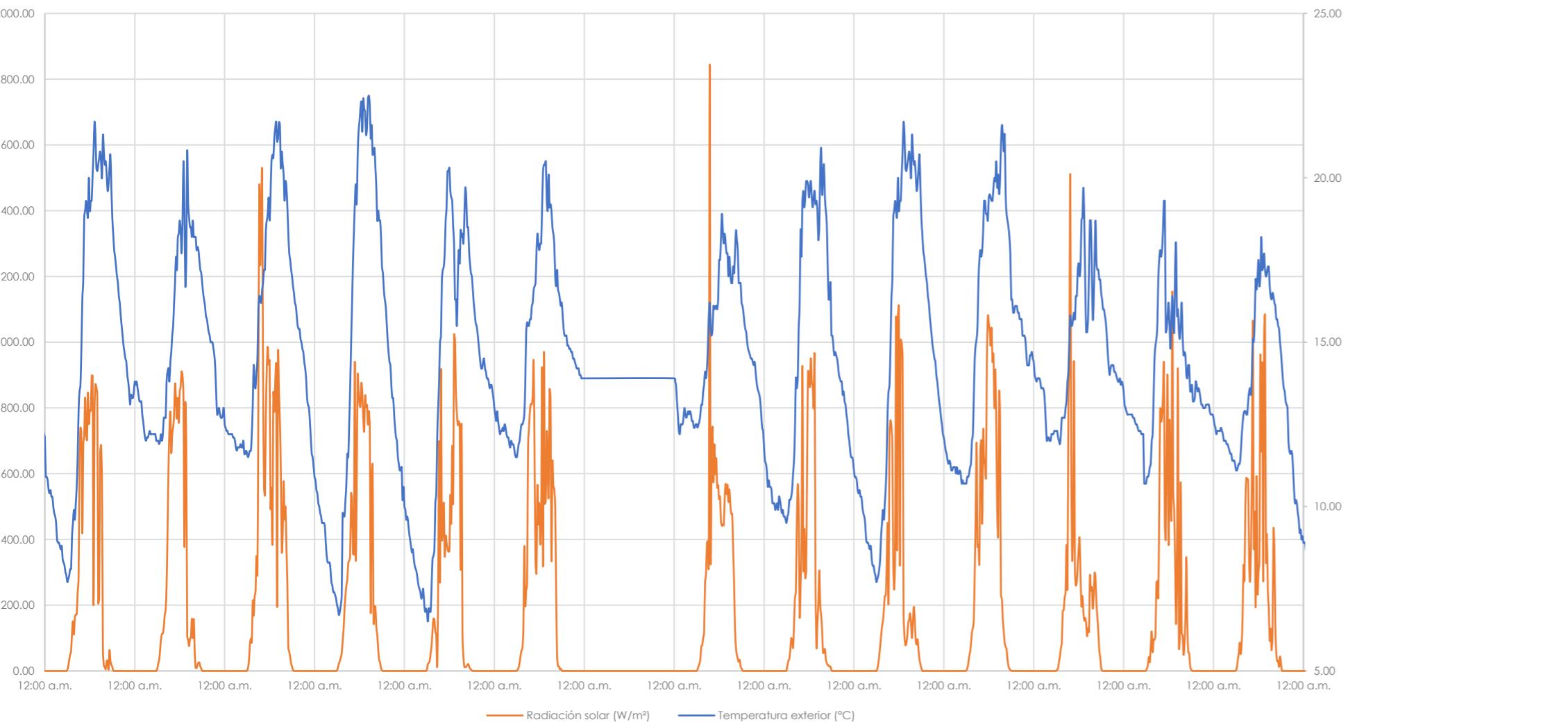
Yi, H., Kim, D., Kim, Y., Kim, D., Koh, J. sung, & Kim, M. J. (2020). 3D-printed attachable kinetic shading device with alternate actuation: Use of shape-memory alloy (SMA) for climate-adaptive responsive architecture. Automation in Construction, 114(February). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103151>

ANEXO



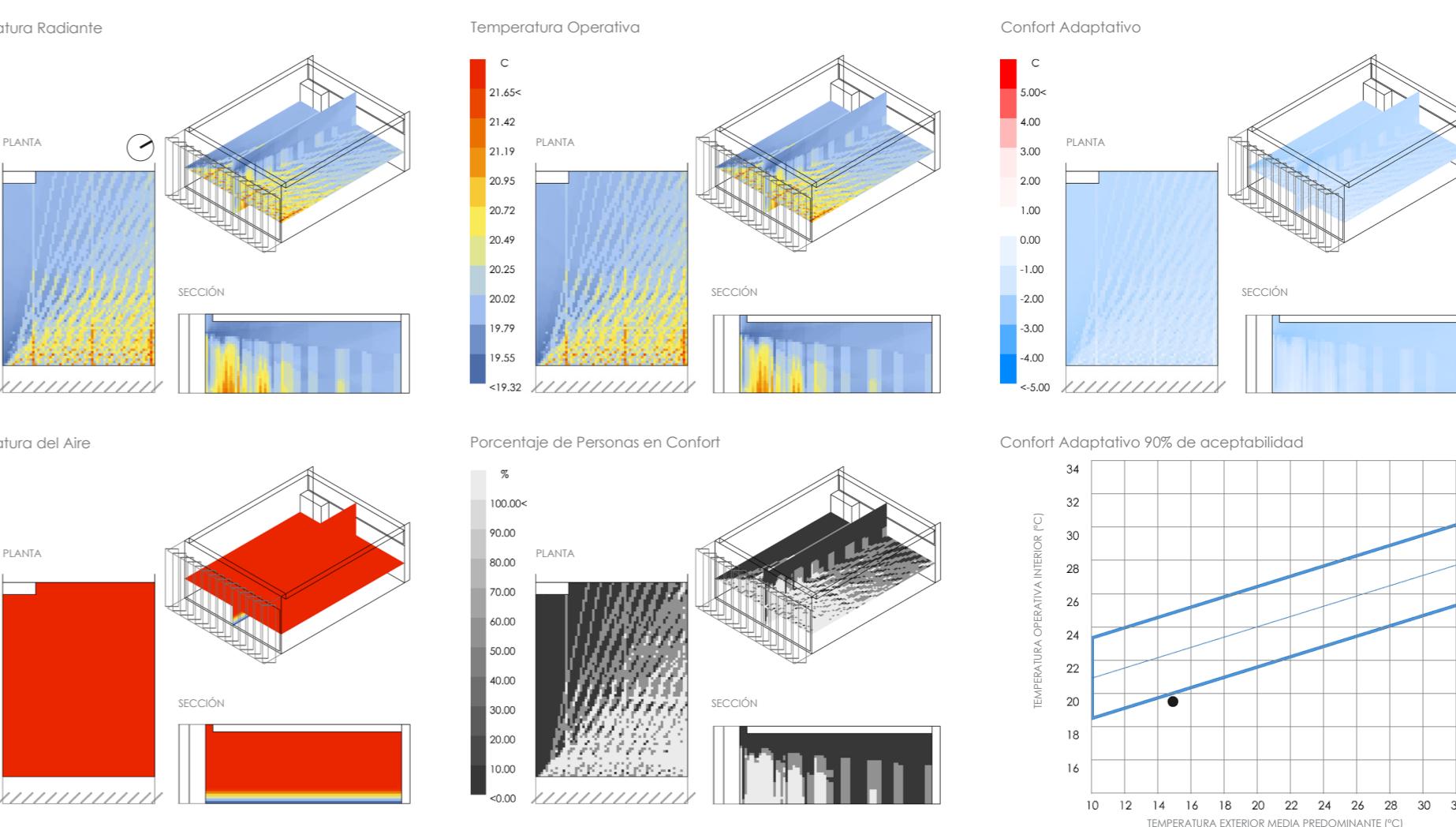
ANEXO

Anexo A. Diagrama de Radiación solar frente a la Temperatura exterior, datos recolectados desde el 11 al 24 de septiembre



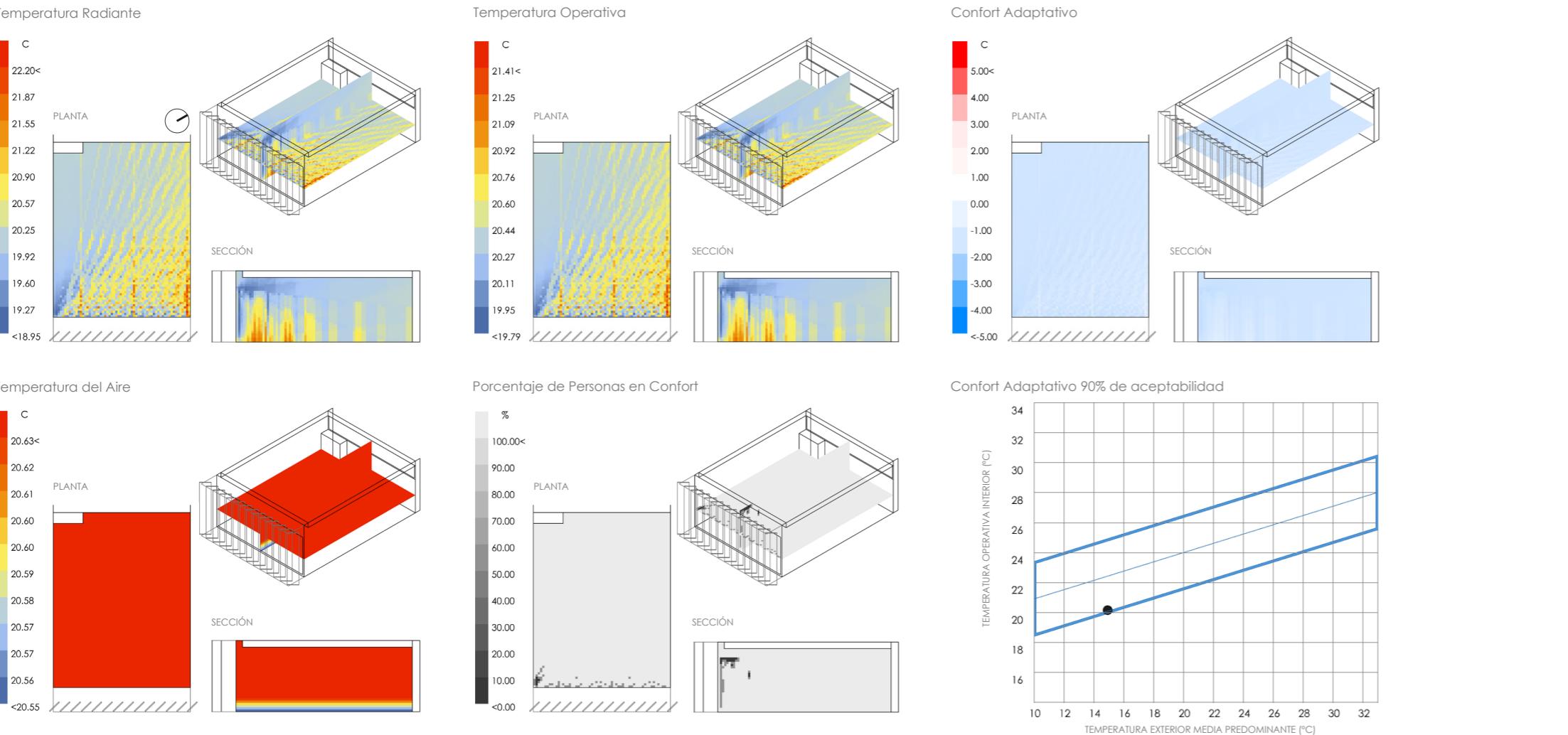
Fuente: Los autores

Anexo B. Análisis de confort térmico del aula J-105 con fachada actual_21 de marzo 12:00 m



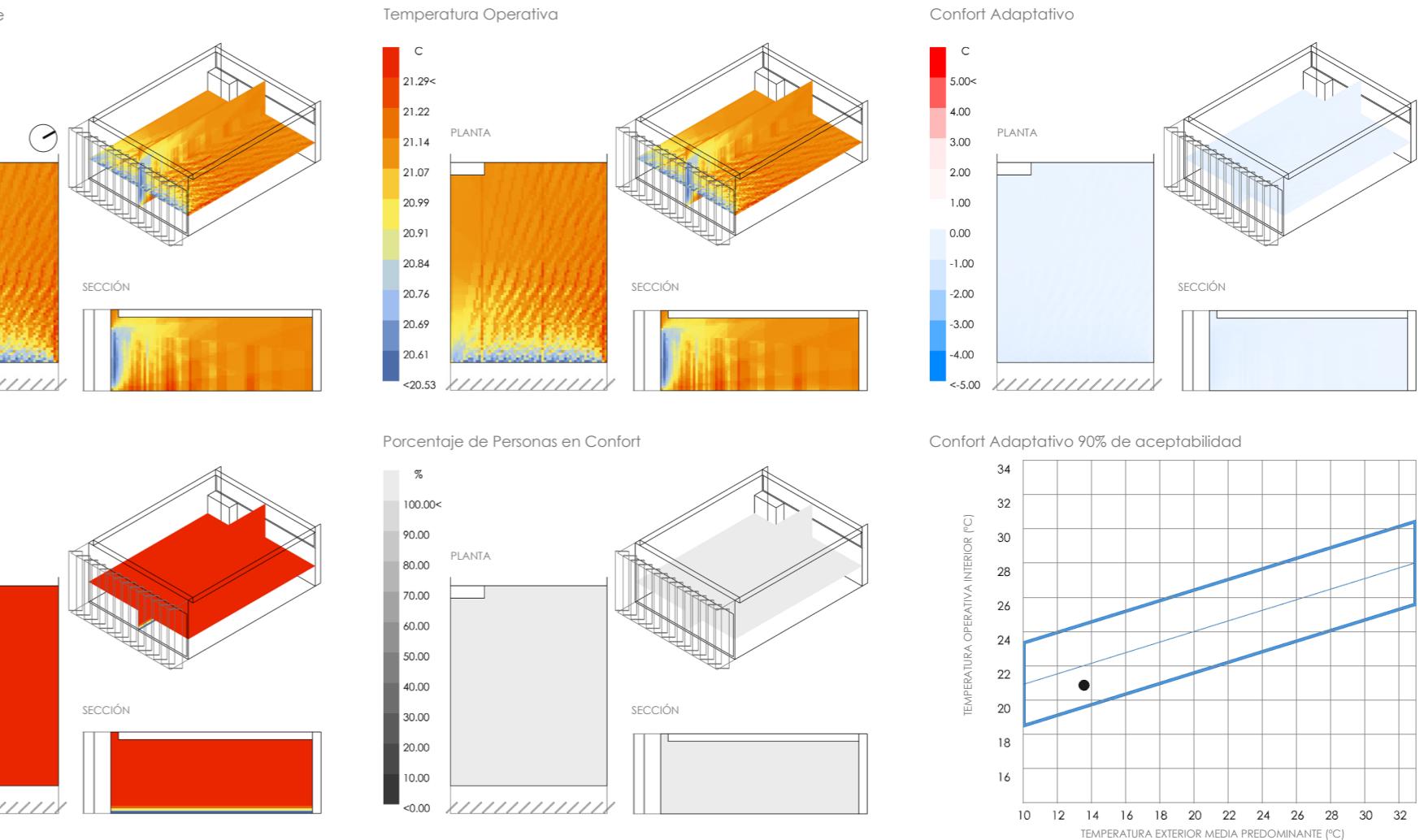
Fuente: Los autores

Anexo C. Análisis de confort térmico del aula J-105 con fachada actual_21 de marzo 4:00 pm



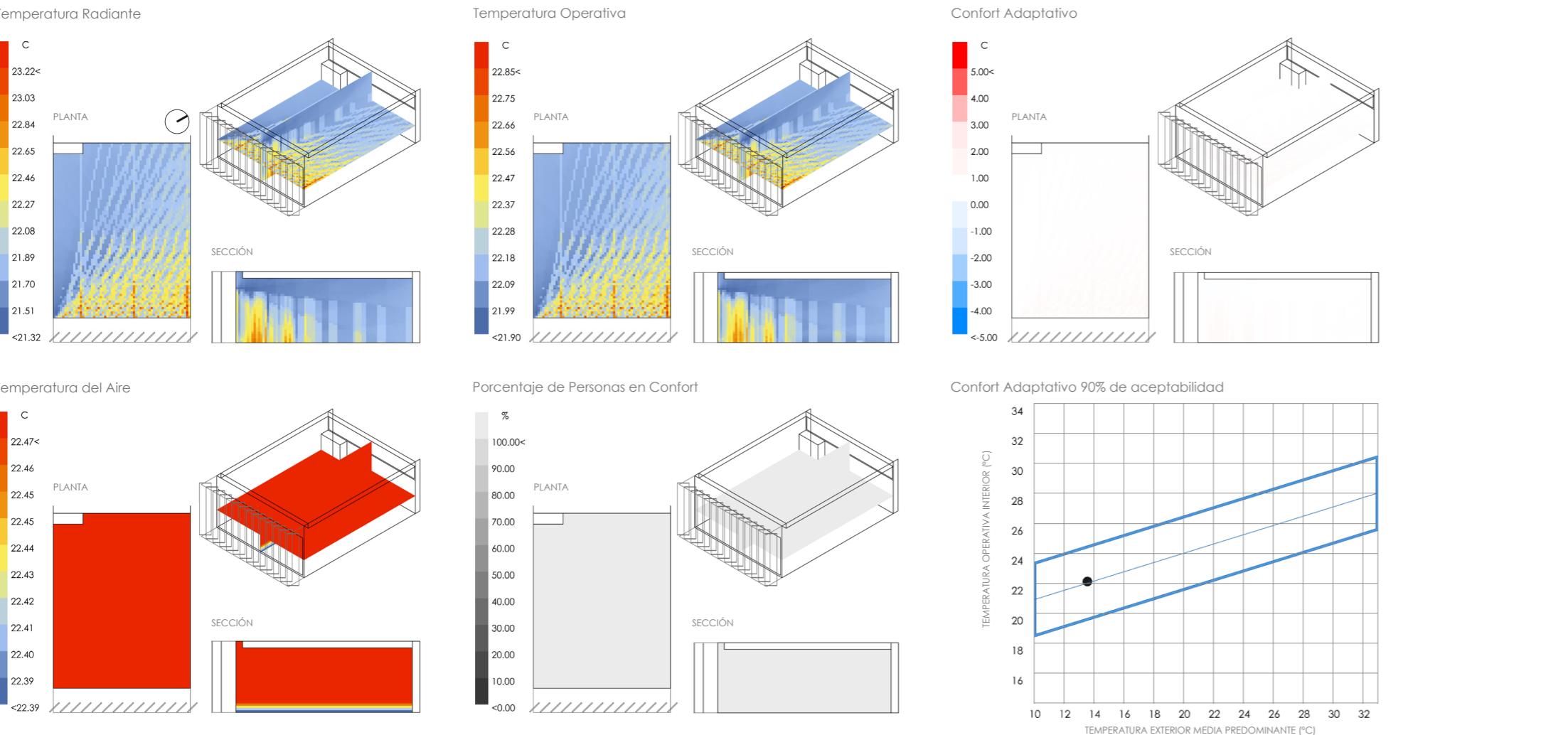
Fuente: Los autores

Anexo D. Análisis de confort térmico del aula J-105 con fachada actual_21 de junio 9:00 am



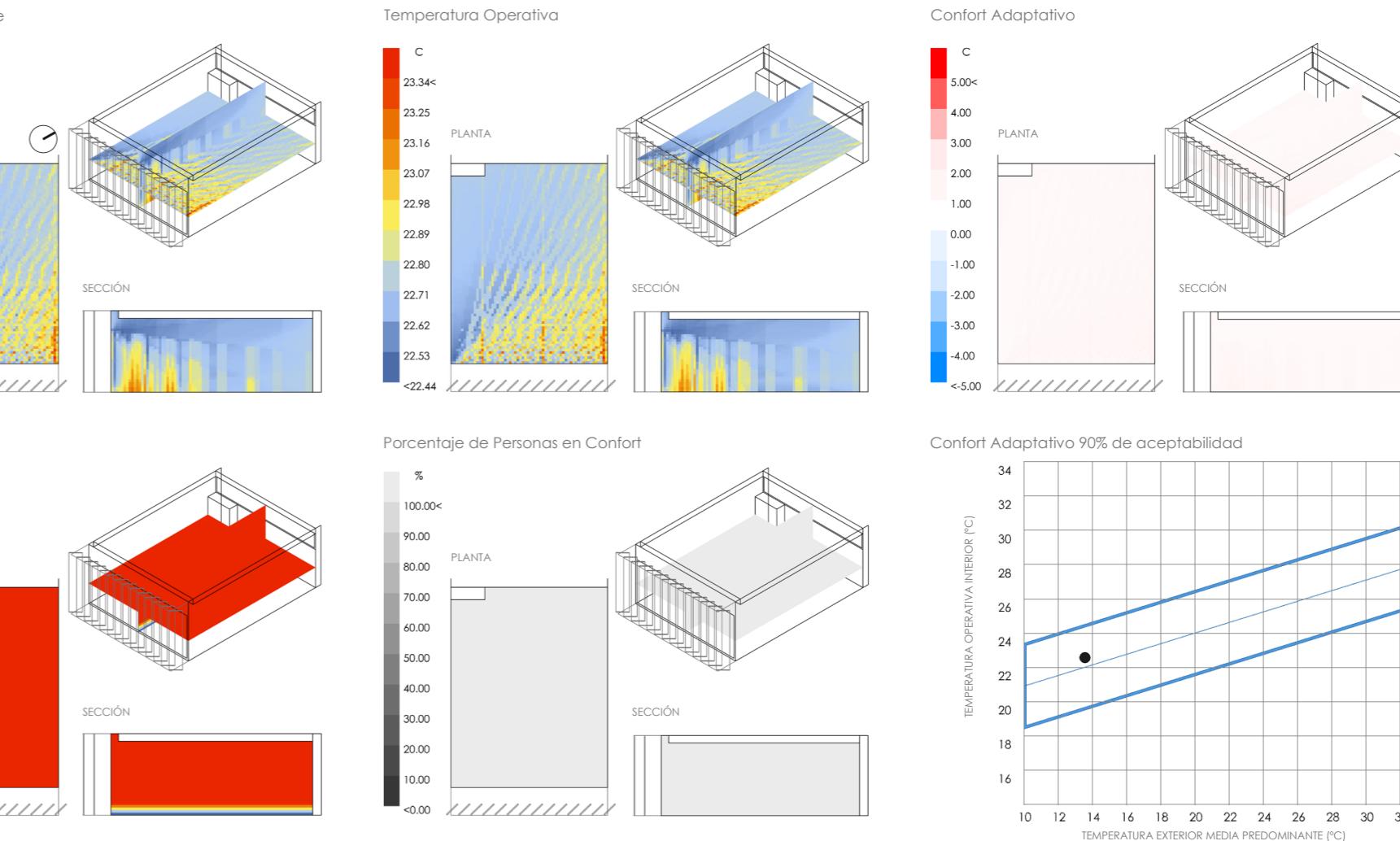
Fuente: Los autores

Anexo E. Análisis de confort térmico del aula J-105 con fachada actual_21 de junio 12:00 m



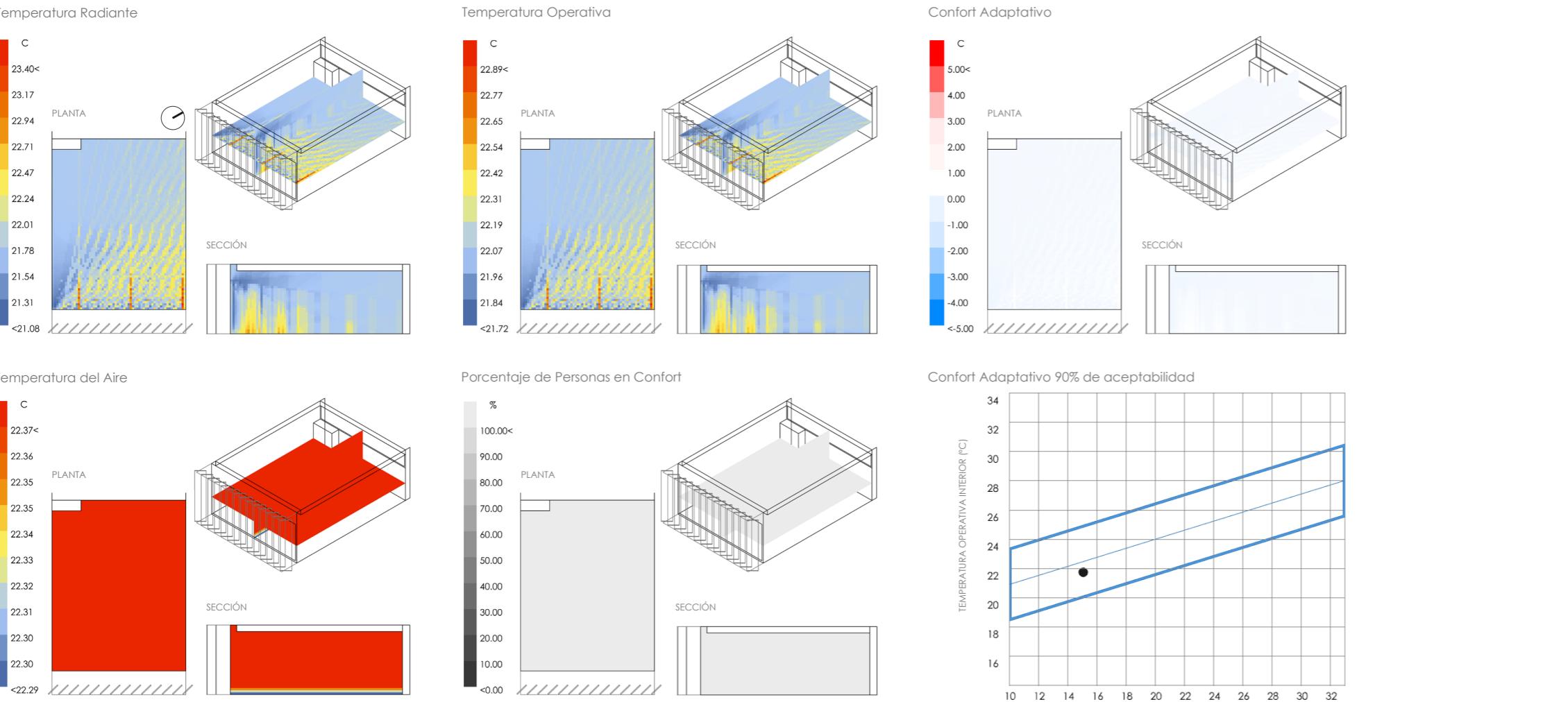
Fuente: Los autores

Anexo F. Análisis de confort térmico del aula J-105 con fachada actual_21 de junio 4:00 pm



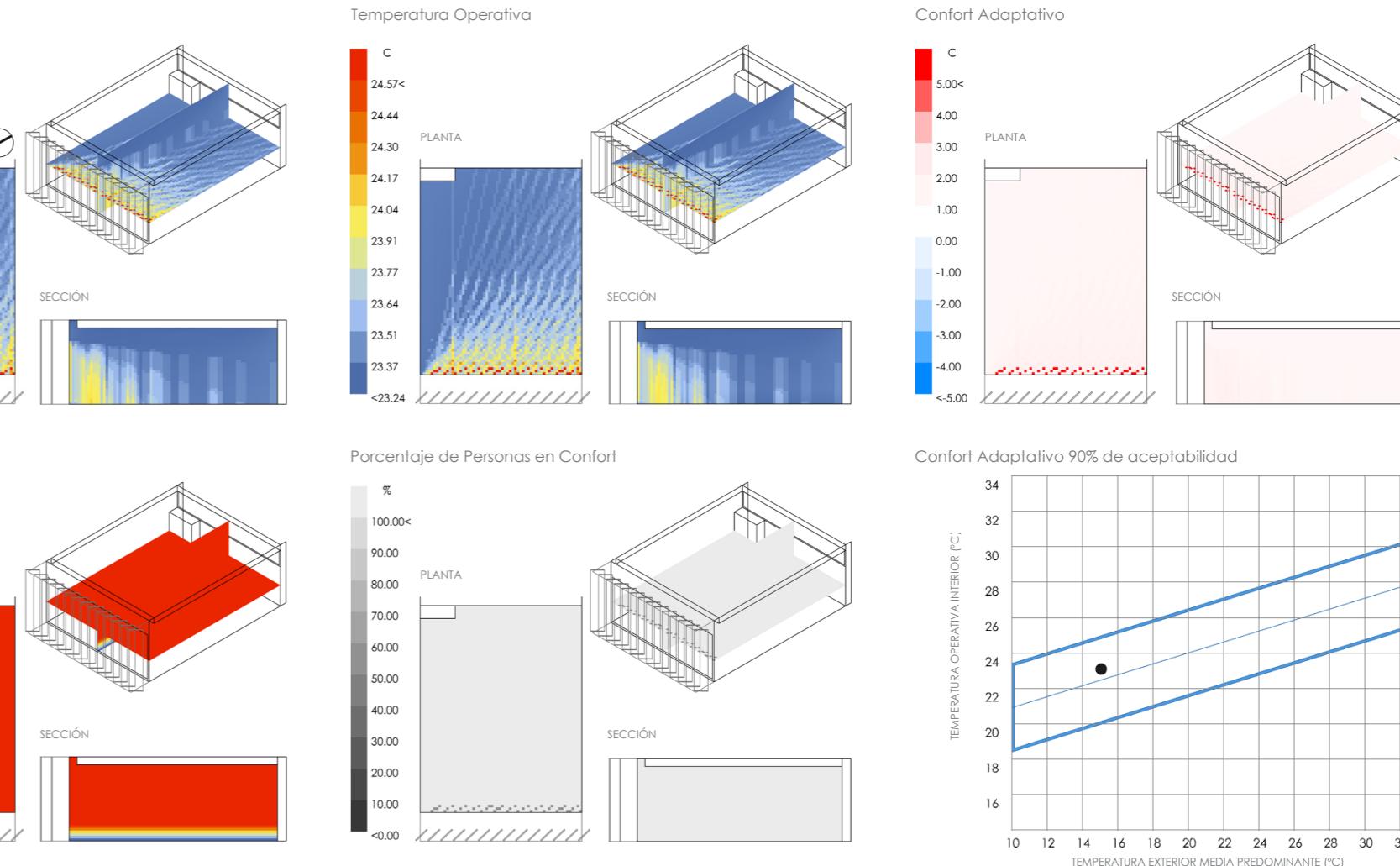
Fuente: Los autores

Anexo G. Análisis de confort térmico del aula J-105 con fachada actual_21 de diciembre 9:00 am



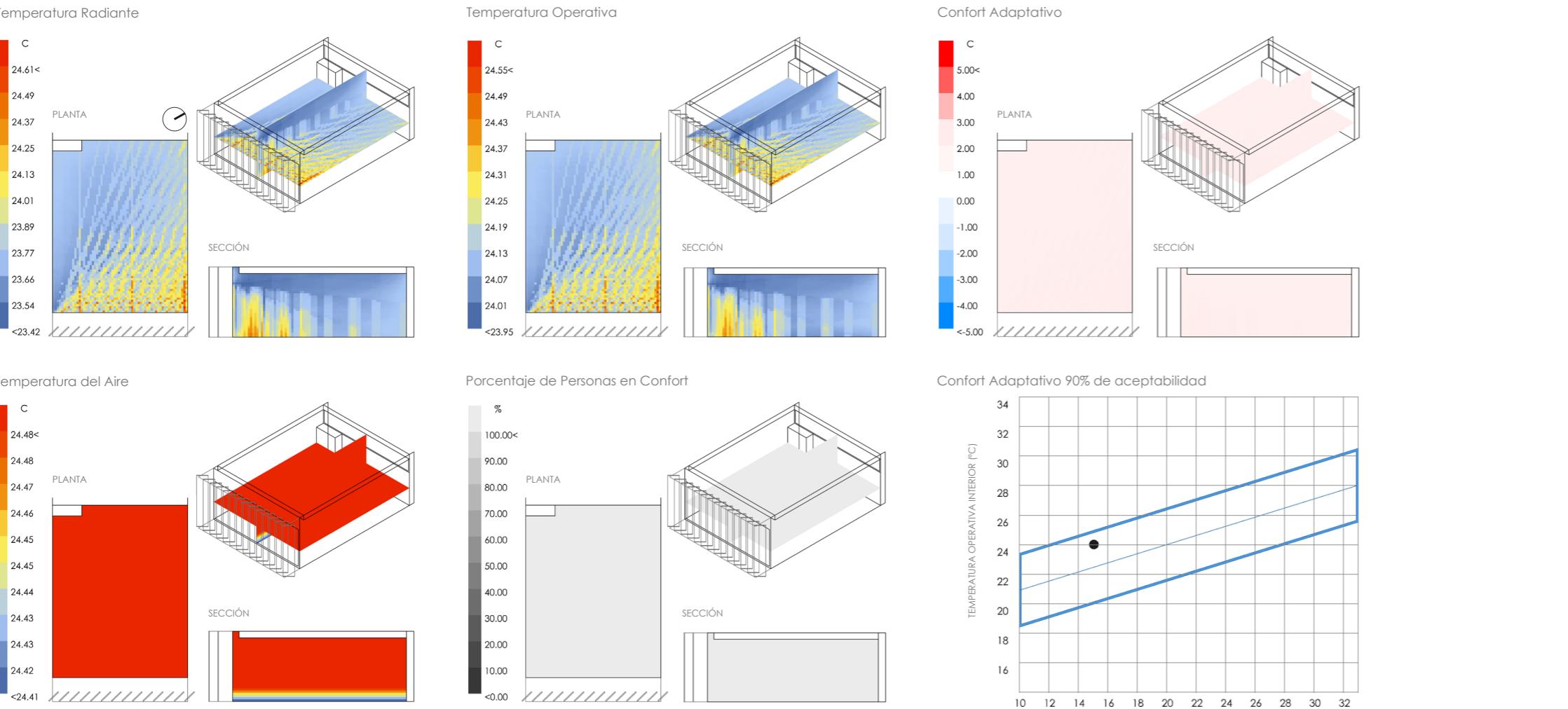
Fuente: Los autores

Anexo H. Análisis de confort térmico del aula J-105 con fachada actual_21 de diciembre 12:00 m



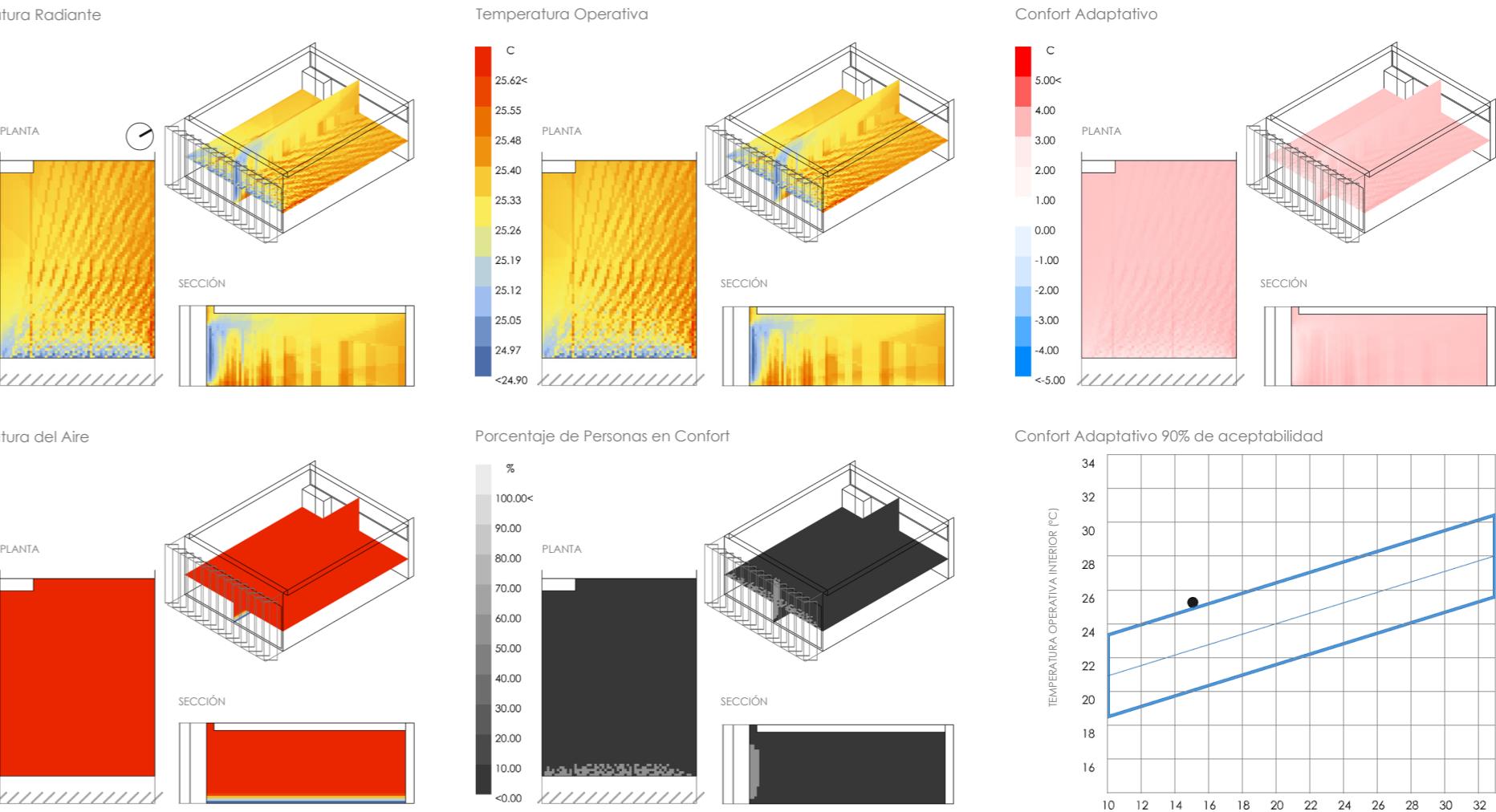
Fuente: Los autores

Anexo I. Análisis de confort térmico del aula J-105 con fachada actual_21 de diciembre 4:00 pm



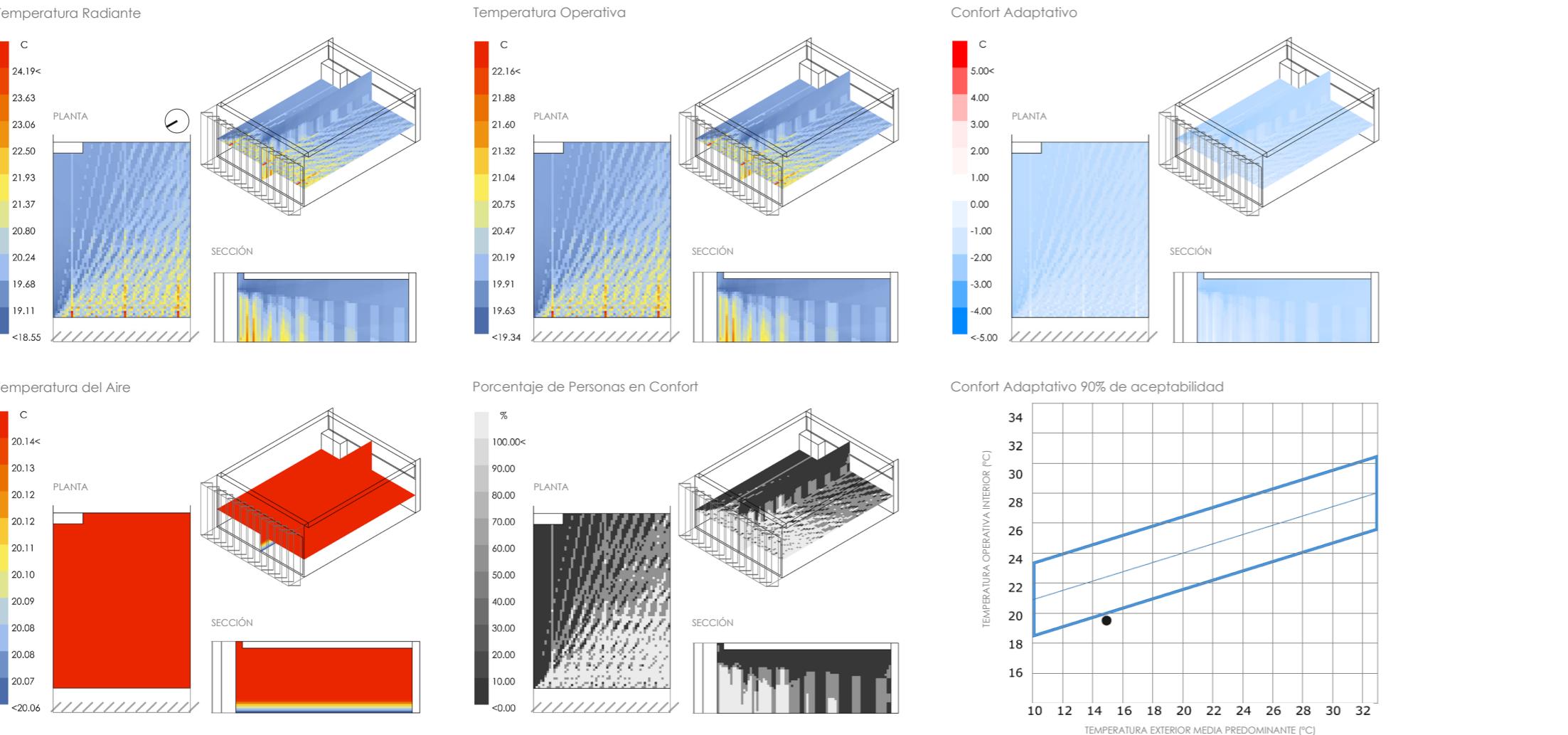
Fuente: Los autores

Anexo J. Análisis de confort térmico del aula J-105 con fachada actual_15 de diciembre 5:00 pm



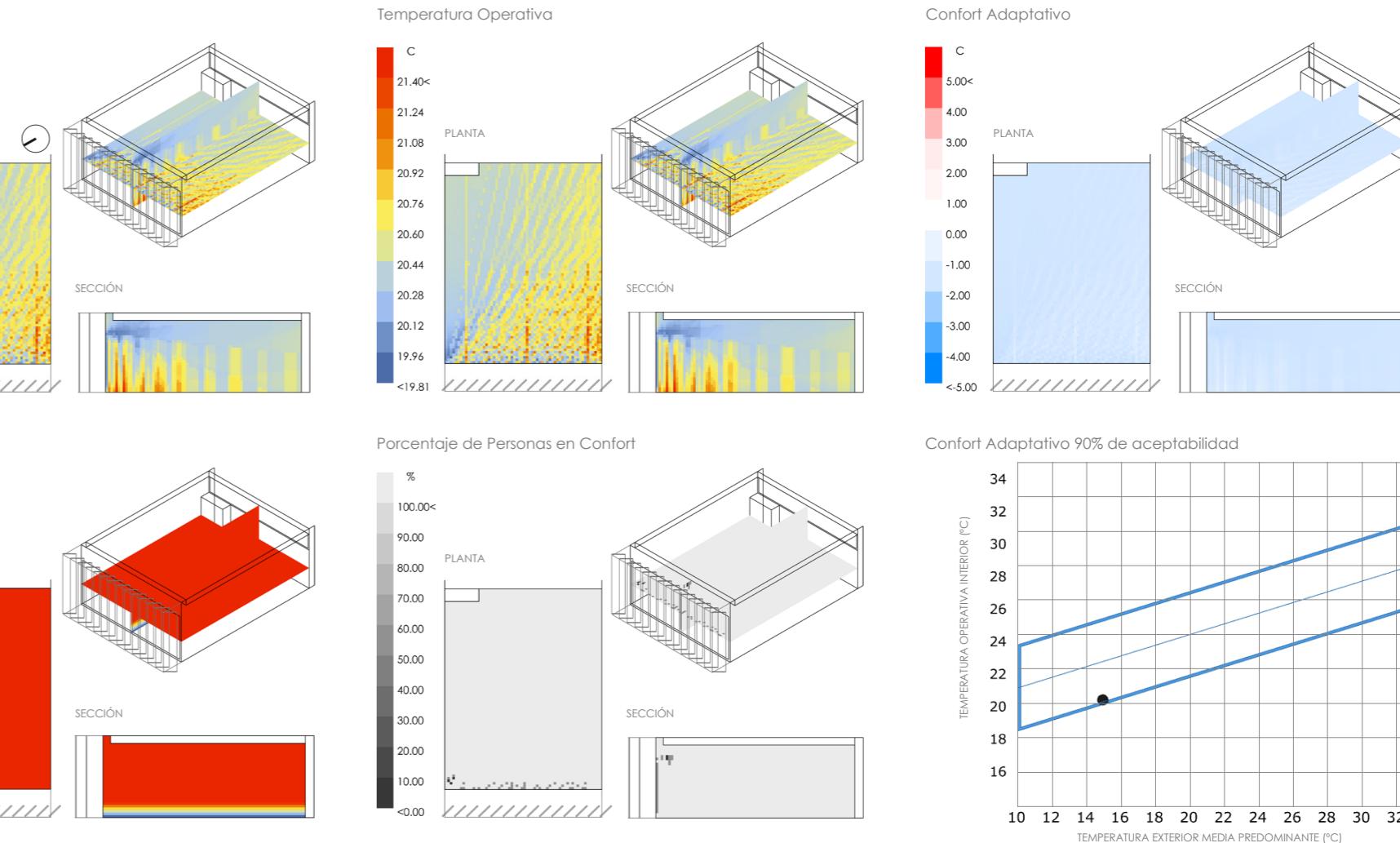
Fuente: Los autores

Anexo K. Análisis de confort térmico del aula J-106 con fachada actual_21 de marzo 12:00 m



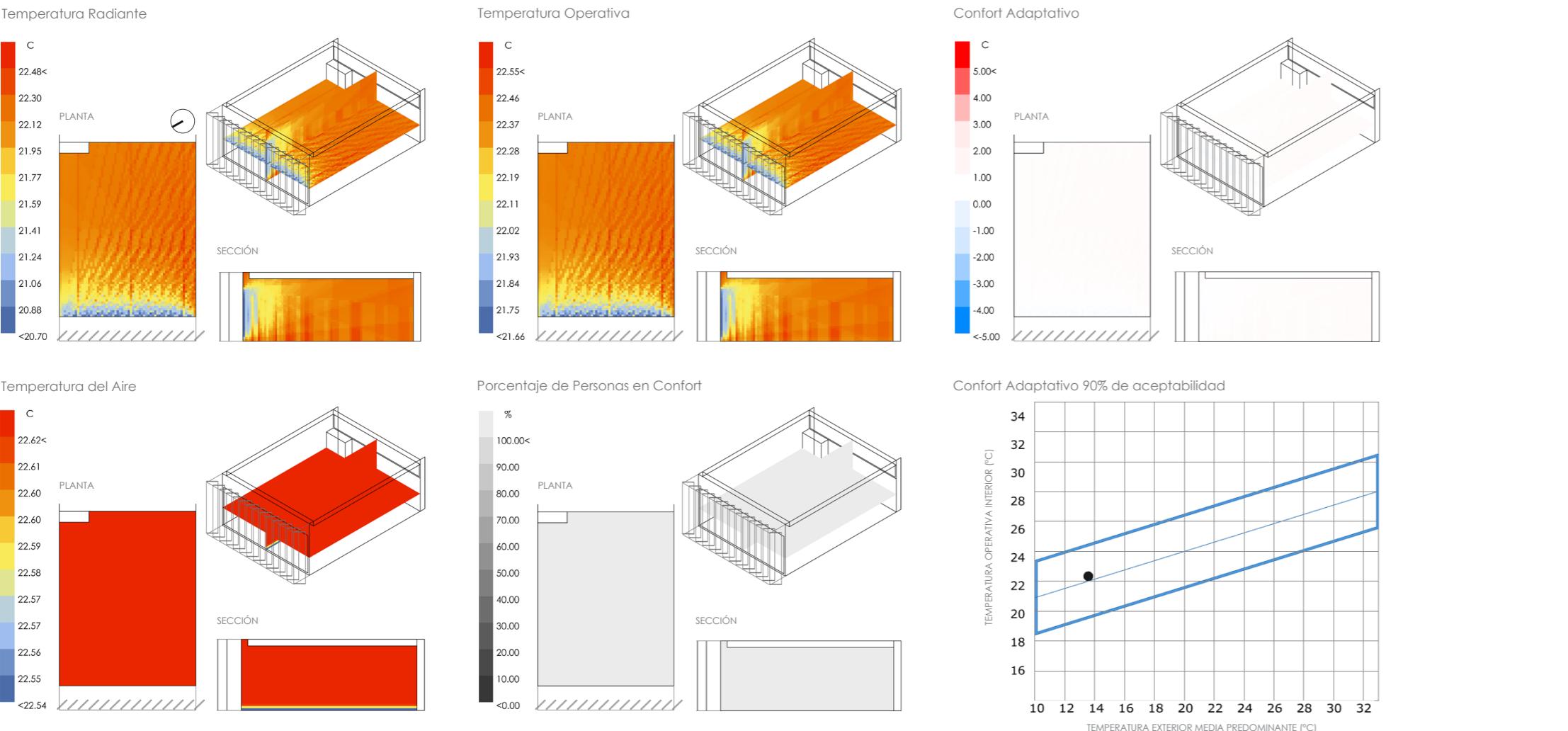
Fuente: Los autores

Anexo L. Análisis de confort térmico del aula J-106 con fachada actual_21 de marzo 4:00 pm



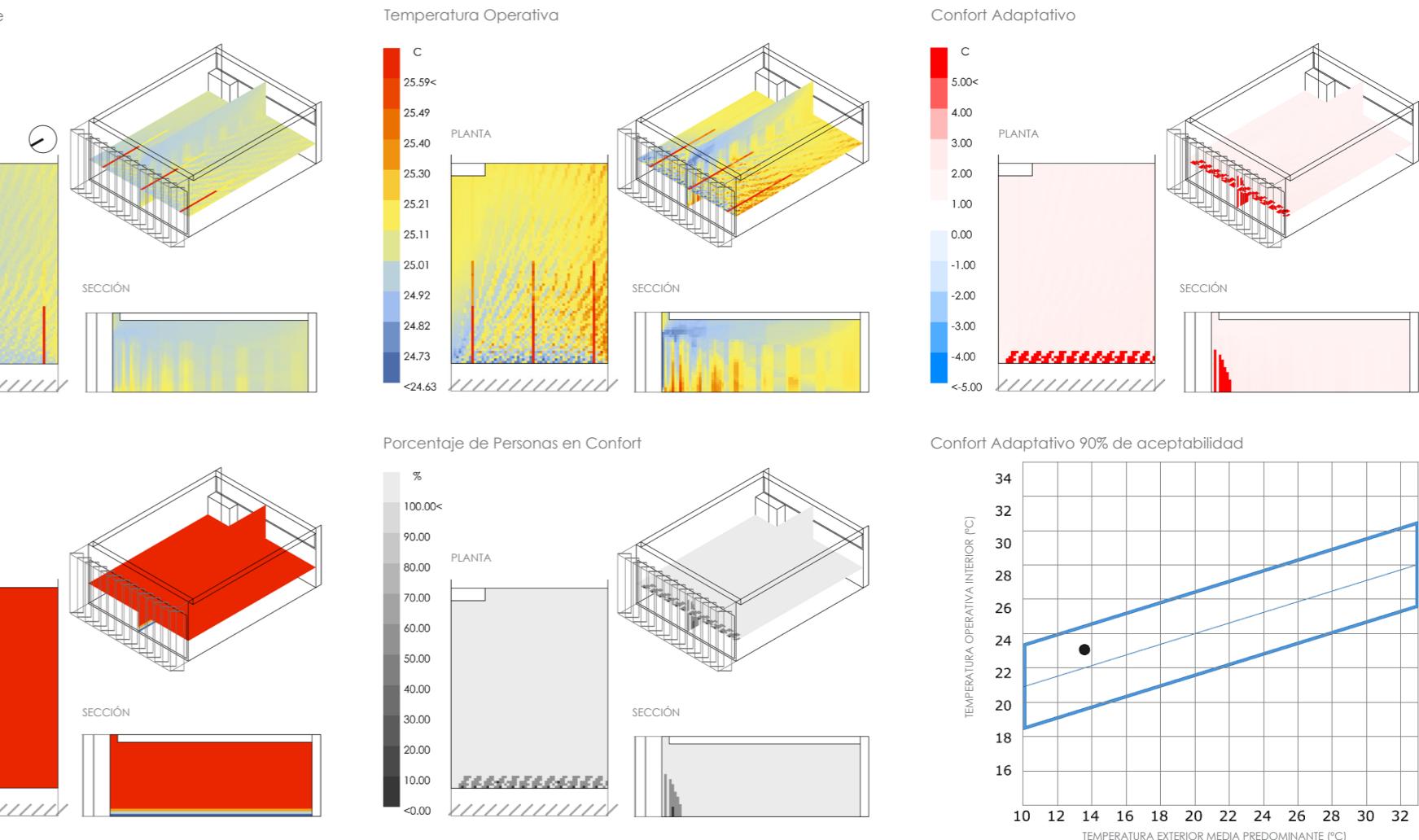
Fuente: Los autores

Anexo M. Análisis de confort térmico del aula J-106 con fachada actual_21 de junio 9:00 am



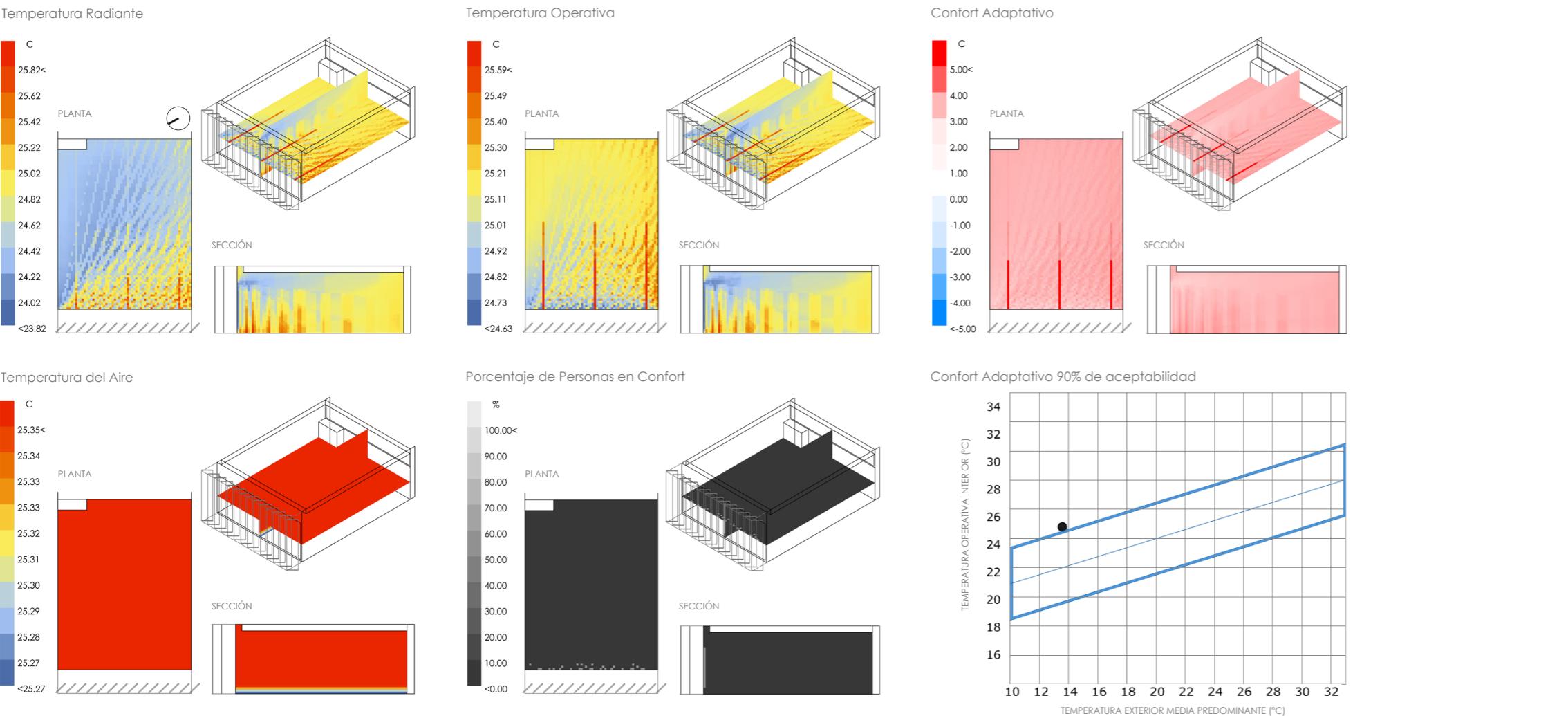
Fuente: Los autores

Anexo N. Análisis de confort térmico del aula J-106 con fachada actual_21 de junio 12:00 m



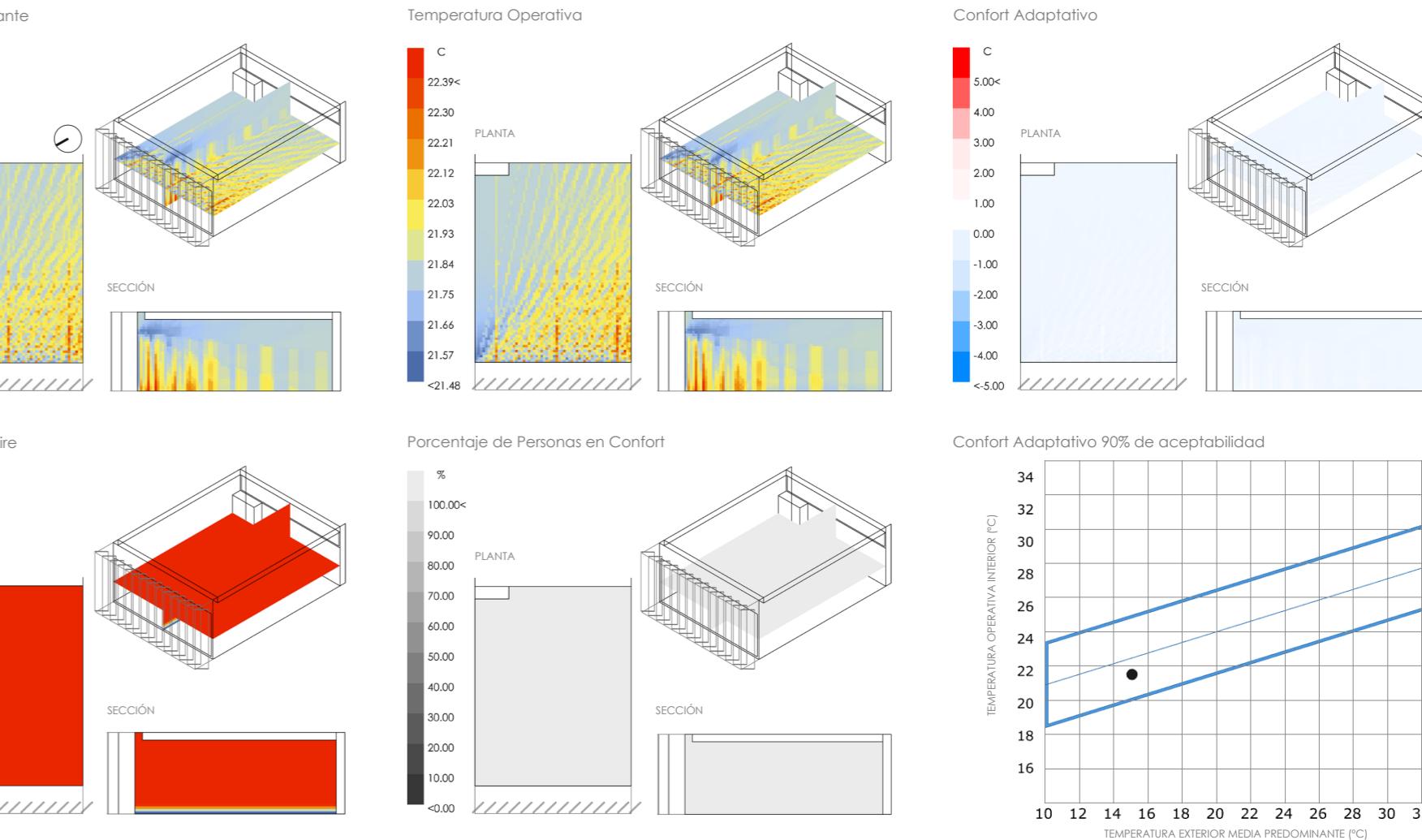
Fuente: Los autores

Anexo O. Análisis de confort térmico del aula J-106 con fachada actual_21 de junio 4:00 pm



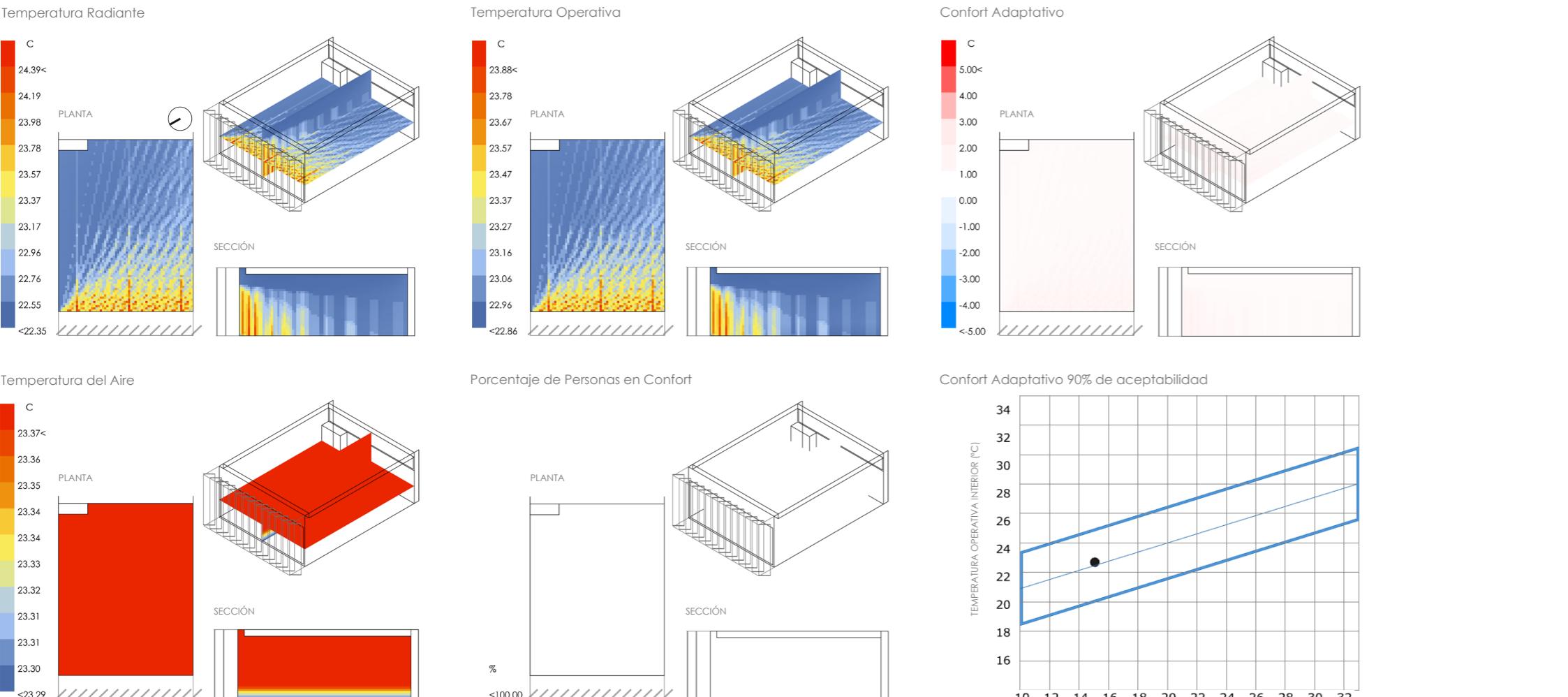
Fuente: Los autores

Anexo P. Análisis de confort térmico del aula J-106 con fachada actual_21 de diciembre 9:00 am



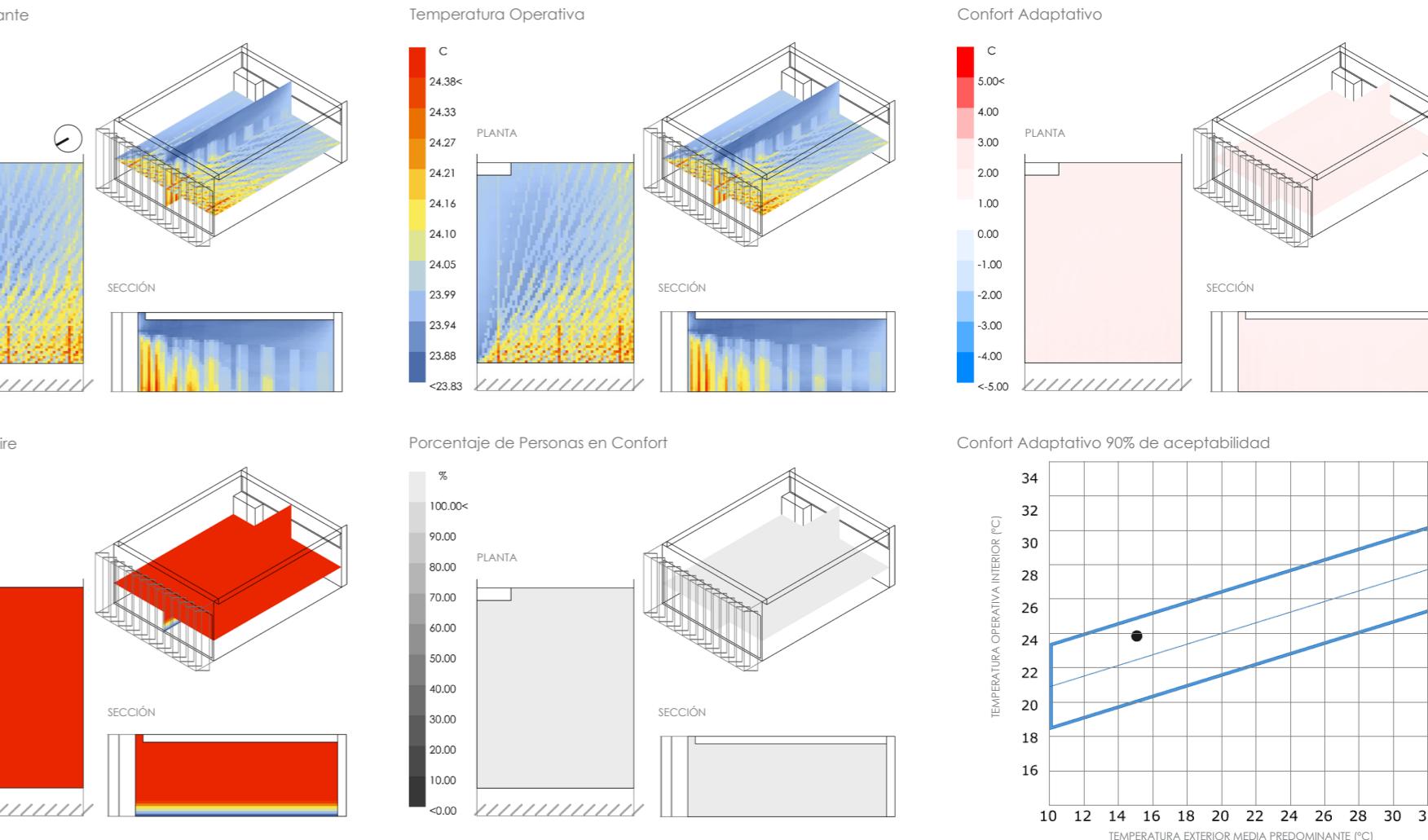
Fuente: Los autores

Anexo Q. Análisis de confort térmico del aula J-106 con fachada actual_21 de diciembre 12:00 m



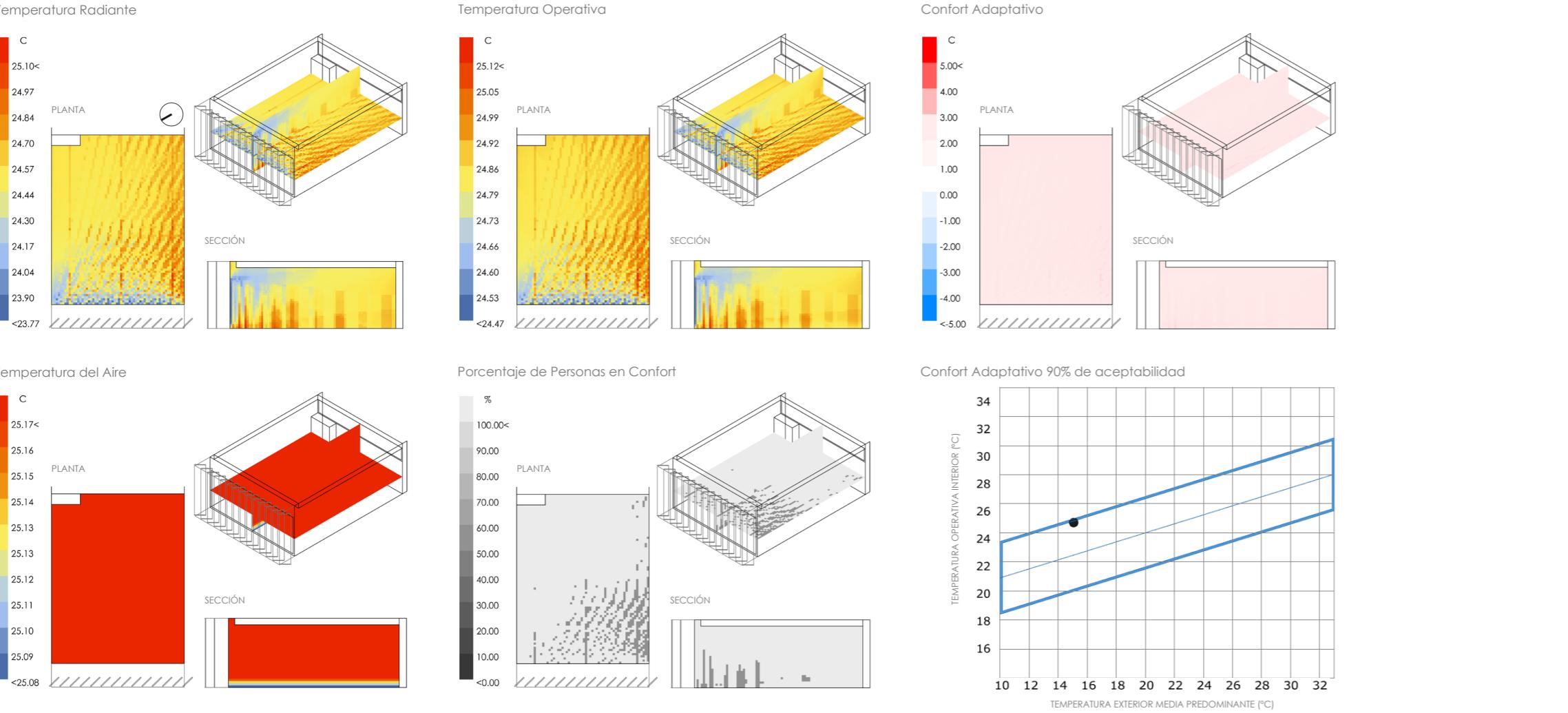
Fuente: Los autores

Anexo R. Análisis de confort térmico del aula J-106 con fachada actual_21 de diciembre 4:00 pm



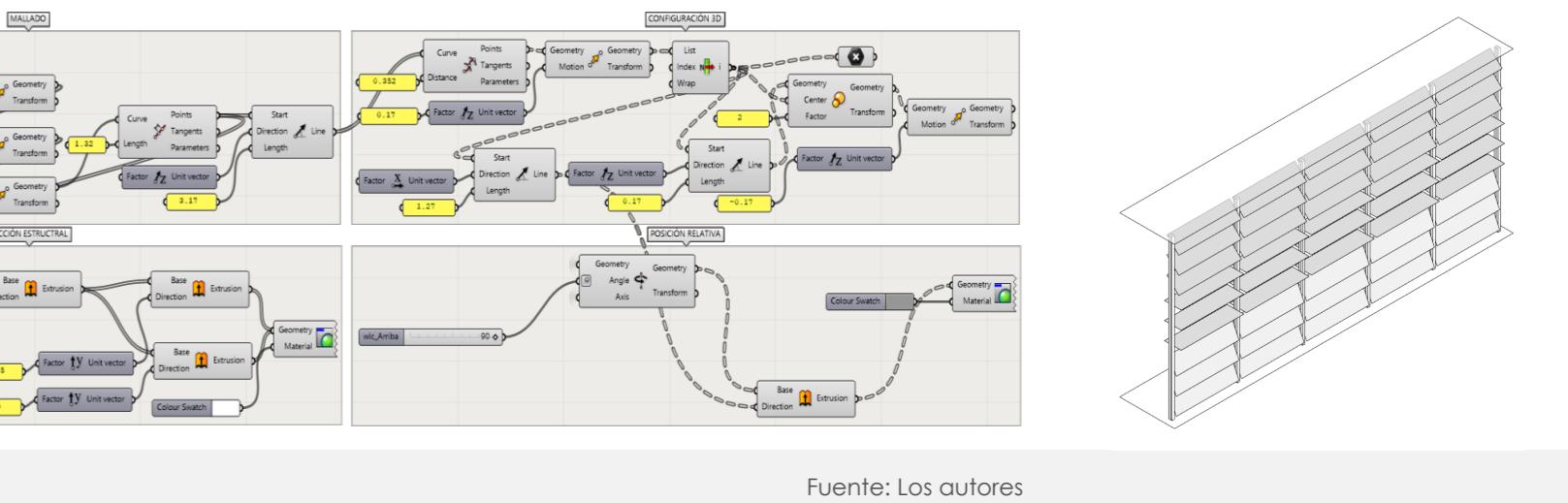
Fuente: Los autores

Anexo S. Análisis de confort térmico del aula J-106 con fachada actual_15 de diciembre 5:00 pm

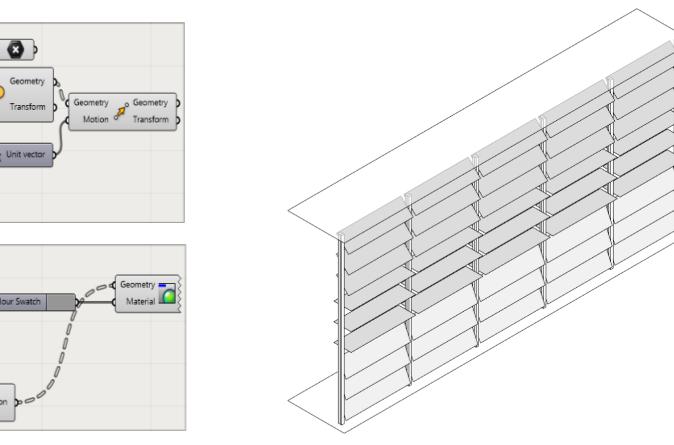


Fuente: Los autores

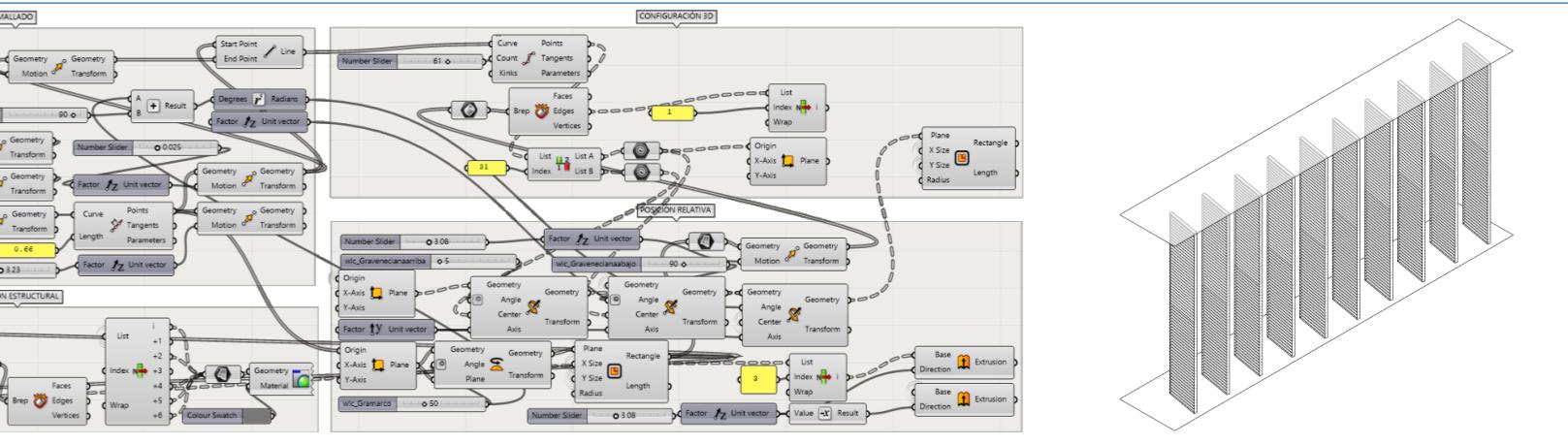
Anexo T. Configuración Grasshopper Fachada 1



Fuente: Los autores

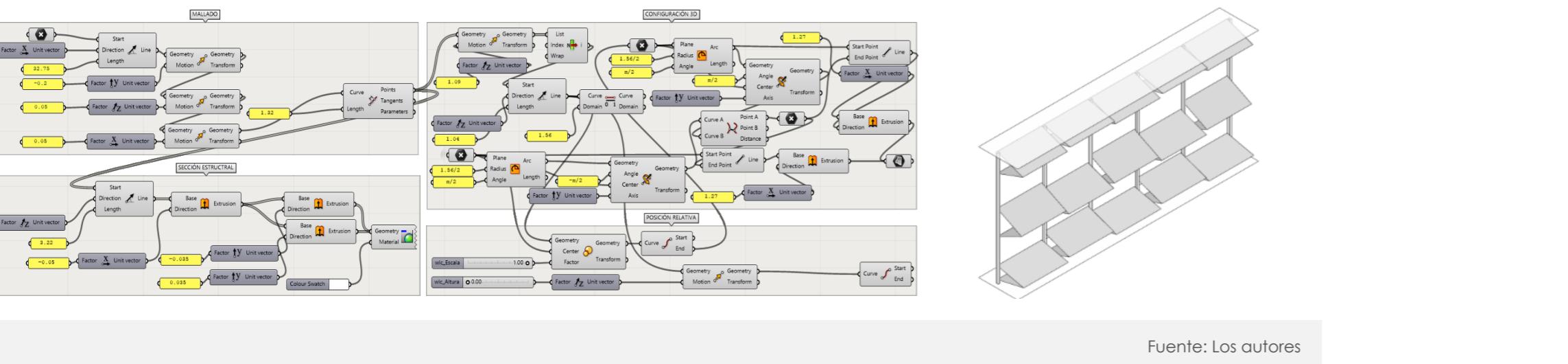


Anexo U. Configuración Grasshopper Fachada 2



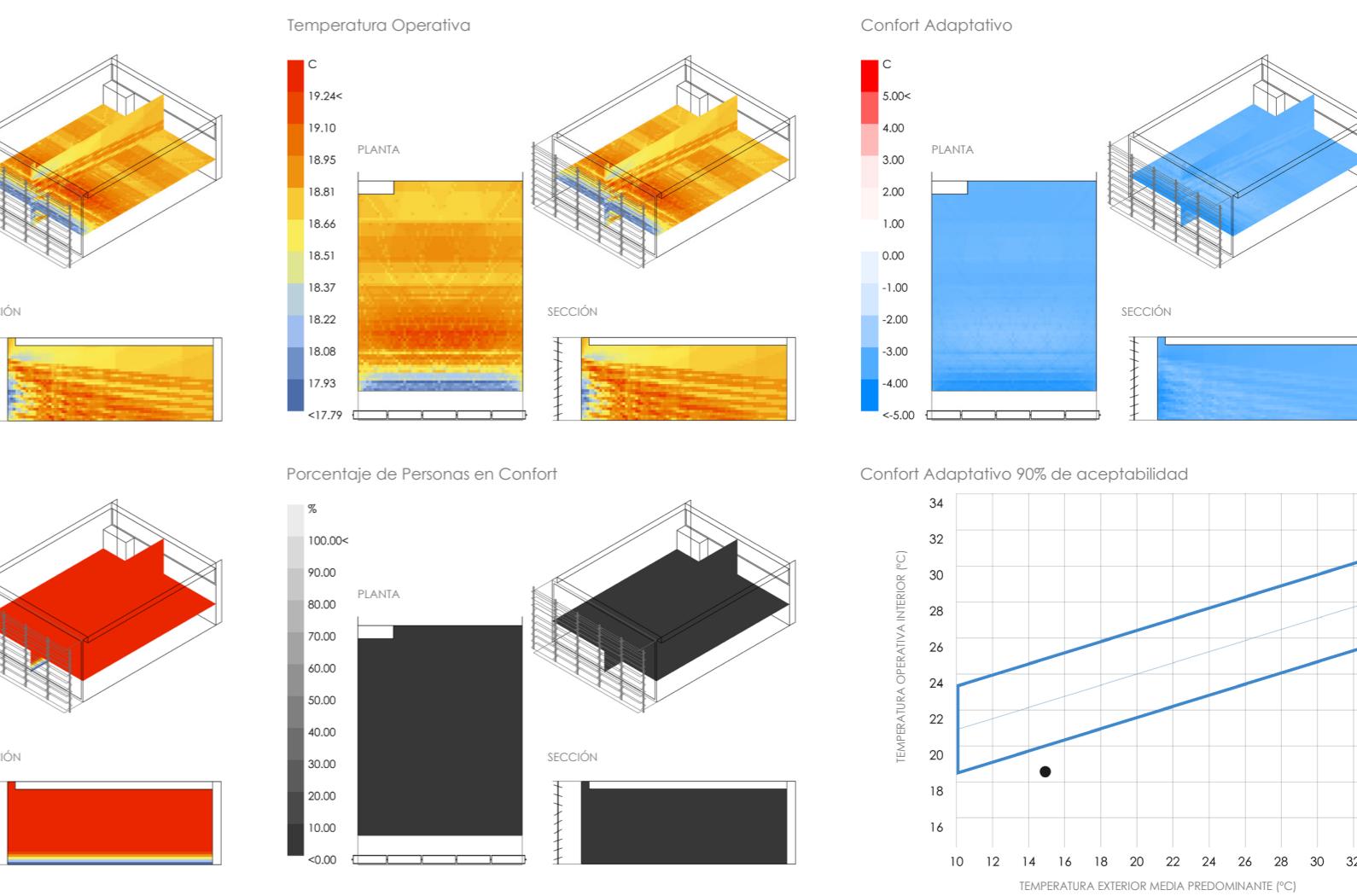
Fuente: Los autores

Anexo V. Configuración Grasshopper Fachada 3



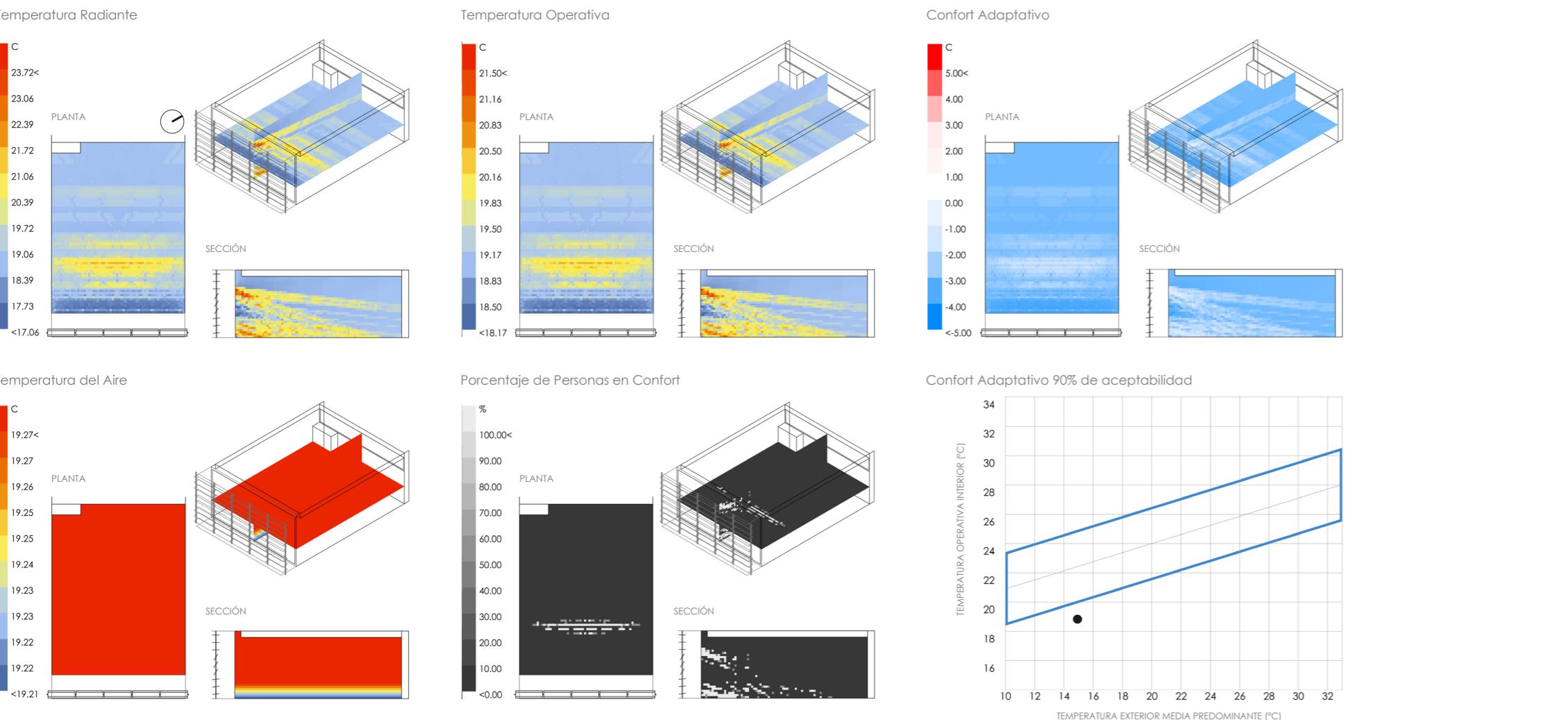
Fuente: Los autores

Anexo W. Análisis de confort térmico aula J-105_21 de marzo 9:00 am



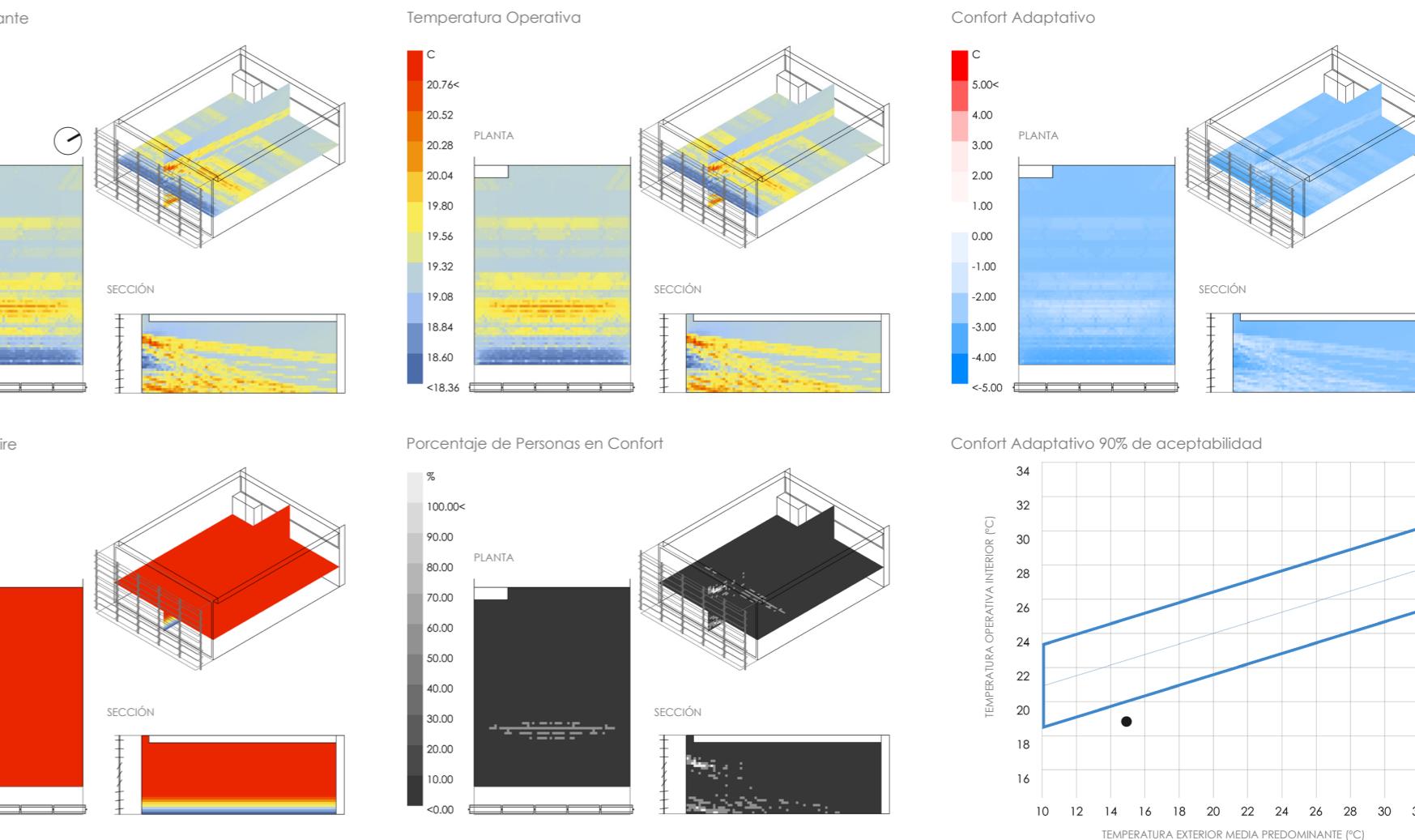
Fuente: Los autores

Anexo X. Análisis de confort térmico aula J-105 _21 de marzo 12:00 m



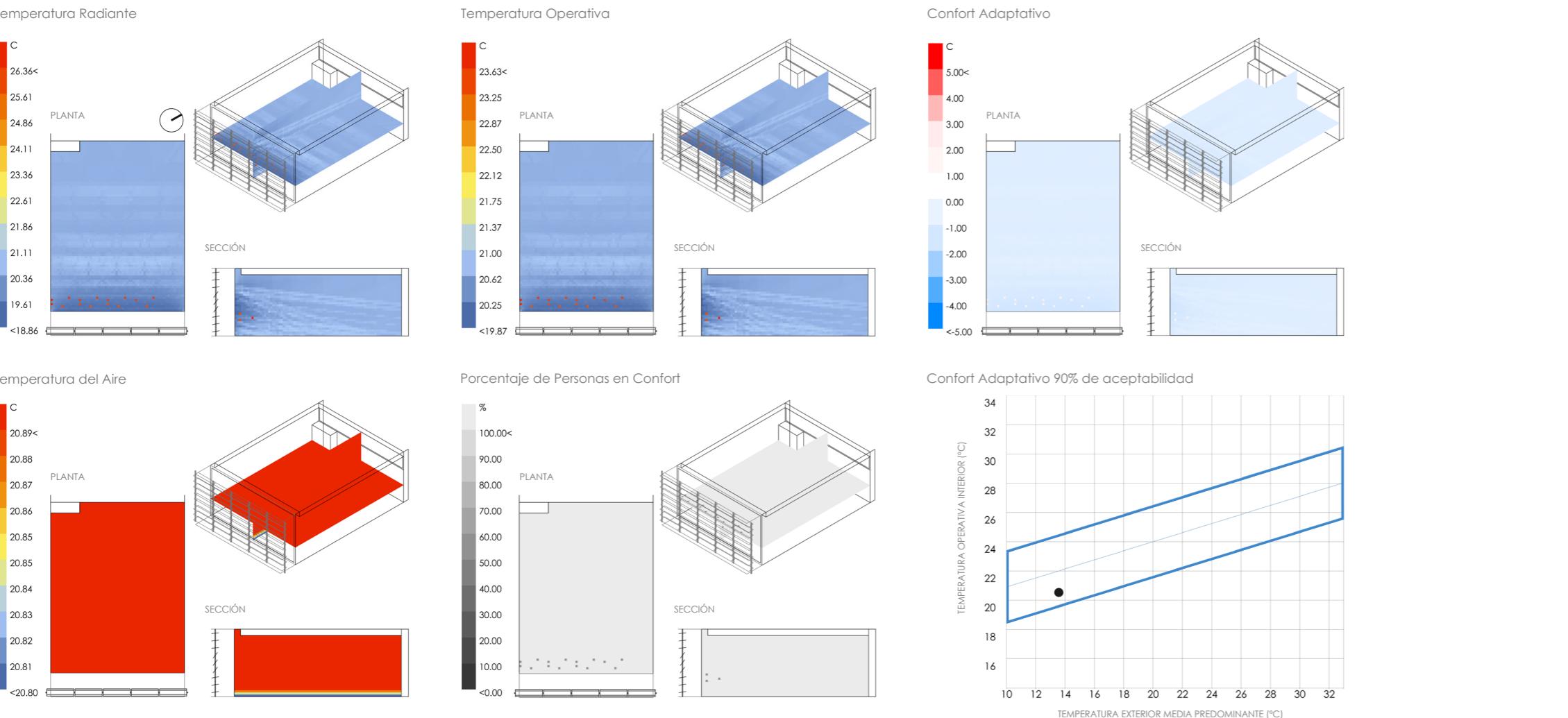
Fuente: Los autores

Anexo Y. Análisis de confort térmico aula J-105 _21 de marzo 4:00 pm



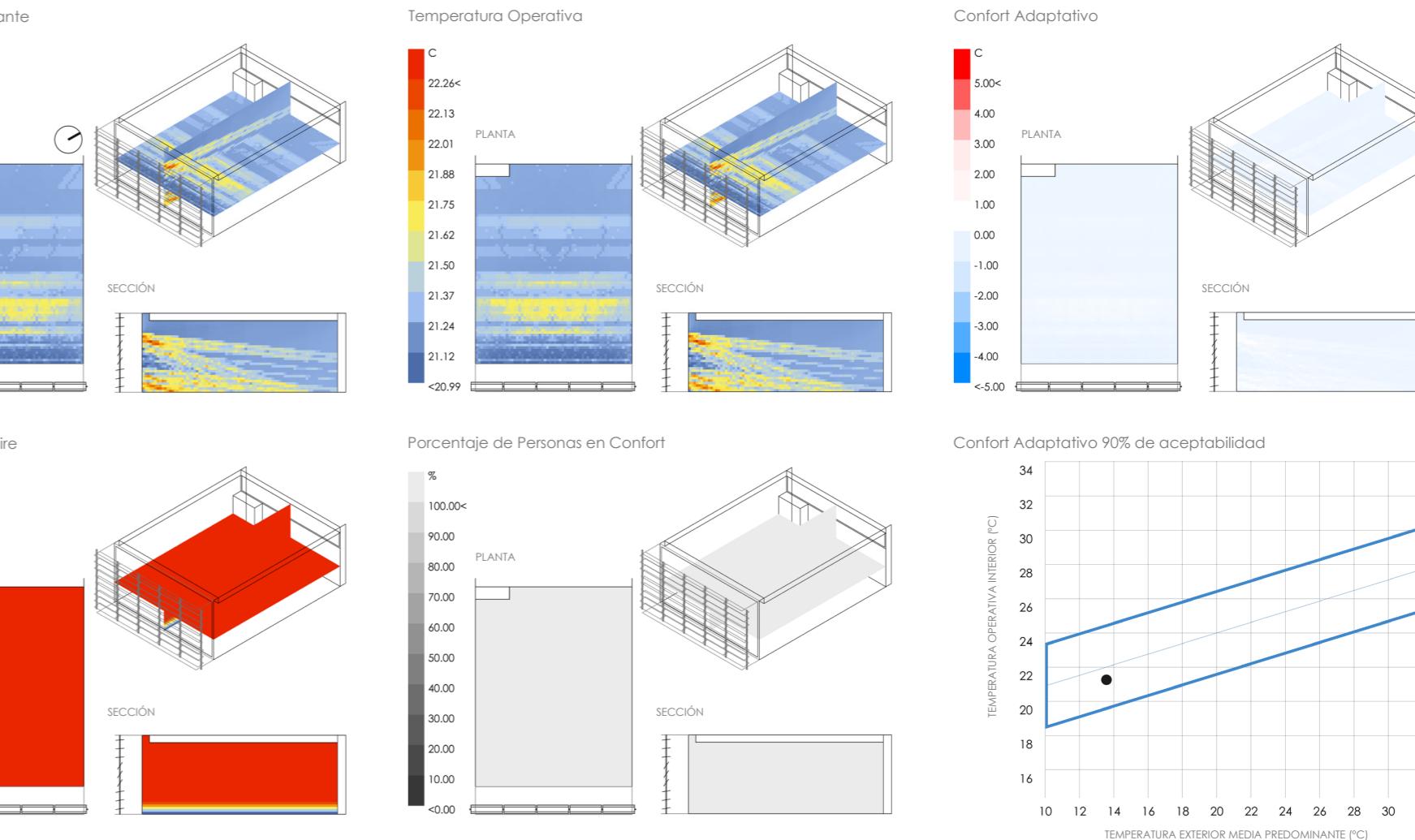
Fuente: Los autores

Anexo Z. Análisis de confort térmico aula J-105_21 de junio 9:00 am



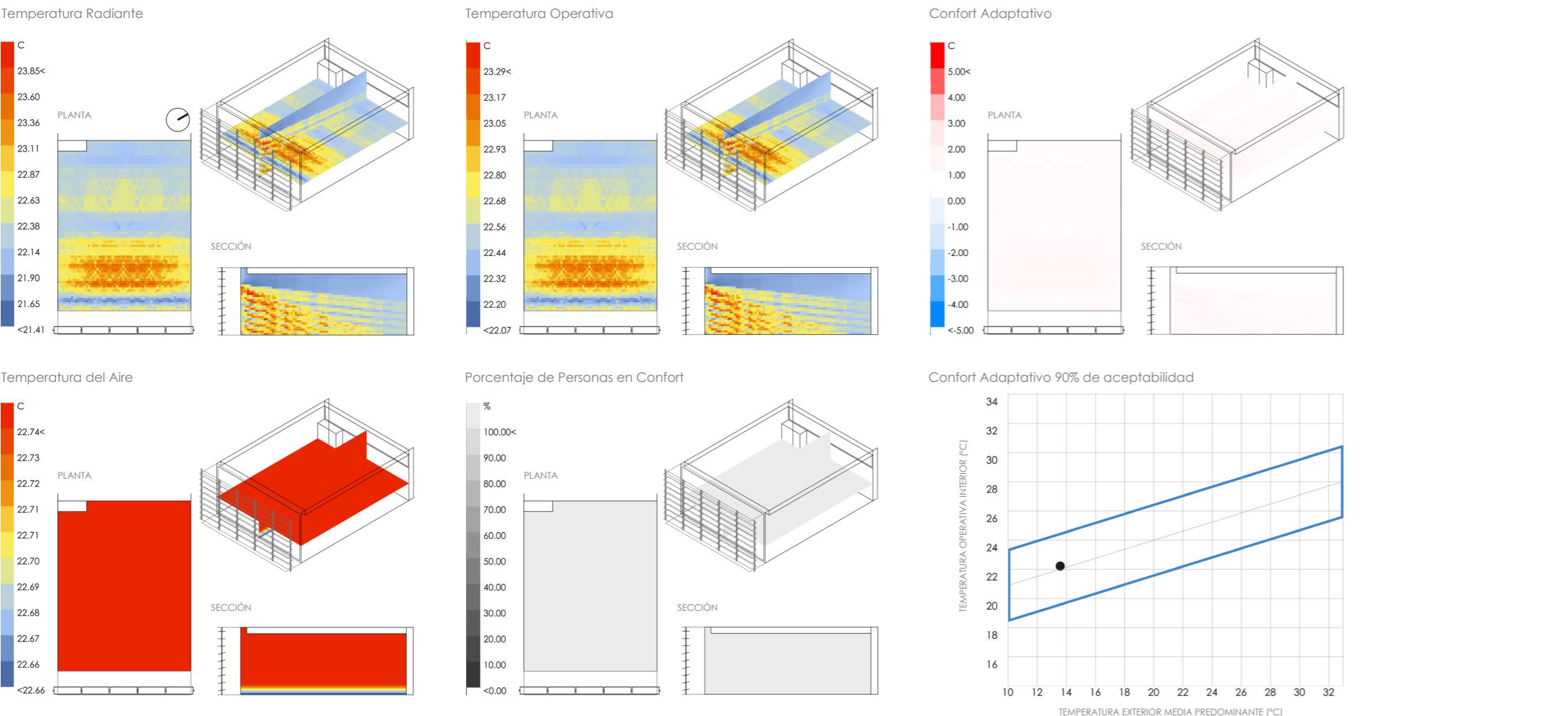
Fuente: Los autores

Anexo AA. Análisis de confort térmico aula J-105 _21 de junio 12:00 m



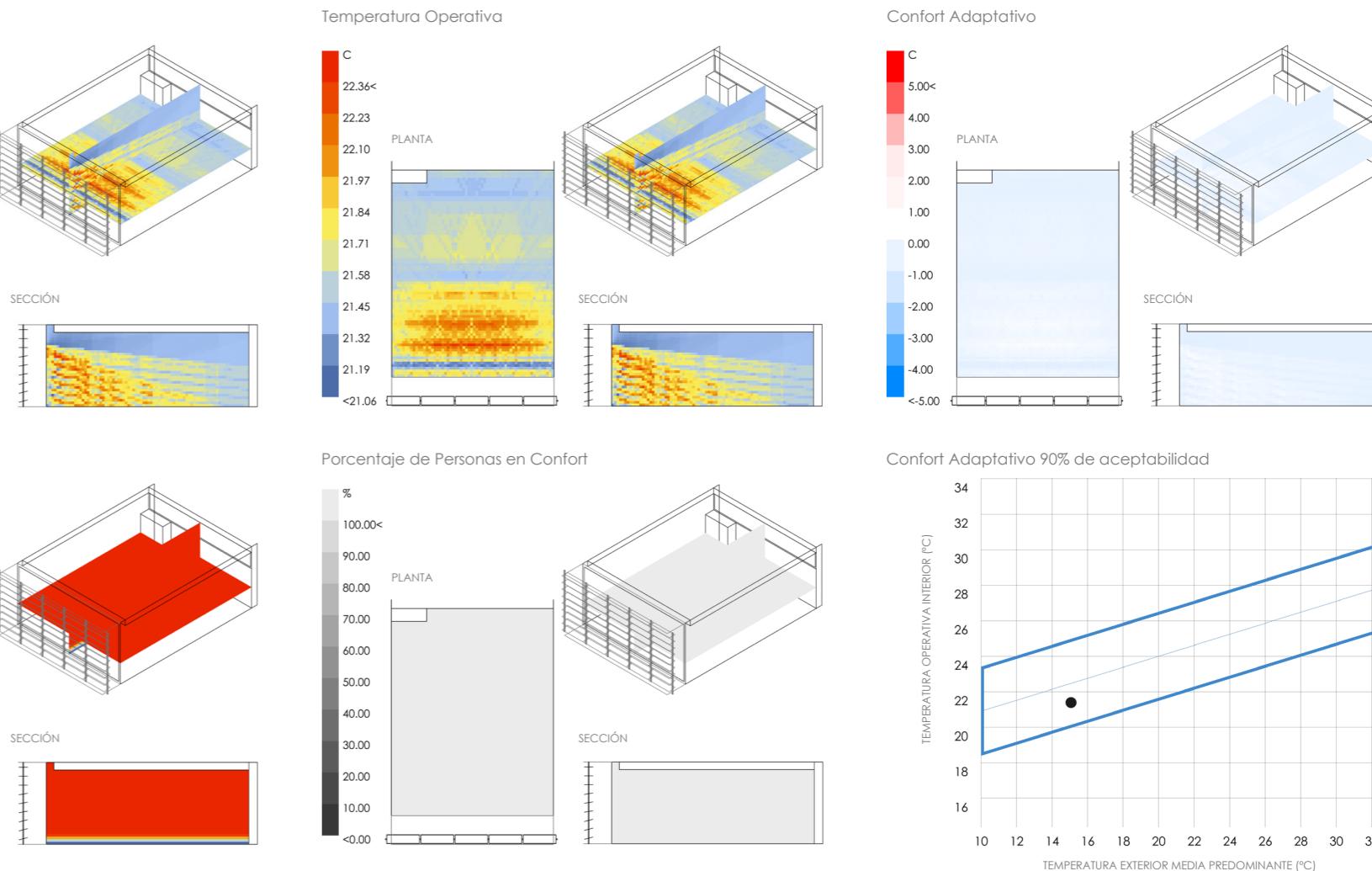
Fuente: Los autores

Anexo AB. Análisis de confort térmico aula J-105_21 de junio 4:00 pm



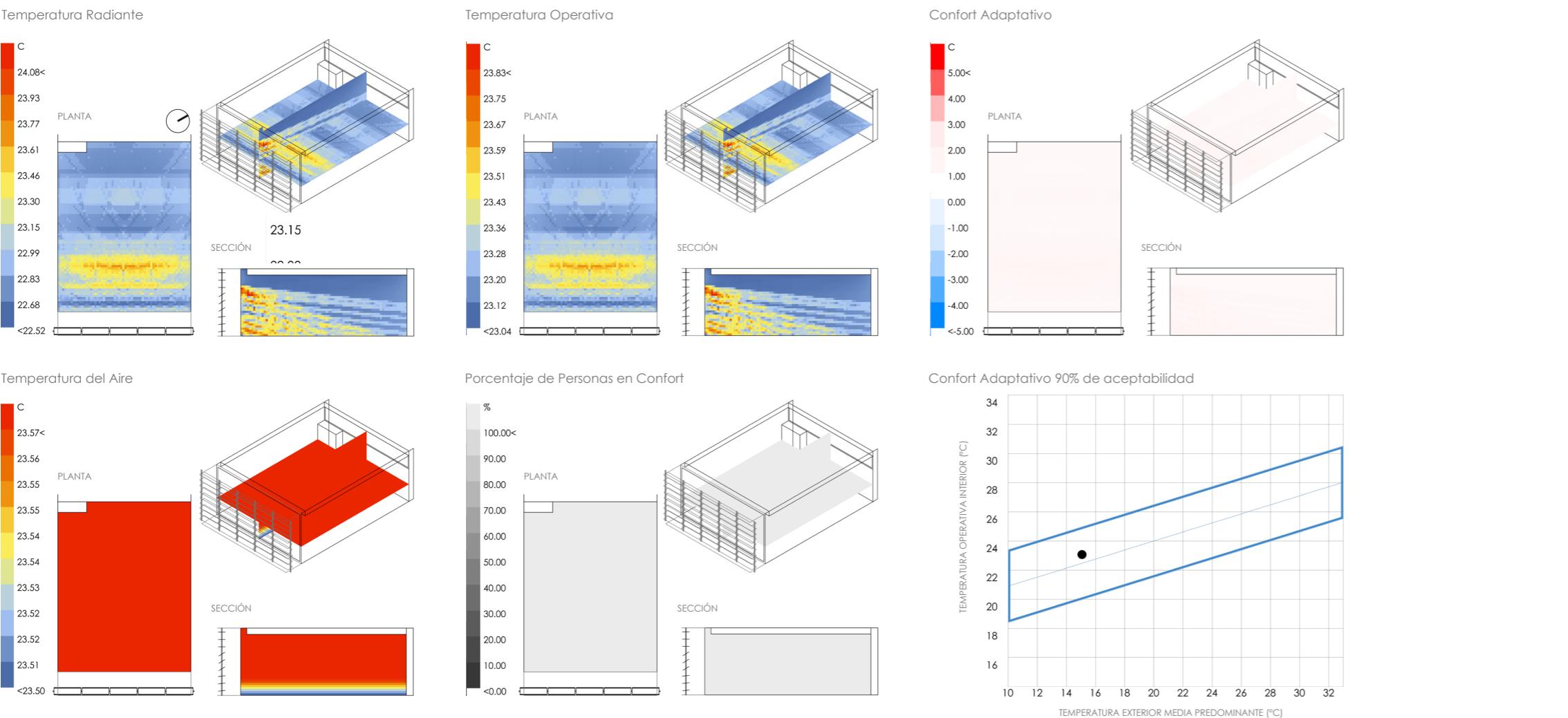
Fuente: Los autores

Anexo AC. Análisis de confort térmico aula J-105_21 de diciembre 9:00 am



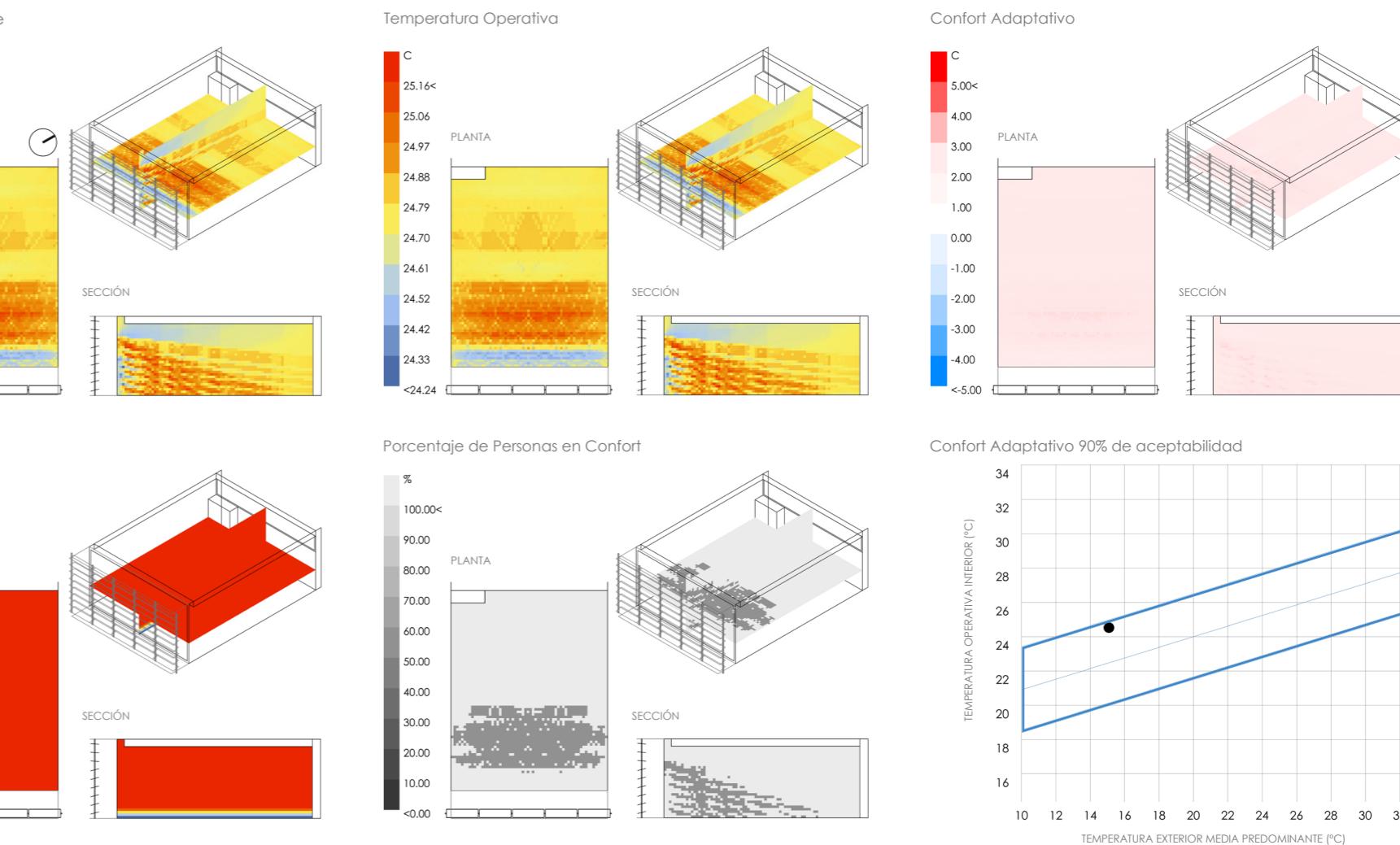
Fuente: Los autores

Anexo AD. Análisis de confort térmico aula J-105 21 de Diciembre 4:00 pm



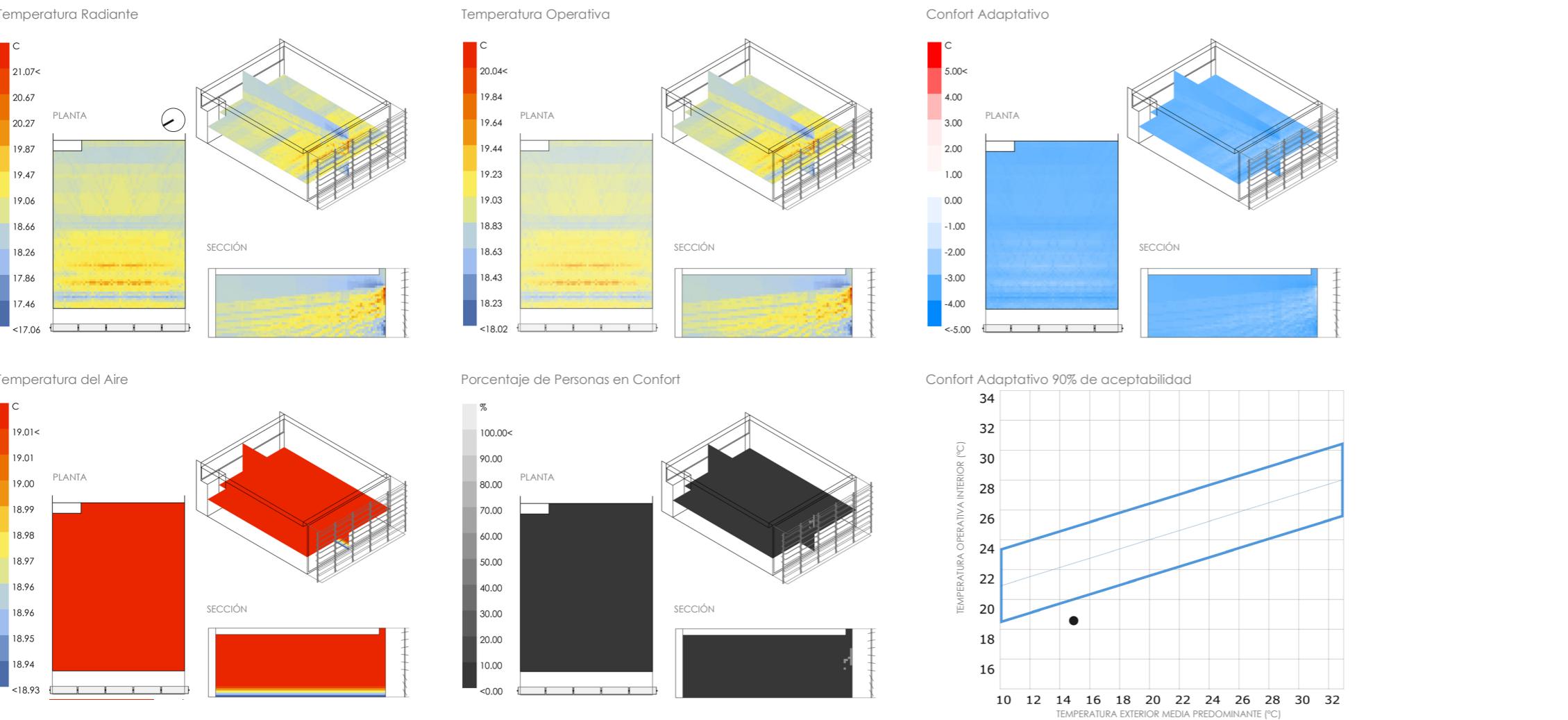
Fuente: Los autores

Anexo AE. Análisis de confort térmico aula J-105 15 de Diciembre 5:00 pm



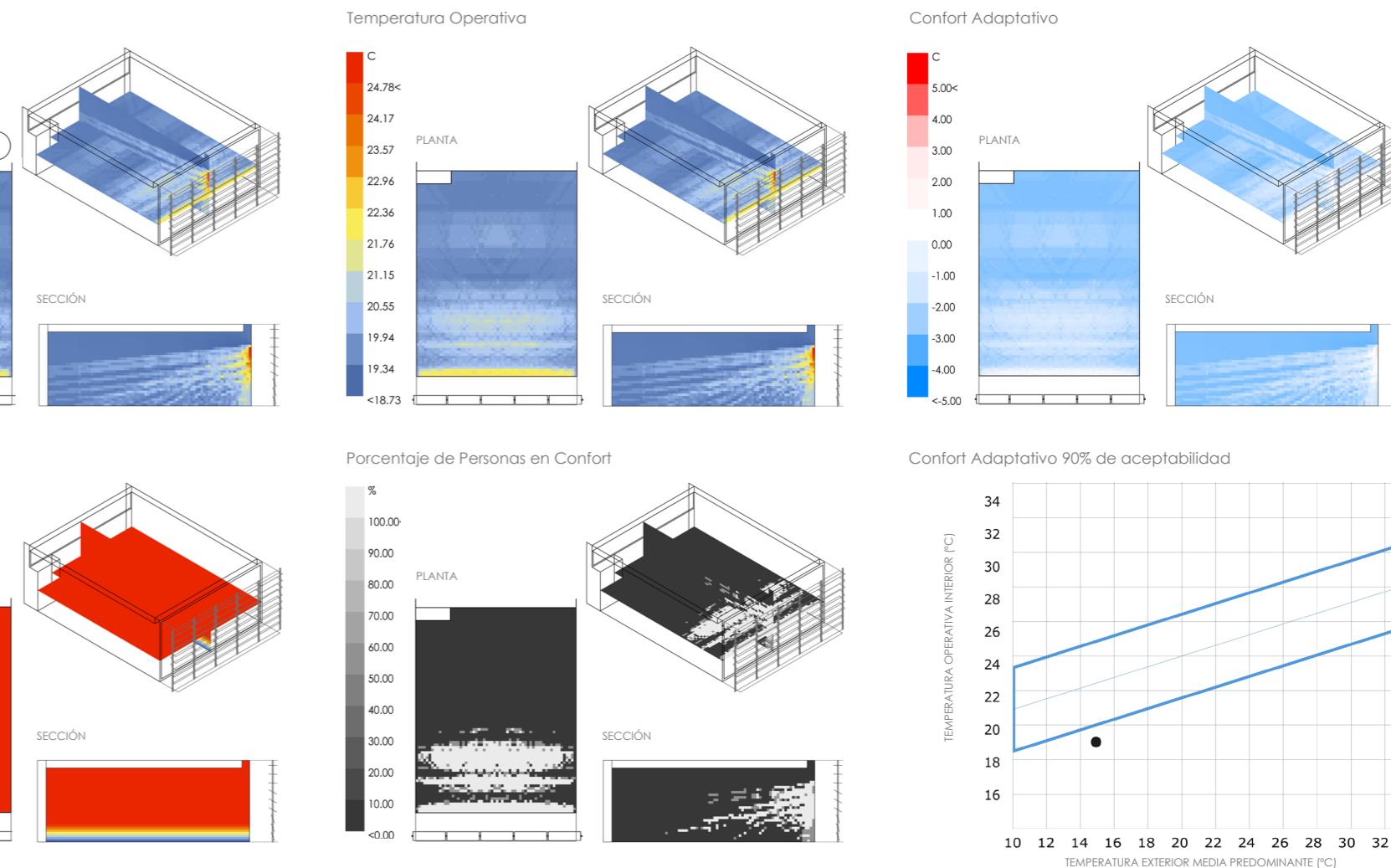
Fuente: Los autores

Anexo AF. Análisis de confort térmico aula J-106_21 de Marzo 9:00 am



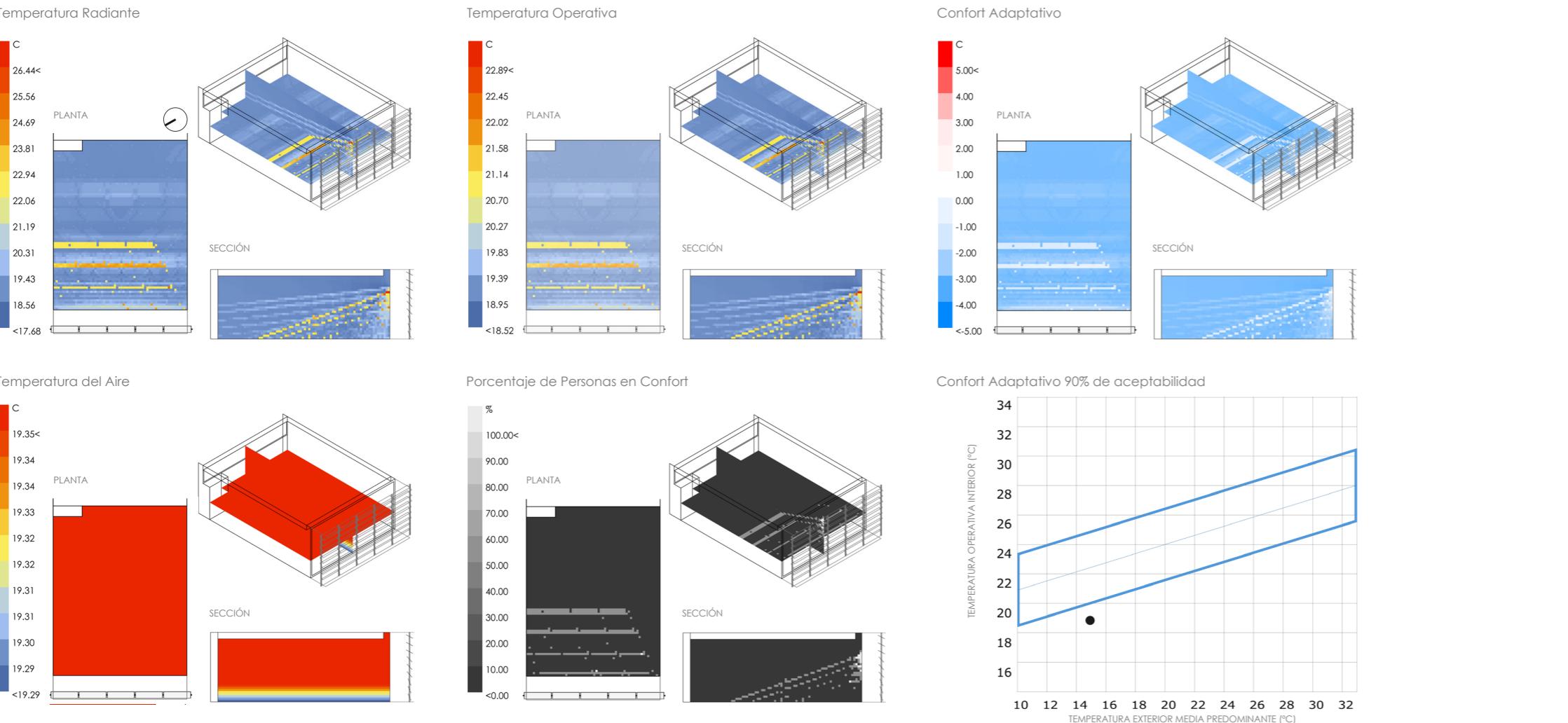
Fuente: Los autores

Anexo AG. Análisis de confort térmico aula J-106_21 de Marzo 12:00 am



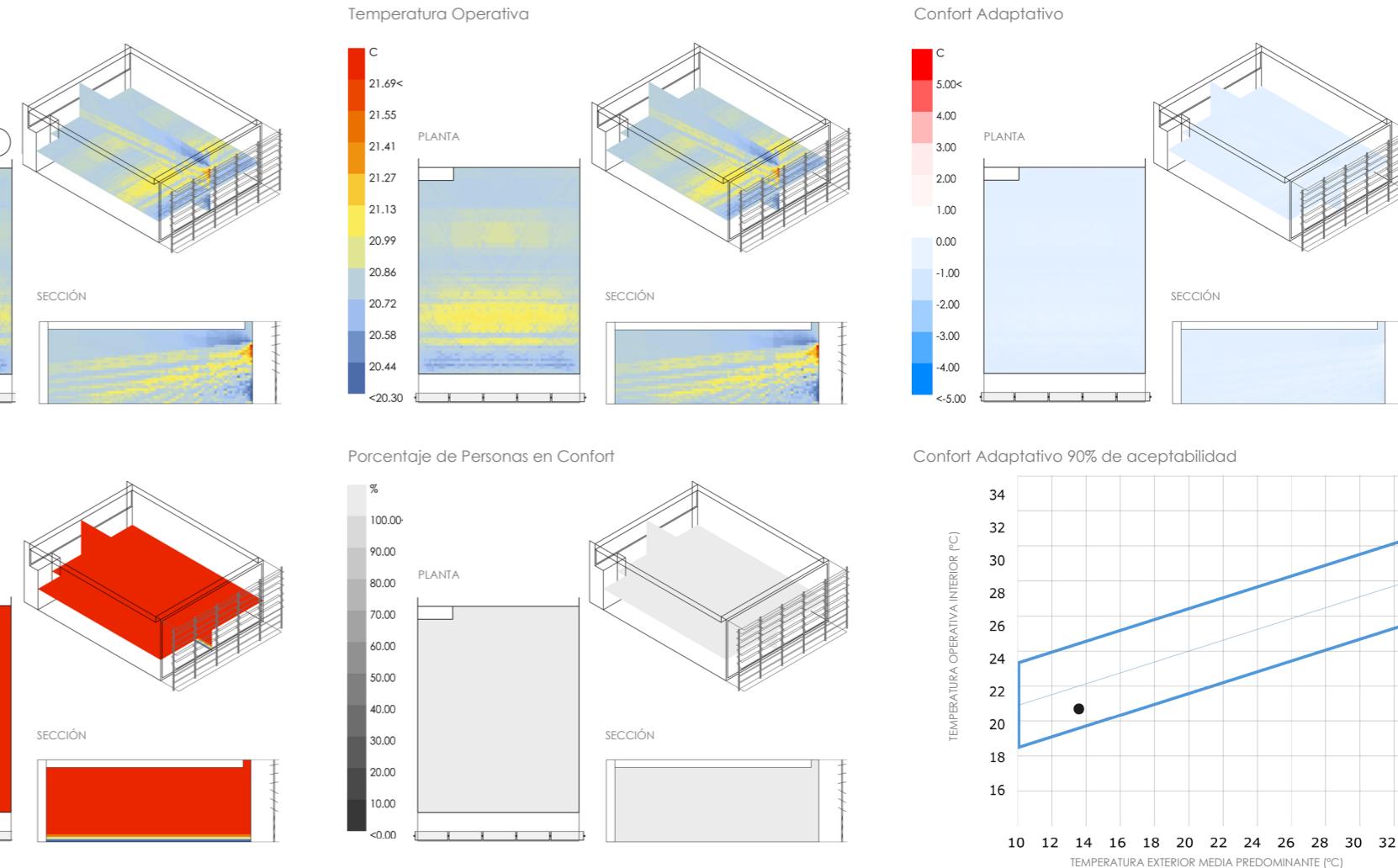
Fuente: Los autores

Anexo AH. Análisis de confort térmico aula J-106_21 de Marzo 16:00 pm



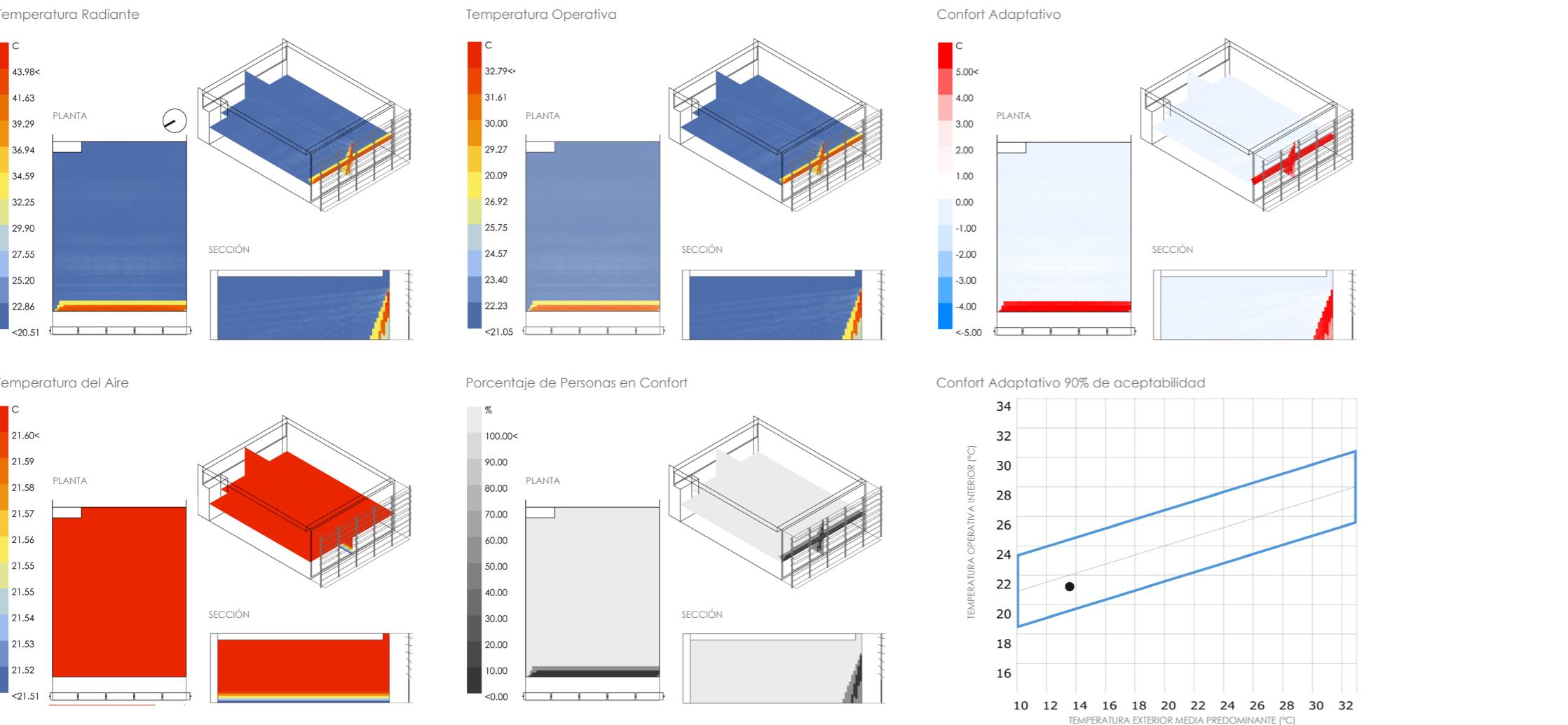
Fuente: Los autores

Anexo AI. Análisis de confort térmico aula J-106_21 de Junio 9:00 am



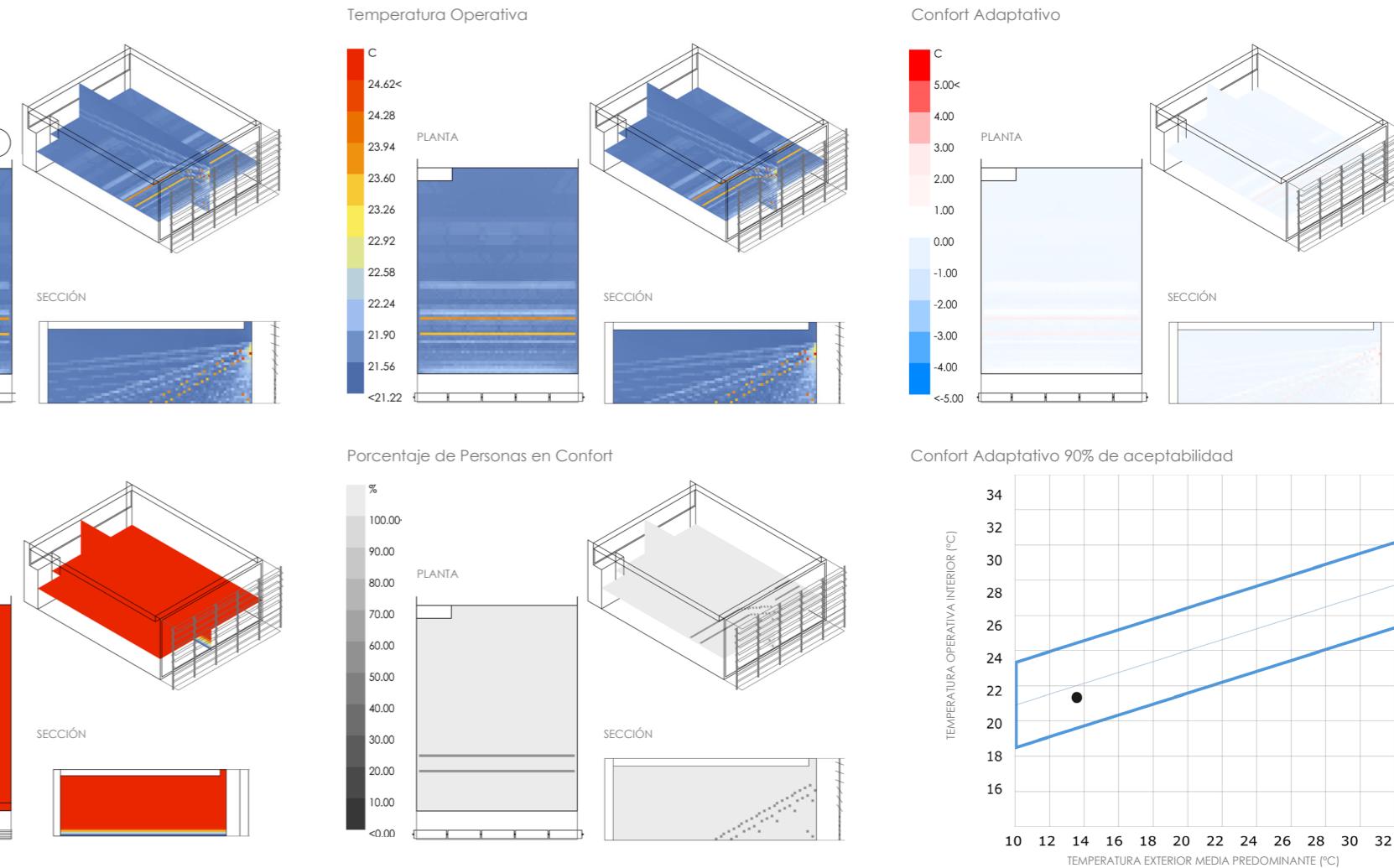
Fuente: Los autores

Anexo AJ. Análisis de confort térmico aula J-106_21 de Junio 12:00 m



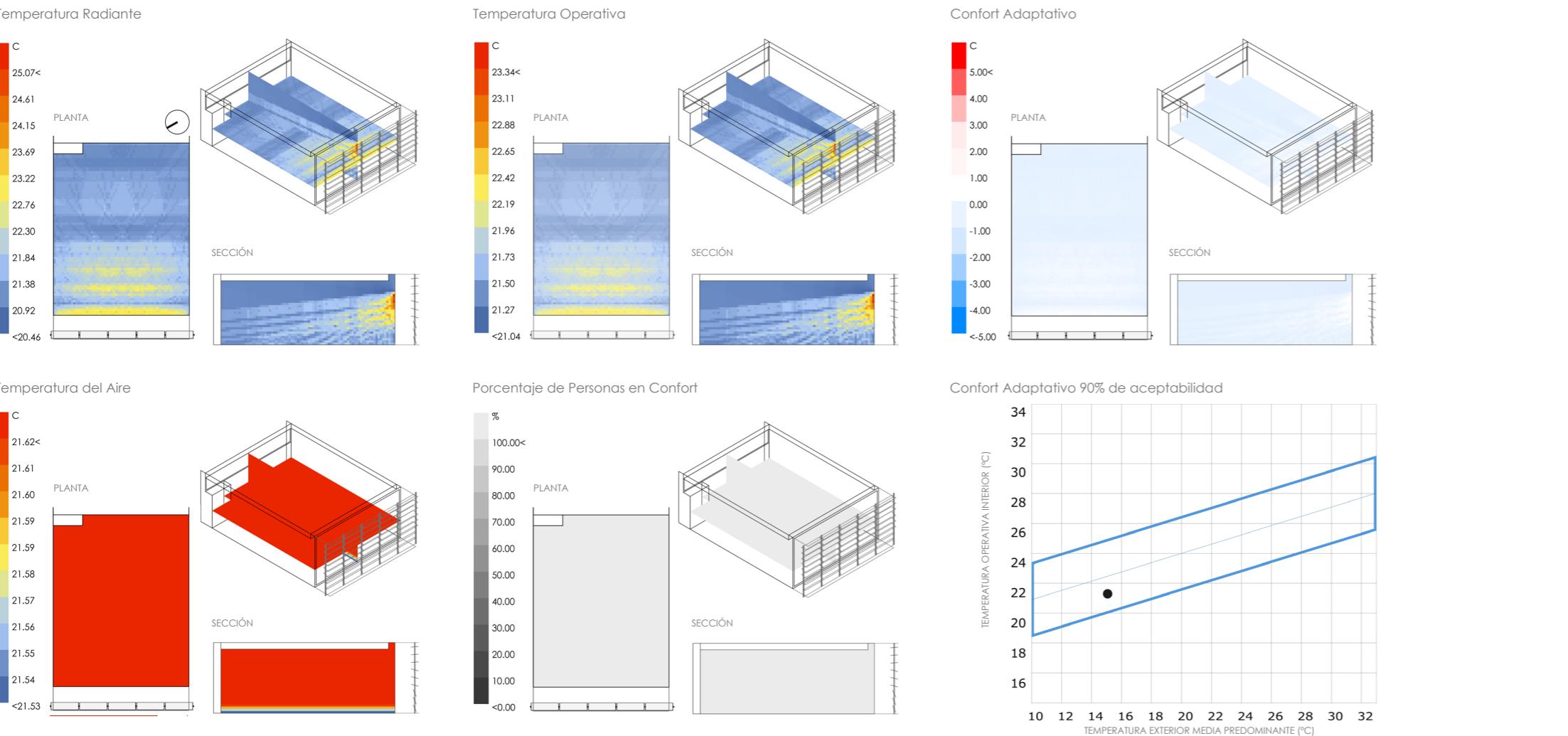
Fuente: Los autores

Anexo AK. Análisis de confort térmico aula J-106_21 de Junio 4:00 pm



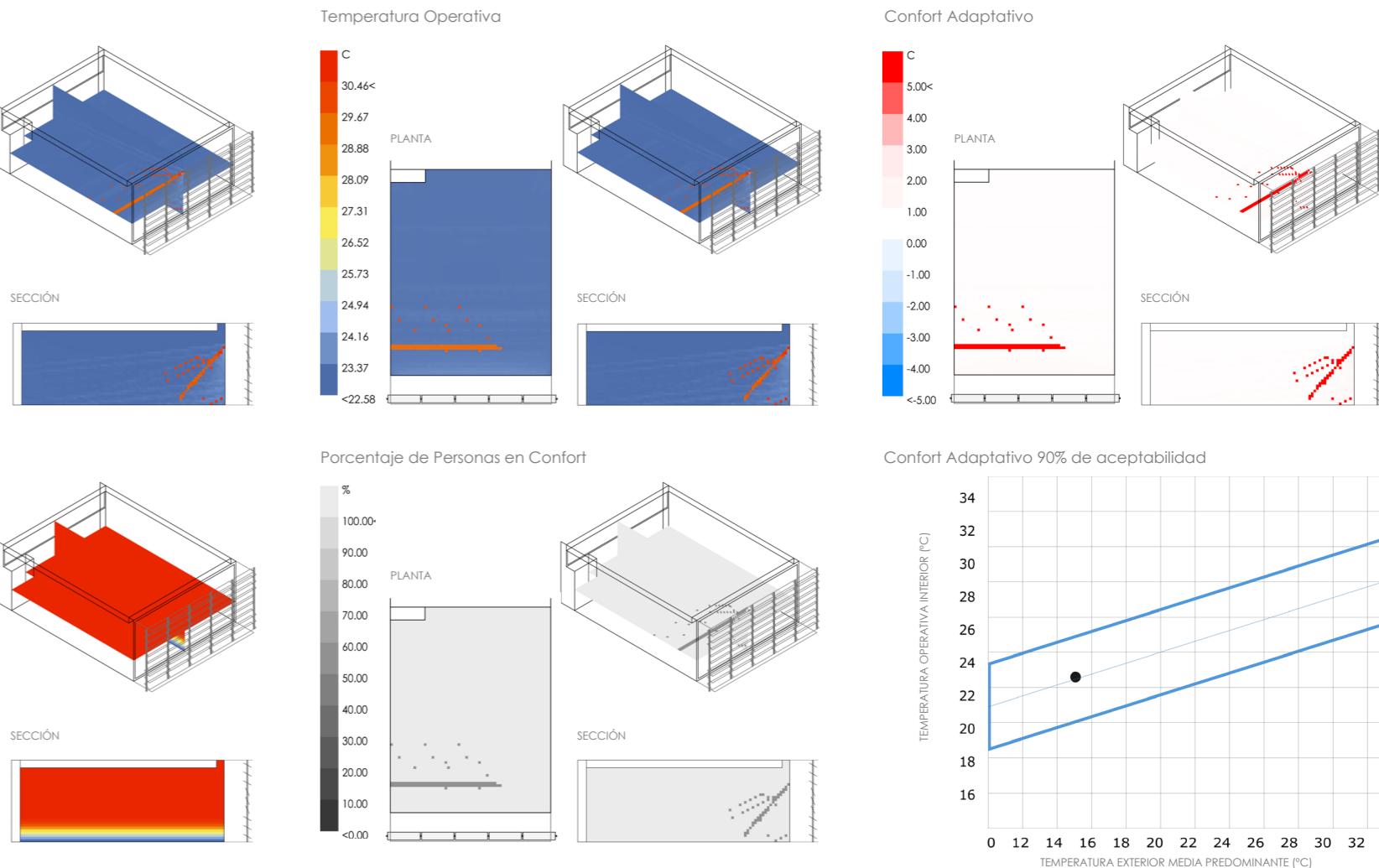
Fuente: Los autores

Anexo AL. Análisis de confort térmico aula J-106_21 de Diciembre 9:00 am



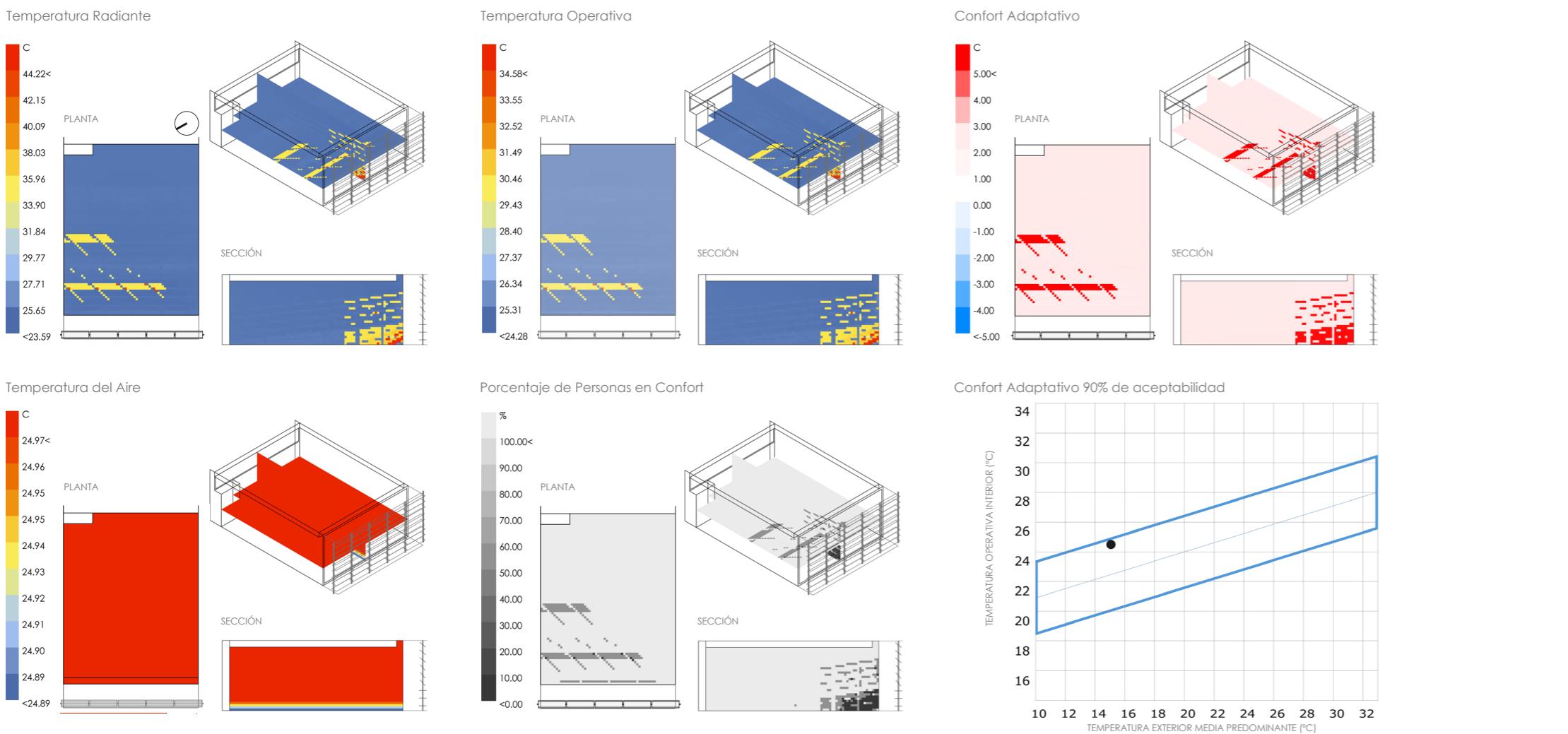
Fuente: Los autores

Anexo AM. Análisis de confort térmico aula J-106_21 de Diciembre 16:00 pm

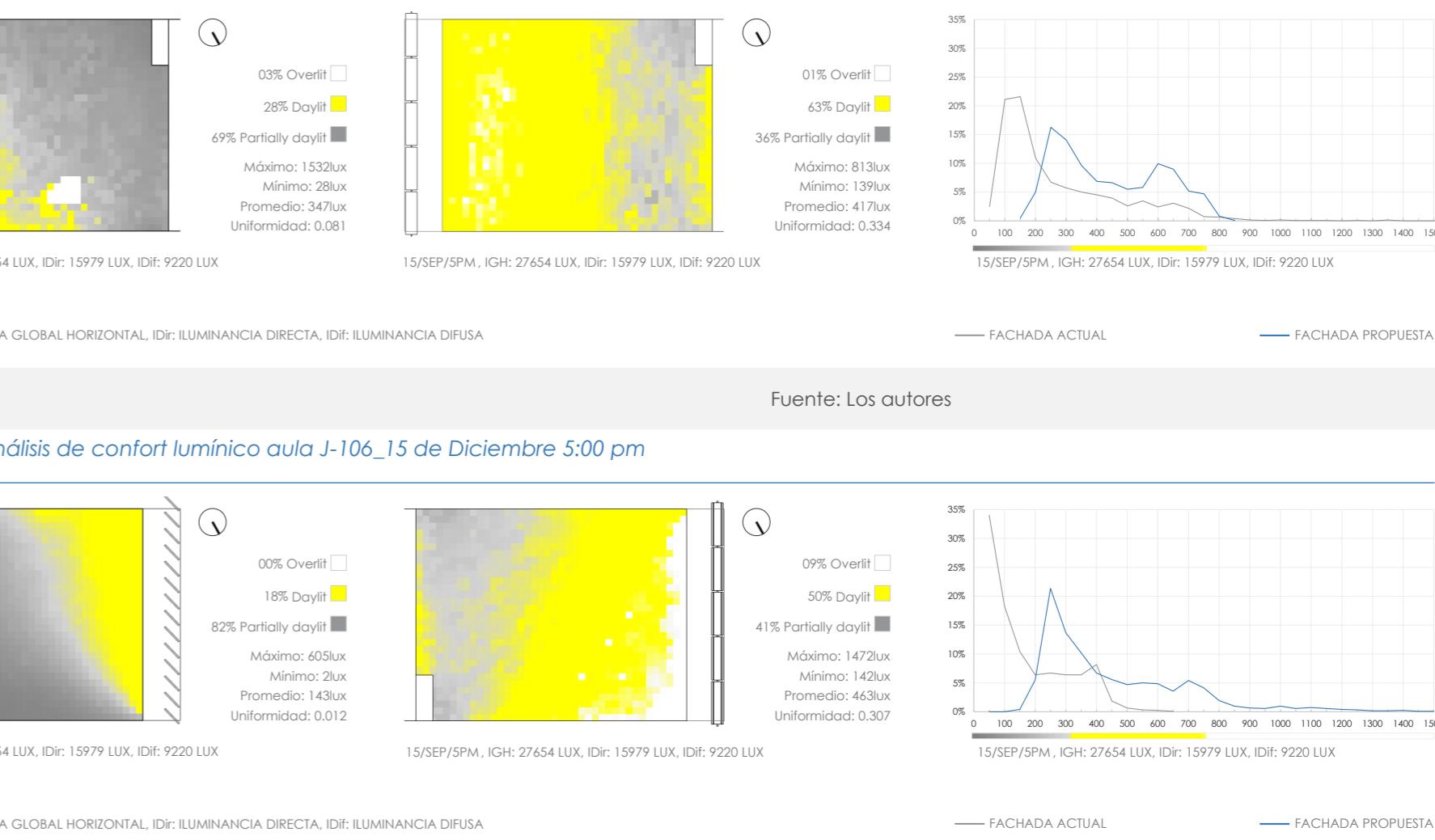


Fuente: Los autores

Anexo AN. Análisis de confort térmico aula J-106_15 de Diciembre 5:00 pm



análisis de confort lumínico aula J-105_15 de Diciembre 5:00



Fuente: Los autores

UCUENCA