

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO  
FACULTAD DE INGENIERÍA ARQUITECTURA Y DISEÑO  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

**MAESTRÍA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO**

**EVALUACIÓN DE ESTRATEGIAS DE ILUMINACIÓN NATURAL EN VIVIENDAS  
EN REGIONES ÁRIDAS PARA EL CONFORT VISUAL:  
MÉTODO DE DISTRIBUCIÓN DE ILUMINANCIA PREDOMINANTE**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

PRESENTA

**CRISTINA OLIVARRÍA TREJO**

Correo electrónico UABC: a1134849@uabc.edu.mx

Correo personal: cristina.olivarria96@gmail.com

Identificador ORCID: 0000-0002-5643-4436

Director de tesis: Dr. Anibal Luna León  
Identificador ORCID: 0000-0003-3480-0607

Co-director de tesis: Dr. Cristina Sotelo Salas  
Identificador ORCID: 0000-0001-8685-4290

Co-tutor: Dr. Gonzalo Bojórquez Morales  
Identificador ORCID: 0000-0001-9303-9278

Mexicali B.C, enero de 2024.

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO  
FACULTAD DE INGENIERÍA ARQUITECTURA Y DISEÑO  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

**MAESTRÍA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO**

**EVALUACIÓN DE ESTRATEGIAS DE ILUMINACIÓN NATURAL EN VIVIENDAS  
EN REGIONES ÁRIDAS PARA EL CONFORT VISUAL:  
MÉTODO DE DISTRIBUCIÓN DE ILUMINANCIA PREDOMINANTE**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRA EN ARQUITECTURA, URBANISMO Y DISEÑO

PRESENTA

**CRISTINA OLIVARRÍA TREJO**

Correo electrónico UABC: a1134849@uabc.edu.mx

Correo personal: cristina.olivarria96@gmail.com

Identificador ORCID: 0000-0002-5643-4436

Director de tesis: Dr. Anibal Luna León  
Identificador ORCID: 0000-0003-3480-0607

Co-director de tesis: Dr. Cristina Sotelo Salas  
Identificador ORCID: 0000-0001-8685-4290

Co-tutor: Dr. Gonzalo Bojórquez Morales  
Identificador ORCID: 0000-0001-9303-9278

Mexicali B.C, enero de 2024.

## Declaración de Originalidad

Declaro que la tesis que se presenta contiene material original que no ha sido presentado para la obtención de un grado académico o diploma en esta u otra institución de educación superior. Asimismo, declaro que hasta donde yo sé no contiene material previamente publicado o escrito por otra persona excepto donde se reconoce como tal a través de las citas.

Mexicali, Baja California a 9 de enero de 2024



Cristina Olivarría Trejo

---

Nombre y firma del estudiante

## **Dedicatoria**

A mi papá, Marco Antonio Olivarría Cabanillas, por ser mi ejemplo de superación y ayudarme a entender mis propias ideas.

A mi mamá, Susana Trejo González, porque después de 12 años por fin pude entender y poner en práctica su frase de las buenas noches “que te sea leve”.

A mi hermano, Marcos Olivarría Trejo, por su apoyo y su abrazo constante a pesar de la distancia.

A la danza, por entrar de nuevo en mi vida y ser mi acompañante en este proceso.

## **Agradecimientos**

A Dios, por acompañarme en mi camino y permitirme llegar al día de hoy. A mis padres, por ser mi soporte en este proceso y durante toda mi vida escolar; por acompañarme en los desvelos, lágrimas y logros. A mi hermano, por su apoyo incondicional, bondad y comprensión. A mi director de Tesis, el Dr. Aníbal Luna León, de la Universidad Autónoma de Baja California, por su paciencia, guía y apoyo durante estos años. A la Dra. Cristina Sotelo Salas, por todo su acompañamiento y atenciones. Al Dr. Gonzalo Bojórquez Morales, por sus enseñanzas, consejos y su apoyo en el proceso de solicitar la beca CONACYT. A la Dra. María Milagrosa Pérez Sánchez, de la Universidad Autónoma de Yucatán, por su disponibilidad y aportaciones en el proceso de esta investigación, así como por la invitación a concursar para ser expositora en el Congreso de Ciencias Exactas e Ingenierías 2022. A los doctores y maestros, Ramona Romero, Osvaldo Leyva, Verónica Jiménez y Daniel Olvera, por sus enseñanzas. A mis compañeras de posgrado que se convirtieron en mis amigas, Ana Teresa Soberanes y Adriana Moreno, por las tardes y noches de trabajo llenas de sororidad y risas. A mis amigos por todo su apoyo: Suseth Ruiz, Christbelén Sandoval, Andrea Ruiz, Gabriela Vélez, Nayeli Delgado, Gabriela López, Melissa Angulo, Natalia Jaloma, Zonia Rodríguez, Andrea Cárdenas, Mónica Medina, Bárbara Castillo, Carlos Villa, Gustavo Vázquez y Fernando Ruiz. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico otorgado. A la Facultad de Arquitectura y Diseño de la Universidad Autónoma de Baja California, por aceptarme en el programa de posgrado. A la Universidad Autónoma de Yucatán, por recibirme en sus instalaciones durante el Congreso de Ciencias Exactas e Ingenierías 2022.

## Índice

<b>DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD</b>	<b>III</b>
<b>DEDICATORIA</b>	<b>IV</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>X</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>XII</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>14</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>15</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>16</b>
<b>CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>17</b>
1.1. Planteamiento del problema	17
1.2. Justificación	21
1.3. Preguntas de investigación	23
1.3.1. Pregunta General	23
1.3.2. Preguntas Específicas	23
1.4. Hipótesis	24
1.5. Objetivo de la investigación	25
1.5.1. Objetivo General	25
1.5.2. Objetivos Específicos	25
1.6. Alcances y Limitaciones	26
1.7. Antecedentes	27
1.7.1. Tipologías evaluadas.	28
1.7.2. Confort visual.	28
1.7.3. Relación de variables lumínicas.	29
1.7.4. Estrategias de iluminación natural.	30
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO</b>	<b>35</b>
2.1. Luz Natural, Variables y Parámetros	35
2.1.1. Luz Natural y Confort del Usuario	37
2.1.2. Iluminancia y Deslumbramiento	38

2.1.3. Luminancia	39
2.1.4. Factor de luz natural (Daylight Factor)	40
2.1.5. Tipos de cielo	41
2.1.6. Autonomía de luz natural (Daylight Autonomy)	44
2.1.7. Reflectancia y Transmitancia	44
2.1.8. Visibilidad	45
2.1.9. Relación de la Luz Natural y la Ganancia Térmica	47
2.2. Criterios de Diseño	49
2.2.1. Emplazamiento y Orientación del Edificio	50
2.2.1.1. Contexto del Edificio.	51
2.2.2. Geometría del Edificio	52
2.2.2.1. Distribución del interior.	55
2.2.3. Las Ventanas	55
2.2.3.1. Orientación.	56
2.2.3.2. Tamaño, Proporción y Distribución	58
2.2.3.3. Altura	59
2.2.3.4. Configuración del Área de Ventana.	60
2.2.3.5. Características del Acristalamiento.	61
2.2.3.5.1. Grosor y Capas.	62
2.2.3.5.2. Emisividad.	62
2.2.3.5.3. Transmitancia Visible.	63
2.2.3.5.4. Sombreado.	63
2.2.3.6. Volados.	64
2.2.3.7. Bordes y Extrusión de Volúmenes.	64
2.2.3.8. Repisas de Luz.	65
2.2.3.9. Persianas Interiores.	67
2.2.4. Iluminación Cenital	67
2.2.5. Diseño de Interiores	69
2.2.5.1. Color y Reflectancia.	69
2.2.6. Iluminación Natural y Visibilidad	70
2.3. Normatividad.	71

2.3.1. Estándar Internacional ASHRAE.	71
2.3.2. Estándar Internacional EN17037.	72
2.3.3. Estándar Internacional GB 50033.	72
2.3.4. Norma mexicana NOM-025.	73
2.3.5. Código de Edificación de Vivienda CONAVI SEDATU.	74
2.3.6. Reglamento de Edificaciones para el municipio de Mexicali.	75
2.4. Herramientas de Simulación y Análisis	76
2.4.1. Matlab	76
2.4.2. Ecotect	77
2.4.3. Dialux	77
2.4.4. VeLux	77
2.4.5. Design Builder Energy Plus	79
2.4.6. Dynamic Daylighting	79
2.5. Metodologías de Análisis de Resultados	80
2.5.1. Mapa Reticular y Porcentaje de Área	81
2.5.2. Contornos Tridimensionales y Valores Anuales.	82
2.5.3. Mapa Reticular y Valores Anuales.	83
<b>CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO</b>	<b>84</b>
3.1. Diseño del Experimento	84
3.2. Objeto de Estudio	86
3.3. Delimitación de Usuario y Necesidades	87
3.4. Selección de Estrategias a Evaluar	89
3.5. Integración de Normativa	91
3.6. Monitoreo en Unidad de Análisis	91
3.7. Simulación de Estrategias	96
3.7.1. Análisis de Archivo Climático y Delimitación de Días de Diseño	96
3.7.2. Programación de la Simulación	98
3.7.3. Ajuste de Visualización Gráfica	101
<b>CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>103</b>
4.1. Resultados de Monitoreo de Unidad de Análisis	103
4.2. Resultados de Simulación	107

4.2.1. Resultados de Análisis de Archivo Climático	108
4.2.2. Caso de Estudio y Variación de Orientaciones	112
4.2.3. Unidad Aislada.	122
4.2.4. Estrategia de diseño: Reflectancia	130
4.2.5. Estrategia de diseño: Ventanas Dobles	137
4.2.6. Estrategia de diseño: Ventana Horizontal	148
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES</b>	<b>160</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>164</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>175</b>

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> <i>Fuentes de luz natural.</i> .....	36
<b>Figura 2.</b> <i>Disponibilidad de luz solar según el tipo de cielo.</i> .....	43
<b>Figura 3.</b> <i>Espectro de luz.</i> .....	47
<b>Figura 4.</b> <i>Radiación térmica a través de las ventanas.</i> .....	48
<b>Figura 5.</b> <i>Variación de ángulo de altitud solar en solsticios en Mexicali, México.</i> ..	51
<b>Figura 6.</b> <i>Influencia del contexto en la presencia de la luz natural.</i> .....	52
<b>Figura 7.</b> <i>Relación de distribución de área y geometría del edificio.</i> .....	53
<b>Figura 8.</b> <i>Estrategias de iluminación aplicadas según la forma del edificio.</i> .....	54
<b>Figura 9.</b> <i>Integración de la estrategia de atrio a un edificio.</i> .....	55
<b>Figura 10.</b> <i>Carta estereográfica de la ciudad de Mexicali, México.</i> .....	57
<b>Figura 11.</b> <i>Variación de tamaño de ventana.</i> .....	59
<b>Figura 12.</b> <i>Distribución lumínica en ventana vertical y horizontal.</i> .....	60
<b>Figura 13.</b> <i>Configuración del área de ventana.</i> .....	61
<b>Figura 14.</b> <i>Transferencia de calor a través de capas de vidrio.</i> .....	62
<b>Figura 15.</b> <i>Tipos de sombreado.</i> .....	64
<b>Figura 16.</b> <i>Bordes de ventanas para la reflexión de la luz solar directa.</i> .....	65
<b>Figura 17.</b> <i>Funcionamiento de una repisa de luz.</i> .....	65
<b>Figura 18.</b> <i>Diferencia de alcance de penetración de luz natural.</i> .....	66
<b>Figura 19.</b> <i>División de persianas.</i> .....	68
<b>Figura 20.</b> <i>Estrategias de iluminación natural de forma cenital.</i> .....	69
<b>Figura 21.</b> <i>Relación de reflexión de muros; vista en planta.</i> .....	70
<b>Figura 22.</b> <i>Visualización de Diseño en Dynamic Daylighting.</i> .....	81
<b>Figura 23.</b> <i>Diagrama de flujo de la metodología aplicada.</i> .....	85
<b>Figura 24.</b> <i>Plano de la unidad de análisis.</i> .....	87
<b>Figura 25.</b> <i>División de zonas en unidad de análisis y posiciones de luxómetro.</i> ..	94
<b>Figura 26.</b> <i>Foto de posición de luxómetros en unidad de análisis.</i> .....	95
<b>Figura 27.</b> <i>Unidad de análisis en programa de simulación Design Builder.</i> .....	99
<b>Figura 28.</b> <i>Programación de simulación en Design Builder.</i> .....	100
<b>Figura 29.</b> <i>Iluminancia medida de unidad de análisis el 22 de mayo de 2022.</i> ..	103

<b>Figura 30.</b> <i>Análisis mensual de iluminancia directa en Mexicali, México.....</i>	108
<b>Figura 31.</b> <i>Días típicos mensuales de iluminancia directa en Mexicali, México..</i>	109
<b>Figura 32.</b> <i>Trayecto solar de días de diseño, caso de estudio y contexto. ....</i>	111
<b>Figura 33.</b> <i>Reflexión de rayos solares, 16 de mayo, 12:00 horas, Norte y Sur. .</i>	114
<b>Figura 34.</b> <i>Reflexión de rayos solares, 16 de mayo, 09:00 horas, Este. ....</i>	115
<b>Figura 35.</b> <i>Reflexión de rayos solares, 16 de mayo, 15:00 horas, Oeste. ....</i>	117
<b>Figura 36.</b> <i>Posición solar, 16 de mayo, 15:00 horas, caso de estudio y contexto. .....</i>	118
<b>Figura 37.</b> <i>Reflectancia 30% y 70%, 28 de enero, 12:00 horas, Norte.....</i>	135
<b>Figura 38.</b> <i>Planta y elevación, caso de estudio y ventanas dobles. ....</i>	138
<b>Figura 39.</b> <i>Planta y Elevación de Configuración de Ventana Horizontal. ....</i>	148
<b>Figura 40.</b> <i>Ventana horizontal: reflexión, 16 de mayo, 12:00 horas, Sur.....</i>	152

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Valores mínimos de factor de luz natural por tipología de espacio. ....	41
<b>Tabla 2.</b> <i>Propiedades de tipos de vidrio.</i> .....	61
<b>Tabla 3.</b> <i>Niveles mínimos de iluminación por espacio o actividad.</i> .....	72
<b>Tabla 4.</b> <i>Relación entre el índice de área y el número de zonas de medición.</i> .....	74
<b>Tabla 5.</b> <i>Relación entre la tipología de edificación y el tamaño de la ventana.</i> .....	75
<b>Tabla 6.</b> <i>Comparación de herramientas de simulación y análisis de iluminación.</i> 78	
<b>Tabla 7.</b> <i>Niveles mínimos de iluminancia considerados por espacio.</i> .....	88
<b>Tabla 8.</b> <i>Estrategias seleccionadas para evaluación en simulación.</i> .....	90
<b>Tabla 9.</b> <i>Metodologías de monitoreo según normativas existentes.</i> .....	92
<b>Tabla 10.</b> <i>Instrumentación utilizada en monitoreo.</i> .....	93
<b>Tabla 11.</b> <i>Ajuste gráfico de mapa reticular de distribución de iluminancia.</i> .....	102
<b>Tabla 12.</b> <i>Cálculo de reflectancia de muros por monitoreo, cielo despejado.</i> .....	105
<b>Tabla 13.</b> <i>Cálculo de reflectancia de muros por monitoreo bajo cielo cubierto.</i> ... 107	
<b>Tabla 14.</b> <i>Características del trayecto solar de los días tipo de simulación.</i> .....	110
<b>Tabla 15.</b> <i>Caso de estudio: iluminancia predominante; día, hora y orientación.</i> .. 113	
<b>Tabla 16.</b> <i>Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.</i> .....	116
<b>Tabla 17.</b> <i>Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.</i> .....	119
<b>Tabla 18.</b> <i>Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.</i> .....	121
<b>Tabla 19.</b> <i>Unidad aislada: iluminancia predominante; día, hora y orientación.</i> ... 122	
<b>Tabla 20.</b> <i>Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.</i> .....	123
<b>Tabla 21.</b> <i>Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.</i> .....	125
<b>Tabla 22.</b> <i>Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.</i> .....	127
<b>Tabla 23.</b> <i>Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.</i> .....	128
<b>Tabla 24.</b> <i>Reflectancia: iluminancia predominante; día, hora y orientación</i> .....	131
<b>Tabla 25.</b> <i>Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.</i> .....	132
<b>Tabla 26.</b> <i>Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.</i> .....	134
<b>Tabla 27.</b> <i>Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.</i> .....	136
<b>Tabla 28.</b> <i>Ventanas dobles: iluminancia predominante; día, hora y orientación.</i> 139	

<b>Tabla 29.</b> <i>Iluminancia predominante por orientación, 16 de mayo, 12:00 horas, caso de estudio y ventanas dobles.</i> .....	140
<b>Tabla 30.</b> <i>Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.</i> .....	142
<b>Tabla 31.</b> <i>Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.</i> .....	143
<b>Tabla 32.</b> <i>Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.</i> .....	144
<b>Tabla 33.</b> <i>Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.</i> .....	145
<b>Tabla 34.</b> <i>Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.</i> .....	146
<b>Tabla 35.</b> <i>Ventana horizontal: iluminancia predominante; día, hora y orientación</i> .....	150
<b>Tabla 36.</b> <i>Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.</i> .....	151
<b>Tabla 37.</b> <i>Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.</i> .....	153
<b>Tabla 38.</b> <i>Iluminancia predominante: caso de estudio y ventana horizontal.</i> .....	155
<b>Tabla 39.</b> <i>Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.</i> .....	156
<b>Tabla 40.</b> <i>Mapa de distribución de iluminancia de caso de estudio.</i> .....	157
<b>Tabla 41.</b> <i>Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.</i> .....	159

## Introducción

La luz natural es un elemento clave en la arquitectura, le da dinamismo a la estructura y noción del paso del tiempo a su interior. Sin embargo, los efectos de su presencia o ausencia, van más allá de los edificios, pues se vinculan directamente al estado fisiológico y psicológico del usuario, así como con su salud y confort visual (Ayoosu, 2020). La importancia del aprovechamiento de la luz natural, parte de la necesidad de redireccionar el diseño arquitectónico, para colocar el bienestar del usuario en el centro y crear espacios saludables y eficientes que consideren el confort visual (Yildiz, 2022).

Dentro del campo temático, existen avances y trabajos que reflejan el grado de influencia que tiene la luz natural en la arquitectura. Estos incluyen la exploración de sus efectos en el ahorro energético y ganancia térmica de los edificios, así como el análisis de su papel en el confort lumínico de los usuarios en espacios interiores.

La presente investigación se enfoca en este último aspecto, a partir de la evaluación de estrategias de iluminación natural para determinar aquellas de desempeño óptimo para el cumplimiento de los niveles mínimos de confort visual en viviendas de regiones áridas.

Lo anterior se logra a partir del desarrollo de un método aplicado al análisis de la simulación de tres estrategias de diseño que incluyen, reflectancia del muro y variación del área de la ventana en dos configuraciones: ventanas dobles y ventana horizontal alta. El método busca la estabilidad de los niveles de iluminación durante dos días de diseño, verano e invierno, a lo largo de tres horarios de evaluación y realiza la valoración de las estrategias para ocho orientaciones, según los niveles de iluminancia predominante y la distribución de porcentajes de área en el espacio; estos criterios cuantitativos delimitan la hipótesis para la valoración de la calidad lumínica ambiental y el alcance de los niveles mínimos de confort visual.

## Resumen

La iluminación natural en la arquitectura es una herramienta de sustentabilidad ambiental, pues crea espacios interiores saludables y cómodos para sus habitantes, al mismo tiempo que reduce el gasto energético de los edificios, sin embargo, a pesar de que la ausencia de la luz natural tiene consecuencias psicológicas y fisiológicas para el usuario, es un recurso desaprovechado en regiones áridas por sus implicaciones térmicas. El objetivo de la investigación es poner en el centro el confort visual al evaluar las estrategias de iluminación natural con base en las necesidades de iluminancia en viviendas de regiones áridas para determinar cuáles son las que presentan un desempeño lumínico óptimo. Para lograrlo se establecieron dos etapas: monitoreo y simulación, el primero para entender las condiciones del caso de estudio y el segundo para analizar el desempeño de las tres estrategias revisadas: reflectancia del muro, configuración de ventanas dobles y ventana horizontal alta. A partir de la simulación se desarrolló la metodología de análisis de los resultados arrojados por Desing Builder y se determinaron los dos criterios principales para la valoración del desempeño lumínico de las estrategias: la iluminancia predominante y la distribución de porcentajes de áreas. Estos conceptos permitieron determinar las estrategias óptimas para el confort visual y son la aportación más importante de la investigación.

**Palabras clave:** Iluminación Natural, Estrategias, Confort Visual.

## **Abstract**

Daylighting in architectural design is a sustainability tool, it creates healthy environments for the users and reduces energy consumption, however, even though its absence has negative psychological and physiological effects, it's a highly wasted resource for buildings in arid regions due to its thermal implications. The goal of this research is to focus on visual comfort and define the optimal daylighting strategies by assessing their performance for residential spaces in arid regions according to illuminance levels. There are two phases to accomplish this objective, the first one is daylight monitoring in site to establish the conditions of the case study, the second one is digital simulation to analyze the performance of the three daylighting strategies: reflectance, window-wall ratio and window height. The data produced by Desing Builder guided and permitted the creation of the evaluation methodology resulting in the two main evaluation criteria: prevailing illuminance and area percentage distribution. These method and concepts for daylighting assessment are the main contribution of the study.

**Key Words:** Daylight, Daylighting Strategies, Visual Comfort.

## **CAPÍTULO I. Planteamiento de la Investigación**

A partir de la revisión de la literatura, se plantea el enfoque del presente trabajo y logra establecer el planteamiento del problema, la justificación del estudio, las preguntas y objetivos de la investigación, así como la hipótesis a comprobar; además se exponen los alcances y limitaciones de la investigación, delimitaciones importantes para entender el marco dentro del que se desarrolla la investigación, justificado por la revisión de los antecedentes.

### **1.1. Planteamiento del problema**

La vivienda es un ambiente complejo formado por un conjunto de espacios con distintos requerimientos. Cubrirlos exitosamente significa el alcance de distintos tipos de confort: acústico, térmico, olfativo, psicológico, visual y lumínico (EADIC, 2013) para los cuales se requiere la solución de diversas necesidades, mismas que responden a la variedad de tareas y actividades que se realizan en cada una de las áreas que componen la vivienda.

Sin embargo, el confort visual y el confort lumínico son enfoques rara vez abordados de manera integral, específicamente en proyectos arquitectónicos en regiones áridas, ya que el confort térmico suele tener prioridad en el estudio y aplicación de estrategias de diseño (Hailu et al., 2021). La iluminación natural es el factor común entre estas clases de confort y su dualidad repercute negativamente en el nivel de aprovechamiento que ha tenido la misma dentro de los espacios arquitectónicos, especialmente en la vivienda (Yu et al., 2020).

Cabe destacar que el confort visual y el confort lumínico son conceptos ligeramente distintos. El confort visual se refiere al bienestar del usuario, inducido por el entorno visual y abarca tanto dimensiones psicológicas, como físicas del confort en sí (Lo Verso et al., 2015); está influenciado por diversas propiedades físicas del contexto, que incluyen: presencia de la luz natural, color de la luz, reproducción del color, distribución de luminancia e iluminancia, presencia de deslumbramiento y la frecuencia de parpadeo del usuario (Rodríguez et al., 2015).

Por su parte, el confort lumínico se centra en el análisis específico de las propiedades físicas de la luz y por ende, en el impacto que tiene la misma en el entorno visual; su objetivo es proporcionar condiciones de iluminación óptimas para los ocupantes y para su valoración, se requiere de la evaluación cuantitativa y cualitativa de parámetros de incomodidad visual, como la cantidad de luz natural, color de la luz, distribución de luminancia, uniformidad de la iluminancia y presencia de deslumbramiento (Iacomussi et al., 2015). Así, se puede entender que la medición del confort lumínico es englobada por la búsqueda del confort visual, por lo que, a pesar de ser conceptos ligeramente diferentes, tienen el mismo objetivo.

La presente investigación aborda el confort visual desde el confort lumínico, y busca alcanzarlo a partir de la evaluación de las estrategias de diseño arquitectónico del espacio, ya que la falta de conocimiento sobre la importancia y el valor de las estrategias de diseño arquitectónico para la iluminación natural, específicamente según sus niveles de iluminancia, repercute de manera negativa en el confort visual de los usuarios y el desarrollo de los espacios, al desperdiciar un vasto recurso natural y crear a la vez otros problemas: de ganancia térmica y gasto energético en el edificio y fisiológicos y psicológicos en el usuario.

La iluminación representa una porción significativa del consumo energético de un edificio; en espacios comerciales puede representar de 40-50% del gasto energético (Vu y Shin, 2016), en oficinas constituye solo un 30%, mientras que en escuelas puede alcanzar hasta un 62% (Suszanowics, 2017). Por su parte, la inclusión de iluminación natural en un espacio puede reducir el consumo de electricidad en un 30-60% (Syed, 2023), y específicamente para edificios en zonas áridas, se ha comprobado que el diseño enfocado en la iluminación natural alcanza a disminuir el consumo anual hasta en un 42% (Dubois et al., 2015).

Con lo anterior se señala el impacto significativo que tiene la iluminación natural en el consumo energético en edificaciones, y se destaca la importancia de la optimización de las estrategias de iluminación que ayuden a alcanzar los objetivos de diseño.

Por otra parte, la incomodidad visual puede traer una variedad de problemas psicológicos y fisiológicos. Una calidad lumínica inadecuada puede ocasionar alteraciones en el patrón de movimiento ocular, afecciones en la pupila, incluso cambios en la actividad cerebral directamente relacionados con altos niveles de estrés (Lin et al., 2015). Otros estudios muestran que la exposición prolongada a ambientes lumínicos inadecuados resulta en fatiga corporal (Lin et al., 2015) y puede ocasionar efectos psicológicos como afecciones en el humor y comportamiento social (Kaushik et al., 2021), disminución en la productividad, aumento en los niveles de estrés y una insatisfacción general con la habitabilidad del ambiente (Gayatri et al., 2020).

Los retos que representa el alcance del confort visual en regiones áridas se atribuyen a distintos aspectos de las condiciones climáticas, como altas temperaturas y radiación solar elevada (Shakhri et al., 2020), ya que esto aumenta la dependencia en sistemas mecánicos para procura el confort térmico, y refuerza la noción de que la luz natural afecta de manera negativa el ambiente interior y el bienestar del usuario (Ayoub y Elseragy, 2017).

Así mismo, como lo plantean Hosseini, et al. (2020), las prácticas de construcción establecidas, tanto por la cultura como por la legislación, no siempre responden a la necesidad de incluir iluminación natural en los espacios y no priorizan el objetivo de alcanzar confort visual, pues los reglamentos se limitan a dictar las condiciones físicas del espacio y un valor general de iluminación según su uso, sin importar la calidad o el origen de la luz.

A partir de lo anterior, se entiende que los retos asociados con el confort visual en regiones áridas abarcan un rango amplio de factores, que incluyen las condiciones climáticas extremas, su vinculación con los sistemas pasivos de confort térmico y los estándares de construcción tradicionales. Abordar estos retos requiere de un acercamiento integral, que abarque el diseño arquitectónico, las consideraciones ambientales, así como prácticas sustentables de diseño y construcción, para procurar así el bienestar lumínico y visual de los habitantes.

Así, la incomodidad visual puede tener implicaciones significativas en la psicología y fisiología de los usuarios de un espacio, al impactar su productividad, niveles de estrés y su bienestar en general. Abordar el área de oportunidad que existe en este campo de estudio a través del entendimiento de los criterios y técnicas para la iluminación natural, la disminución del deslumbramiento y el diseño ambiental, resulta crucial para promover la existencia de espacios que priorizan la salud, confort visual y el bienestar general del usuario.

## 1.2. Justificación

La integración de la iluminación natural en la arquitectura es crucial para crear ambientes interiores visualmente cómodos y saludables, reducir el consumo de energía y contribuir a la sostenibilidad ambiental (Sokól et al., 2019). Se ha demostrado que la iluminación natural impacta positivamente en los ritmos circadianos humanos, la productividad y la salud en general, lo que destaca su importancia en el diseño arquitectónico (Fortuna et al., 2022). Así, la importancia de aprovechar la iluminación natural en la arquitectura radica en su capacidad para crear ambientes interiores de calidad lumínica, eficiencia energética y saludables. (Yildiz, 2022).

Además, los beneficios de lograr un balance entre el confort visual y el confort térmico, alcanzan aspectos, tanto del bienestar humano, como del desempeño del edificio. Específicamente en climas cálidos, la adaptabilidad de las ventanas y estrategias de iluminación natural ha demostrado mejoras en el confort visual de los habitantes de un ambiente al reducir el deslumbramiento y contribuir al balance entre los niveles de iluminancia y la uniformidad de su distribución en el espacio (Ahmed et al., 2023). Así mismo, el estudio del funcionamiento de estrategias como atrios y patios de luz, ha encontrado en el análisis de su desempeño, que logra regular problemáticas térmicas al mismo tiempo que aporta luz natural para el confort visual (Suhendri et al., 2018).

Sin embargo, a pesar de los beneficios fisiológicos, psicológicos, térmicos y energéticos que tiene la incorporación de la iluminación natural en los espacios, esto suele tener un nivel de prioridad secundario frente a otros factores. Esto queda en evidencia cuando se revisa el alcance que tiene el reglamento de edificaciones de la región, en especial si se compara con los avances que han tenido los códigos en otras partes del mundo. Mientras que algunos códigos se limitan a establecer un mínimo de área porcentual destinada a vanos de ventanas (REGEDIFC, 1998), en la unión europea se desarrolló el nuevo estándar de diseño y luz natural EN 17037. En él se establecen, tanto lineamientos de acceso a la luz solar y los respectivos

límites para el deslumbramiento, como el valor que gana la presencia de la visibilidad como un factor de confort y calidad (VELUX Group, 2019).

Así, el aprovechamiento efectivo de la luz natural en un edificio requiere que las estrategias de iluminación, como ventanas, lucernarios y repisas de luz, sean concebidos como parte inicial del diseño arquitectónico de manera integral (Aljawder & El-Wakeel, 2022).

La iluminación natural es un tema estratégico para lograr edificios sostenibles, y es imperativo incorporar la educación sobre iluminación natural en los planes de estudio de arquitectura para preparar a una nueva generación de profesionales con enfoque en el diseño orientado a la iluminación natural (Reinhart et al., 2014). Además, la promoción de métricas de rendimiento de la iluminación natural para la certificación de espacios diseñados con enfoque sostenible, reitera la importancia de aprovechar la iluminación natural en la arquitectura (Kawshalya et al., 2022).

Esta investigación tiene el propósito de promover el diseño arquitectónico con el confort visual como objetivo central, y no como una prioridad posterior al desarrollo de conceptos y propuestas. Esto se propone a través de la utilización de estrategias de iluminación natural como herramientas principales, al seguir su nivel de iluminancia, así como su factor de visibilidad del exterior, para permitir darle prioridad a la experiencia del usuario en el espacio.

Así se establece la importancia de que la integración de estos parámetros sea planeada desde las primeras etapas de bocetaje de cada proyecto, como una parte integral y primordial del proceso de diseño.

### **1.3. Preguntas de investigación**

La pregunta de investigación general rige el enfoque de la investigación, mientras que las preguntas específicas desglosan los cuestionamientos que guían el desarrollo de la metodología de trabajo.

#### **1.3.1. Pregunta General**

¿Cuáles son las estrategias de iluminación natural que, con base en las necesidades de iluminancia en viviendas de regiones áridas, tienen desempeño lumínico óptimo para alcanzar confort visual en los espacios?

#### **1.3.2. Preguntas Específicas**

1. ¿Cuáles son las estrategias de iluminación natural para lograr confort visual?
2. ¿Cómo se caracteriza el desempeño lumínico de las estrategias de iluminación natural en la unidad de análisis?
3. ¿Cómo se evalúa el desempeño lumínico de las estrategias de iluminación natural?
4. ¿Cuáles son las estrategias de iluminación natural con desempeño óptimo para el confort visual en la unidad de análisis?

#### **1.4. Hipótesis**

Las estrategias óptimas de iluminación natural para el confort visual en viviendas de regiones áridas son aquellas que, según las necesidades del usuario, logran conservar un ambiente lumínico con niveles de iluminancia dentro del rango de 200-500 lx en el 40% del espacio, mientras mantienen por debajo del 5% el área correspondiente a valores  $\geq 1000$  lx.

## **1.5. Objetivo de la investigación**

Mientras que el objetivo general responde directamente a la pregunta de investigación, los objetivos específicos determinan de manera puntual el alcance del trabajo.

### ***1.5.1. Objetivo General***

Evaluar estrategias de iluminación natural con base en las necesidades de iluminancia en viviendas de regiones áridas y determinar aquellas de desempeño lumínico óptimo para alcanzar confort visual de los espacios.

### ***1.5.2. Objetivos Específicos***

1. Identificar estrategias de iluminación natural para confort visual.
2. Caracterizar el desempeño lumínico de las estrategias de iluminación natural en la unidad de análisis.
3. Desarrollar un método de análisis y comparación del desempeño lumínico de las estrategias de iluminación natural.
4. Determinar estrategias de iluminación natural con desempeño lumínico óptimo para el confort visual en unidad de análisis.

## 1.6. Alcances y Limitaciones

Los alcances de los estudios que existen actualmente en el ámbito de la iluminación natural, varían según los aspectos considerados en cada uno de éstos; algunos proponen su vinculación con los aspectos energéticos, mientras que otros destacan las variables de confort, y visibilidad (Yu et al., 2020).

De la misma manera, mientras que algunos autores califican la iluminación natural y la visibilidad como variables del confort visual, otros clasifican la visibilidad como una variable de la iluminación natural, misma que tiene el objetivo de lograr el nivel de confort deseado (VELUX Group, 2014).

La presente investigación se centra, dentro del área temática de la arquitectura, en la iluminación natural como tema general. De ella, se explora la variable de iluminancia, como parámetro para la valoración de las estrategias de aprovechamiento de la luz natural en el diseño arquitectónico para el logro de un nivel de confort visual.

Así mismo, se consideran aspectos de normatividad y códigos establecidos, sea de manera local, estatal o nacional; estos se toman como punto de partida en la delimitación de los estándares de diseño para cubrir las necesidades de iluminación de cada espacio en la vivienda según las actividades que se realizan en ellos.

Por su parte, una de las mayores limitaciones de la investigación es que, debido a que la variable de iluminancia es medida puntualmente, su valoración representa en cada uno de sus análisis, según los días, horarios y orientaciones, un caso único con propiedades específicas. Así, para evitar el manejo de más de 250 escenarios, se limitan la cantidad de estrategias evaluadas; esto significa que no se exploran los resultados de la combinación de estrategias o de crear variaciones de sus propiedades.

Además, no se explora la relación entre los niveles de iluminancia y ganancia térmica, pues como se expuso anteriormente, esta relación de variables es actualmente el enfoque principal de estudios de luz natural en regiones áridas.

## 1.7. Antecedentes

El interés por entender la luz natural como recurso es uno de los instintos más antiguos del ser humano, sin embargo, son los distintos enfoques de estudio, los que han dictado el alcance de su aprovechamiento dentro de los espacios arquitectónicos. Así, es la revisión de los antecedentes lo que permite entender la evolución del tema en cuestión, las diferentes variables y metodologías desarrolladas, y lo más importante, el área de oportunidad del tema.

Yu et al. (2020), académicos de la Escuela de Arquitectura de la Universidad Southeast, PR, China, realizaron un artículo de revisión del estado del arte del tema de iluminación natural y su relación con otras variables y métricas, documento en el cual expusieron el estado en el que se encontraba el alcance de los estudios realizados que abordaban la vinculación entre el confort visual a través del uso de luz natural y el confort térmico.

Establecieron que a pesar de que la importancia de esta relación ha sido aceptada entre los estudiosos, el concepto del balance por sí mismo ha sido difícil de definir y expresar, especialmente debido a que, a través de las distintas investigaciones, se han utilizado distintos parámetros, y se han involucrado en diferente medida las variables de energía, confort, temperatura e iluminancia. Sin embargo, tras la revisión de todos los artículos referenciados, y a pesar de la combinación de parámetros, se encontró que una gran parte de las conclusiones no fueron absolutas, debido a la variación climática de los contextos geográficos de los estudios (Yu et al., 2020).

A esta conclusión también llegaron los académicos Shi y Lin (2012) en su revisión del diseño sustentable de sistemas de energía renovable, en la cual incluyeron el análisis de las ventajas y áreas de oportunidad de distintas estrategias de iluminación natural, según su desempeño en su relación con factores como la fenestración, material de construcción, área, tamaño, forma, orientación y posición geográfica, siendo ésta última la que señalaron como uno de los elementos determinantes para el proceso de diseño.

De la misma manera, Zhen et al. (2019) centraron gran parte de su investigación, en la influencia que tienen la latitud y longitud en la que se ubica un proyecto, pues ambos factores influyen directamente en los niveles de iluminancia que se pueden alcanzar dentro del espacio interior. Por lo anterior se concluye que todo proyecto aplicado a una nueva zona geográfica será de gran aporte para el campo de estudio de la iluminación natural.

### **1.7.1. Tipologías evaluadas.**

Das y Paul (2015) determinaron que, además de la ubicación geográfica y las condiciones del cielo, la tipología del edificio y otros factores particulares de los ocupantes influyen en la iluminación natural de los espacios interiores. Esto incluye el comportamiento de los usuarios según su edad, nivel socioeconómico, horario y rutina de trabajo.

Así, un enfoque muy común en los trabajos desarrollados en el campo de la iluminación natural, es el estudio de su aplicación en áreas de trabajo, como fábricas, bibliotecas, escuelas y oficinas. Estas investigaciones suelen tener enfoques en productividad del usuario, y por ende en la influencia que la presencia o ausencia de luz natural tiene en su desempeño físico y mental. Acosta et al. (2019) analizaron un salón de clases tipo, que simularon en distintas ubicaciones geográficas, para analizar el papel que los niveles de iluminancia y reflectancia del contexto tienen sobre la iluminación general de espacio, y el efecto de ésta sobre el ciclo circadiano de los estudiantes.

### **1.7.2. Confort visual.**

El confort del usuario es el factor resultante de considerar el contexto geográfico y las necesidades según el uso del espacio. A pesar de que se puede creer que este resulta un parámetro subjetivo, muchos de los avances en el campo de la iluminación natural han evaluado y vinculado esta variable con métricas cuantitativas, y esta relación ha servido para predecir la eficiencia de las estrategias aplicadas desde el proceso de diseño conceptual de un espacio (Seyed et al., 2020).

Por otra parte, la presencia de luz solar en un espacio implica una conexión con el exterior. Por lo anterior, resulta importante explorar las formas en las que esta relación influye en la percepción y el confort del usuario. Así, se delimita la variable de visibilidad como un parámetro a estudiar.

Shin et al. (2012) introdujeron la variable de visibilidad en el estudio de iluminancia y deslumbramiento. Tras la valoración de la aplicación de instrumentos con 48 sujetos de estudio, encontraron que el tipo de paisaje y la distancia de la misma eran dos factores críticos en la subjetividad de la evaluación del deslumbramiento percibido por el usuario.

Por su parte, Kent y Shiavon (2020) estudiaron la variable de visibilidad y su relación con el observador. En su investigación, destacaron la importancia de la influencia del tipo de paisaje y exploraron la variable de la distancia entre ambos, consideración antes mencionada por Shin et al. (2012). Tras la aplicación de distintos instrumentos y el análisis de resultados, encontraron que las personas prefieren paisajes urbanos distantes y paisajes naturales cercanos.

Anteriormente sólo se le había dado importancia a la distancia del paisaje o a su tipología. Al aplicar esta variación al enfoque al estudio y combinar ambas variables, se encontraron resultados sin precedentes, cuya incorporación en el proceso de diseño significó un cambio importante en la búsqueda del bienestar del usuario.

A pesar de ello, Yu et al. (2020) mantuvieron la conclusión de que, en el estudio de los parámetros de la luz natural, la visibilidad es la variable cualitativa menos estudiada, en la cual se encuentra una de las mayores áreas de oportunidad para investigaciones futuras.

### ***1.7.3. Relación de variables lumínicas.***

La relación de factores más común en el estudio de la iluminación natural es su influencia en la ganancia térmica y cómo se puede reflejar en el gasto energético de los edificios de distintos usos y necesidades (Yu et al., 2020).

Awad y Abd-Rabo (2020) encontraron cómo se relacionan directamente la presencia de la luz natural en un edificio de tipología de alta densidad, con la eficiencia energética según el clima en el que se encuentran, para determinar soluciones y recomendaciones de mejora al diseño del espacio.

En la Universidad de Asiut, Egipto, los académicos Ahmad y Reffat (2018), expusieron el proceso de investigación que llevaron a cabo con el propósito de expandir la cantidad de estrategias de iluminación natural analizadas en el campo de estudio. Este trabajo comparó distintos sistemas aplicados, tanto de manera individual como colectiva, así como en distintas orientaciones de fachadas, para evaluar su desempeño en el logro de un alto nivel de eficiencia energética en edificios, específicamente en el consumo de electricidad de los sistemas de enfriamiento y de iluminación artificial.

Los resultados señalaron exitosamente las estrategias óptimas para el logro de este objetivo central, sin embargo, quedaron ejemplificadas las conclusiones de los académicos Yu et al. (2020), que señalaron la relación de las ganancias térmicas y sus implicaciones energéticas como el enfoque principal en la mayor parte de los estudios sobre iluminación natural, sin considerar el papel de otras variables.

#### ***1.7.4. Estrategias de iluminación natural.***

Cuando se habla de estrategias de iluminación natural, se incluye tanto a las que buscan brindarle mejor nivel de iluminancia al espacio, como aquellas que buscan disminuir la cantidad de luz que se recibe. Así, se identificaron dos enfoques principales en la revisión del estado del arte cuando se habla del análisis y valoración de estrategias de iluminación natural. El primero es el análisis de distintas variables sobre una misma herramienta base: la ventana como estrategia original de iluminación natural.

Liu et al. (2021) estudiaron el efecto de deslumbramiento a través de distintos tipos de ventanas aplicadas a un salón de clases como caso de estudio; analizaron el efecto de la variación de alturas de vanos, formas de ventanas y transmitancia del cristal.

Sepúlveda et al. (2020) exploraron los alcances que las ventanas aplicadas a una habitación tipo podían tener respecto al factor de luz solar y la autonomía de luz natural al mismo tiempo. Encontraron que en el 30% de las combinaciones exploradas, las variables pueden llegar a ser limitantes entre ellas.

Por su parte Lakhdari et al. (2021) revisaron la optimización del diseño de iluminación natural aplicado a un salón de clases, a través de la variable de iluminancia útil de luz solar. En su trabajo encontraron que el tamaño de ventana y la transmitancia del vidrio resultan las variables más relevantes, aunados a la orientación de la fachada en la que se coloquen, pues este factor siempre delimitará de manera diferente las características de mejor desempeño. Así, para la ciudad de Biskra, Algeria, la orientación sur favoreció una relación de tamaño de ventana del 40% con vidrio claro y sombreado horizontal, mientras que para las fachadas este y oeste fue preferible una relación del 60% con sombreado vertical y cristal de alta resistencia.

El segundo enfoque en el que se pueden clasificar los trabajos de evaluación y análisis de estrategias de iluminación natural son aquellos que dirigen su estudio a herramientas específicas. Generalmente estas investigaciones suelen tomar las mismas variables básicas a evaluar sobre las distintas estrategias, sin embargo, enfocan sus esfuerzos a una o dos de ellas por estudio y no al efecto combinado de varias.

Freewan et al. (2014) analizaron las variaciones aplicables a la estrategia de pozos de luz como acciones de optimización para la distribución de niveles de iluminancia de entre 100 y 300 luxes en edificios de alta densidad. A través de la simulación en el programa Radiance, concluyeron que, en su contextualización geográfica en Irbid, Jordán, los pozos de luz elevaban eficiencia al aplicar una sección escalonada con un colector vertical en su parte superior.

Manzan y Clarich (2017) evaluaron y optimizaron el sistema de sombreado fijo aplicado a una ventana de un edificio de oficinas, y lo combinaron con el uso de persianas interiores. A través del programa Dayism, estimaron el consumo de energía vinculado a la luz artificial según la distribución de la luz natural.

Zayed. et al. (2018) realizaron una evaluación de las persianas como estrategia de control de luz natural para edificios de oficina con una relación de tamaño de ventana del 100%, con el fin de alcanzar mejor desempeño lumínico en las áreas centrales de las construcciones. Específicamente tenían el objetivo de encontrar la inclinación ideal según cada estación del año, fueran colocadas en el interior o en el exterior del edificio. Según su análisis y sus hallazgos, para el solsticio de invierno la inclinación ideal es de 62°, para los equinoccios es de 58°, y para el solsticio de verano de 52°-56°.

Day et al. (2019) evaluaron la relación entre tres estrategias de iluminación natural aplicadas, y la forma en la que se percibía su influencia en la productividad de los usuarios de los edificios. Entre las estrategias evaluadas se encontraban persianas automatizadas, polarizado electro cromático y *roller shades*. A través de la aplicación de un instrumento de evaluación a más de 1,000 sujetos, se encontró que aquellos usuarios que declaraban mayor productividad y mayor nivel de satisfacción con su trabajo lo correlacionaron con su acceso a la luz natural, además de la interconexión que tuvieron estos datos con su ubicación en el perímetro del edificio y no en el centro. Además, se destacó la importancia de la posibilidad de controlar la intensidad de luz solar y su presencia en el espacio según las actividades y la hora del día.

Shi y Tablada (2020) analizaron la aplicación y el desempeño de fachadas dinámicas. Para esta valoración se consideraron cuatro parámetros: movimiento, tamaño del patrón, transmitancia del elemento y eje de movimiento. El trabajo encontró que la aplicación de fachadas dinámicas puede reducir el consumo de energía hasta en un 20%. Así mismo, se determinó que el tipo de movimiento óptimo es del de rotación para cualquiera de las cuatro orientaciones.

Por su parte, el 2021 fue un año en el que se hizo evidente el avance y crecimiento del interés por la iluminación natural y sus estrategias aplicables. Rastegari et al. (2021) evaluaron los niveles de iluminancia y autonomía de la luz natural logrados al aplicar distintas modificaciones al diseño de un atrio para un edificio de oficinas. A partir de la variación de la altura y medida de apertura en

relación con el área total del techo, encontraron que con una altura de 0.50m y una relación de 1, se obtuvieron los mejores niveles de las variables objetivas.

El análisis específico del vidrio utilizado es un tema constante de evaluación, por lo que Davila y Fiorito (2021) analizaron distintas variaciones de vidrios grabados con ranuras en distintas separaciones, grosores e inclinaciones. Durante el proceso se encontró que el sistema de paneles grabados por sí solo no era suficiente para aumentar el nivel de iluminancia sin aumentar el riesgo de deslumbramiento. Esto llevó a los académicos a convertir el estudio en el análisis de un sistema combinado, añadiendo una estrategia secundaria de persianas internas. Este cambio permitió encontrar los resultados concluyentes, donde se logró un alto nivel de inclusión de luz natural (68%) y se disminuyó el riesgo de deslumbramiento, especialmente en comparación con la opción previa a la estrategia secundaria.

Por su parte, Eltaweel et al. (2021) estudiaron las opciones de optimización para un sistema automatizado de persianas. Analizaron la influencia del tamaño, forma y material de la estrategia aplicada a una oficina en la ciudad de El Cairo, Egipto. El estudio encontró que reducir el tamaño de las persianas a 2.5cm y modificando su curvatura se puede aumentar el aprovechamiento de la luz natural en el interior de los espacios en un 5% dentro de los niveles de iluminancia objetivos, al mismo tiempo que disminuyen la probabilidad de deslumbramiento.

Freewan continuó su investigación sobre otras estrategias de iluminación natural, y junto con Dalala (2020) evaluaron el desempeño en iluminancia, uniformidad y consumo de energía de distintas estrategias de iluminación natural encontradas en el caso de estudio en un salón de clases. Entre ellas se encontraron la repisa de luz, los sistemas anidólicos, materiales traslúcidos y sistemas de combinación de los mismos. Así, Freewan et al., (2020) encontraron que la repisa de luz, el sistema anidólico y la forma y distribución específica de las ventanas, tuvieron el mejor desempeño lumínico en todo el salón, especialmente respecto a las áreas más alejadas, y se logró reducir el consumo de energía por luz artificial en un 50%.

Existe una serie de trabajos enfocados a la valoración de estrategias de diseño para regular la iluminación natural de los espacios. Sin embargo, los estudios en la revisión del estado del arte se enfocan en la evaluación u optimización de una sola estrategia por sí sola, y rara vez se exploran las posibilidades que brinda su uso combinado. Así mismo, la mayoría se centran en variables cuantitativas a través de valoraciones de iluminancia o ganancia térmica, pocos involucran en un mismo estudio la visibilidad como factor cualitativo.

Es por ello que el presente trabajo busca tomar las áreas de oportunidad identificadas y realizar una evaluación del desempeño individual de las estrategias de iluminación a partir de la medición de la iluminancia; el alcance de los niveles mínimos de confort de esta variable es determinante para determinar la eficiencia y efectividad con la que el diseño del espacio procura la comodidad del usuario.

## CAPÍTULO II. Marco Teórico

Al revisar el estado del arte del tema de estudio, se reconocen variables y parámetros clave, tales como confort, iluminancia, energía, entre otros, así como la relación entre ellos. Esto permite establecer una estructura lógica de la evolución de los conceptos para su óptimo entendimiento.

### 2.1. Luz Natural, Variables y Parámetros

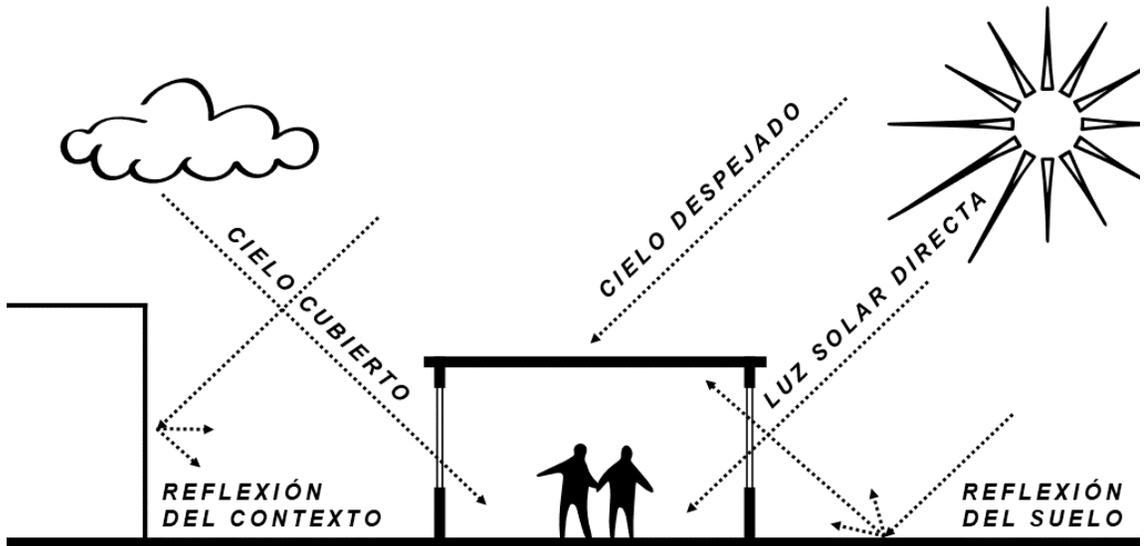
Según se define en el libro básico de luz natural, energía y clima interior (VELUX Group, 2014), se entiende como luz natural a la combinación de toda la luz, directa e indirecta, originaria del sol durante el día. La luz visible es una región del espectro electromagnético cuyas ondas tienen una longitud que va desde el rojo al violeta; esta pequeña extensión del espectro es la energía que percibe el ojo humano y permite ver los objetos.

Así, la luz natural es una fuente luminosa que cubre todo el aspecto visible, la cual proporciona un rendimiento de colores perfecto, con variaciones de intensidad, color y distribución de luminancias; la fuente luminosa se reconoce compuesta por tres fuentes principales: el haz directo del sol, la luz difusa del cielo, y la luz procedente de reflexiones del suelo y los objetos del entorno como se observa en la Figura 1. *Fuentes de luz natural*. (Meneses, 2016).

#### 2.1.1.1. Trayectoria solar: Azimut y Altitud

Se le denomina azimut al ángulo medido en el plano horizontal en el que se ubica en un determinado momento cualquier cuerpo celeste, es decir, se refiere a la dirección del mismo (Lechner, 2015). El azimut toma el Norte como punto de partida, le asigna el valor de  $0^\circ$ , y avanza en dirección de las manecillas del reloj; bajo esta descripción se entiende que el Este tiene un azimut de  $90^\circ$ , el Sur de  $180^\circ$  y el Oeste de  $270^\circ$ .

**Figura 1.** Fuentes de luz natural.



*Nota.* Elaboración propia, adaptado de Lechner, 2021, Heating, Cooling, Lighting - Sustainable Methods for Architects.

La altitud se refiere al ángulo medido en el plano vertical en el que los rayos del sol llegan a la superficie; esta varía según la hora del día, temporada del año y latitud geográfica. De la altitud depende la cantidad de radiación y luz solar que recibe un determinado lugar en la tierra, y esto determina directamente el clima y las estaciones del año (Lechner, 2015).

Al camino que forma el conjunto de azimut y altitudes del sol en un determinado día y a lo largo del año se le denomina trayectoria solar (Lechner, 2015). A partir del entendimiento de esta relación se puede determinar la disponibilidad de luz natural, para así aprovechar de manera eficiente la presencia o ausencia de la misma en los espacios arquitectónicos.

### **2.1.1. Luz Natural y Confort del Usuario**

La luz natural tiene una gran influencia e importancia en la regulación y el balance de dos de los sistemas humanos principales, el sistema nervioso y el sistema endócrino. Se ha comprobado que ambos sistemas tienen una vinculación indiscutible con la percepción de la luz solar, a través de las células del ganglio retinal (VELUX Group, 2014).

#### **2.1.1.1. Impactos Fisiológicos.**

El reloj biológico o ciclo circadiano, es un ritmo de 24 horas que tiene un gran impacto en el bienestar fisiológico humano (VELUX Group, 2014). Según lo menciona el Comité Español de Iluminación (2005), en un ambiente natural, la luz percibida de manera ocular sincroniza el reloj corporal con el ciclo de luz/obscuridad de 24 horas. Este influye en los ciclos de sueño, el nivel de alerta y patrones de desempeño, así como la temperatura interna y la producción de hormonas como la melatonina y el cortisol (como lo cita el VELUX Group, 2014).

En la ausencia total de luz natural, éste inicia un funcionamiento autónomo que dura 24 horas y 15 minutos, suceso que ocasiona un desvío paulatino del curso contextual, lo cual puede traer consigo señales de fatiga, desorientación, dolor de cabeza y dolor estomacal (CEI et al., 2005). Para poder alinear el ciclo circadiano, la luz natural es la mayor y más importante señal percibida, pues ésta no es solo un estímulo visual, sino una experiencia sensorial que afecta y regula muchos más aspectos de la salud y bienestar humano (Fortuna et al., 2022).

#### **2.1.1.2. Impactos Psicológicos.**

De la misma manera, el estado de ánimo es el reflejo de las sensaciones de una persona. Factores que influyen en este incluyen tanto el clima y las estaciones del año, como las condiciones y entorno visuales, aspecto en el cual entran la cantidad, calidad y color de la iluminación, así como la visibilidad y conexión con el exterior.

Los efectos que una iluminación inadecuada o falta de luz natural pueden tener en el usuario incluyen problemas de sueño, fatiga, motivación reducida, entre otros (CEI et al., 2005). Mientras que la inclusión de la iluminación natural en espacios interiores ha sido asociada con mejoras en el estado de ánimo, el nivel de la moral, disminución de la fatiga, así como un proceso de aprendizaje más rápido y eficiente (VELUX Group, 2014).

### **2.1.1.3. Iluminación Natural y Confort Lumínico.**

Como lo cita el VELUX Group (2014), se define como iluminación natural al uso controlado de la luz natural en las edificaciones a través de ventanas y superficies reflectantes para distribuir la luz dentro de los espacios. Ésta se compone de una combinación de luz solar directa, luz difusa del cielo y luz reflejada del suelo y los objetos de alrededor. El objetivo principal de la iluminación natural es proveer de la luz necesaria a un espacio, al utilizarla como fuente única o principal, especialmente durante el día.

Se ha comprobado que los seres humanos son capaces de percibir y experimentar la cantidad, variación y composición de la luz natural en un espacio. Así, si la iluminación de un espacio es inadecuada o insuficiente, ésta influirá en el desempeño, salud y bienestar de los usuarios (VELUX Group, 2014), por lo que el confort visual se define como la condición subjetiva de bien estar visual inducida por el entorno.

### **2.1.2. Iluminancia y Deslumbramiento**

Dentro de los factores de iluminación, se distinguen principalmente la iluminancia y su papel en el deslumbramiento. El Grupo VELUX (2014) define iluminancia como la medida de la cantidad de luz que recibe una superficie, medida en luxes. La iluminancia y su distribución en el espacio interior tienen un gran impacto en cómo una persona percibe su entorno y realiza sus tareas de un modo rápido, seguro y confortable (CEI et al., 2005).

El deslumbramiento es la sensación, calificada como molesta o perturbadora, producida por áreas brillantes dentro del campo de visión (Meneses, 2016), la cual ocasiona incomodidad o reducción en la capacidad para distinguir detalles u objetos. Esto sucede ya que el ojo humano se adapta a la fuente más brillante, y desenfoca el contexto, lo cual ocasiona problemas para reajustar la vista al ambiente en el que se encuentra. Así, la sensación de deslumbramiento ocurre cuando la variación de iluminancia varía de 20:1 a 40:1 (IESNA, 2000).

Se entiende pues que el deslumbramiento es un fenómeno que sucede según la relación de la fuente de luz y su contexto, pues depende no solo del brillo real de la fuente de luz, sino del brillo aparente según los elementos que la rodean, así como de la geometría del espacio y la posición del observador en relación a dicha fuente de iluminación (Lechner, 2015). Es por ello que los niveles de iluminancia y procurar el alcance de un ambiente balanceado es importante, pues evita la generación del fenómeno de deslumbramiento como sensación de incomodidad.

### **2.1.3. Luminancia**

La percepción de brillo se relaciona con la luminancia de un objeto, la capacidad de adaptación de la pupila del observador y el destello de los objetos adyacentes a la fuente (Lechner, 2015). La luminancia, que se refiere a la medida de la cantidad de luz percibida que refleja o emite una superficie, y se mide en candela por metro cuadrado ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ) (VELUX Group, 2014). Así, a diferencia de la iluminancia, que mide una característica de la fuente de luz en relación a su espacio, la luminancia mide una característica del espacio y los objetos en él en relación a la fuente de luz.

Según lo establece el Comité Español de Iluminación “La distribución de luminancias en el campo de visión, ya sea debida a la luz natural o artificial, condiciona el nivel de adaptación del ojo, lo que afecta a la visibilidad de la tarea.” (CEI et al., 2005). Así, la luminancia es un parámetro que se vincula con el efecto de deslumbramiento, y debe ser considerada cuando se habla de confort visual.

#### **2.1.4. Factor de luz natural (Daylight Factor)**

La disponibilidad de la luz natural varía según la ubicación geográfica, debido a diferentes patrones solares y condiciones meteorológicas a lo largo del día, las estaciones y el año. Es por esto que los métodos para medir la disponibilidad de luz natural se basan en valores relativos, y no en valores absolutos (Gherri, 2015).

La razón entre los niveles de iluminancia exterior e interior bajo un cielo nublado, define la eficiencia del diseño para introducir la luz natural a un espacio (Lechner, 2015). El Comité Español de Iluminación (CEI) define esta relación como factor medio de luz natural o factor de luz día (2005).

$$DF = \left( \frac{E_{\text{interior}}}{E_{\text{exterior}}} \right) 100\% \quad (1)$$

Donde:

DF= Factor de luz natural

$E_{\text{interior}}$ : Iluminancia interior media

$E_{\text{exterior}}$ : Iluminancia exterior

Es importante destacar que este factor sólo es válido bajo la consideración de las características de un cielo nublado o cubierto, ya que representa los menores niveles de disponibilidad de luz natural; además esta clasificación es considerada como la única bajo la cual el nivel de iluminación es independiente de los efectos de la orientación y de la posición del sol (CEI, 2005).

Lechner, N. (2021) y el Comité Español de Iluminación (2005), establecen que para que se considere que un espacio está iluminado por luz natural, el factor de luz día debe ser de 5% o más. Los valores mínimos pueden variar según la tipología del espacio y las actividades que en él se realicen, según lo establece la Tabla 1.

Así, debido a la variación diaria y horaria de la luz natural, la comparación de mediciones puntuales en distintos periodos del día no es tan representativa para la evaluación de la eficiencia de estrategias de diseño, como lo es la comparación de la variación del factor de luz natural.

**Tabla 1.** Valores mínimos de factor de luz natural por tipología de espacio.

<b>Tipo de espacio</b>	<b>Factor de luz natural (DF)</b>
<b>Estudios de arte, galerías</b>	4-6
<b>Fábricas, laboratorios</b>	3-5
<b>Oficinas, salones de clases, gimnasios, cocinas</b>	2
<b>Vestíbulos, salas de estar, iglesias</b>	1
<b>Pasillos y habitaciones</b>	.5

*Nota.* Adaptado de Lechner, (2021, p.409).

### **2.1.5. Tipos de cielo**

La distribución lumínica del cielo depende directamente del clima, y cambia durante el curso del día según la posición del sol. A pesar de que las condiciones del cielo son variables a lo largo del día y del año, considerar las propiedades de los escenarios críticos resulta de vital importancia para el diseño de iluminación natural de un espacio.

La Comisión Internacional de Iluminación o CIE por sus siglas en francés, es una organización sin fines de lucro que se enfoca en el desarrollo técnico y científico para la investigación del campo de la iluminación, con el fin de promover foros de discusión, divulgación de información, así como alcanzar y establecer estándares para la valoración del campo lumínico que influyen en las normativas nacionales e internacionales, inclusive las normas ISO (CIE, 2023).

Así, se reconoce a la CIE como el cuerpo académico y de desarrollo de investigación que determina las propiedades y características de los tipos de cielo, su distribución de luminancia, estandarización y clasificación en dos clases principales: cielo nublado o cubierto y cielo claro o despejado; partir de esto, se desarrolla la norma CIE S011/E:2003 y se refleja en el estándar ISO 15469:2004, versión revisada que sigue vigente.

El CIE S011/E:2003 reconoce 15 tipos de cielo generales que representan distintas condiciones climáticas y su influencia en las características del cielo y la disponibilidad de luz solar directa a partir de cinco coeficientes: gradiente del horizonte-cenit, intensidad del gradiente, intensidad circumsolar, radio circumsolar y efecto de retrodispersión. Existe un décimo sexto tipo de cielo basado en un modelo matemático simplificado aplicado a la tipología nublado-cubierto (Andrew Marsh, 2022).

#### **2.1.5.1. Cielo Nublado o Cubierto.**

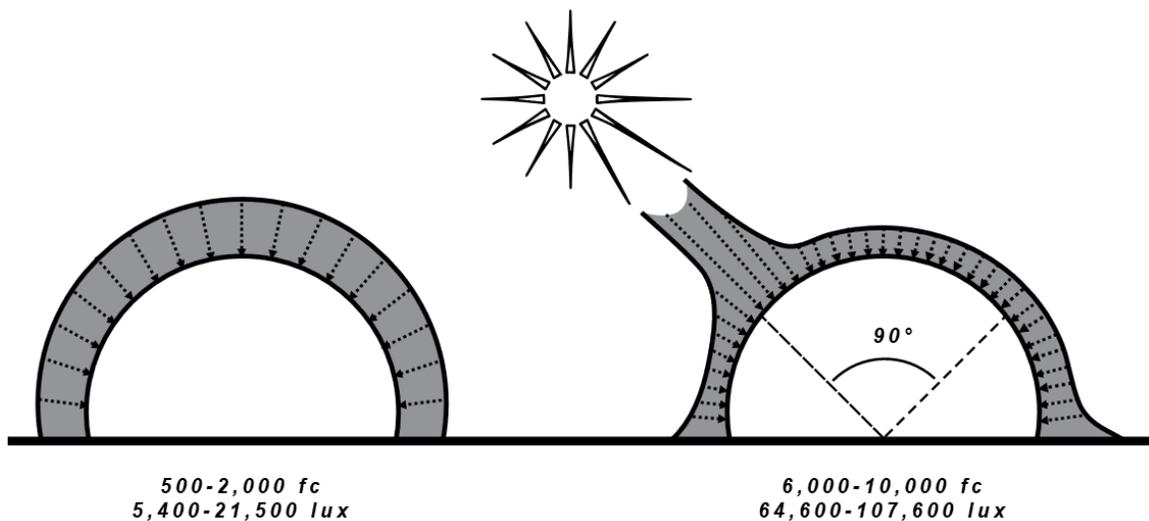
De manera general, se considera que un cielo nublado o cubierto alcanza niveles de iluminancia entre los 5000-20,000 lux (CIE, 2003). Las condiciones de cielo cubierto establecen que la iluminancia en el horizonte es solo un tercio del total del cenit, por lo cual, los espacios iluminados con tragaluces o túneles de luz, recibirán una mayor cantidad de luz natural (CEI, 2005). Así, la mayor dificultad de diseñar un espacio con iluminación natural al considerar un tipo de cielo cubierto, es la cantidad de luz natural disponible.

#### **2.1.5.2. Cielo Claro o Despejado.**

Por su parte, un cielo claro o despejado alcanza valores de hasta 100,000 lux, y los mayores niveles de iluminación se encuentran cerca del trayecto solar, por lo que las partes del cielo más oscuras se encuentran de manera opuesta a 90° de la orientación del sol (CIE, 2003) según se muestra en la Figura 2. En el caso del hemisferio norte, esto representa mayores niveles de iluminancia en la orientación sur, y menores niveles al norte de los edificios.

Las condiciones de cielo claro o despejado conducen a que los espacios iluminados lateralmente, con orientación al sur, este y oeste, recibirán la mayor cantidad de luz natural (CEI, 2005). Así, la mayor dificultad de diseñar un espacio con iluminación natural al considerar un tipo de cielo claro es la implicación de la luz natural directa, que además de ser la más brillante y la más propensa a causar deslumbramiento y ganancias de calor, cambia constantemente su dirección. Por ello que bajo estas condiciones es necesario entender y considerar la geometría solar vinculada a la ubicación geográfica en la que se emplaza el edificio.

**Figura 2.** Disponibilidad de luz solar según el tipo de cielo.



*Nota.* Elaboración propia, adaptado de Lechner, 2021, Heating, Cooling, Lighting - Sustainable Methods for Architects.

Sin embargo, las condiciones del cielo no son las únicas que definen o afectan la cantidad de luz natural disponible y aprovechable. Como lo establece el Comité Español de Iluminación en el manual de aprovechamiento de luz natural, “en climas muy contaminados y relativamente húmedos, el cielo claro es una fuente de luz muy importante; en climas secos y cálidos el cielo es de un azul más oscuro y las fuentes principales de luz (aparte del propio sol) son a menudo el terreno y los edificios circundantes” (CEI, 2005).

### **2.1.6. Autonomía de luz natural (*Daylight Autonomy*)**

La autonomía de la luz natural se refiere al porcentaje de horas anuales en las que un espacio o punto en el espacio recibe y mantiene un nivel de iluminancia óptimo, según el uso o tarea que se realiza en el mismo. A diferencia del factor de luz natural, el factor de autonomía no considera el tipo de cielo en un día específico, sino el dato anual del total de horas de luz natural disponibles para ser aprovechadas en un espacio (Bian, Y., y Ma, Y., 2016).

La Sociedad de Iluminación de Ingeniería de Norteamérica (IESNA) desarrolló en el 2000 un manual de iluminación en el cual, entre otros aspectos, establecen valor objetivo de esta relación de parámetros señala un nivel de iluminancia de 300 lux con una autonomía del 50%, lo cual representa que, durante la mitad del tiempo, generalmente en el periodo de las ocho de la mañana a las seis de la tarde, y al menos en el 50% del espacio, los niveles de iluminación son iguales o están por encima de la cantidad de luxes ideales (ASHRAE, 2017).

#### **2.1.6.1. Iluminancia útil (*Useful Daylight Illuminance*).**

La iluminancia útil o UDI por sus siglas en inglés, es una métrica derivada de la autonomía de la luz natural, que corresponde al porcentaje de horas de ocupación de un espacio en los que se alcanza un nivel de iluminancia específico. Según lo menciona el VELUX Group (2014), algunos estándares ingleses establecen un nivel de UDI de 100-3,000 lux del 80% de las horas de ocupación en aulas escolares.

### **2.1.7. Reflectancia y Transmitancia**

La luz que cae sobre un objeto puede ser reflejada, transmitida o absorbida. El factor de transmitancia se refiere a la relación entre la cantidad de luz que recibe un objeto y la cantidad que transmite o deja pasar a través de él. Un material transparente dejará pasar casi el total de la luz recibida, mientras que un material con transmitancia baja la distribuye de manera difusa (Lechner, 2015).

El factor de reflectancia (RF) indica la relación entre la cantidad de luz que recibe un objeto y la cantidad que es reflejada al ambiente. Éste se refiere solo a la cantidad y no a la forma en la que se refleja la luz. Los colores claros tienen un factor de reflectancia cercano al 1, mientras que los colores oscuros tienen un factor cercano al 0; las superficies brillosas o suaves como los espejos, reflejan la luz casi con el mismo ángulo de inclinación que la reciben, mientras que superficies con acabados mates o rugosos la dispersan. Así, Meneses (2015) plantea que existen tres tipos de efecto de reflexión de los materiales: difusa, especular y mixta o lustrosa.

#### **2.1.7.1. Reflexión Difusa.**

Debido a la rugosidad de la superficie, la luz es reflejada en todas las direcciones; se observa generalmente en superficies granulosas, como el concreto rústico, el estuco y el ladrillo.

#### **2.1.7.2. Reflexión Especular.**

Presente solo en superficies reflejantes, se refiere al fenómeno ante el cual el rayo de luz incidente en el material, es reflejado con el mismo ángulo con respecto a la superficie; se observa en espejos, superficies pulidas y algunos metales.

#### **2.1.7.3. Reflexión Mixta o Lustrosa.**

Se refiere a la reflexión que es mayormente especular, reflejando en mayor medida el rayo de luz incidente hacia el mismo ángulo exterior debido a las propiedades del material, sin embargo, debido a que no es completamente reflectante, la superficie circundante produce un efecto de reflexión difusa.

#### **2.1.8. Visibilidad**

Cuando se habla de visibilidad se hace referencia al acceso que tiene el usuario a una vista al exterior, misma que considera la calidad de esta conexión; esto incluye tanto las características del acristalamiento, como las propiedades de la vista o paisaje en sí (VELUX Group, 2014).

A pesar de que esta variable ha resultado difícil de medir (Yu et al., 2020) algunos datos y conclusiones han podido ser reconocidas y determinadas en los

estudios realizados. Distintos estudios y evaluaciones han comprobado que el ser humano prefiere un paisaje natural a uno artificial, y una vista amplia y distante a una estrecha y cercana. Así mismo, el dinamismo es apreciado y percibido como más interesante por los usuarios, en comparación con un paisaje estático y monótono (Boyce et al., 2013).

Cabe mencionar que existen algunos requisitos y regulaciones que delimitan algunos puntos sobre la visibilidad del exterior. Algunos países establecen estándares para el tamaño del área de los vanos según el área de cada habitación, generalmente a partir de una razón o porcentaje WWR o WFR. En México, la Comisión Nacional de Vivienda (2017) desarrolla el Código de Edificación de Vivienda en el cual establece que el área de ventana no debe ser menor al 15% del área de piso del espacio habitable a iluminar; para la ciudad de Mexicali se determina un 10% del área de la habitación, este valor final puede reducirse en un 50% si esta ventana se encuentra en la fachada orientada al poniente (Ayuntamiento de Mexicali, 2017).

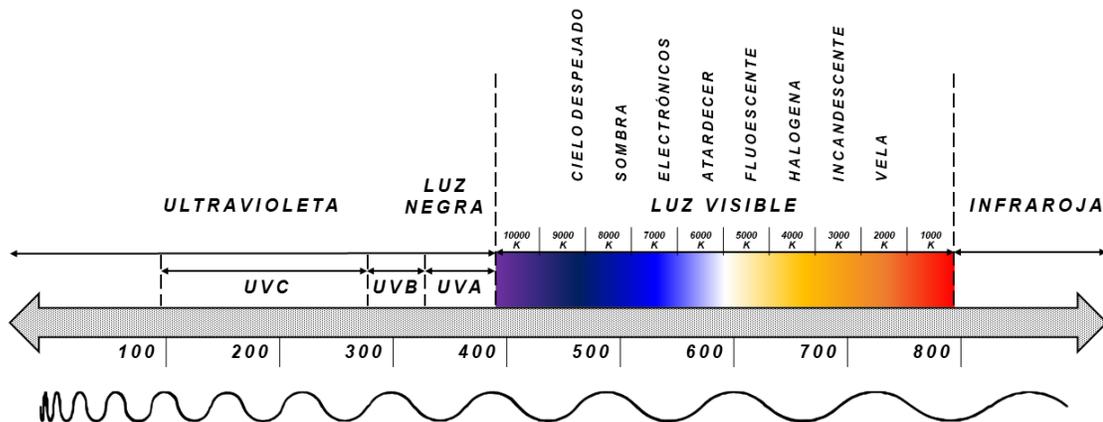
Existen también certificaciones que ya incluyen este parámetro como parte de sus criterios a evaluar, como la certificación de liderazgo en diseño de energía y medio ambiente, mejor conocido como LEED. Dentro de sus lineamientos, incluyen un apartado de luz natural y visibilidad, en el cual delimitan que en un 90% de las áreas ocupadas de un edificio, debe establecerse una conexión visual directa con el exterior a una altura mínima de 0.80 metros sobre el nivel de piso terminado (USGBC, 2021).

Como se menciona en la guía técnica de aprovechamiento de la luz natural en la iluminación de edificios, “Un factor emocional muy importante es el contacto visual con el exterior” (CEI et al., 2005). Así, los edificios deben diseñarse para satisfacer la necesidad humana de tener una vinculación con la naturaleza y el entorno. (VELUX Group, 2014).

### 2.1.9. Relación de la Luz Natural y la Ganancia Térmica

La luz natural aprovechable se compone de tres elementos: el haz proveniente del sol, la luz difusa de la atmósfera y la procedente de reflexiones del suelo y el entorno y toda luz, sea natural o artificial es energía radiante que se convierte en calor, por lo que su presencia aporta una ganancia térmica. Sin embargo, al mismo nivel de iluminación, luz de distintas fuentes puede contribuir una distinta cantidad calor debido a la proporción de radiación infrarroja en su composición según su posición en el espectro, como se observa en la Figura 3. *Espectro de luz..* Así, se define como luz fría a aquella cuya proporción de luz-calor implica un menor aporte de energía térmica al espacio (Lechner, 2015).

**Figura 3.** *Espectro de luz.*

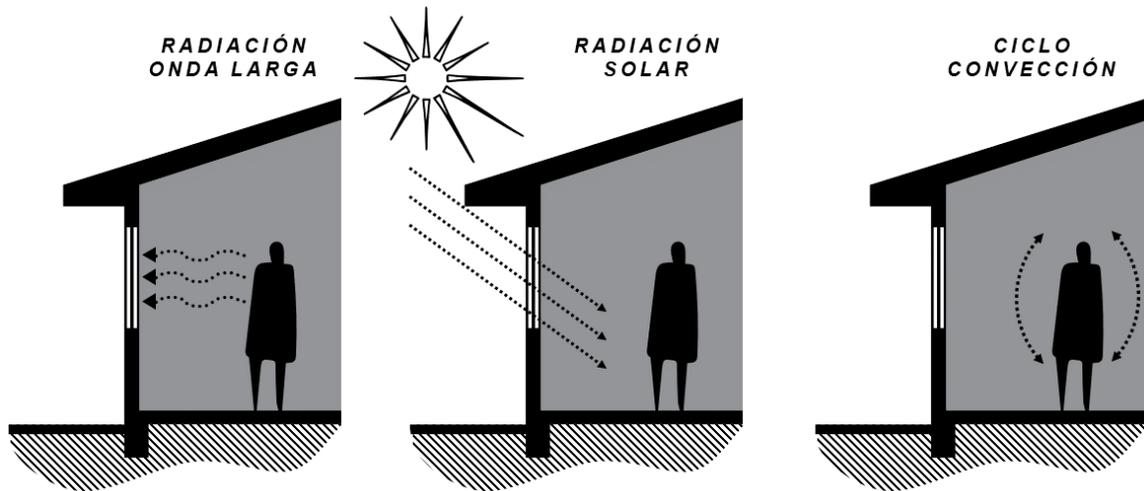


*Nota.* Elaboración propia, adaptado de Lechner, 2021, Heating, Cooling, Lighting - Sustainable Methods for Architects.

Así, la fenestración influye en el confort térmico del usuario en un espacio a través de una combinación de tres mecanismos: el intercambio de radiación de onda larga, la absorción de radiación solar y el ciclo de convección interior del espacio (ASHRAE, 2021) como se muestra en la Figura 4.

La temperatura interior del acristalamiento de las ventanas depende directamente de las condiciones climáticas del ambiente exterior, y esta temperatura afecta significativamente el intercambio radiante entre el usuario y el espacio interior. Si este aumento o disminución en la temperatura general del ambiente traspasa los valores admitidos, se rompe el confort (ASHRAE, 2021).

**Figura 4.** Radiación térmica a través de las ventanas.



*Nota.* Elaboración propia, adaptado de Lechner, 2021, Heating, Cooling, Lighting - Sustainable Methos for Architects.

A partir de esta distinción, se reconoce que la luz natural aporta menos calor que la artificial, y de la misma manera, la luz natural difusa, como la reflejada por las nubes y el cielo implica menos ganancia térmica que la directa, con una diferencia de 40 lúmenes/watt. Por lo anterior, la luz cálida es ideal para el aprovechamiento dentro de edificios, especialmente los emplazados en regiones áridas (Lechner, 2015).

#### **2.1.9.1. El Color de la Luz.**

La empresa TCP (2023) describe que, para un mayor entendimiento de la relación entre la temperatura de la luz y su color, se puede tomar el ejemplo cuando se calienta un metal, dependiendo del nivel de calor se ve de un color en específico; según la escala en grados Kelvin de la temperatura del color, esta variación se

clasifica de menor a mayor temperatura como cálida o fría y toma tonos rojizos, amarillos y blancos o azules respectivamente. Así, la luz fría es la que aporta mayor temperatura al espacio.

**Luz Cálida.** Se clasifica en este extremo de la escala, a la que se encuentra entre valores de 2000K a 3000K. Suele tener tonos rojizos o amarillos, que son ideales para la apreciación de tonos de piel y ropa, por ello, es común encontrar este tipo de iluminación en espacios de descanso como recámaras y estancias (TCP, 2023).

**Luz Fría.** Se encuentra entre los 3100K y 4500K, contiene tonos blancos o azules y genera mayor contraste visual, por lo que suele ser ideal para áreas de trabajo y tareas de enfoque, así como baños o cocinas (TCP, 2023).

## **2.2. Criterios de Diseño**

El Comité Español de Iluminación (2005), establece que el aprovechamiento de la luz natural para la iluminación de un espacio interior debe tener dos objetivos principales: facilitar la orientación del usuario en la sensación del paso del tiempo y responder adecuadamente a las necesidades de las actividades a realizar en el espacio.

Por su parte, Lechner, N., (2021) propone ciertas reglas para la iluminación natural de un espacio interior, que se resumen en las necesidades ambientales para periodos de temperaturas extremas. En época de verano, se busca capturar suficiente luz natural para sustituir el uso de la artificial, al mismo tiempo que se busca evitar la ganancia térmica en el espacio. Sin embargo, en el invierno se busca captar la mayor cantidad de luz natural posible por la mayor cantidad de tiempo, para aprovechar no solo la iluminación sino el aporte de calor al espacio.

Es a partir de estas necesidades que se delimitan metas específicas que las estrategias de iluminación natural deben lograr. Las principales son llevar la luz natural a las partes más adentradas del edificio, evitar el deslumbramiento y crear iluminación difusa (Lechner, N., 2021).

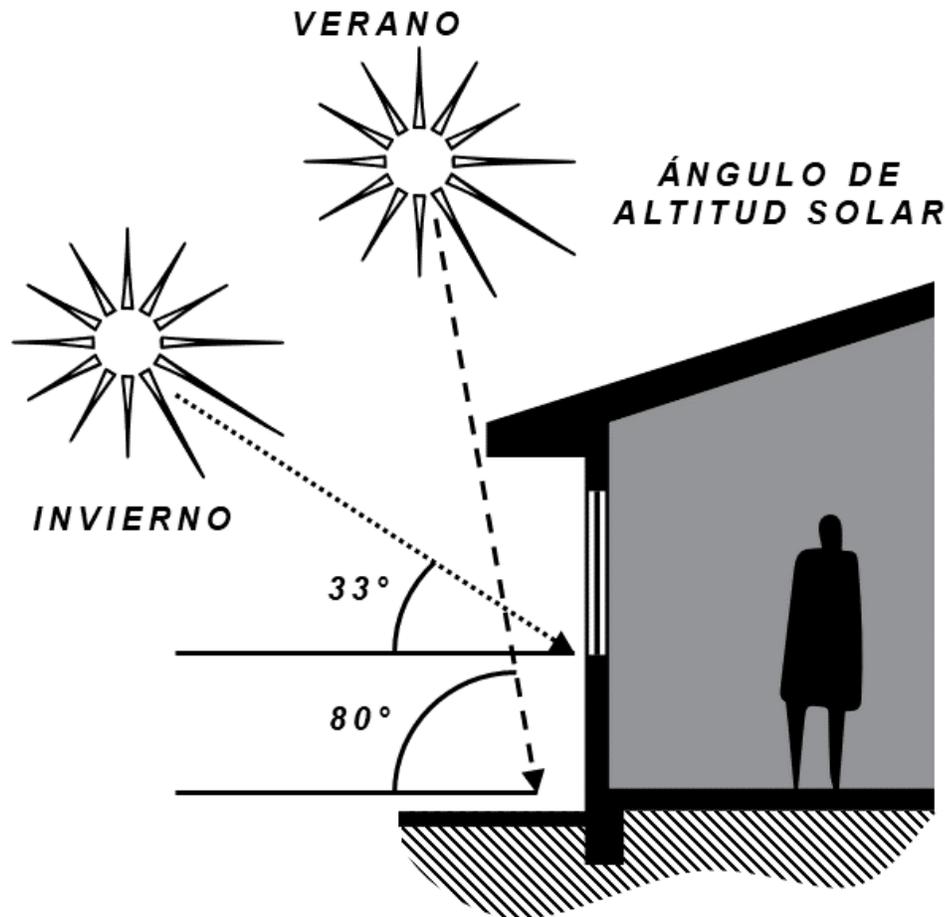
Para una solución eficiente de iluminación natural de un espacio, ésta debe ser integrada en el proceso de diseño desde la etapa de conceptualización. Como lo menciona Lechner (2021) “Daylighting design is part of the fundamental building design from the first line drawn” [El diseño de la iluminación natural es parte fundamental del diseño de un edificio desde la primera línea que se dibuje] (Lechner, 2021:413). Así, el orden del proceso de diseño para una propuesta de iluminación natural debe iniciar por el emplazamiento, orientación y geometría del edificio, continuar con el diseño de ventanas, su ubicación, tamaño e integración de estrategias de sombreado o regulación, y terminar por la consideración y selección de colores y acabados de las superficies interiores (Lechner, N., 2021).

### **2.2.1. *Emplazamiento y Orientación del Edificio***

El diseño de luz natural debe de comenzar desde la etapa de zonificación y diseño del edificio, principalmente debido a que la orientación de las fachadas impacta la cantidad de luz que alcanza las ventanas y por ende la distribución de la luz dentro de un espacio (CEI et al., 2005).

Esto se define desde su posición geográfica, pues la latitud en la que se encuentra un edificio determina la altitud solar de un momento específico del día a lo largo de un año y conocer la altitud solar en verano y en invierno permite diseñar efectivamente para el control de la radiación solar directa y su papel en el espacio, según se observa en la Figura 5. La latitud también determina la duración de la disponibilidad de la luz solar durante las distintas temporadas del año (VELUX Group, 2014).

**Figura 5.** Variación de ángulo de altitud solar en solsticios en Mexicali, México.



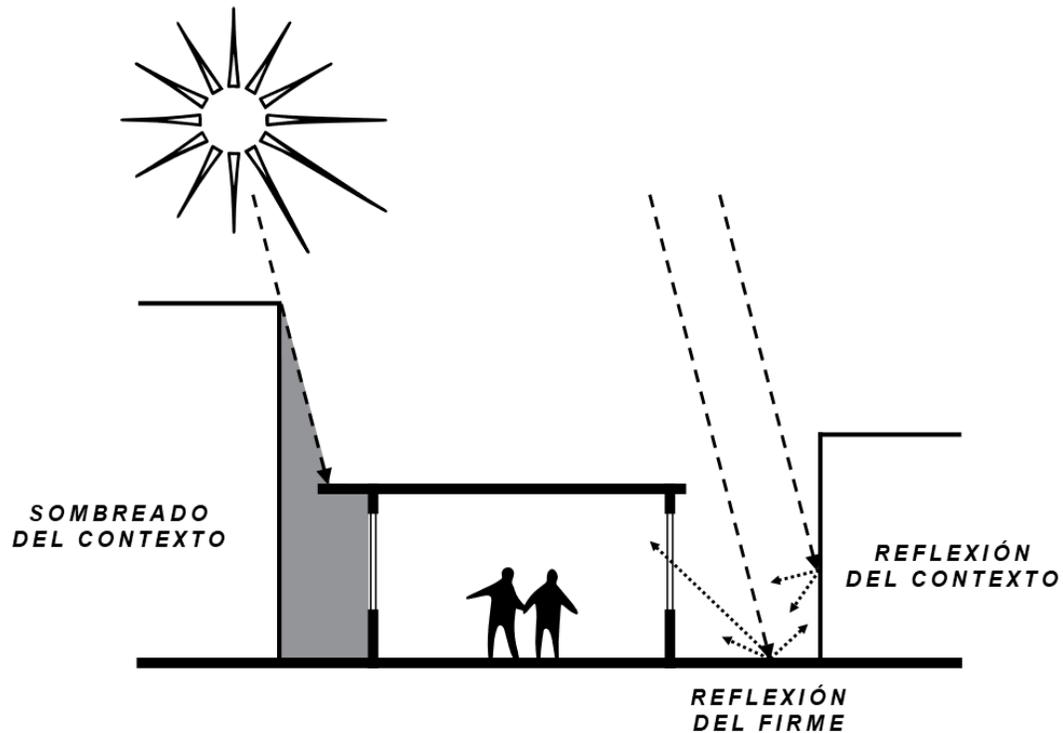
*Nota.* Elaboración propia, según información recuperada de Sun Earth Tools, (2023).

Así mismo, la evaluación de las condiciones de emplazamiento incluye la inclinación del terreno y relación de alturas del contexto, pues la pendiente en cualquier dirección reducirá la cantidad de luz natural que alcanzan las ventanas en esa orientación (CEI et al., 2005).

#### **2.2.1.1. Contexto del Edificio.**

Como se puede entender en la Figura 6, el contexto que rodea a un edificio, los elementos obstructivos y sus propiedades de reflexión de la luz solar influyen directamente en la cantidad de luz solar que puede alcanzar el interior de una habitación (VELUX Group, 2014).

**Figura 6.** *Influencia del contexto en la presencia de la luz natural.*



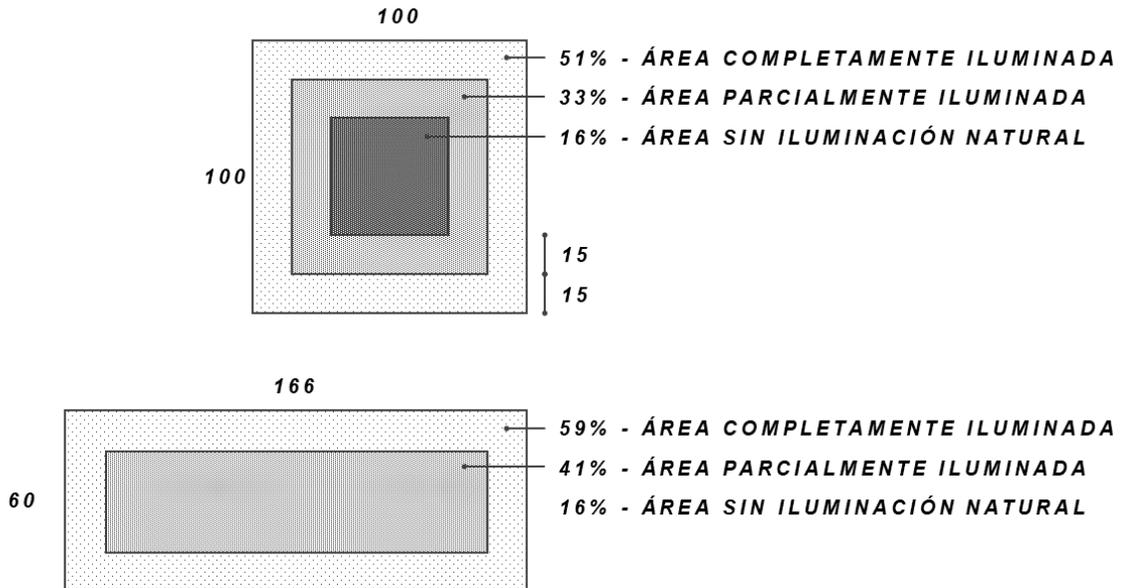
*Nota.* Elaboración propia, adaptado de Lechner, 2021, Heating, Cooling, Lighting - Sustainable Methods for Architects.

### **2.2.2. Geometría del Edificio**

La forma y geometría de un edificio influye directamente tanto en su capacidad de captación de la luz solar, como en el aprovechamiento y distribución de la misma en su interior. La Figura 7 ejemplifica cómo Lechner, (2021) ilustra las diferentes distribuciones que puede tener un mismo total de área, y los efectos de ésta en la distribución de la luz natural.

Así, la proporción y relación entre el ancho y largo de un edificio resulta de gran importancia. Si un edificio rebaza una profundidad máxima, sin importar cuán grandes sean las ventanas en sus fachadas, éstas solo alcanzarán a iluminar cierto porcentaje del interior de la habitación (Meneses, 2015).

**Figura 7.** Relación de distribución de área y geometría del edificio.



*Nota.* Elaboración propia, adaptado de Lechner, 2021, Heating, Cooling, Lighting - Sustainable Methods for Architects.

A partir de esto se establece la consideración de los límites de profundidad para la iluminación de un espacio a través de sus fachadas. Si una habitación es iluminada por ventanas en una sola pared, el Comité Español de Iluminación (2005) establece que la profundidad del espacio no debe exceder el valor límite dado por la siguiente ecuación:

$$\frac{L}{W} + \frac{L}{H_w} < \frac{2}{(1/R_b)} \quad (2)$$

Donde:

L= profundidad de la habitación

W= anchura de la habitación

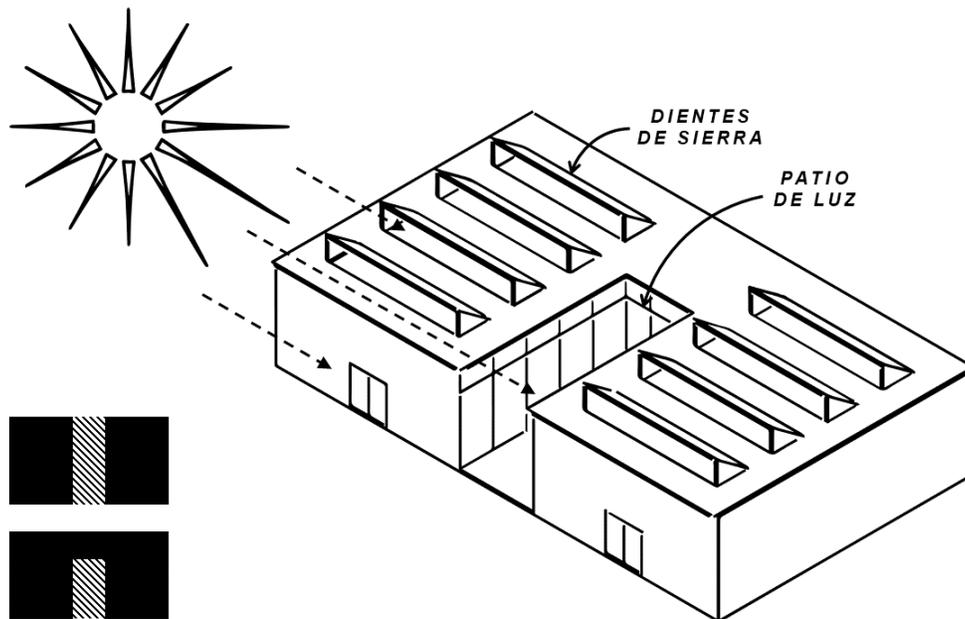
H<sub>w</sub>= altura de la parte superior de la ventana desde el suelo.

R<sub>b</sub>= reflectancia promedio de las superficies en la parte más alejada de la ventana.

Por otro lado, si una habitación se ilumina mediante ventanas por lados opuestos, la profundidad máxima para una iluminación natural satisfactoria es dos veces la profundidad límite si ésta fuera iluminada solo por una de sus fachadas (CEI et al., 2005).

Así mismo, la forma del edificio determina las estrategias de iluminación natural que se podrán integrar al edificio. Se determina la cantidad, distribución y tipo de ventanas que pueden colocarse en cada orientación, se delimita si la inclusión de patios de luz puede ser una solución viable, o si es posible la incorporación de cúpulas o ventanas en techos tipo diente de sierra, como se entiende en la Figura 8. Cada posibilidad de diseño debe ser evaluada, y cada decisión tomada, para determinar el porcentaje del área interior que tendrá acceso a luz natural (Meneses, 2015).

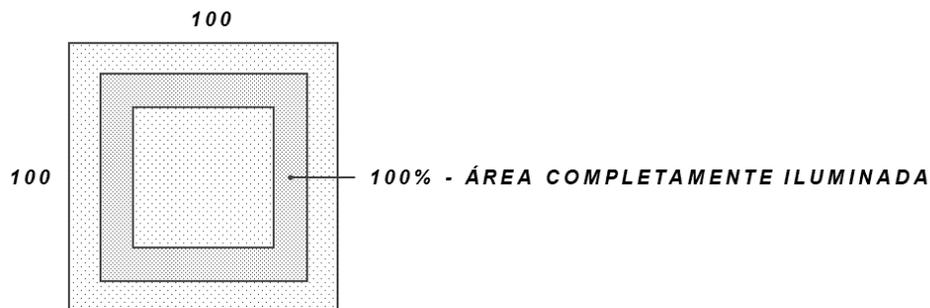
**Figura 8.** Estrategias de iluminación aplicadas según la forma del edificio.



*Nota.* Elaboración Propia.

Un claro ejemplo de una estrategia que se basa en la geometría de un edificio es el atrio. Esta solución de diseño, afecta directamente la distribución y forma del edificio, e integra en su diseño otras estrategias de iluminación como tragaluces, triforios o cúpulas, y cuando el espacio destinado para un atrio se reduce, se convierte en otra estrategia delimitada como patio o pozo de luz, revisar Figura 9 (Lechner, 2021).

**Figura 9.** Integración de la estrategia de atrio a un edificio.



*Nota.* Elaboración propia, adaptado de Lechner, 2021, Heating, Cooling, Lighting - Sustainable Methos for Architects.

### **2.2.2.1. Distribución del interior.**

El diseño de la distribución de espacios interiores y zonificación puede tener gran influencia en la distribución y aprovechamiento de la luz natural. Tal como lo menciona Lechner (2021), la propuesta de plantas abiertas y plantas libres, elimina los muros del espacio y permite el máximo flujo de la iluminación dentro de los edificios.

### **2.2.3. Las Ventanas**

Las ventanas como estrategia de iluminación tienen grandes desventajas. Su capacidad de iluminar una habitación se limita sólo al área de inmediata cercanía y si reciben la luz directa del sol pueden crear deslumbramiento desmedido en el espacio además de una ganancia térmica indeseada (Lechner, 2021). Sin embargo, existen algunos criterios básicos considerables en el diseño de las ventanas, así como elementos que, al actuar en conjunto, se convierten en estrategias de iluminación natural.

### **2.2.3.1. Orientación.**

La orientación de una fachada y por ende las ventanas situadas en ella, tienen una de las mayores influencias en la iluminación interior, pues ésta y su relación al recorrido del sol afecta significativamente a la penetración de la luz solar y la ganancia de temperatura de un espacio (CEI et al., 2005). Así, la orientación de una ventana influye en la disponibilidad de luz natural y la calidad con la que se introduce en el espacio (VELUX Group, 2014).

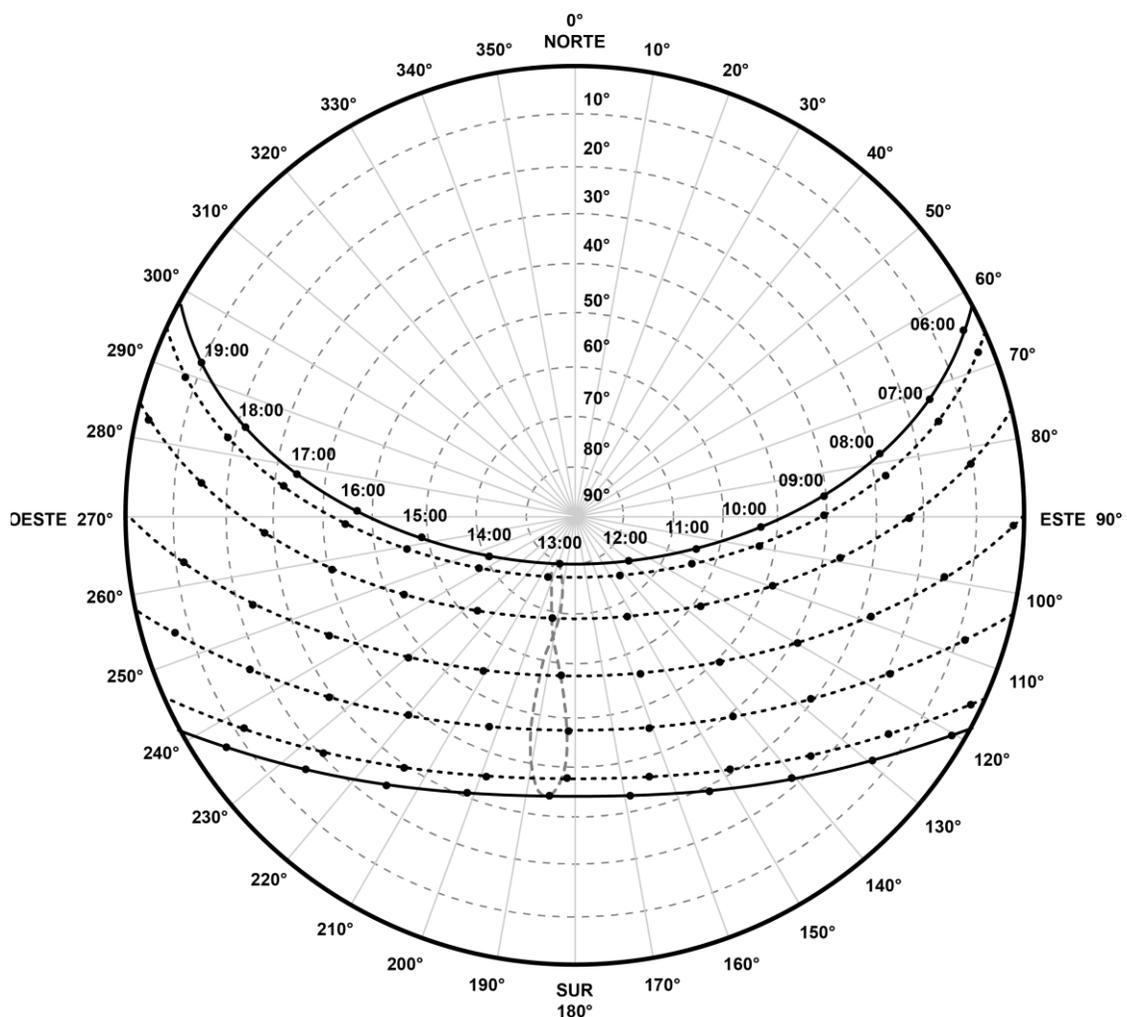
En el hemisferio norte, Lechner (2021) establece que la orientación sur es la más aprovechable, pues recibe luz solar de manera constante a lo largo del año. Sin embargo, existen ciertas consideraciones pertinentes cuando se diseña con enfoque en esta orientación; el sol estará en su punto más alto en el cielo durante el momento más caluroso del día, por lo que una ventana ubicada al sur precisa de algún tipo de sombreado o apantallamiento en su parte superior para evitar el deslumbramiento y la ganancia de calor (CEI et al., 2005).

Por su parte, la luz proveniente del norte se compone mayormente de luz difusa del cielo y el contexto, por lo que no ocasiona deslumbramiento ni ganancia térmica representativa, tal como lo establecen el VELUX Group (2014) y Lechner (2021). A pesar de que la cantidad de luz que puede aportar no es tan alta, sí es constante a lo largo del día y del año. Así, esta se delimita como la segunda mejor orientación, especialmente para climas áridos.

Las orientaciones este y oeste son poco favorables, no solo porque la cantidad de luz que pueden proveer se limita a la mitad de las horas del día, sino porque en esos momentos el sol se encuentra en bajos ángulos de incidencia y alto nivel de intensidad en los periodos de primavera y verano, lo cual ocasiona problemas de ganancia térmica y de deslumbramiento difíciles de solucionar incluso con estrategias de sombreado (CEI et al., 2005 y Lechner, 2021).

Estas deducciones se interpretan a partir de una carta solar estereográfica, diagrama de proyección del cielo completo en el que se traza el recorrido solar diario a lo largo del año. La carta estereográfica permite leer la elevación del sol y el azimut a una hora dada. Estos ángulos son utilizados para trazar las sombras que inciden sobre un plano o lugar (CEI et al., 2005). En la Figura 10 muestra la carta estereográfica de la ciudad de Mexicali, México.

**Figura 10.** Carta estereográfica de la ciudad de Mexicali, México.



*Nota.* Adaptado de SunEarth Tools.

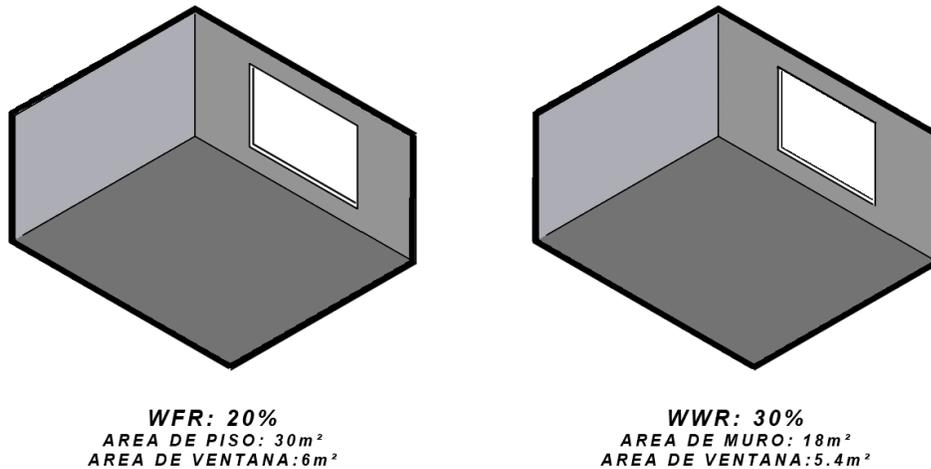
A partir de la lectura de la carta estereográfica de la ciudad de Mexicali se puede entender que el ángulo de elevación mayor del sol es de  $80^\circ$  y se alcanza el 21 de junio a las 11:40 horas, mientras que a la misma hora en el solsticio de invierno el ángulo de diseño es de  $33^\circ$ . El entendimiento e interpretación de la carta estereográfica de la ciudad en la que se emplaza un proyecto permite a los arquitectos y diseñadores tomar decisiones informadas respecto a la relación entre el sol y el edificio, los ángulos en los que llegan los rayos solares y las implicaciones que su presencia o ausencia puede tener si no se toman fallos adecuados.

#### **2.2.3.2. Tamaño, Proporción y Distribución.**

La cantidad de luz natural que entra en una habitación se vincula directamente con las dimensiones de la ventana y su proporción vertical y horizontal (VELUX Group, 2014). Yu et al. (2020), identifican esta propiedad evaluada por distintos autores como proporción de tamaño de ventana según su relación con distintas áreas del espacio medido.

Así, existe relevancia en la valoración de la relación entre el área de ventana y el del muro, llamado WWR por sus siglas en inglés, y la relación entre el tamaño de ventana y el área de piso del espacio que ilumina, o WFR por su traducción al inglés (Yu et al., 2020); esto se puede entender mejor según se explica en la Figura 11. Lechner (2021) indica la consideración de un 20% en la relación WFR, mientras que Yu et al. (2020), encontraron que una relación de 30% de WWR funciona como regla general, y varía según el clima, la orientación de la fachada y su combinación con distintas estrategias, como sombreado o tratamiento del acristalamiento.

**Figura 11.** Variación de tamaño de ventana.



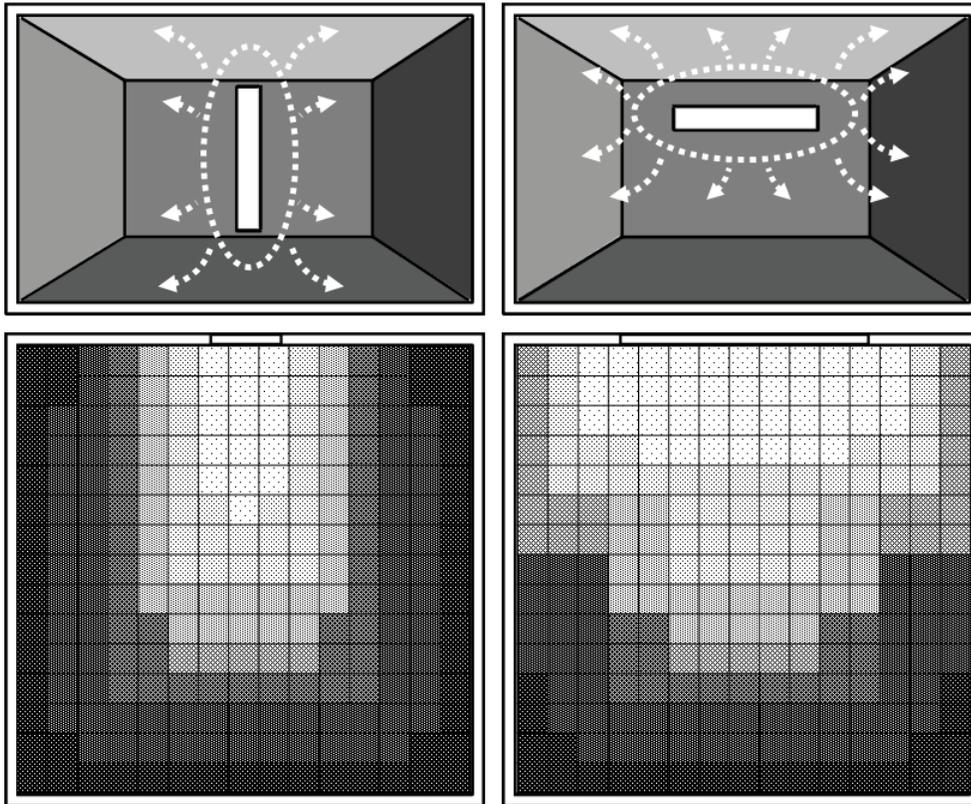
Nota. Elaboración propia.

### 2.2.3.3. Altura.

La posición de una ventana también resulta de gran importancia, especialmente en relación con su tamaño, proporción, altura y distribución en el muro en el que se coloca. Según ASHRAE (2017), como regla general se puede considerar que cualquier espacio iluminado lateralmente tendrá un área de alcance con una profundidad proporcional a 1.5 veces la altura del margen superior de la ventana en cuestión. Lechner (2021) propone como principio básico para el diseño de iluminación natural de un espacio con ventanas, la colocación de las mismas en la parte más alta del muro; esta consideración se apoya de la reflectancia del techo del espacio, propiedad que por sí misma es una estrategia de diseño.

Así, mientras sea posible en el proceso de diseño, se deben proponer alturas interiores más elevadas, esto permite que la luz se refleje en el techo del espacio, se distribuya de manera uniforme y evite deslumbramiento incómodo. Además, se recomienda que las ventanas sean en proporción horizontal y no vertical, para distribuir de manera más uniforme en el espacio la luz natural (Lechner, 2021), según se muestra en la Figura 12.

**Figura 12.** *Distribución lumínica en ventana vertical y horizontal.*



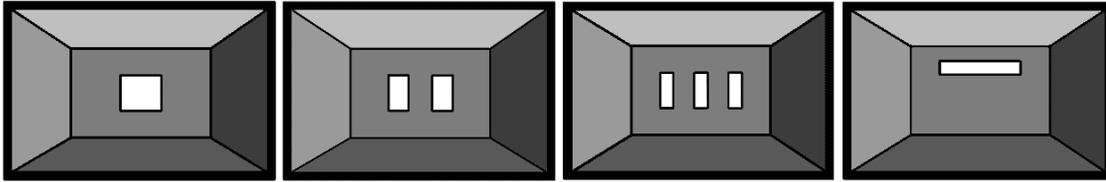
*Nota.* Elaboración propia.

#### **2.2.3.4. Configuración del Área de Ventana.**

La distribución de los vanos a lo largo de un muro también resulta influyente en la recolección y comportamiento de la luz natural dentro de un espacio. Colocar los vanos en el centro de los muros, eleva el contraste entre el brillo de la ventana y el muro en el que se encuentra.

Es preferente alcanzar un mismo factor de WWR o WFR, a través de la colocación de varias ventanas adyacentes que la de una sola, ya que logran una distribución de luz en más áreas de un mismo espacio, según se observa en la Figura 13, lo cual disminuye los deslumbramientos y contrastes no deseados sobre el plano de trabajo (Lechner, 2021).

**Figura 13.** Configuración del área de ventana.



Nota. Elaboración propia.

### 2.2.3.5. Características del Acristalamiento.

Elegir el acristalamiento de una ventana es clave para el diseño de la iluminación natural. El vidrio puede tener distintas propiedades que influyen y afectan en la manera en la que permiten el paso de la luz natural, así como la conexión con el exterior; el cristal puede ser claro, teñido, de varias capas, reflectante, baja emisividad, absorbente de calor o espectralmente selectivo, según se observa en la Tabla 2. *Propiedades de tipos de vidrio.* Sin embargo, no porque un tipo de vidrio disminuya el paso del calor o la posibilidad de deslumbramiento significa que es adecuado, pues estas características pueden afectar su transmitancia y la claridad de su vista (Lechner, 2021).

**Tabla 2.** *Propiedades de tipos de vidrio.*

Capas	Tipo	Valor-U (W/m <sup>2</sup> K)	Coefficiente de sombreado	Transmitancia
<b>Sencillo</b>	Claro	1.25	0.72	0.71
<b>Doble</b>	Claro	0.60	0.60	0.63
	Teñido	0.60	0.42	0.38
	Reflectante	0.54	0.17	0.10
	Low-e	0.46	0.34	0.57
	Teñido + Low-e	0.49	0.39	0.36
<b>Triple</b>	Claro + low-e	0.14	0.20	0.34

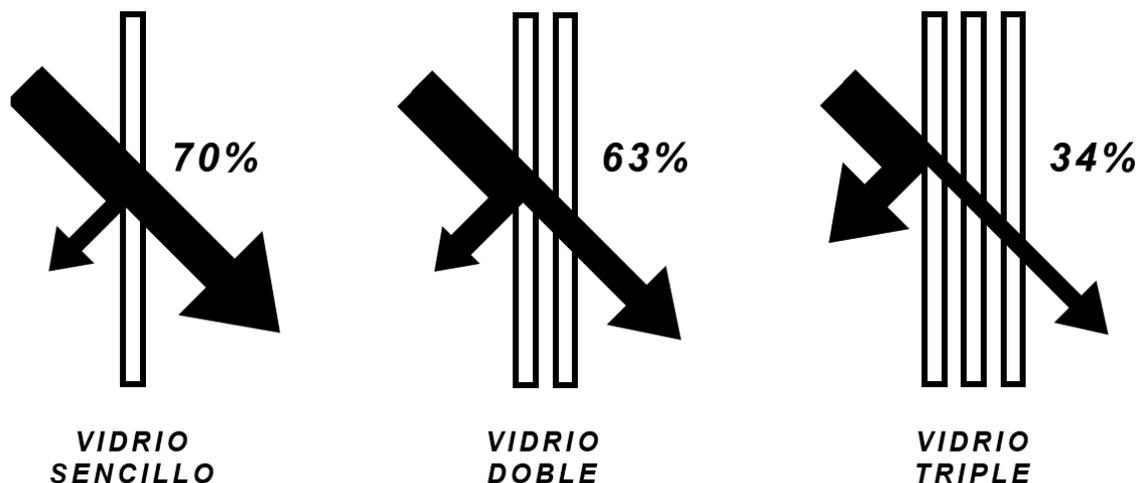
Nota. Adaptado de E Source (2019).

En climas cálidos el uso de acristalamiento con un acabado en el paño exterior y doble capa tiene beneficios en el rechazo a la ganancia térmica mientras se mantiene un color de luz comfortable para los usuarios (ASHRAE, 2017).

#### **2.2.3.5.1. Grosor y Capas.**

Existen también vidrios de distintos grosores y ventanas que se componen por distinta cantidad de capas de vidrios o cantidad de caras; se considera que una sola capa de vidrio tiene 2 caras, mientras que 2 capas tienen 4 y 3 capas tienen 6. Ambas medidas contribuyen a la variación de la transferencia de calor y el paso de la luz natural a través de ellas, según se explica en la Figura 14 (Lechner, 2021).

**Figura 14.** *Transferencia de calor a través de capas de vidrio.*



*Nota.* Elaboración propia.

#### **2.2.3.5.2. Emisividad.**

La emisividad es una propiedad de los materiales que hace referencia a la facilidad o dificultad con la que el calor es absorbido y devuelto al ambiente por el material; es una propiedad primordialmente térmica, en la que se analiza la forma en la que la radiación de onda larga atraviesa el material (ASHRAE, 2017).

En el caso del acristalamiento, se le denomina *low-e* al tipo de vidrio que se caracteriza por tener baja emisividad. Esta propiedad resulta de su revestimiento de óxido, y logra reducir la transferencia de calor al interior del espacio. Según lo expone ASHRAE (2017), existen vidrios *low-e* con mayor o menor transmitancia, para minimizar la pérdida o ganancia de calor según se requiera; este tipo de cristal se conforma de vidrio laminado compuesto por dos o más capas, en las que el cristal que queda por dentro de la edificación.

#### **2.2.3.5.3. Transmitancia Visible.**

Se le denomina a la propiedad del cristal para permitir el paso de la luz visible (ASHRAE, 2017), así la cantidad de luz que pasa a través de una ventana se ve afectada directamente por la cantidad de capas de acristalamiento que debe atravesar, así como por el color o acabado de los mismos. Mientras que, para vidrio claro este factor se valora entre 0.80 y 0.70, el valor para vidrios reflectivos o tintados disminuye a valores entre 0.40 y 0.10, así mientras que un vidrio doble deja pasar alrededor de 60% del total de luz que recibe, si a éste se le da algún acabado de color, el total se puede reducir hasta un 40%.

#### **2.2.3.5.4. Sombreado.**

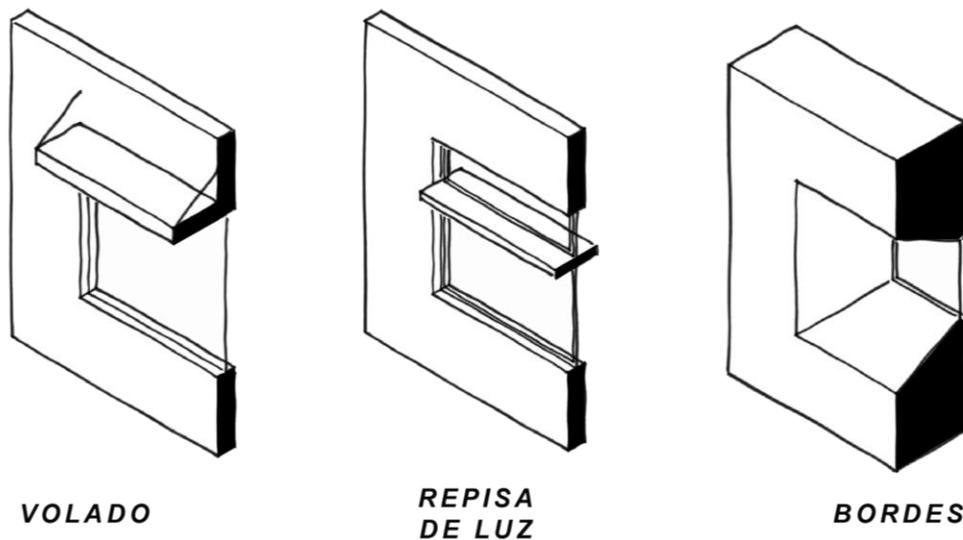
Debido la interconexión que existe entre la luz y las sombras que se generan, un buen entendimiento del sombreado es un prerrequisito para el entendimiento y aplicación de las estrategias de diseño para la iluminación natural (Lechner, 2021). Así, la estrategia de sombreado que se aplique a una ventana es casi tan importante como la ventana en sí. El objetivo debe ser no solo tratar de proteger las ventanas de luz directa, sino tratar de dirigir la mayor cantidad de luz difusa posible.

Las soluciones más eficientes son aquellas que previenen la radiación solar directa desde el exterior, más que aquellas que influyen en ella una vez dentro del edificio. Esto incluye estrategias como vegetación, malla-sombras, volados, celosías, persianas exteriores e interiores, extrusión de volúmenes de sombreado, entre otras, según se observa en la Figura 15 (VELUX Group, 2014 y Lechner, 2021).

### 2.2.3.6. Volados.

Los volados como estrategia de sombreado de ventanas son excelentes estrategias integradas al edificio. Sin embargo, debe de entenderse el papel que se desea que éstos cumplan, ya que mientras que pueden evitar que sucedan áreas de deslumbramiento, también pueden ocasionar que disminuyan los niveles de iluminancia. De la misma manera, pueden servir convertir la luz directa en luz difusa, al actuar como superficies de reflexión; esto se logra según la posición, orientación, altura y color de los elementos integrados (Lechner, 2021).

**Figura 15.** *Tipos de sombreado.*

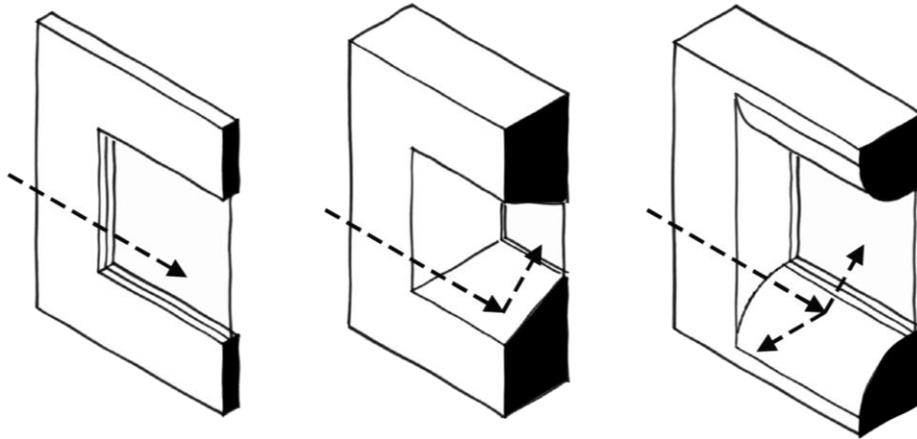


*Nota.* Elaboración propia.

### 2.2.3.7. Bordes y Extrusión de Volúmenes.

Extender los bordes de la ventana o redondearlos, como se ejemplifica en la Figura 16, crean una zona de transición para la luz natural y son estrategias que permiten que la luz directa se convierta en difusa antes de penetrar la ventana (Lechner, 2021).

**Figura 16.** Bordes de ventanas para la reflexión de la luz solar directa.

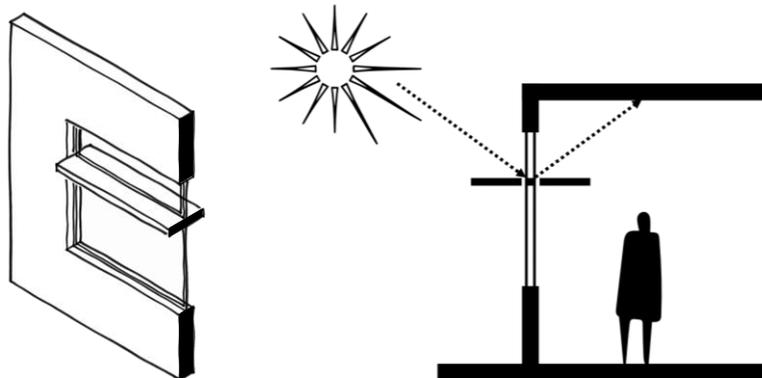


*Nota.* Elaboración propia.

#### **2.2.3.8. Repisas de Luz.**

Esta estrategia de iluminación natural es ideal para lograr distintos objetivos a partir de una misma solución (Gherri, 2015). La repisa se coloca de manera horizontal o angular, en la parte interior y/o exterior de la ventana según sea necesario para su óptimo funcionamiento y se recubre de un acabado de alta reflectancia para redirigir la luz directa del sol al techo del espacio interior y convertirla en luz difusa, como lo explica la Figura 17 (Raphael y Warriier, 2021).

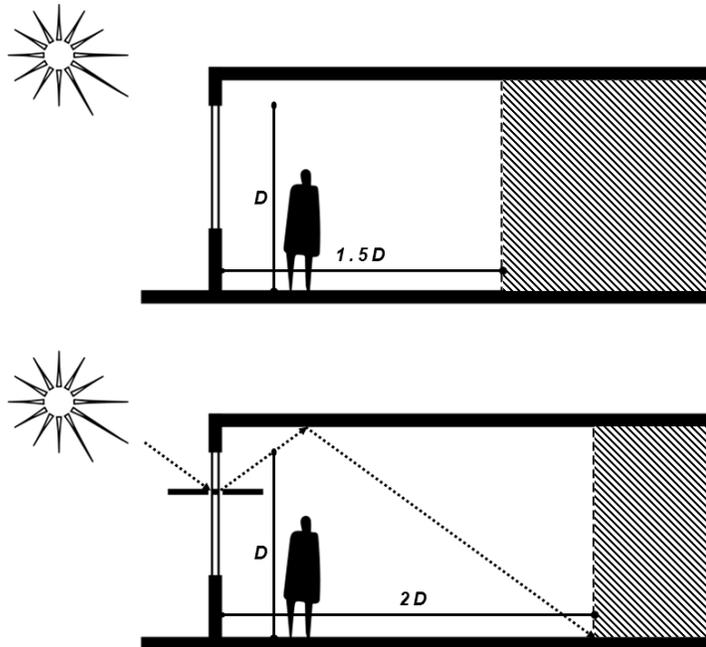
**Figura 17.** Funcionamiento de una repisa de luz.



*Nota.* Elaboración propia, adaptado de Lechner, 2021, Heating, Cooling, Lighting - Sustainable Methods for Architects.

Sin embargo, al colocarse a la altura precisa, las repisas de luz también funcionan como prevención del deslumbramiento en el plano de trabajo al obstruir la iluminación directa y la creación de grandes contrastes. Esto permite que la parte inferior de la repisa se sombree, por lo que funcionan como una solución para la visibilidad del exterior. Así, al dividir las ventanas en dos secciones, la parte superior responde a la necesidad de reflectancia y difusión de la luz, mientras que la parte inferior resuelve el deslumbramiento, como se observa en la Figura 18 (Lechner, 2021).

**Figura 18.** *Diferencia de alcance de penetración de luz natural.*



*Nota.* Elaboración propia, adaptado de Lechner, 2021, Heating, Cooling, Lighting - Sustainable Methods for Architects.

La altura y ángulo de colocación, así como el ancho y largo de las repisas, dependerá de las condiciones y características de la orientación de la ventana en la que se instalarán. Mientras que en el norte este tipo de soluciones no son efectivas puesto que la luz que recibe esta orientación es difusa, en el este y oeste las repisas de luz requieren de mayor profundidad, ya que se enfrentan a ángulos más bajos de elevación del Sol (Gherri, 2015).

Es una estrategia sencilla, pero de gran eficiencia, que según lo cita Lechner (2021), aumenta la profundidad de la penetración de la luz natural en relación con la altura de la ventana en un 33%, y que puede mejorar la uniformidad de la distribución de la iluminación en un 20% (Lee et al., 2022).

#### **2.2.3.9. Persianas Interiores.**

El uso de persianas es una de las estrategias clásicas para el control lumínico en el interior de un espacio. Sin embargo, también existen consideraciones básicas para su óptima aplicación.

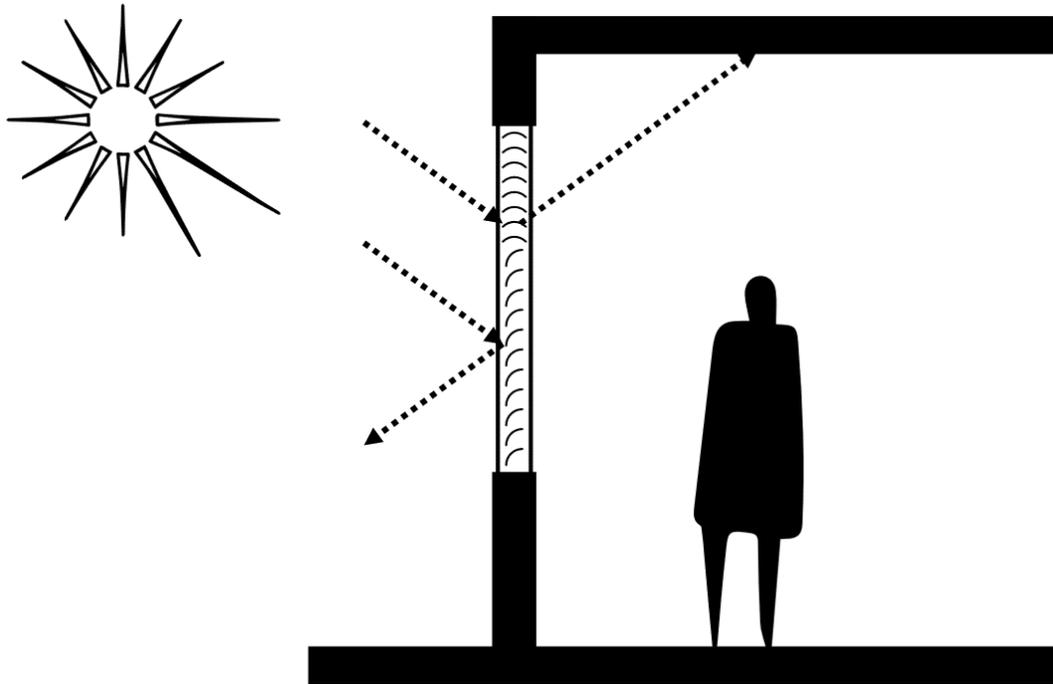
El primer criterio es la inclusión de sistemas móviles. El uso de persianas de sistema móvil en el interior del espacio le otorga al usuario control sobre la cantidad y calidad de la luz que se distribuye al interior del espacio; esto puede responder tanto a sus necesidades específicas, como a la disponibilidad de luz natural según el clima o la temporada del año (Gherri, 2015).

Sin embargo, la integración óptima de esta estrategia se alcanza al dividir la ventana en dos secciones; en la parte superior el ángulo de las persianas responde a la necesidad de reflectancia hacia el techo del interior del espacio, mientras que en la parte inferior sirven como control para el deslumbramiento y la visibilidad. Las persianas son unas de las estrategias más simples y eficientes para las fachadas este y oeste, sin embargo, según lo establece Lechner (2021), no importa cuál sea su orientación, su mejor funcionamiento siempre será si se coloca en pares. Esto se puede revisar en la Figura 19.

#### **2.2.4. Iluminación Cenital**

La iluminación desde el techo o iluminación cenital permite brindarles luz a edificios de mayor profundidad (CEI et al., 2005), así como distribuirla de una manera más uniforme en el espacio. Sin embargo, este tipo de estrategias se enfrentan a varias desventajas y obstáculos. En primera instancia, este tipo de soluciones sólo son aplicables en la planta superior de un edificio.

**Figura 19.** *División de persianas.*

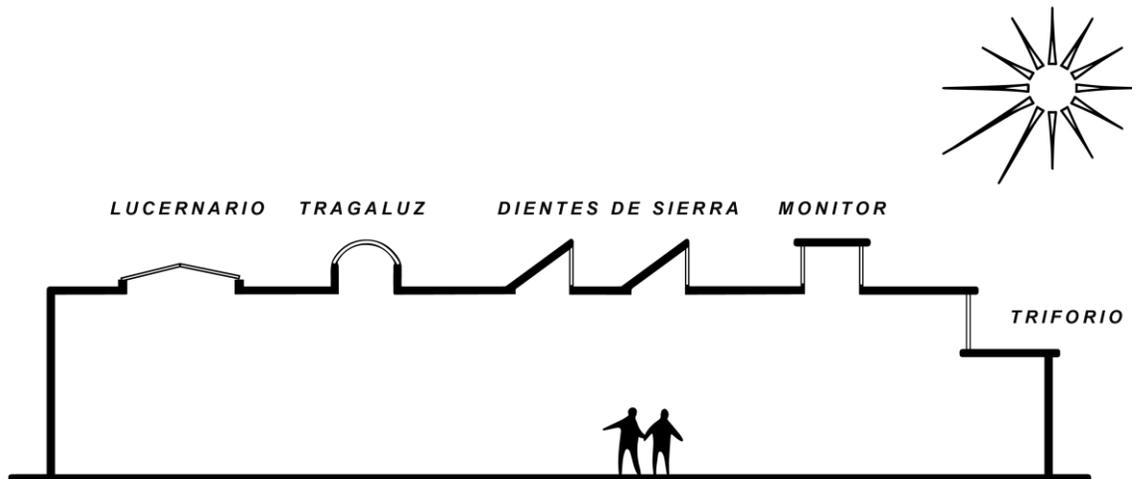


*Nota.* Elaboración propia, adaptado de Lechner, 2021, Heating, Cooling, Lighting - Sustainable Methods for Architects.

Por otra parte, la iluminación de un plano horizontal requiere de un alto ángulo de elevación del sol, y este se alcanza en la época de verano, cuando la radiación alcanza también su nivel más alto, lo cual ocasiona un efecto opuesto al que se desea en esta temporada, especialmente en regiones áridas (Lechner, 2021).

A partir de lo anterior es recomendable evitar la inclusión de lucernarios, tragaluces o cúpulas, todas soluciones que colocan los vanos en el plano horizontal, y optar por iluminación cenital a partir de planos verticales, con la incorporación de estrategias como triforios, monitores y ventanas en dientes de sierra, como se ilustra en la Figura 20.

**Figura 20.** Estrategias de iluminación natural de forma cenital.



*Nota.* Elaboración propia, adaptado de Lechner, 2021, Heating, Cooling, Lighting - Sustainable Methods for Architects

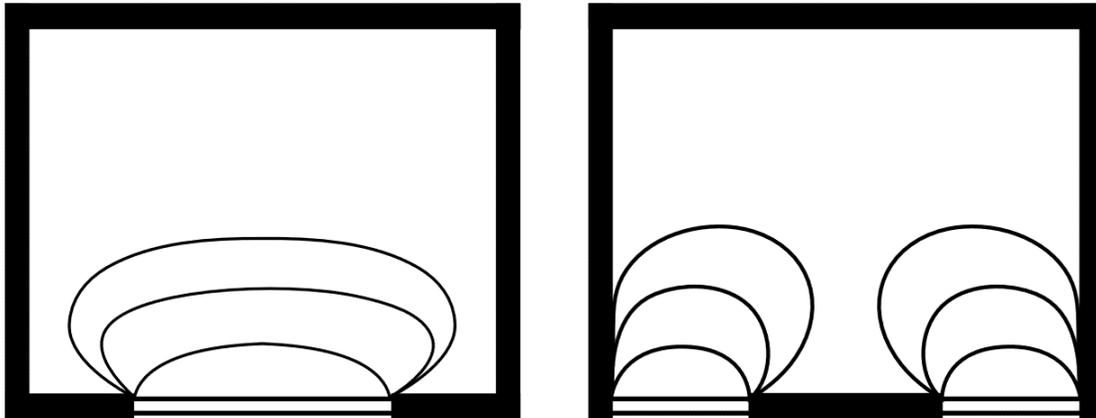
### **2.2.5. Diseño de Interiores**

Todas las decisiones de diseño pueden contribuir o eximir la cantidad y calidad de la distribución de la iluminación natural de un espacio. Los acabados interiores tienen una gran inherencia en la mayoría de las estrategias de iluminación natural antes mencionadas, pues el óptimo funcionamiento de algunas depende del auxilio de superficies interiores, muros, techos y área de trabajo, para llevar la luz natural a áreas más profundas del del edificio, o distribuirla de una manera más uniforme.

#### **2.2.5.1. Color y Reflectancia.**

El uso estratégico del color, tanto del contexto de un edificio como de su interior, contribuirá a que se refleje y se distribuya una mayor o menor cantidad de luz en el espacio. Como se citó anteriormente, la colocación de vanos en la parte más alta de los muros se auxilia de la reflectancia del plano adyacente, el techo, para llevar la luz al interior del espacio. Esta misma propiedad también es aprovechada en la configuración y distribución del área de los vanos, cuando éstos se colocan adyacentes a muros de tonos claros que sirven como reflectores de luz, como se muestra en la Figura 21 (Lechner, 2021).

**Figura 21.** *Relación de reflexión de muros; vista en planta.*



*Nota.* Elaboración propia, adaptado de Lechner, N., 2021, Heating, Cooling, Lighting - Sustainable Methods for Architects.

Así, de manera general, para una mejor distribución de luz natural en el interior del espacio, se recomienda priorizar en orden el color del techo, posteriormente el del muro más alejado de la ventana, los muros laterales, el piso y por último los colores del mobiliario (Lechner, N., 2021).

### **2.2.6. Iluminación Natural y Visibilidad**

La opción más recomendable para procurar la visibilidad del exterior en un espacio sin comprometer las implicaciones de la luz natural, es utilizar diferentes estrategias para ambas. La propuesta de ventanas a nivel del espectador cubre la necesidad de visibilidad y conexión con el paisaje existente, mientras que la inclusión de ventanas altas o iluminación cenital responde a las necesidades de iluminación del espacio según las actividades a realizar (Lechner, 2021).

A partir del análisis anterior, se destaca que debido a que cada orientación requiere de una solución diferente según las condiciones a las que se enfrenta y el objetivo que se busca alcanzar en el espacio interior de los edificios, la mejor manera de abordar el diseño arquitectónico que considera la iluminación natural, es a partir del complemento y combinación de distintas estrategias.

## **2.3. Normatividad.**

Los códigos y estándares para las edificaciones regulan y definen los límites, restricciones y requerimientos de distintos aspectos, así como su forma de valoración y evaluación. Estos documentos buscan salvaguardar la salud, seguridad y confort de los habitantes. Gherri (2015), describe que, en la actualidad, respecto al campo de la iluminación natural, muchas de estas normativas y estándares son anticuadas o se encuentran desfasadas respecto al avance tecnológico mundial; sufren de deficiencias y simplificaciones excesivas que surgen a partir de no entender o poder evaluar el comportamiento real de la luz natural en el espacio.

### **2.3.1. Estándar Internacional ASHRAE.**

En sus distintos apartados, la estandarización ASHRAE se reconoce como de las primeras en determinar estrategias de iluminación natural como sistemas de eficiencia energética en los edificios, debido a la correlación entre las propiedades visuales y térmicas de esta variable.

La norma 189.1 de ASHRAE especifica los niveles mínimos de iluminación que debe de proveer cada estrategia de iluminación, así como la relación del tamaño y diseño de la fenestración, criterios que incluyen la determinación de límites y características de los materiales, como reflectancia y distribución.

El artículo 7.4.2.9 se enfoca en especificaciones de orientación de fachadas, y la integración de sensores de ocupación para reducir el gasto energético del espacio, así como las ganancias térmicas de las orientaciones este y oeste según distintas zonas geográficas.

El artículo 8.3.4 por su parte, determina respecto a la iluminación cenital, que ésta debe ser mínima, ya que ocasiona la presencia de luz directa en los espacios, crea deslumbramiento y resulta en las mayores ganancias térmicas.

### 2.3.2. *Estándar Internacional EN17037.*

El estándar europeo EN17037 califica la calidad del ambiente lumínico a partir de valores objetivos mínimos, medios e ideales, de acuerdo a cuatro factores evaluables: cantidad de horas de exposición a la luz solar de un espacio, calidad de la visibilidad al exterior, protección de deslumbramiento y disponibilidad de luz natural (Sepúlveda et al., 2022) esta última es la que describe la metodología de medición comparable con la NOM-025.

### 2.3.3. *Estándar Internacional GB 50033.*

Por su parte, la norma GB 50033-2013 es un estándar chino que establece una metodología de medición de la calidad de iluminación en espacios residenciales. Según lo referencia Zhen, M. et al., (2019), este estándar estipula que espacios residenciales como las habitaciones, estancias, pasillos y cocinas deben recibir luz natural. Esta normativa clasifica los espacios en “clases” según los niveles de iluminancia que deben alcanzar, según se relaciona en la Tabla 3.

**Tabla 3.** *Niveles mínimos de iluminación por espacio o actividad.*

<b>Nivel de iluminación</b>	<b>Espacio / Actividad</b>	<b>Factor de luz día</b>	<b>Nivel mínimo de iluminación (luxes)</b>
<b>IV</b>	Recámara	2	300
	Sala de estar	2	300
	Cocina	2	300
<b>V</b>	Baño	1	150
	Pasillos y escaleras	1	150

*Nota.* Zhen, M. et al., (2019) adaptado del estándar GB 50033-2013.

Según la metodología planteada en el estándar GB 50033-2013, el ambiente lumínico de un espacio residencial debe de evaluarse bajo un cielo nublado, en un periodo de tiempo entre las 10:00 y las 14:00, ya que la iluminación es constante.

El plano de referencia debe considerarse a una altura de 0.75m desde el piso, y los puntos de medición se colocan sobre un mismo eje delimitado en el espacio según la configuración de la o las ventanas, con una equidistancia de entre 0.5m y 1.00m. Cada punto deberá ser medido 3 veces y considerado el promedio en caso de haber variación.

#### **2.3.4. Norma mexicana NOM-025.**

En México, la NOM-025-stps-2008 - Condiciones de iluminación en los centros de trabajo, establece los requerimientos de iluminación en los centros de trabajo e Incluye una guía de referencia sobre los métodos para evaluar los niveles de iluminación de los espacios.

En su metodología, la norma determina que cuando la luz natural es la fuente de iluminación del espacio, se deben efectuar tres mediciones en cada punto zona determinada de acuerdo a lo siguiente: primera lectura en el inicio del turno de trabajo, segunda lectura a la mitad del turno y última lectura al final del turno (NOM-025, 2008).

$$IC = \frac{(x)(y)}{h(x+y)} \quad (3)$$

Donde:

IC = Índice del área

x , y = dimensiones del área (largo y ancho) en metros

h = altura de la luminaria respecto al plano de trabajo en metros

Para determinar los puntos de medición se debe dividir el área evaluada en zonas del mismo tamaño según la fórmula del índice de área que se presenta en la ecuación 3, y se ajusta la posición a la mayor concentración de área de trabajo o al centro geométrico de la zona (NOM-025, 2008). La Tabla 4 enlista esta relación.

**Tabla 4.** *Relación entre el Índice de área y el número de zonas de medición.*

<b>Índice de área</b>	<b>Zonas a evaluar</b>
<b>IC&lt;1</b>	4
<b>1&lt;IC&lt;2</b>	9
<b>2&lt;IC&lt;3</b>	16
<b>3&lt;IC</b>	25

*Nota. Desarrollada a partir de NOM-025-STPS-2008*

### **2.3.5. Código de Edificación de Vivienda CONAVI SEDATU.**

La Comisión Nacional de Vivienda y la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (2017) se unen para crear el código de edificación de vivienda, con la intención de delimitar las especificaciones con las que las viviendas y unidades habitacionales deben de diseñarse, construirse, mantenerse y conservarse.

La Sección 809 se dedica a dictar los criterios de iluminación y ventilación natural a considerar. Especifica que las ventanas, puertas, celosías y vanos en general, deben de colocarse hacia la vía pública o espacios exteriores, y que los habitantes deben de tener acceso directo a ellas para su control.

El punto 806.2.1 especifica por su parte, que el área vidriada del elemento de introducción de luz natural, no debe ser menor al 15% del área de piso del espacio habitable que ilumina, como recámaras, pasillos y escaleras, o del 10% en caso de referirse a espacios auxiliares.

Para los baños, según el punto 806.4, se debe contar con un área vidriada no menor a 0.16m<sup>2</sup> y al menos el 50% de ésta debe poder abrirse completamente. Cabe destacar que el código también menciona que este criterio se puede omitir si se proporciona iluminación artificial y un sistema de ventilación mecánico, sin embargo, tras la revisión del marco teórico se puede concluir que esta cláusula no resulta ideal para el confort real del usuario.

La especificación 806.11 dictamina que la iluminación natural puede suceder de manera cenital a partir de elementos como domos o tragaluces, pero sólo en espacios secundarios como baños, pasillos y escaleras. Para estos casos, el área del vano libre no debe ser menor del 5% de la superficie del espacio, y su transmisión solar debe ser del 85% como mínimo.

### **2.3.6. Reglamento de Edificaciones para el municipio de Mexicali.**

El reglamento de edificaciones para el municipio de Mexicali, Baja California (Ayuntamiento de Mexicali, 2001) parte de lo dictaminado en el código de edificación de vivienda de CONAVI, y modifica algunos puntos según las necesidades regionales.

El artículo 63 especifica que para edificaciones de tipo habitacional o de alojamiento, se debe proporcionar una relación de área de ventana y superficie del espacio a iluminar de un 10% como mínimo, siempre y cuando éste no represente menos de 0.75m<sup>2</sup>. en la Tabla 5. *Relación entre la tipología de edificación y el tamaño de la ventana.* se muestran los valores especificados para el tamaño del área de ventana para otras tipologías.

**Tabla 5.** *Relación entre la tipología de edificación y el tamaño de la ventana.*

<b>Tipología de Edificación</b>	<b>Área de ventana en relación WFR</b>
<b>Habitacional</b>	10%
<b>Educación y Cultura</b>	20%
<b>Salud y Servicios Asistenciales</b>	5%
<b>Diversión, Espectáculos y Centros Deportivos</b>	10%*
<b>Estacionamientos Abiertos</b>	10%

\*Iluminación natural opcional.

*Nota. Desarrollada a partir del Reglamento de Edificaciones para el municipio de Mexicali.*

El artículo 64. 3 menciona que en casos en los que la iluminación natural se provea a través de domos o tragaluces, éstos deben de corresponder a un mínimo del 2% del área de la habitación.

El primer ejemplo de ajuste del Código de Edificación de Vivienda de CONAVI es la primera especificación del artículo 62 en la Sección II, que establece que el área de ventana y su relación con la superficie total del espacio que ilumina puede verse reducida en un 50% si el vano se encuentra en una fachada con orientación al poniente.

A pesar de estas especificaciones, resulta preocupante que el Artículo 64. 1, puntualiza que la iluminación de un espacio puede ser natural o artificial, es decir, vuelve la presencia de la luz solar un aspecto optativo, y omite por completo las necesidades, beneficios y ventajas de su inclusión en los espacios.

## **2.4. Herramientas de Simulación y Análisis**

A partir de la noción de que la inclusión de la iluminación natural en el funcionamiento de un edificio tiene repercusiones positivas en su desempeño energético y térmico, se desarrollaron distintos programas simuladores que permiten predecir las ventajas y desventajas del comportamiento de un proyecto antes de ser construido, para así permitir a los arquitectos y diseñadores realizar modificaciones para obtener resultados óptimos. Ahmad et al. (2020), desarrollaron una revisión con el fin de comparar y contrastar algunos de los simuladores existentes en el mercado, la Tabla 6. *Comparación de herramientas de simulación y análisis de iluminación*. resume este análisis.

### **2.4.1. Matlab**

Es una herramienta digital que permite simular el ciclo de funcionamiento de un edificio para identificar aciertos y errores en su configuración, la cual incluye la circulación del aire, el sistema hidráulico, así como el comportamiento de la luz natural y su influencia en la ganancia térmica del espacio, características que determinan la vitalidad del proyecto. Matlab es un programa que requiere de la especificación de datos a partir de un desarrollo e intervención algorítmica y de programación (Ahmad et al., 2020).

### **2.4.2. Ecotect**

El simulador Ecotect tiene un enfoque de eficiencia energética, especialmente aplicable en las primeras etapas de diseño respecto a criterios de diseño como la configuración del área de ventana, sistemas de sombreado externo. Su simulación dinámica la realiza a través de Radiance. Es un programa de uso complejo y debido a que su criterio principal es la trayectoria solar, su aplicación se rescata en criterios de diseño enfocados en la geometría solar (Ahmad et al., 2020).

### **2.4.3. Dialux**

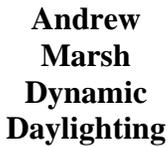
El enfoque principal de Dialux como herramienta de simulación es comparar el comportamiento de un proyecto según su sistema de iluminación artificial y su variación según su inclusión de iluminación natural; contiene un gran catálogo de iluminación artificial comercial, sistemas de control de la iluminación natural, entre otros elementos (Ahmad et al., 2020).

La programación de las condiciones climáticas para el análisis lumínico las especifica a partir de las condiciones especificadas bajo tres tipos de cielo según lo establece el CIE: nublado, claro y mixto. Sin embargo, cabe destacar que, a diferencia de otros programas revisados, el cálculo del comportamiento de la luz natural se realiza a través de un sistema interno propio del programa. En él se puede especificar las características propias del espacio, como la reflectancia de los muros, piso y techo, el coeficiente de reflexión del vidrio, inclusive la reducción por contaminación (Zhen et al., 2019).

### **2.4.4. VeLux**

Velux es una compañía danesa que se especializa en la producción de cancelería para tragaluces, lucernarios, así como accesorios para su instalación y mantenimiento. Sin embargo, también se dedican a la incentivación de investigación y desarrollo de herramientas de apoyo para el análisis de la iluminación natural (VELUX Group 2023). Luxion, es una empresa dedicada al desarrollo de programas de análisis y visualización de la iluminación en distintos enfoques.

**Tabla 6. Comparación de herramientas de simulación y análisis de iluminación.**

Programam	Ventajas	Desventajas
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulación dinámica a través de: SIMULINK</li> <li>• Manejo de gran cantidad de datos.</li> <li>• Enfoque lumínico en su relación con las ganancias térmicas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difícil conversión de datos entre programas.</li> <li>• Requiere de conocimiento de programación para su manejo.</li> <li>• Costo de licencia alto.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulación dinámica a través de: RADIANCE</li> <li>• Análisis de geometría solar, radiación solar y cálculos.</li> <li>• Incluye lenguaje de realidad virtual, niveles de luminancia y exportación de información.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Su representación en 3D y herramientas de modelado retrasan el funcionamiento del programa.</li> <li>• No es posible importar fotometría del lujo luminoso</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gran variedad de modelos 3D en su librería</li> <li>• Incluye catálogo de luminarias con características editables.</li> <li>• Gran eficiencia en el cálculo de iluminación natural.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No considera un arreglo automatizado de luminarias en los espacios, debe especificarse.</li> <li>• No tiene gran variedad en sus herramientas de modelado 3D del edificio.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Herramienta para etapa inicial de diseño.</li> <li>• Librería predeterminada de objetos 3D.</li> <li>• Se puede modificar las especificaciones de la luminaria.</li> <li>• Se puede importar geometría 3D de otros formatos estándares.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se puede manipular el nivel de luminancia e iluminancia a través de una cámara o simulador.</li> <li>• No considera un arreglo automatizado de luminarias en los espacios, debe especificarse.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulación dinámica a través de: ENERGY PLUS</li> <li>• Trabaja con el archivo climático.</li> <li>• Puede analizar también el cálculo y simulación de ganancia térmica.</li> <li>• Puede simular todo un edificio (no solo 1 habitación).</li> <li>• Realiza el análisis en minutos.</li> <li>• La simulación trabaja con la información climática exacta que se desea analizar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limitación en detalle de modelado.</li> <li>• Costo de licencia.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trabaja con el archivo climático.</li> <li>• Analiza en tiempo real la iluminación natural del espacio conforme se plantean modificaciones de diseño de ventanas y configuración del espacio.</li> <li>• Convierte iluminancia, factor de luz natural y autonomía de luz natural.</li> <li>• Comparable con RADIANCE</li> <li>• Costo; Gratuito.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limitado en su geometría y posibilidades de especificación de características del espacio.</li> <li>• Es una herramienta en línea y no un programa adquirible por licencia.</li> </ul>

Nota. Elaboración propia adaptada de Ahmad, A., et al (2020).

En conjunto, Velux y Luxion desarrollan una herramienta digital que permite la simulación y análisis de los efectos de la presencia de la luz natural a través de las ventanas de un edificio (Luxion, 2023). El programa Velux trabaja bajo las condiciones de 16 tipos de cielo según se determinan por el CIE y vincula los resultados gráficos y numéricos de la presencia de la luz natural y su influencia en la ganancia térmica, ventilación y la necesidad de complemento con la iluminación artificial (Ahmad et al., 2020).

#### **2.4.5. *Design Builder Energy Plus***

Es un programa de análisis del comportamiento de un edificio que permite evaluar el diseño y funcionamiento desde el enfoque de ingeniería, arquitectura y de eficiencia energética. Su simulación de iluminación natural funciona a través de Radiance y Daysim, así como por cálculos internos programados dentro del mismo simulador y permite analizar el comportamiento lumínico del espacio a partir de distintas variables como autonomía de luz natural, iluminancia útil de luz solar, iluminancia, factor de luz natural, así como el deslumbramiento y uniformidad en los resultados (Desing Builder, 2023).

Design Builder trabaja con distintos tipos de cielo, tanto los establecidos por CIE como por el método Pérez establecido en 1997, o bajo la especificación de propiedades de iluminancia puntuales introducidas por el usuario manualmente. Además, permite calificar cada valoración según los criterios de distintas certificaciones de sustentabilidad como BREEAM, *Green Stars* y LEED (Design Builder, 2023).

#### **2.4.6. *Dynamic Daylighting***

Esta herramienta digital no es un programa que requiere instalación, es un simulador en línea desarrollado por Andrew Marsh que realiza un análisis dinámico de la iluminación natural de un espacio, incluye iluminancia puntual, factor de luz natural y autonomía de luz natural.

Para el cálculo de iluminación natural, se importa el archivo climático con el que se desea trabajar y los resultados se procesan a partir del método de flujo dividido para determinar los reflejos generados, así como el análisis de los rayos solares, trayectoria y rebotes, para determinar la relación entre la cuadrícula de análisis interna, y el cielo visible según la apertura del vano (Andrew Marsh, 2019).

Las iluminancias de los tipos de cielo predeterminados se establecen según los métodos determinados por la CIE, que a su vez se plantean según la ISO 15469:2004. Los tipos de cielo resultan especialmente útiles en caso de no contar con el archivo climático correspondiente a la zona geográfica en la que se emplaza el proyecto a analizar (Andrew Marsh, 2019).

Su alcance de análisis es comparable con Radiance y con Daysim, sin embargo, su principal limitación son sus posibilidades de modelado del espacio y contexto.

## **2.5. Metodologías de Análisis de Resultados**

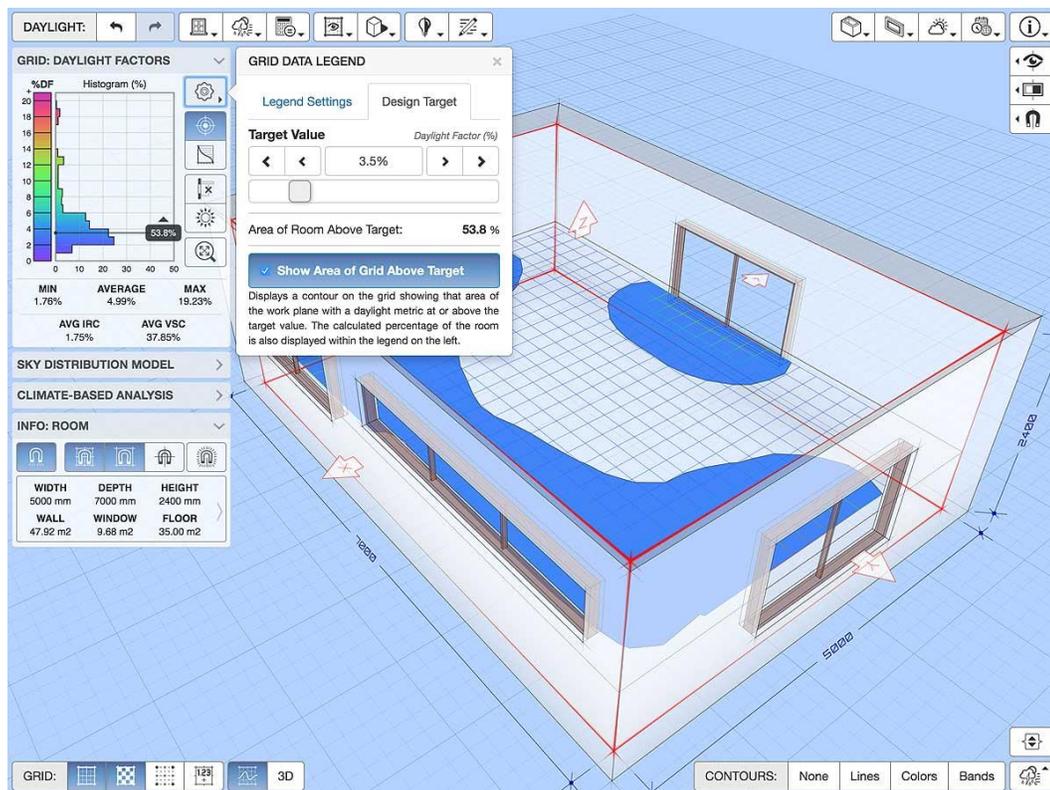
A partir de la revisión del estado de la cuestión, se entiende que no existe una única metodología para evaluar la iluminación natural de un espacio. Esto se debe a tres factores principales: la variedad de parámetros y variables que se pueden utilizar para valorar la calidad lumínica, la diversidad de formas de programación y procesamiento de datos que utilizan los simuladores digitales, así como la deficiencia en las normativas y estándares internacionales respecto a especificaciones en la metodología para la evaluación lumínica de forma digital, pues la mayoría de ellas se centra en el monitoreo de espacios existentes y no en la valoración de escenarios simulados previo a su construcción.

Debido a lo anterior, los estudios que han aplicado las herramientas de simulación como parte de su técnica para la evaluación de la calidad lumínica de espacios interiores, desarrollaron su propia metodología para el análisis de resultados.

### 2.5.1. Mapa Reticular y Porcentaje de Área

En la descripción de su simulador en línea Dynamic Daylighting, Andrew Marsh (2019) describe la forma en la que se realiza el análisis de la distribución espacial de la iluminancia a partir del factor de luz natural. Esta variable se presenta en un mapa reticular alineado de forma paralela al piso, sobre la que los resultados numéricos generan un gradiente de color, líneas de contorno y valores puntuales de forma textual. La calidad lumínica del espacio se evalúa a partir de la delimitación del objetivo de diseño, donde se determina el valor del límite mínimo de factor de luz natural que se busca para el espacio y a partir de esta información el programa muestra el porcentaje de área que es igual o está por encima de ese valor como lo muestra la Figura 24.

Figura 22. Visualización de Diseño en Dynamic Daylighting.



Nota. Obtenido de Andrew Marsh.

Criterios similares pueden aplicarse en el análisis de resultados arrojados por otros simuladores. Ali y Mustafa (2024) utilizaron una combinación de Revit, Autodesk Insight 360 y ClimateStudio de Rhinoceros para el análisis del impacto de la morfología de mezquitas en el confort visual; en el desarrollo de su metodología determinaron tres variables para la evaluación de la calidad lumínica del espacio: iluminancia, factor de luz natural y probabilidad de deslumbramiento. Así, el desempeño de la iluminación natural se evaluó a partir de los niveles de iluminancia, de los cuales el experimento buscó que, por más de 2000 horas al año, se debía alcanzar un mínimo de 300lx en al menos un 80% del área de la habitación analizada. Esto deja no solo un rango amplio de valoración, sino una deficiencia en el entendimiento de cómo se distribuyen los valores en el espacio, o el contraste entre ellos.

### ***2.5.2. Contornos Tridimensionales y Valores Anuales.***

La herramienta de Radiance, mencionada como parte del funcionamiento del simulador Ecotect, es en realidad una interface que permite estimar los niveles de iluminancia sobre las distintas superficies de un modelo y crea visualizaciones similares a lo que es percibido por un usuario de forma tridimensional (Marsh, 2007), sobre las que se indican los contornos de distribución de los rangos de iluminación. Esta forma de visualización describe el comportamiento de la luz en el espacio de manera absoluta, a partir de variables como el factor de luz día y autonomía de la luz natural, visualización que también está disponible en el programa, sin embargo, su uso es menos común.

Kota et al. (2014) desarrollaron un prototipo de metodología en el cual se une el uso del programa Revit, para una simulación precisa del espacio, con Radiance, para la obtención de los diagramas de contornos tridimensionales y con DAYSIM, programa a través del cual se genera un perfil de iluminación anual.

De manera similar, Teo et al. (2023) utilizaron esta forma de visualización generada por Radiance, para la evaluación de la viabilidad de inclusión de repisas de luz en ventanas inclinadas como técnicas de iluminación natural pasivas. Su metodología comparó el estado actual de su caso de estudio, un edificio de oficinas de más de 42 niveles, con la aplicación de 4 variaciones de diseño en la inclusión de repisas de luz; estos cinco escenarios se simularon en dos horarios y bajo dos tipos de cielo, con el objetivo de alcanzar valores anuales de iluminancia útil de 300 a 3000 luxes.

### ***2.5.3. Mapa Reticular y Valores Anuales.***

Aunque la delimitación de una metodología de valoración anual suele encontrarse junto con la visualización tridimensional del espacio, existen simuladores que arrojan datos anuales aislados de su visualización gráfica, como es el caso de Design Builder, que además de su simulación de iluminancia y factor de luz día, tiene la opción de valorar la autonomía de la luz natural.

Amleh et al. (2023) utilizaron Design Builder para evaluar la variación de criterios de diseño para la iluminación natural en habitaciones de hospitales para el confort visual de los enfermos. La metodología desarrollada evaluó los resultados de cada escenario simulado según los valores de factor de luz día, que debía ser  $\geq 3\%$ , como de la autonomía de la luz natural, que debía ser mayor a 75%.

## **CAPÍTULO III. Marco Metodológico**

La estructura general del experimento a desarrollar para la presente investigación se presenta en dos secciones principales: monitoreo y simulación. La etapa de monitoreo permite un entendimiento de las condiciones reales de la unidad de análisis seleccionada, mientras que, por su parte, la etapa de simulación busca analizar el comportamiento de la unidad de análisis con la aplicación de distintas estrategias de diseño a evaluar.

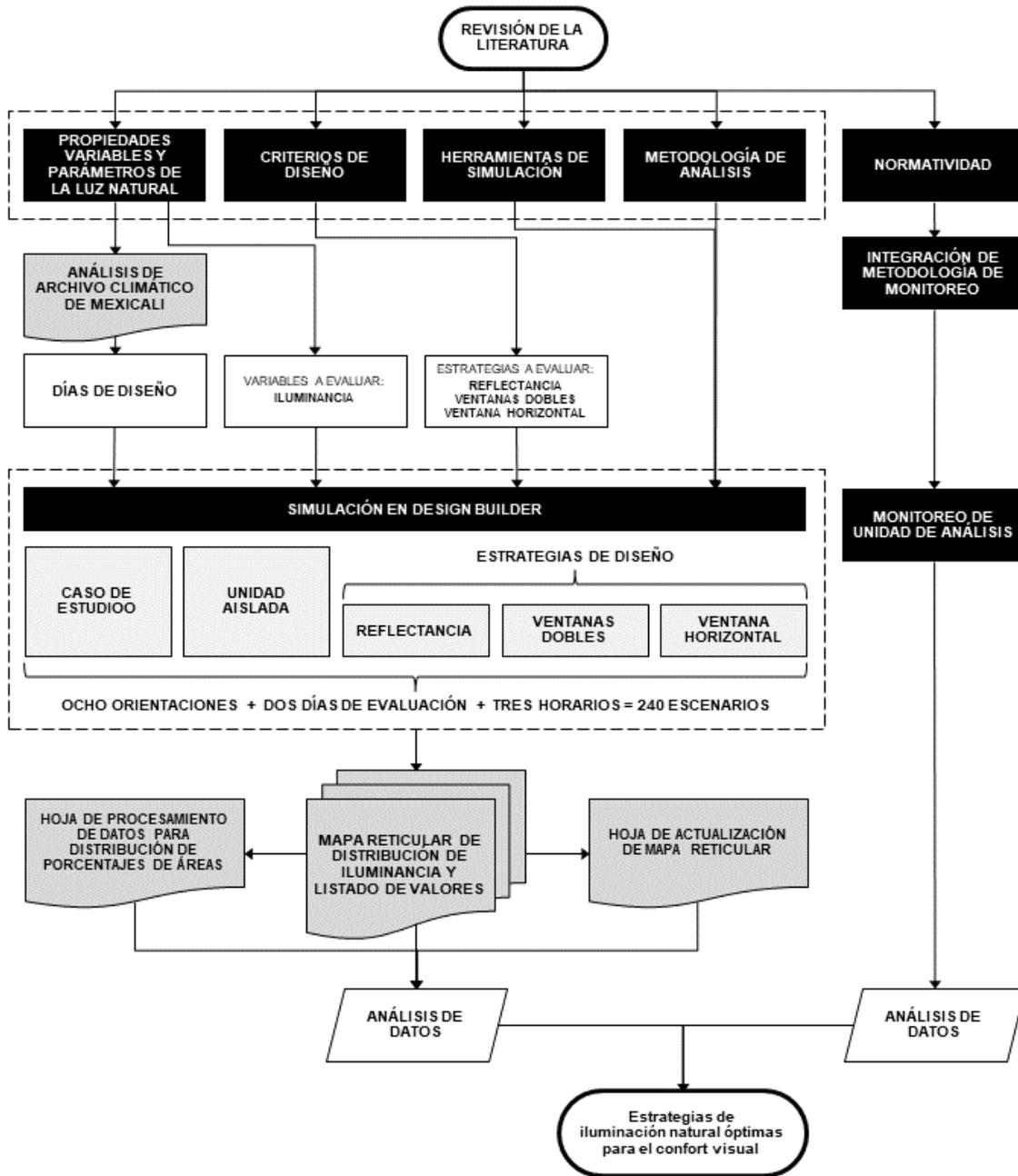
El análisis de la literatura dicta los pasos a seguir y el orden de éstos define no solo la funcionalidad para la obtención de los resultados para la comprobación de la hipótesis, sino varios de los aspectos definitivos para el desarrollo de la metodología en sí, como la selección del programa de simulación y la definición de las estrategias a evaluar. La Figura 23. Diagrama de flujo de la metodología aplicada., en él se expone el orden del proceso a seguir para el cumplimiento de los objetivos y la respuesta a las preguntas planteadas.

### **3.1. Diseño del Experimento**

Para la presente investigación se precisa un enfoque metodológico de tipo cuantitativo, ya que se identifica, según lo define Hernández-Sampieri (2018), el requerimiento de un seguimiento de orden secuencial a partir de un plan riguroso diseñado para la comprobación de la hipótesis planteada; la recolección de datos se refiere a la medición de las variables evaluadas, en este caso la iluminancia, y el análisis sucede a partir de métodos estadísticos.

Además, el diseño de la investigación se delimita como experimental, pues, según lo define Muñoz (2011), esta tipología clasifica los diseños metodológicos que se enfocan en la realización de pruebas bajo condiciones de un ambiente controlado. En el caso de esta metodología, las simulaciones toman el lugar de las pruebas de laboratorio o experimentos.

Figura 23. Diagrama de flujo de la metodología aplicada.



Nota. Elaboración propia

A partir de las delimitaciones anteriores, se define el alcance del presente trabajo como exploratorio-descriptivo, ya que a pesar de que el objetivo es describir el comportamiento de las estrategias frente a los niveles de confort visual establecidos, a partir de la revisión de la literatura se identifican las deficiencias en las especificaciones sobre la metodología de simulación y análisis para evaluar la calidad lumínica de un espacio, por lo que se requiere de una exploración inicial en el desarrollo del método en sí (Hernández-Sampieri, 2018),

### **3.2. Objeto de Estudio**

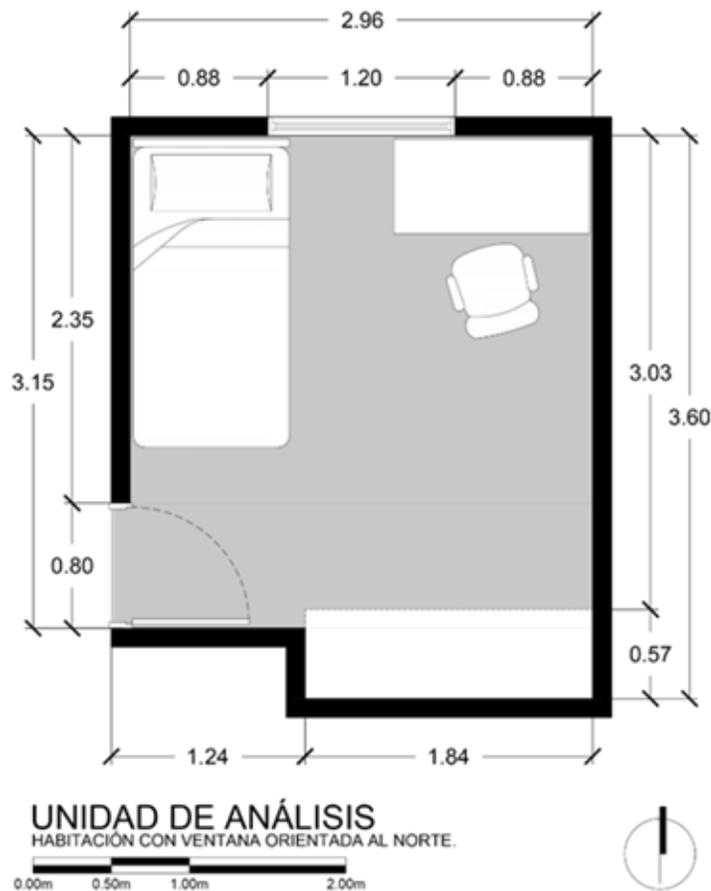
El objeto de estudio a abordar son las estrategias de diseño para el aprovechamiento de la luz natural. Su evaluación se realiza a partir de modelar las estrategias de iluminación natural en una unidad de análisis a través del programa de simulación Design Builder. El programa permite analizar el cambio en el comportamiento de las variables de medición para cada estrategia simulada en la habitación.

Sin embargo, el las estrategias de diseño se sitúan en una unidad de análisis dentro de un caso de estudio. Ésta, se encuentra en la ciudad de Mexicali, México, presenta un clima árido-seco, con un promedio de temperatura de 42.2°C en su mes más caliente, y recibe un 90% de las posibles horas de luz natural cada año (García et al.,2013).

La habitación evaluada está ubicada en la planta alta de una vivienda de dos niveles emplazada en una zona residencial; está construida de bloque de concreto, según la configuración mostrada en la Figura 24 y tiene una altura interior de 2.70m. Su muro este se encuentra a 1 metro de distancia con su colindancia; su muro norte se encuentra a 3 metros del edificio colindante y en su centro se coloca un vano de ventana de 1.20m x 1.22m, con vidrio claro de 3mm de espesor, sin tinte añadido, con una transmitancia visible del 90%, y marco de aluminio color blanco.

El espacio plantea un uso específico en el que de 8:00 a 18:00 h, se utiliza como área de trabajo, el nivel de actividad es bajo y la cantidad de ocupantes es un total de 1. Como mobiliario se identifican una cama, armario y un escritorio colocado próximo a la ventana conforme a la Figura 24. *Plano de la unidad de análisis.*, mismo que establece el plano de trabajo de referencia.

**Figura 24.** *Plano de la unidad de análisis.*



*Nota.* Elaboración propia.

### 3.3. Delimitación de Usuario y Necesidades

Debido a que el objetivo del presente estudio es evaluar las estrategias de iluminación, y no la valoración de un caso de estudio específico, se delimitó un usuario y necesidades según la base de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

De acuerdo al censo de población y vivienda de INEGI (2020), en el municipio de Mexicali, Baja California, hay un promedio de 3.2 ocupantes por vivienda unifamiliar, compuesta en una relación 1-1 por hombres y mujeres, con una edad media de 31 años. La tasa de participación económica es del 63.3%, lo cual indica que en la mayoría de los casos solo 1 integrante de la familia es económicamente activo. Esto implica que la dinámica familiar se estructura por un padre trabajador, un padre que mantiene el hogar y 1-2 hijos por familia (INEGI, 2020).

Esta información definió las actividades básicas que se desarrollan en los espacios de una vivienda y permitió delimitar los valores de las necesidades lumínicas según dichas actividades. Los niveles mínimos de iluminación considerados para la investigación se encuentran en la Tabla 7; estos valores se tomaron de los niveles mínimos delimitados en la Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008, que establece las condiciones de iluminación en los centros de trabajo, y se complementaron con los parámetros establecidos en el Estándar de Diseño para Iluminación Arquitectónica GB 50033-2013, normativa China revisada y aplicada en la metodología planteada por Zhen, M., et al (2019).

**Tabla 7.** Niveles mínimos de iluminancia considerados por espacio.

<b>Espacio / Actividad</b>	<b>Nivel mínimo de iluminancia (luxes)</b>
<b>Pasillos y escaleras</b>	50 - 100
<b>Salas de estar</b>	100
<b>Baño</b>	150
<b>Recámara</b>	300
<b>Cocina / Tareas de precisión</b>	300 - 500

*Nota. Adaptado de NOM-025-STPS-2008 y GB 50033-2013.*

Estos parámetros se utilizaron para evaluar los resultados obtenidos en el simulador, para así clasificar las estrategias según su cumplimiento con los valores establecidos en la hipótesis de investigación.

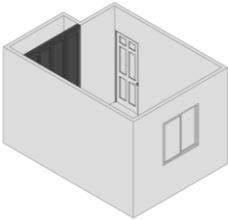
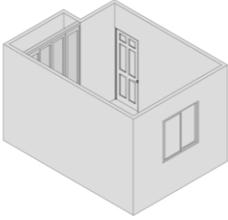
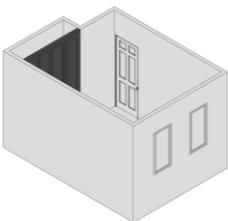
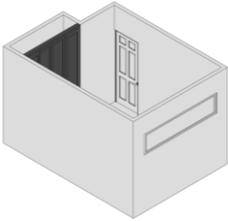
### **3.4. Selección de Estrategias a Evaluar**

Para la aplicación de la metodología, se seleccionaron 3 estrategias de diseño principales para su evaluación en la simulación según lo enlistado en el marco teórico y cómo se aprecian en la Tabla 8. La delimitación y reducción a la evaluación de 3 estrategias, obedece principalmente a dos factores. El primero es la simplicidad de adaptación del criterio de diseño aplicado al desarrollo de un proyecto, pues tal cual lo menciona ASHRAE (2017), la selección de la mejor estrategia de adaptación para la iluminación natural dependerá de los beneficios que brinde y del costo de su aplicación; por ello, mantener la propuesta de ajuste de diseño sencilla tanto para los arquitectos como para los usuarios, representa mayor facilidad de corrección y eficiencia de aplicación.

El segundo factor definitivo para la delimitación de las estrategias a evaluar, es la metodología planteada, que se establece según lo que dictan las normativas existentes, así como por el funcionamiento integral de los simuladores. Como se menciona en el marco teórico, el análisis de la calidad lumínica de un espacio difícilmente se traduce a un valor general o promedio. La luminancia se valora de manera puntual y metódica a lo ancho y largo de una cuadrícula imaginaria en el espacio, valor que cambia según su ubicación en la habitación, hora de medición y características de las estrategias de iluminación natural aplicadas, por lo que cualquier ligera modificación en ellas, representa una afección a los niveles de iluminación en el interior.

Por lo anterior, resulta conveniente mantener reducidas las variaciones de las características de las estrategias, para permitir un mayor control sobre la cantidad y método de análisis de resultados. Así, al considerar las condiciones del estado actual, la unidad de análisis aislada y 3 estrategias de iluminación natural aplicadas, para la evaluación de su comportamiento en las 8 orientaciones, durante 2 días y 3 horarios de valoración, el total resulta en 240 escenarios a valorar.

**Tabla 8.** Estrategias seleccionadas para evaluación en simulación.

Estrategia	Configuración de Ventana	Orientación	Reflectancia de Muro de Fondo
<b>Estado Actual</b>			
	1.20m x 1.22m	Norte	0.12
<b>Reflectancia</b>			
	1.20m x 1.22m	Noreste	0.70
		Este	
		Sureste	
<b>Configuración de Área de Ventana - Dobles</b>			
	Dos ventanas verticales de 0.60m x 1.22m con separación de 0.60m	Sur	0.12
		Suroeste	
		Oeste	
		Noroeste	
<b>Configuración de Área de Ventana - Horizontal</b>			
	Ventana horizontal de 2.44m x 0.60m Colocada a 1.45 m de altura		0.12

Nota. Elaboración propia.

### **3.5. Integración de Normativa**

La metodología de monitoreo se desarrolla a partir de la integración de tres documentos principales: la normativa nacional NOM-025 y los estándares internacionales EN17037 y GB 50033. Los tres documentos revisados presentan procedimientos y enfoques diferentes, por lo cual la revisión de estos estándares permite llegar a una amalgamación de la metodología y rangos establecidos que se ajustan a los objetivos en cuestión según se entiende en la Tabla 9.

A partir de la revisión de los procedimientos establecidos en los documentos, se propone la metodología aplicada a la unidad de análisis. El método se conforma por la integración de las fortalezas de cada normativa, y establece, según la Tabla 9, el proceso, las condiciones y las unidades de valoración de los resultados para la evaluación de la calidad lumínica de los espacios y de las estrategias de diseño aplicables para alcanzar los niveles de confort.

### **3.6. Monitoreo en Unidad de Análisis**

Se realizaron dos días de evaluación, uno bajo condiciones de cielo despejado, 22 de mayo del 2022, y un segundo día bajo condiciones de cielo cubierto; ambos en un horario entre las 8:00 y las 16:00 h. A pesar de que la normativa revisada plantea que el monitoreo debe realizarse bajo condiciones de cielo cubierto, esta especificación se señala sólo cuando la calidad de iluminación será valorada según el factor de luz día; la metodología desarrollada plantea que la evaluación de la calidad lumínica de un espacio resulta de mayor relevancia si se realiza bajo las condiciones climatológicas predominantes de la ubicación geográfica.

De manera ordenada, se inició por la inspección de cada instrumento enlistado en la Tabla 10, se realizó su debida limpieza y cambio de baterías, revisión de sus manuales y la realización de pruebas de sensibilidad para evaluar la respuesta de cada instrumento.

**Tabla 9. Metodologías de monitoreo según normativas existentes.**

<b>Criterios</b>	<b>NOM-025</b>	<b>EN17037</b>	<b>GB 50033</b>	<b>Metodología Aplicada</b>
<b>Espacio de Evaluación</b>	Laboral	General	Residencial	General
<b>Periodo de Medición</b>	Turno de trabajo: matutino, vespertino o nocturno	No especifica	10:00 - 14:00	Horario en el que se utiliza el espacio para la tarea principal
<b>Tipo de Cielo</b>	No especifica	Cielo cubierto CIE	Cielo cubierto	El que se presente con mayor frecuencia
<b>Ubicación de sensores</b>	Al centro de cada zona de medición determinada por el índice de área calculada según la fórmula	Al centro de cada recuadro dentro de una retícula de 0.25m x 0.25m, a partir de un margen perimetral de 0.50m	A lo largo de un eje central de la habitación, distribuidos cada 0.5m -1m según la longitud del eje	Al centro de cada zona de medición determinada por el índice de área según lo presenta la NOM-025.
<b>Altura de plano de medición</b>	A la altura del área de trabajo	A 0.85m sobre el nivel del piso	A 0.75m sobre el nivel del piso	Se determina por la altura del área de trabajo
<b>Cantidad de lecturas de un mismo punto</b>	3 lecturas en cada punto determinado durante el turno evaluado	No especifica	3 lecturas de cada punto determinado	Una vez cada hora del periodo determinado.
<b>Variables Determinantes de Calidad Lumínica</b>	Iluminancia (lx)	Factor de luz natural (%) Autonomía de la luz natural (%)	Iluminancia (lx) y factor de luz natural (%)	Iluminancia (lx)
<b>Contexto</b>	Evaluación de la reflexión de paredes y plano de trabajo según la fórmula presentada	La normativa específica 4 criterios generales de evaluación: 1. Exposición a la Luz Solar 2. Visibilidad al exterior 3. Disponibilidad de Luz Natural 4. Protección de Deslumbramiento	No especifica	Evaluación de la reflexión de paredes y plano de trabajo según la NOM-025.
<b>Resultados</b>	Cumplimiento de niveles mínimos de iluminancia en cada punto evaluado y de valores máximos de reflexión de muros y planos de trabajo	Se evalúan dentro de los 4 criterios generales, la calificación dentro de los valores mínimos, medios e idealmente recomendados	Promedio del total de medidas realizadas durante el periodo de análisis.	Promedio de los cuadrantes en una hora específica del periodo de evaluación  Promedio por cuadrante a lo largo de todo el periodo de evaluación

*Nota.* Elaboración propia a partir de NOM-025, estándar EN17307 y estándar GB 50033.

El instrumento se colocó sobre un tripié que mantuvo la altura del plano de medición a 0.70m, según su relación con el plano de trabajo. De acuerdo al índice de área calculado según la ecuación 3 y la Tabla 4 mencionadas en la revisión de la normatividad NOM-025, la habitación debe dividirse en 4 zonas a evaluar y colocar el luxómetro al centro de cada una de éstas según lo muestra la Figura 25.

$$IC = \frac{(2.96)(3.15)}{2.70(2.96+3.15)}$$

$$IC = 0.55$$

$$IC < 1$$

A partir de esto, de los tres instrumentos disponibles, dos se mantuvieron estáticos. El primero se colocó directamente sobre el escritorio, en el punto A, según la NOM-025 (2008) que establece que se debe de colocar el luxómetro tan cerca como sea posible del plano de trabajo y se tomaron precauciones para no proyectar sombras ni reflejar luz adicional sobre el luxómetro.

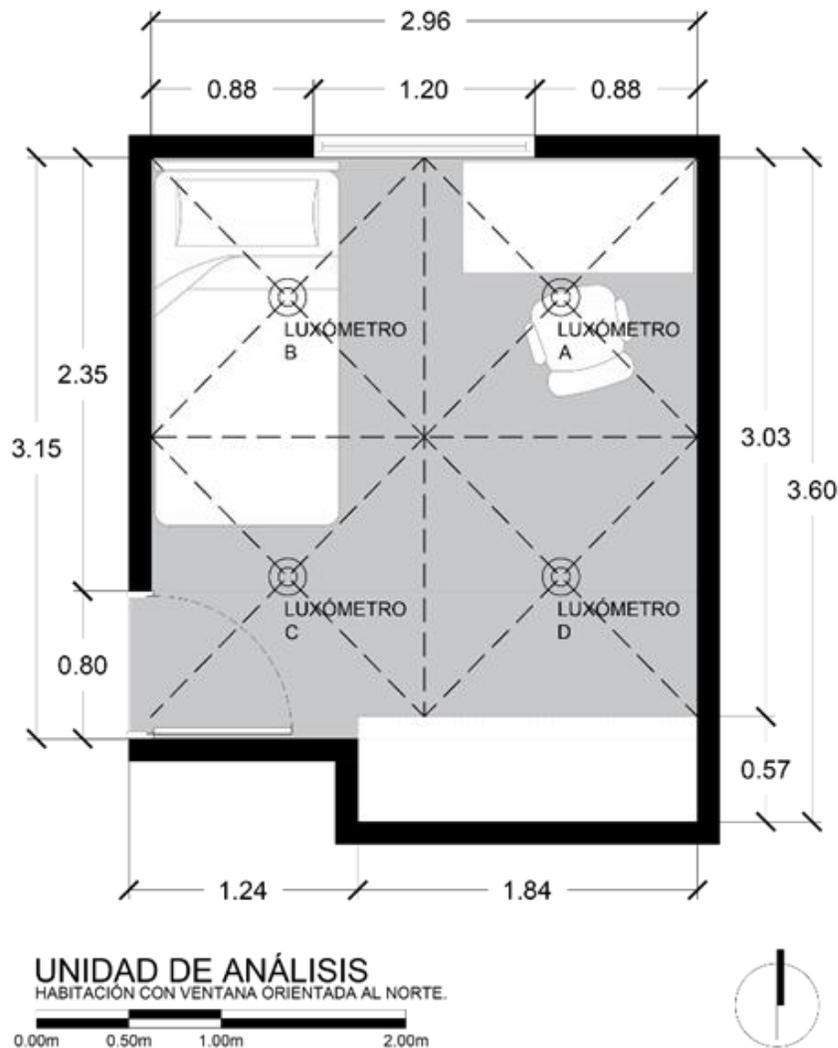
**Tabla 10.** Instrumentación utilizada en monitoreo.

INSTRUMENTO	VARIABLES	UNIDAD	PRECISIÓN
<p><b>Luxómetro.</b></p> 	Iluminancia	Luxes	23°C +- 5°C 70% humedad relativa
<p><b>Luxómetro.</b></p> 	Iluminancia	Luxes	±3%

Nota. Elaboración propia.

El segundo se colocó sobre un tripié que mantuvo la altura del plano de medición a 0.70m según su relación con el plano de trabajo establecido, en la posición del punto C, como se puede observar en las Figura 25 y Figura 26. Debido a la disponibilidad de instrumentos, el tercer luxómetro se sostuvo para realizar la medición puntual tanto del cuadrante B, sobre la cama, y en la ubicación del punto D. La variación entre luxómetros fue de un 8%.

**Figura 25.** División de zonas en unidad de análisis y posiciones de luxómetro.



*Nota.* Elaboración propia.

Así, y según la coincidencia entre NOM-025 y GB 50033, cada punto de evaluación se leyó tres veces durante un periodo de 2 minutos, y se consideró el promedio de las tres lecturas como el dato puntual de registro, durante cada uno de los seis horarios de valoración. Además, la NOM-025 establece que el plano de trabajo y las paredes con cercanía al área de trabajo no deben superar los niveles del factor de reflexión del 50% y el 60% respectivamente.

**Figura 26.** Foto de posición de luxómetros en unidad de análisis



*Nota.* Elaboración propia.

Para la medición del factor de reflexión de las superficies y según lo indica la NOM-025, se realizó una primera medición (E1), con el sensor del luxómetro colocado de frente a la superficie, a una distancia de  $0.10\text{m} \pm 0.02\text{m}$ , hasta que la lectura permanezca constante.

La segunda medición (E2), se realizó con la fotocelda orientada en sentido contrario y apoyada en la superficie, con el fin de medir la luz incidente. Estas dos mediciones se consideraron para encontrar el factor de reflexión de la superficie (Kf) se determinó según la ecuación 4 establecida en la NOM/025.

$$K_f = \left( \frac{E_1}{E_2} \right) 100\% \quad (4)$$

Donde:

Kf= Reflexión de la superficie

E1= Iluminancia de la superficie (emisión)

E2= Iluminancia incidente (recepción)

### **3.7. Simulación de Estrategias**

Para la evaluación de las estrategias de iluminación natural seleccionadas, y tras la revisión de las herramientas digitales existentes en el mercado actual, se decidió utilizar el programa simulador *Design Builder*. Como se mencionó en el marco teórico, es un programa que permite la simulación del ambiente luminoso y el cálculo de las condiciones ópticas del espacio que funciona a través de programación externa e interna (Desing Builder, 2023).

#### **3.7.1. Análisis de Archivo Climático y Delimitación de Días de Diseño**

Según la revisión del marco teórico y la normatividad existente, los cálculos se pueden desarrollar bajo la consideración de diversos tipos de cielo según los establece la CIE; la mayor parte de la bibliografía menciona que el tipo de cielo cubierto es requerido para los cálculos de factor de luz día, sin embargo, otros estudios presentan otros criterios para determinar los días y horas de simulación.

Debido a la limitación de tiempo de la investigación, la metodología para el monitoreo atiende a los días que presentan las condiciones de tipo de cielo especificadas en los estándares revisados. Sin embargo, debido a que la simulación digital ofrece un mayor nivel de influencia y rango de manipulación, tanto de las características del espacio como de las condiciones climáticas, antes de proceder a la simulación de la unidad de análisis y las estrategias de diseño, es necesario establecer los días de evaluación.

Para esto se realiza un análisis de los datos anuales de iluminancia registrados en el archivo climático de Mexicali y se adapta la programación del archivo de cálculo preparado originalmente por el Dr. Marcos González Treviso, para el desarrollo de su tesis de doctorado “Efecto de la inercia térmica en un dispositivo de ventilación por extracción pasiva” (2016), en la cual, a partir del importe de datos térmicos anuales, se obtiene el día típico de diseño mensual. En el caso de la presente investigación, esta programación se realiza con los datos de iluminancia directa, con el objetivo de obtener los días de mayor y menor disponibilidad de luz natural y seleccionarlos como días de simulación.

Respecto a la selección de horas de evaluación, Freewan, A., et al. (2020) simularon los días marzo 21, junio 21 y diciembre 21 a las 12:00 horas para analizar las variaciones por temporadas del año, así como por la selección del día más corto y largo del año, mientras que Ashrafian y Moazzen (2019) en su metodología valoran solo el contraste entre las 10:00 y 14:00 horas. Por su parte, Rastegari, M. et al. (2021), realizaron sus estudios en las 9:00, 12:00 y 15:00 horas, debido a que es el periodo del día en el que de manera estable y consistente se presentan datos de iluminancia en todos los días de evaluación. Este último criterio se toma para la aplicación de la metodología para la presente investigación.

### **3.7.2. Programación de la Simulación**

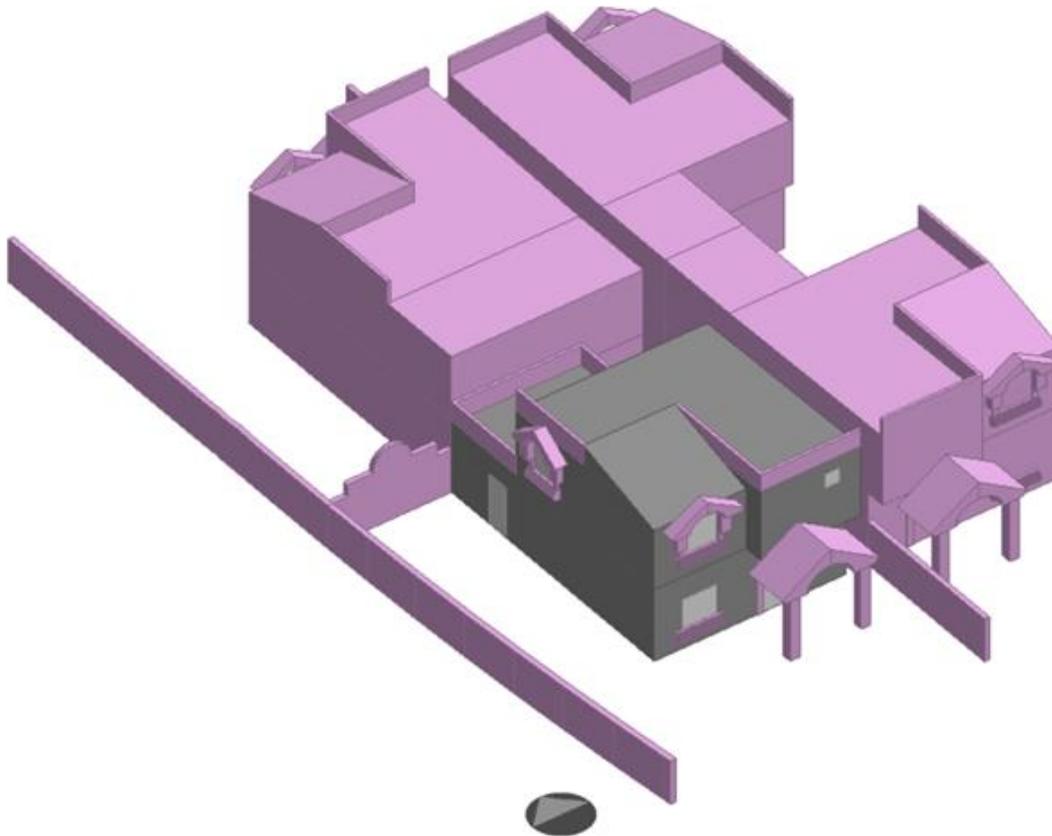
Design Builder, en su séptima versión, opera su módulo de iluminación natural desde los motores de cálculo de Radiance y Daysim. El primero de ellos permite calcular el desempeño lumínico del espacio según los valores de iluminancia, factor de luz diurna y uniformidad, mientras que el segundo sistema provee los cálculos de autonomía espacial de luz diurna, exposición solar anual e iluminancia útil de luz diurna (Design Builder, 2023).

Para la programación del simulador, se optó por importar en el programa el archivo climático de la ciudad de Imperial, Estados Unidos, ya que este contiene información térmica y lumínica recuperada de la estación meteorológica.

La simulación y cálculo lumínico considera los parámetros básicos de geometría del espacio, la especificación de reflectancia de las superficies y la transmisión de luz visible del acristalamiento, así como el espesor de los cerramientos y cancelería de ventanas, ya que el programa reconoce elementos de obstrucción y redirección lumínica tanto exteriores como interiores. Así, una vez preparado el archivo se modeló tanto la totalidad del edificio que contiene el espacio a evaluar, como el contexto inmediato, esto último para que se pudiera tomar en consideración los valores de reflexión que afectan directamente a la unidad de análisis, como se observa en la Figura 27.

La programación base de la unidad de análisis requirió delimitar la reflectancia del terreno, que, según los valores típicos, se manejó un valor de 0.22. Así mismo, se especificaron las propiedades tanto de los muros interiores como del contexto. El emplaste de yeso interior y exterior se delimitó con una absortancia de 0.50, mientras que el muro que representa el closet de madera color chocolate se programó con un valor de 0.88 según lo establece CATEDI. La cubierta del área de ampliación de la edificación, que juega un papel de reflector hacia el interior de la habitación de análisis, se delimitó con un valor de absortancia de 0.20, es decir, refleja hasta el 0.80 de la luz que recibe.

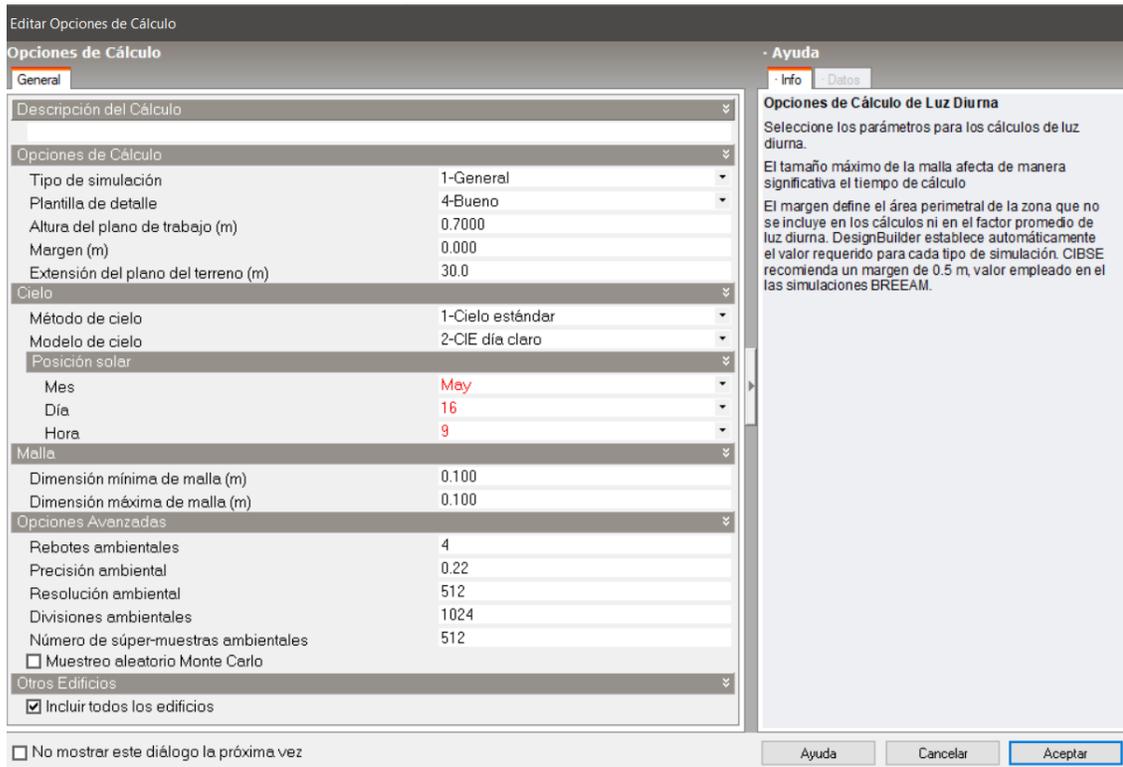
**Figura 27.** Unidad de análisis en programa de simulación Design Builder



*Nota.* Elaboración propia en Design Builder.

. Así, la simulación se realizó bajo la especificación manual por parte del usuario, información que se introduce en el cuadro de diálogo que arroja el programa para poder realizar el cálculo lumínico, según se muestra en la **Figura 28**. El tipo de simulación se determinó como general, y la plantilla de detalle se mantuvo en buena calidad para agilizar el trabajo operativo del programa; se optó por no determinar un margen alrededor del área simulada ya que se busca analizar la totalidad del espacio y los mapas de distribución de iluminancia que se generan permiten entender visualmente el acomodo en el espacio de los valores mínimos.

**Figura 28.** Programación de simulación en Design Builder



*Nota.* Elaboración propia en Design Builder.

Como lo muestra la revisión de la normativa en la Tabla 9 , a pesar de que ésta se refiere a monitoreo en sitio y no especifica las condiciones para simulación, los estándares internacionales establecen que, para la evaluación de las condiciones lumínicas de un espacio, este debe realizarse bajo el tipo de cielo cubierto determinado por el CIE. Sin embargo, para la programación de esta simulación, se cargó un archivo climático que contiene los valores horarios anuales de iluminancia directa y radiación, por lo que es a partir de estos datos que Design Builder realiza la simulación. Se determinó el método de cielo estándar y el modelo de CIE día claro, debido a que es la única opción que permite especificar un mes, día y hora de diseño.

El apartado de Malla solicita la especificación tamaños mínimo y máximo, esto se refiere a la retícula del mapa de distribución de valores de iluminancia. Sin embargo, es el programa el que determina el ajuste real y final de la medida de la retícula del espacio, y esto resulta en la cantidad total de puntos de valoración arrojados, misma que para la unidad de análisis, varió entre 800 y 900 datos. Por último, las opciones avanzadas se mantuvieron con las especificaciones predeterminadas.

### **3.7.3. Ajuste de Visualización Gráfica**

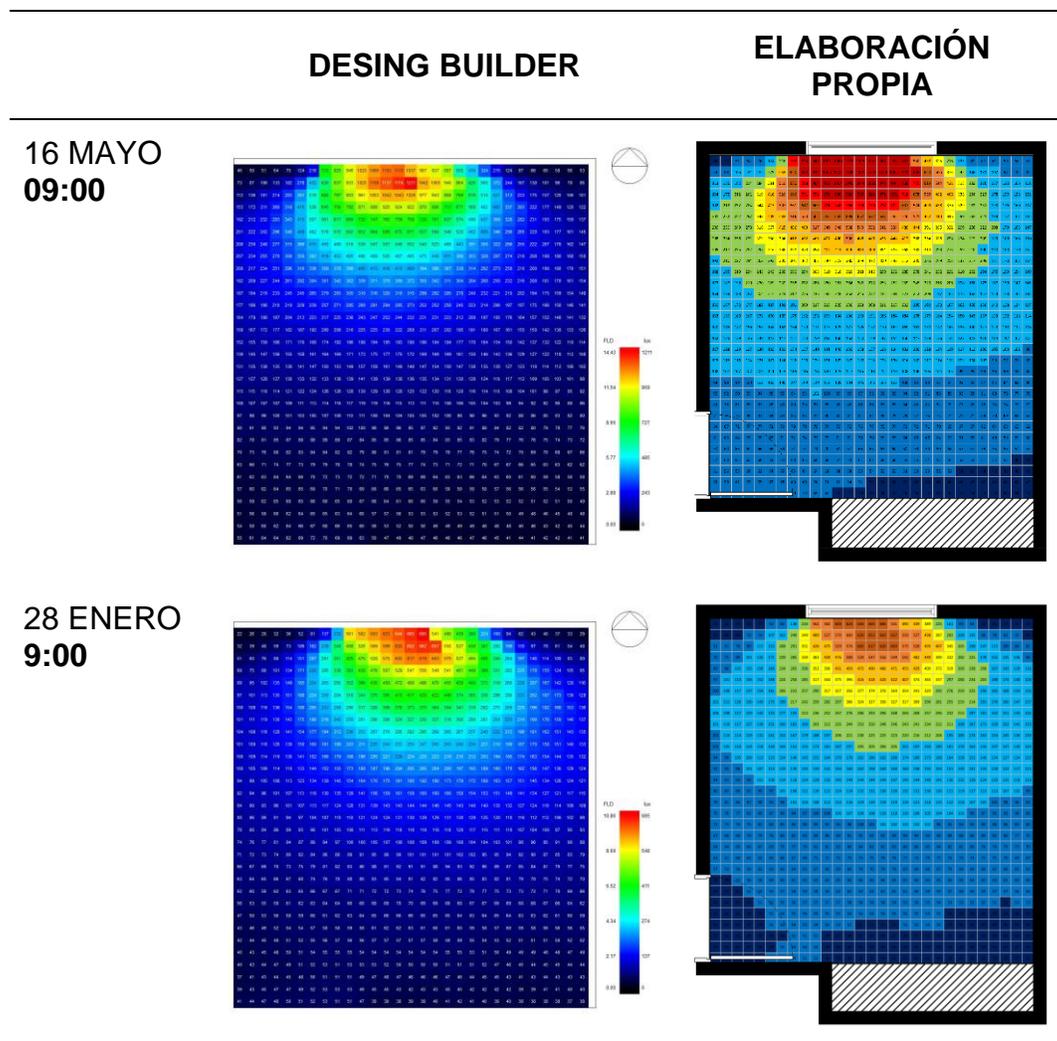
Una desventaja que se reconoció en las opciones de visualización de datos que ofrece Design Builder, es que el mapa de distribución de iluminancia muestra un gradiente de colores que se adapta a la escala de valores arrojados por esa corrida en específico, es decir, les asigna los colores más cálidos a los valores máximos de esa corrida, mismos que pueden representar un valor medio para las simulaciones en otro horario o bajo otras condiciones climáticas o de diseño. A pesar de ser una desventaja superficial y no de programación, resulta inconveniente para el fácil análisis, entendimiento y comparación del comportamiento y cambio de la iluminancia bajo distintas condiciones y al aplicar distintas estrategias de iluminación.

Por otra parte, esta información se puede exportar a manera de tabla para el análisis cuantitativo de la corrida, lo cual resultó ser la mejor opción para la valoración a profundidad de la información arrojada, ya que el programa no ofrece la opción de visualizar o comparar entre simulaciones anteriores.

Así, de manera integral, se optó por manejar la información numérica de la retícula de iluminación para cada caso de análisis, para obtener valores mínimos, máximos, y cantidad de valores que se encuentran dentro de un rango, para así poder compararlos con la normativa nacional e internacional según los valores mínimos establecidos para el confort del usuario de acuerdo a la actividad que se realice en el espacio.

Por su parte, este mismo análisis permitió generar un nuevo mapa gráfico con colores asignados dentro de los distintos rangos de valores, para poder realizar la comparativa entre estrategias de manera efectiva, como se puede observar en la Tabla 11. *Ajuste gráfico de mapa reticular de distribución de iluminancia*, y se aplicó a los 240 escenarios simulados (véase en anexo B).

**Tabla 11.** *Ajuste gráfico de mapa reticular de distribución de iluminancia.*



*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en *Design Builder*

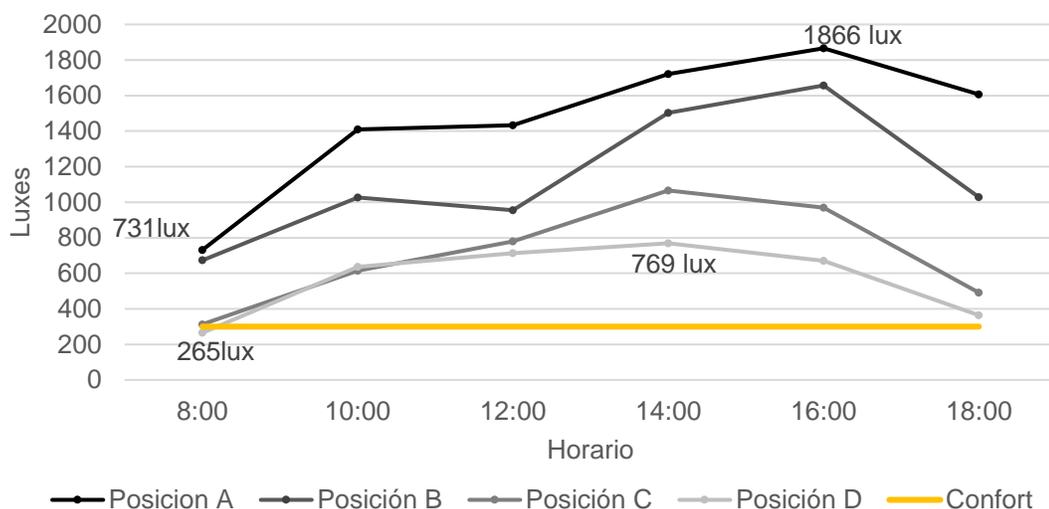
## CAPÍTULO IV. Análisis de Resultados

Bajo la estructura del marco metodológico y el diseño del experimento, en el apartado de resultados se exponen los dos procesos para la valoración de los objetivos: el monitoreo de la unidad de análisis y la simulación de estrategias, dentro de este último se aborda el resultado del análisis del archivo climático para la selección de los días de diseño.

### 4.1. Resultados de Monitoreo de Unidad de Análisis

A partir del primer acercamiento de monitoreo en sitio, se estableció la propuesta metodológica que integra las técnicas y métodos para la valoración de la calidad lumínica del espacio propuestas en los estándares y normativas pertinentes. En el Anexo A se encuentran las tablas de los datos de monitoreo de cada cuadrante para ambos días de evaluación; el comportamiento de la iluminancia durante el monitoreo bajo cielo despejado del 22 de mayo de 2022 se muestra en la Figura 29.

**Figura 29.** Iluminancia medida de unidad de análisis el 22 de mayo de 2022.



Nota. Elaboración propia.

Los niveles de iluminación del espacio monitoreado varían en concordancia con la disponibilidad de luz natural en el exterior con el paso del tiempo y el cambio en la elevación solar. A pesar de que al inicio y al final del día evaluado se encuentran los valores más bajos de iluminancia, los cuatro cuadrantes se mantienen por encima de los 300 lx, nivel mínimo de confort para el uso de una recámara según lo establecido en la **Tabla 7. Niveles mínimos de iluminancia considerados por espacio.**, durante todas las horas de evaluación, a excepción del cuadrante D a las 8:00am, en el que se registró un valor de 265 lx.

Así, la interpretación de resultados de los niveles de iluminancia adquiridos en los distintos cuadrantes a lo largo del periodo de análisis, permite determinar que el área de trabajo puede ubicarse en cualquier parte de la habitación, sin afectar los requerimientos mínimos para el confort de los usuarios.

Por su parte, la medición de los niveles de iluminancia que reciben los muros en el espacio, y el contraste con su emisión, permiten obtener el valor de reflectancia bajo el que están trabajando las superficies. En la Tabla 12, se puede observar el comportamiento de incidencia y reflexión de cada uno de los muros interiores.

**Tabla 12. Cálculo de reflectancia de muros por monitoreo, cielo despejado.**

HORA		MURO NORTE		MURO SUR		MURO ESTE		MURO OESTE	
		lx	K <sub>f</sub>	lx	K <sub>f</sub>	lx	K <sub>f</sub>	lx	K <sub>f</sub>
8:00	E1	261		304		28		362	
	E2	247	94%	22	7%	20	78%	289	79%
10:00	E1	561		870		1080		776	
	E2	513	91%	65	7%	840	77%	602	77%
12:00	E1	570		1063		1242		776	
	E2	500	87%	70	6%	958	77%	620	79%
14:00	E1	706		1183		1303		1526	
	E2	574	81%	81	6%	994	76%	1223	80%
16:00	E1	567		873		851		1835	
	E2	490	86%	62	7%	627	73%	1355	73%
18:00	E1	386		406		531		853	
	E2	379	98%	31	7%	401	75%	600	70%

*Nota.* Elaboración propia. Donde E1 se refiere a la cantidad de iluminancia incidente, E2 la cantidad de iluminancia emitida y K<sub>f</sub> la reflexión de la superficie.

Se pueden observar varios comportamientos según la orientación. Primeramente, el muro norte, al ser el muro en el que se encuentra la ventana, en ningún momento recibe luz de forma directa, por lo que la iluminación que incide es resultante de la reflexión del resto de las superficies en la habitación. Sin embargo, a pesar de esto, mantuvo un índice de reflexión mayor a 80% durante todo el día y alcanza un máximo de 98%. Esta variación en la reflectancia del muro se debe a que, a pesar de que la superficie no cambia de color durante el día, la forma en la que los muros interiores que reflejan la luz hacia el muro norte varían según la geometría solar.

Por su parte, los muros este y oeste presentan mayor estabilidad en sus índices de reflectancia, especialmente en las primeras horas del día, que es cuando la luz solar se presenta de una manera más estable (Rastegari, M. et al. 2021); en el periodo entre las 8:00 y las 14:00 horas los valores se mantienen entre el 76% y el 80% de reflectancia.

Por último, el muro sur mantiene su índice de reflectancia estable a lo largo del día, sin embargo, este valor es de 7%, pues a pesar de ser una de las superficies con más incidencia lumínica, debido al color café chocolate de las puertas del armario que se encuentran a lo largo de este muro, su capacidad de reflectancia disminuye en un 93%.

Este fenómeno afecta directamente las lecturas de iluminancia en los cuadrantes C y D, como se puede observar en la **Figura 29. Iluminancia medida de unidad de análisis el 22 de mayo de 2022.**, que a pesar de que por la naturaleza de su posición en el espacio es normal que los niveles de iluminancia sean de los más bajos del monitoreo, la diferencia puede disminuirse con un ajuste en la reflectancia del muro más alejado a la ventana, según lo plantea la revisión de la literatura. Esta estrategia se evaluó en la simulación digital de la unidad de análisis.

Durante el día de monitoreo del 09 de septiembre del 2022, bajo las características de un cielo cubierto, la reflectancia de los muros mantuvo su comportamiento para la mayoría de las superficies y horas de evaluación según se

puede observar en la **Tabla 13**. *Cálculo de reflectancia de muros por monitoreo bajo cielo cubierto.*

**Tabla 13.** *Cálculo de reflectancia de muros por monitoreo bajo cielo cubierto.*

HORA		MURO NORTE		MURO SUR		MURO ESTE		MURO OESTE	
		lx	K <sub>f</sub>	lx	K <sub>f</sub>	lx	K <sub>f</sub>	lx	K <sub>f</sub>
8:00	E1	57		97		98.1		99	
	E2	48	84%	5	5%	68	70%	59	59%
10:00	E1	94		173		224		246	
	E2	90	96%	8	5%	156	70%	154	63%
12:00	E1	66		121		121.1		122	
	E2	64	97%	6.5	5%	85	71%	79	65%
14:00	E1	568		1161		1202		1158	
	E2	489	86%	55	5%	894	74%	892	77%
16:00	E1	200		361		400		391	
	E2	148	74%	19	5%	284	71%	276	71%
18:00	E1	39		72		81		74	
	E2	33	85%	3	5%	57	71%	50	68%

*Nota.* Elaboración propia. Donde E1 se refiere a la cantidad de iluminancia incidente, E2 la cantidad de iluminancia emitida y K<sub>f</sub> la reflexión de la superficie.

A pesar de la disminución en las lecturas de iluminancia incidente en cada muro, los índices de reflectancia se mantuvieron dentro de mismo rango de valores. El muro oeste fue el único que presentó una variación significativa, especialmente entre las 8:00 y las 12:00 horas, en donde la reflectancia disminuyó a un 59%. Esto se le atribuye a que, como la evaluación es un monitoreo en sitio y no una simulación controlada, existió una variación, tanto en la cantidad de luz en el exterior en este horario, como en la forma de distribución de la luz difusa bajo el cielo cubierto, tanto en el exterior como en el interior.

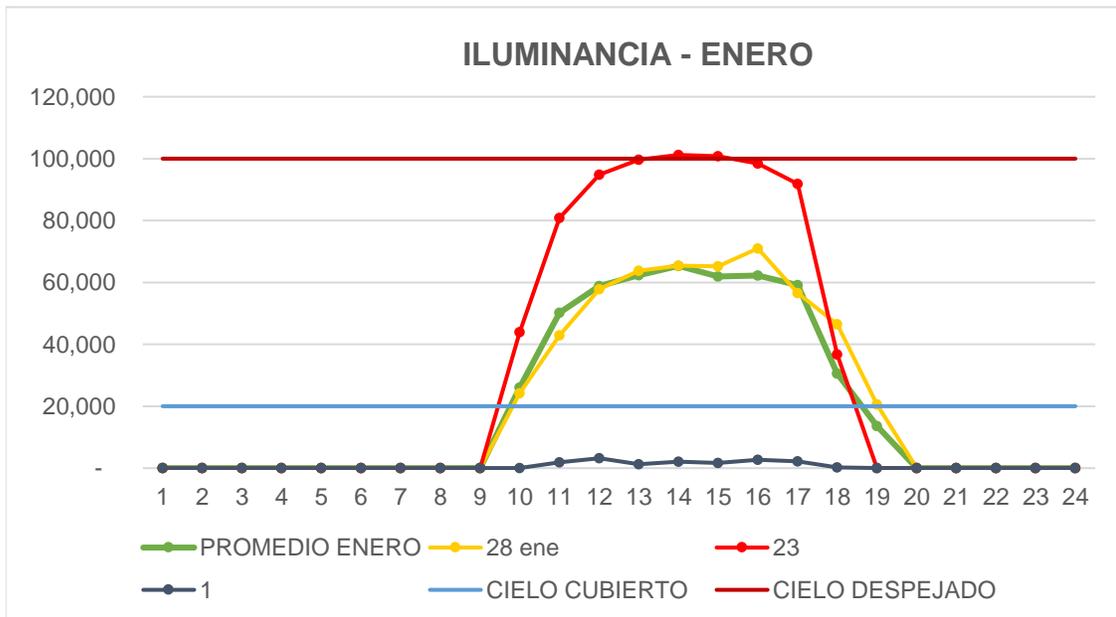
## 4.2. Resultados de Simulación

El análisis de los resultados de simulación, muestra de manera clara la distribución de iluminancia y los valores medios, máximos y mínimos para cada estrategia evaluada. En total, se realizaron 240 simulaciones, a partir de la evaluación de dos días de análisis, tres horarios de simulación, 5 variaciones de diseño: estado actual, unidad aislada, reflectancia del muro y configuración de área de ventanas (dobles y horizontal), así como ocho orientaciones.

### 4.2.1. Resultados de Análisis de Archivo Climático

En la adaptación de este análisis de datos, se nutrieron los datos de iluminancia anuales, y se obtuvieron los valores máximos y mínimos mensuales, así como los días típicos de cada mes de acuerdo a su aproximación de comportamiento según los valores promedios mensuales. La Figura 30. *Análisis mensual de iluminancia directa en Mexicali, México.* muestra el ejemplo gráfico del análisis de los datos revisados para cada uno de los 12 meses.

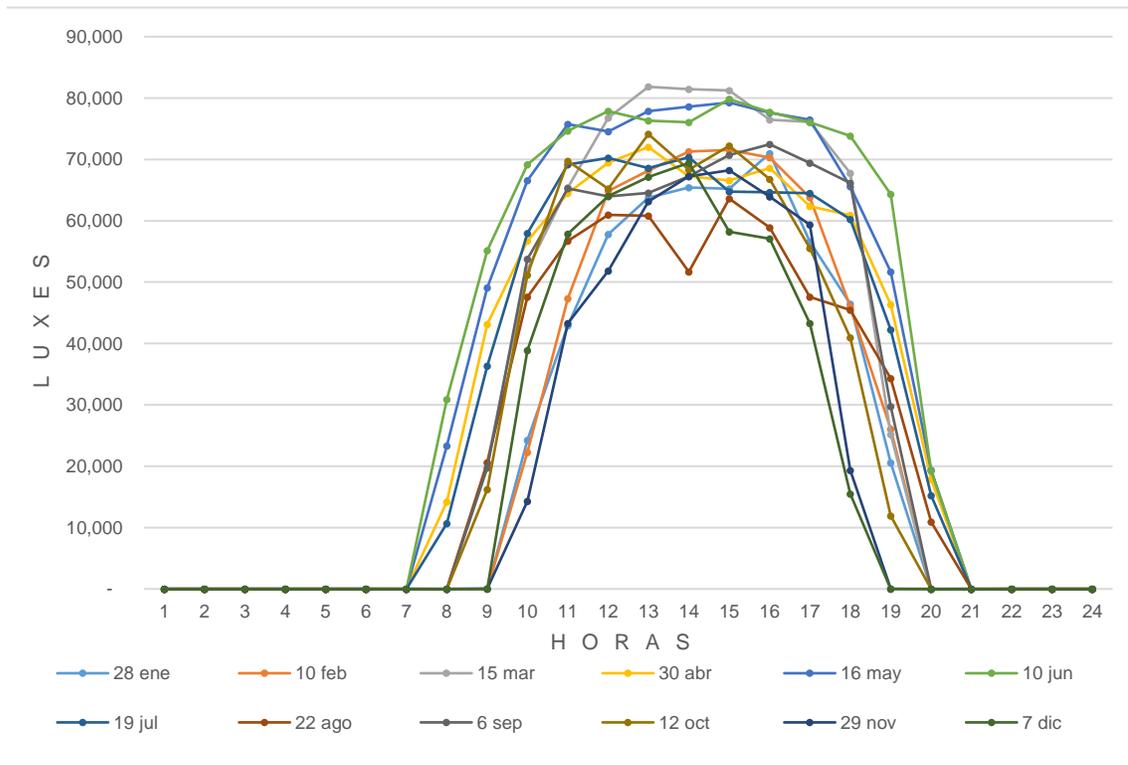
**Figura 30.** *Análisis mensual de iluminancia directa en Mexicali, México.*



Nota. Elaboración propia a partir de archivo climático.

Una vez delimitados los días típicos mensuales, se realizó una comparativa de los valores máximos y mínimos presentados como se muestra en la Figura 31. *Días típicos mensuales de iluminancia directa en Mexicali, México.* esto determinó los días de simulación con los que se trabajó la simulación.

**Figura 31.** *Días típicos mensuales de iluminancia directa en Mexicali, México.*

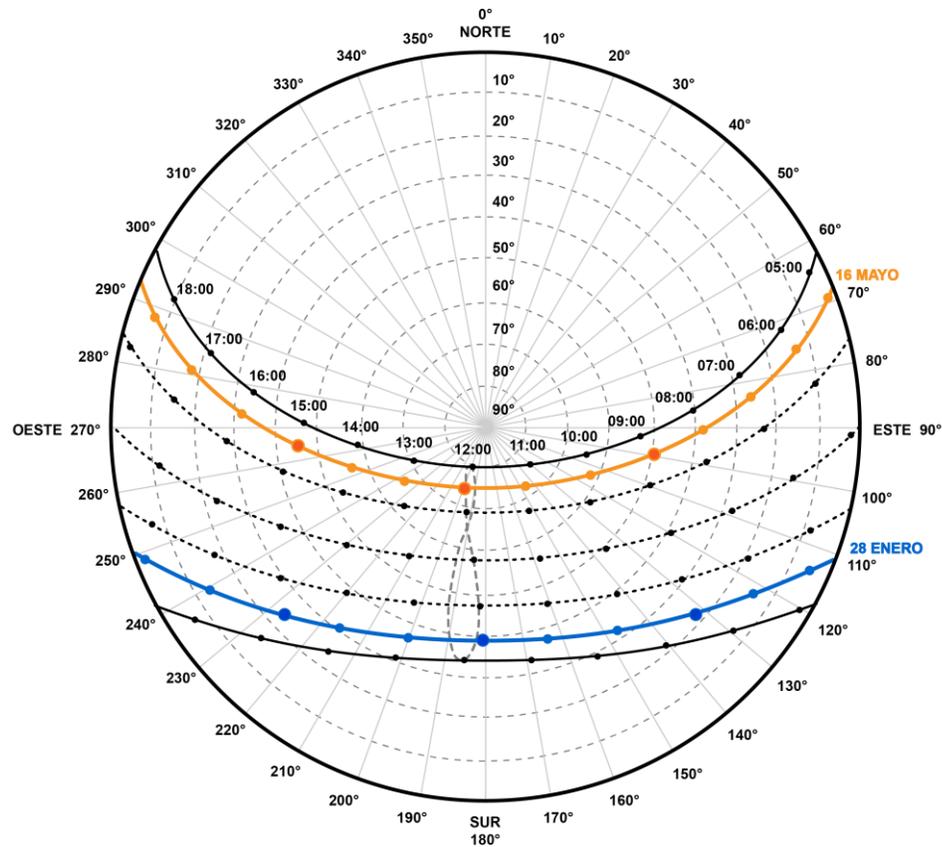


*Nota.* Elaboración propia a partir de archivo climático.

A partir de este análisis se determinaron como días de evaluación el 16 de mayo por sus valores máximos, y el 28 de enero por sus valores mínimos. A pesar de que el 19 de julio reflejó la coincidencia entre los valores mínimos que se tienen bajo un cielo cubierto por la temporada de lluvias, se delimitó el 28 de enero como el día crítico de valores mínimos, para considerar la disminución de la cantidad de horas que se tiene la disponibilidad de luz natural.

En la **Tabla 14** se muestra el trayecto solar de cada uno de los días *d*, los ángulos de elevación solar y azimut correspondientes a cada horario de análisis, y la relación entre estas características influye directamente en el comportamiento de la distribución de iluminancia dentro del caso de Estudio.

**Tabla 14.** Características del trayecto solar de los días tipo de simulación.

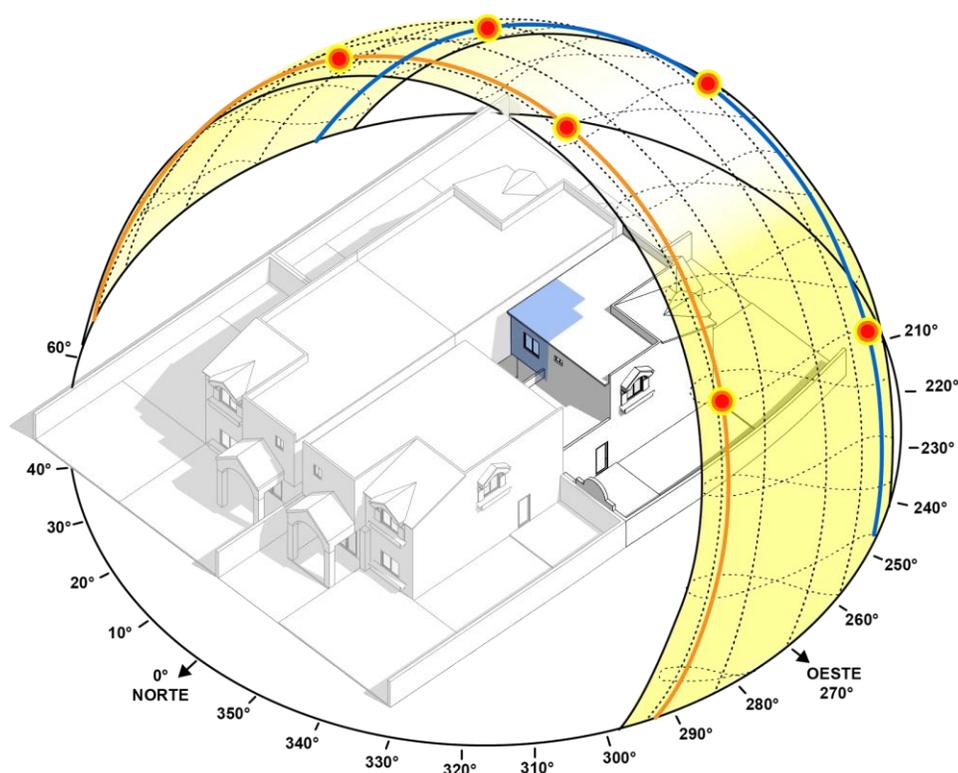


	16 MAYO			28 ENERO		
DURACIÓN DEL TRAYECTO SOLAR	04:47 – 18:30			06:44 – 17:06		
AZIMUT DEL TRAYECTO SOLAR	67.06° - 292.99°			111.75° - 248.26°		
ÁNGULO MÁXIMO DE ELEVACIÓN SOLAR	76°			39°		
	9:00	12:00	15:00	9:00	12:00	15:00
ÁNGULO DE ELEVACIÓN SOLAR	48.38°	76.22°	46.86°	21.24°	38.83°	25.16°
AZIMUT	98.08°	183.63°	263.12°	130.57°	176.10°	224.385°
ILUMINANCIA DIRECTA	71,189 lx	66,410 lx	58,921 lx	61,667 lx	35,976 lx	32,123 lx

*Nota.* Elaboración propia a partir del sitio web *Sun Earth Tools*

Así, se observa que el día 16 de mayo, día tipo de iluminancia de verano, el trayecto solar tiene una duración de 13 horas con inicio a las 04:47 horas (azimut  $67.06^\circ$ ) y término a las 18:30 horas (azimut  $292.99^\circ$ ). Por su parte, durante el 28 de enero, día representativo de iluminancia de invierno, el trayecto solar tiene una duración de 10 horas, desde las 06:44 horas (azimut  $111.75^\circ$ ) y 17:06 horas (azimut  $248.26^\circ$ ). La Tabla 33. *Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento*. muestra la visualización en tercera dimensión del trayecto solar en la ciudad de Mexicali, México.

**Figura 32.** *Trayecto solar de días de diseño, caso de estudio y contexto.*



*Nota.* Elaboración propia.

Debido a que la luz natural varía constantemente durante la trayectoria solar, se determinaron las horas de análisis a las 9:00, 12:00 y 15:00 horas, ya que, al encontrarse en la ventana solar, la luz natural se mantiene estable a lo largo del año en ese horario.

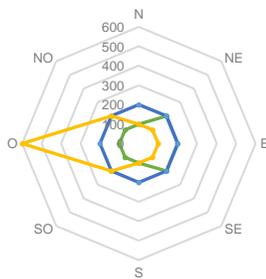
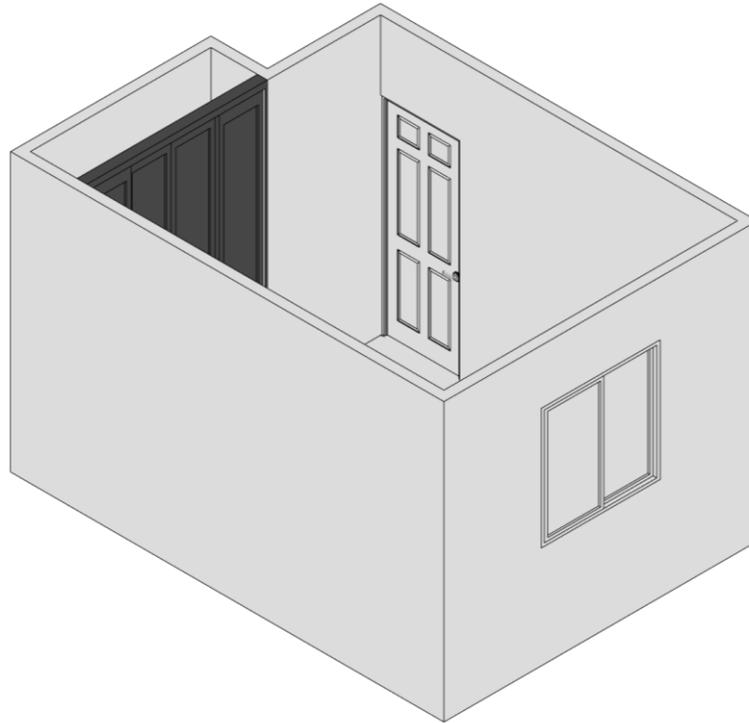
#### **4.2.2. Caso de Estudio y Variación de Orientaciones**

El análisis de resultados de simulación del caso de estudio, permitió revisar criterios de diseño mencionados en el Marco Teórico, principalmente aquellos que se refieren a la orientación de vanos de ventanas y su influencia en la distribución de iluminancia del espacio. Ya que la habitación evaluada se construyó bajo criterios de diseño establecidos en reglamentos de construcción locales y nacionales, los resultados de simulación sirvieron de evaluación sobre su capacidad de alcance de niveles de confort lumínico.

Por lo que se refiere a los resultados del 16 de mayo, la Tabla 15. muestra que en el horario de las 12:00 horas, la iluminancia predominante es de 200 lx en todas las orientaciones. Esto se debe a la combinación de luz directa y reflectancia para las orientaciones este – oeste ( $90^\circ$ -  $270^\circ$ ), y la incidencia de fuentes de luz difusa en noroeste – noreste ( $315^\circ$ -  $45^\circ$ ). De esta forma, a pesar de que el norte recibe iluminación indirecta y el sur la recibe de forma directa, ambas orientaciones presentaron 200lx como valor de iluminancia predominante, pues el contexto y las colindancias de la unidad de análisis funcionaron como elementos reflectores u obstructivos de la luz solar.

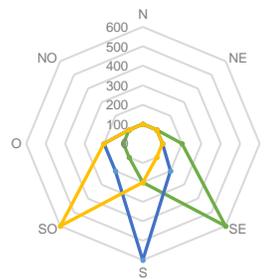
En otras palabras, mientras que en el norte los muros del edificio colindante detrás del caso de estudio reflejan la luz hacia el interior, en el sur es la cubierta de la planta baja que se extiende frente a la ventana analizada la que funciona como superficie reflectora de la luz solar, como se observa en la **Figura 33**. Esto mismo sucede hacia el este y hacia el oeste, ya que por el azimut de  $183.63^\circ$  y el ángulo de elevación del sol a  $76.22^\circ$ , en estas orientaciones la luz se recibe también de forma indirecta por reflexión.

**Tabla 15. Caso de estudio: iluminancia predominante; día, hora y orientación.**



**16 MAYO**

— 9:00  
— 12:00  
— 15:00



**28 ENERO**

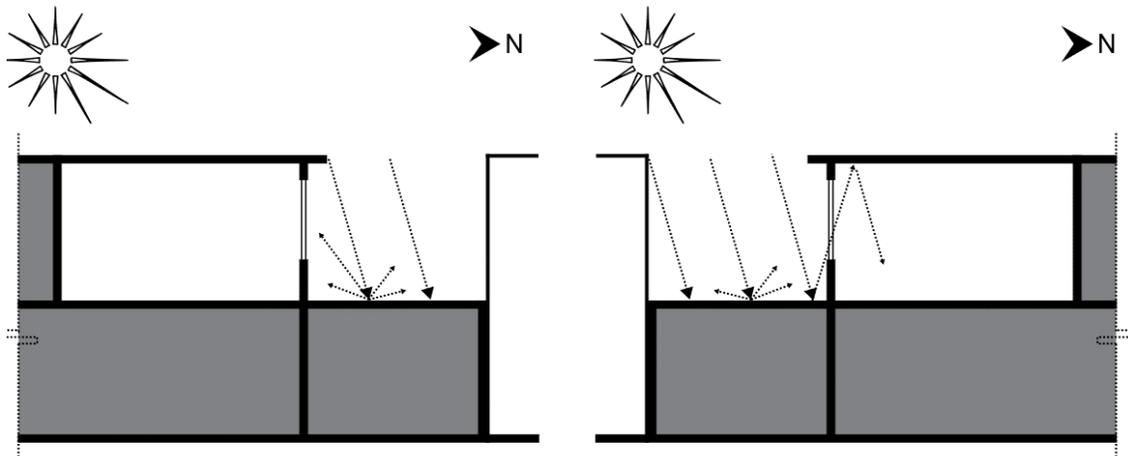
— 9:00  
— 12:00  
— 15:00

	16 MAYO						28 ENERO					
	9:00		12:00		15:00		9:00		12:00		15:00	
<b>N</b>	37%	<b>100 lx</b>	32%	<b>200 lx</b>	36%	<b>100 lx</b>	50%	<b>100 lx</b>	41%	<b>100 lx</b>	43%	<b>100 lx</b>
<b>NE</b>	34%	<b>200 lx</b>	32%	<b>200 lx</b>	38%	<b>100 lx</b>	44%	<b>100 lx</b>	41%	<b>100 lx</b>	44%	<b>100 lx</b>
<b>E</b>	29%	<b>200 lx</b>	31%	<b>200 lx</b>	42%	<b>100 lx</b>	32%	<b>200 lx</b>	38%	<b>100 lx</b>	49%	<b>100 lx</b>
<b>SE</b>	33%	<b>200 lx</b>	30%	<b>200 lx</b>	40%	<b>100 lx</b>	32%	<b>600 lx</b>	32%	<b>200 lx</b>	44%	<b>100 lx</b>
<b>S</b>	32%	<b>100 lx</b>	31%	<b>200 lx</b>	31%	<b>100 lx</b>	31%	<b>200 lx</b>	32%	<b>600 lx</b>	33%	<b>200 lx</b>
<b>SO</b>	36%	<b>100 lx</b>	31%	<b>200 lx</b>	32%	<b>200 lx</b>	36%	<b>100 lx</b>	34%	<b>200 lx</b>	32%	<b>600 lx</b>
<b>O</b>	40%	<b>100 lx</b>	33%	<b>200 lx</b>	30%	<b>600 lx</b>	46%	<b>100 lx</b>	31%	<b>200 lx</b>	33%	<b>200 lx</b>
<b>NO</b>	40%	<b>100 lx</b>	32%	<b>200 lx</b>	31%	<b>200 lx</b>	45%	<b>100 lx</b>	38%	<b>100 lx</b>	38%	<b>100 lx</b>

Nota. Elaboración propia.

A diferencia de las 12:00 horas, las 9:00 y las 15:00 horas del 16 de mayo no presentan coincidencia de iluminancia predominante en todas las orientaciones. En estos horarios, el comportamiento de iluminancia es simétricamente inverso; por la mañana, se alcanzaron 100lx en las orientaciones de sur a norte (azimut  $0^\circ - 180^\circ$ ) y por la tarde este valor se encuentra de norte a sur (azimut  $180^\circ - 0^\circ$ ). Este comportamiento se le atribuye a la trayectoria solar.

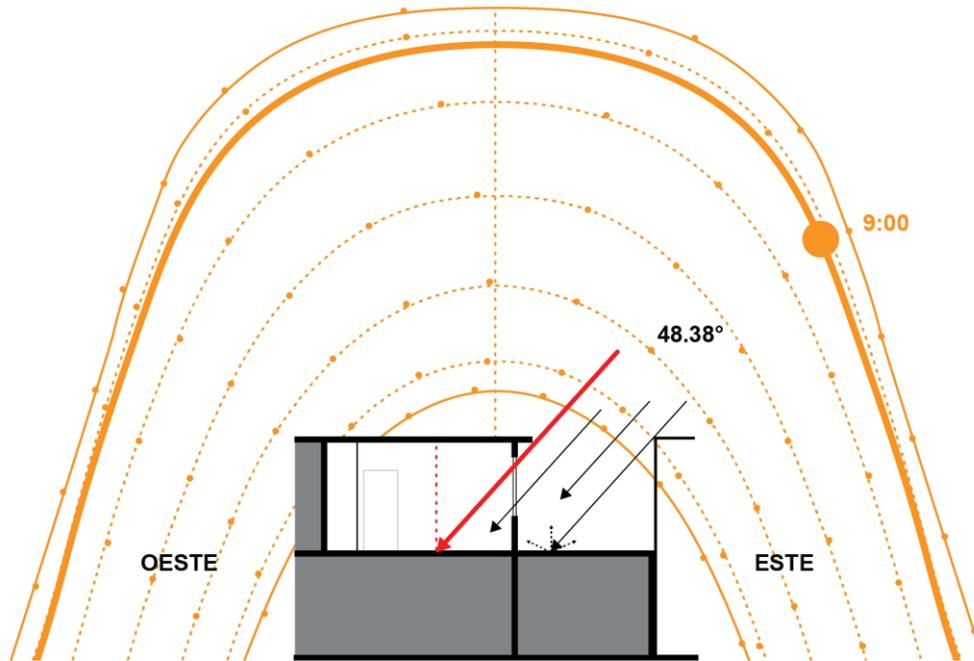
**Figura 33.** Reflexión de rayos solares, 16 de mayo, 12:00 horas, Norte y Sur.



*Nota.* Elaboración propia.

A las 9:00 horas, en el noreste, este y sureste, la iluminancia predominante llega a 200lx, con porcentajes de distribución en el área de la habitación de 34%, 29% y 33% respectivamente como se observa en la Tabla 15. Este comportamiento obedece a que, además de la luz que se recibe directamente del sol en ese horario, el techo de la habitación ampliada que se encuentra en el primer piso del caso de estudio, sirve como elemento reflector hacia el interior de la unidad de análisis, como se observa en la **Figura 34**. Así, el este alcanza los 200 lx a las 9:00 horas, y disminuye a 100lx a las 15:00 horas una vez que el sol se encuentra del lado opuesto, lo cual significa que la luz que recibe pasa de ser directa a difusa.

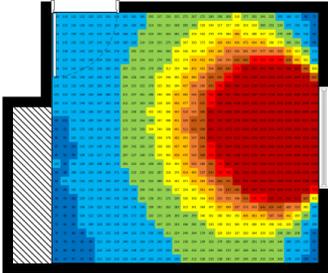
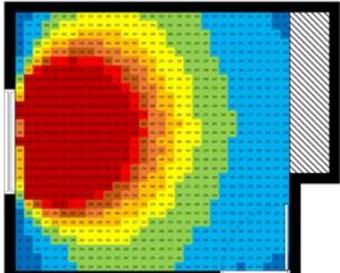
**Figura 34.** Reflexión de rayos solares, 16 de mayo, 09:00 horas, Este.



Nota: Elabore el texto...

Sin embargo, la simetría de valores, se da solo cuando se habla de orientaciones en horarios que reciben luz indirecta. En los horarios en los que las orientaciones reciben luz directa del sol, no se presentaron valores de iluminancia inversamente simétricos. Esto se puede observar claramente en el comportamiento de la orientación oeste, donde a las 9:00 horas, el poniente tiene una iluminancia predominante de 100lx en un 29% del área de la habitación, mientras que a las 15:00 horas alcanzó el rango de >500 lx en un 30%, según se lee en la **Tabla 16**. A pesar de que la diferencia entre el porcentaje de área que abarca el valor predominante es mínima, de 1%, la variación entre los valores de iluminancia que representan es considerable, es decir, el cambio del rango de iluminancia predominante pasa de 100lx a 500lx.

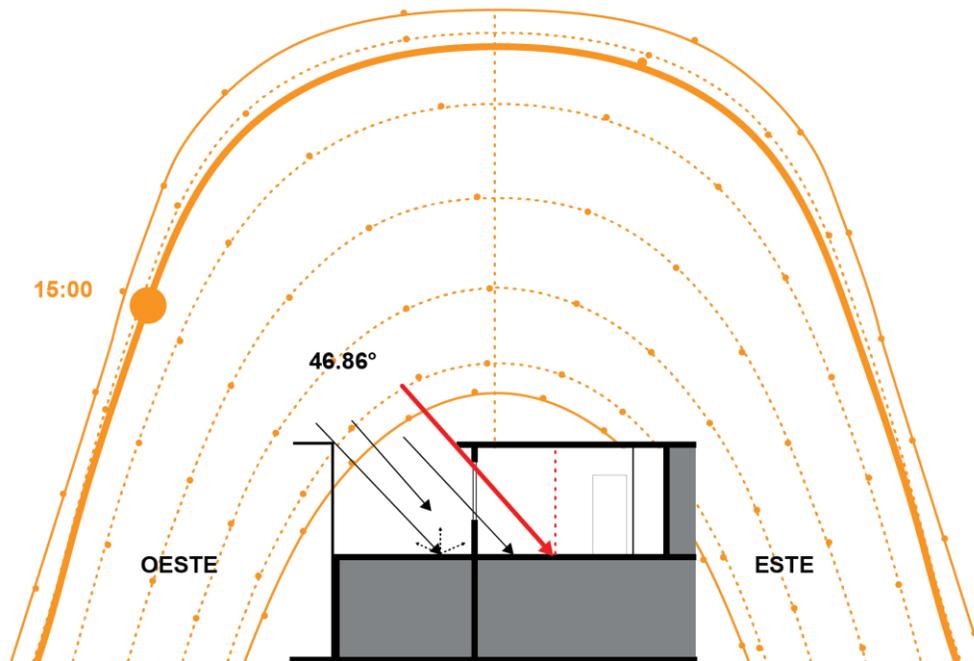
**Tabla 16.** Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.

SIMULACIÓN:	Caso de Estudio	
		
DÍA	16 MAYO	16 MAYO
ORIENTACION	ESTE	OESTE
HORARIO	9:00	15:00
Porcentaje de Área de Distribución de Iluminancia por Rangos		
< 100 lx	6%	3%
100 - 200 lx	29%	29%
201 - 300 lx	20%	20%
301 - 400 lx	12%	11%
401 - 500 lx	5%	7%
> 500 lx	28%	30%
Área de deslumbramiento > 1000 lx	15%	15%

*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Esta alteración se le atribuye a la ligera variación en los ángulos de altura solar y su influencia en la profundidad que alcanza la luz solar directa en el interior del espacio. Esto se puede observar claramente al comparar el este y el oeste en sus horarios de recepción de luz directa. Hacia el este a las 9:00 horas, el ángulo de altura solar es de  $48.38^\circ$  e incide en el interior del espacio de manera directa como se observa en la Figura 34. Por su parte, a las 15:00 horas en la orientación oeste, el ángulo de elevación solar disminuye a  $46.86^\circ$  y a pesar de que la variación es de menos de  $2^\circ$ , esto ocasiona que su incidencia de forma directa dentro de la habitación alcance mayor profundidad al llegar de una manera ligeramente más horizontal, como se observa en la Figura 35 y Figura 36. *Posición solar, 16 de mayo, 15:00 horas, caso de estudio y contexto..*

**Figura 35.** Reflexión de rayos solares, 16 de mayo, 15:00 horas, Oeste.

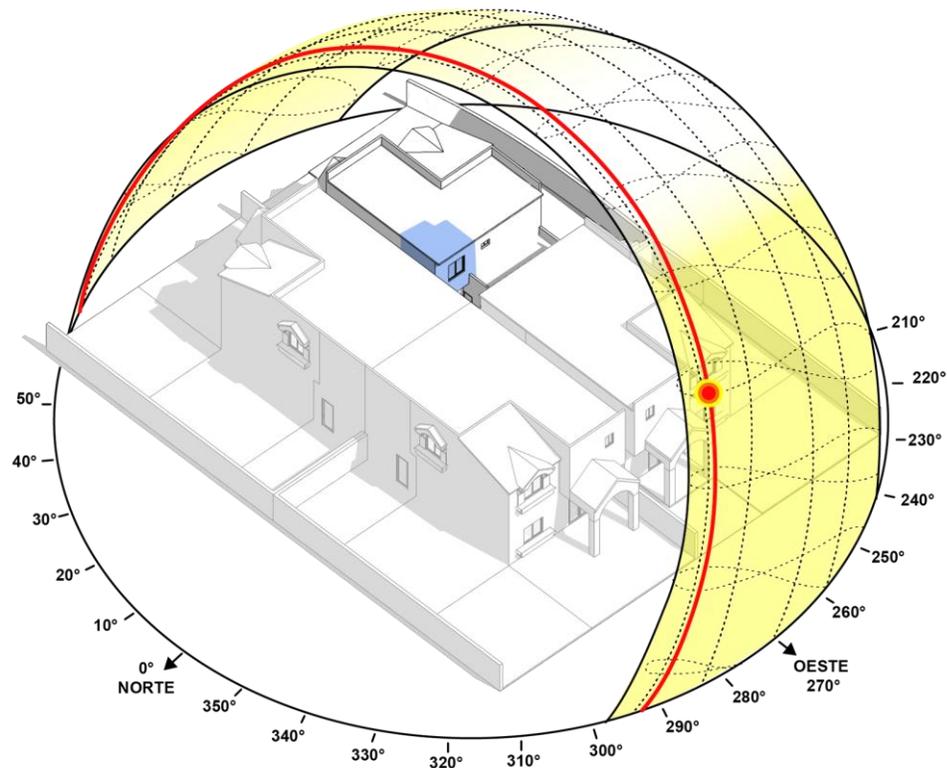


Nota. Elaboración propia.

A pesar de que en la **Tabla 16. Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.** se lee que para ambas orientaciones y horarios se mantuvo el mismo porcentaje de área (29%) del rango de 100-200lx, el poniente presentó una disminución del porcentaje de área correspondiente al rango  $<100$ lx, que se reflejó en el aumento del 2% en el rango  $> 500$  lx, lo cual lo convirtió en el rango de iluminancia predominante para la orientación oeste a las 15:00 horas.

Además, según lo muestra la **Tabla 16**, en ambas orientaciones el 15% del total del espacio corresponde a valores de luminancia por encima de los 1000 lx, valor que corresponde a rangos de incomodidad para el usuario y sensación de deslumbramiento. Este fenómeno se debe a la recepción de luz de forma directa en el espacio y a la influencia del contexto como elementos reflectores explicado anteriormente.

**Figura 36.** Posición solar, 16 de mayo, 15:00 horas, caso de estudio y contexto.



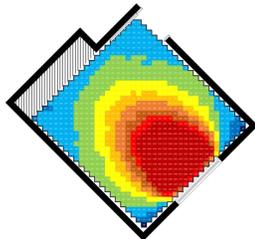
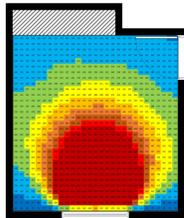
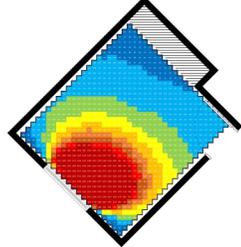
*Nota.* Elaboración propia.

En los resultados del segundo día de análisis, 28 de enero, se observó que el comportamiento de la iluminancia predominante presentó mayores contrastes entre las ocho orientaciones, a diferencia del día tipo de verano, sin embargo, la distribución de los valores de la iluminancia predominante presenta algunas similitudes entre los tres horarios de evaluación.

A las 9:00 horas, las orientaciones de suroeste a noreste, presentaron una iluminancia predominante de 100 lx, el este y sur de 200 lx, mientras que el sureste alcanzó el rango de >500 lx. La causa de este cambio en esta última orientación mencionada, se le atribuye a que el sol en este horario se encuentra con una elevación de apenas 21.24°, lo cual ocasiona que la luz del sol llegue de manera casi perpendicular a la ventana, y por ende, que la distribución de la iluminancia alcance mayor profundidad en la habitación.

Lo anterior se puede observar en la **Tabla 17**, que muestra el mapa reticular de la orientación sureste en el horario de las 9:00 horas; en éste se observa cómo el área verde, que corresponde a los valores entre 201 y 300 lx, se encuentra casi frente al muro más alejado de la ventana, y el porcentaje de iluminancia correspondiente al rango por debajo de los 100 lx es de 2%.

**Tabla 17.** Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.

SIMULACIÓN: Caso de Estudio			
			
<b>DÍA</b>	28 ENERO	28 ENERO	28 ENERO
<b>ORIENTACION</b>	SURESTE	SUR	SUROESTE
<b>HORARIO</b>	9:00	12:00	15:00
Porcentaje de Área de Distribución de Iluminancia por Rangos			
< 100 lx	2%	3%	4%
100 - 200 lx	22%	25%	17%
201 - 300 lx	24%	21%	26%
301 - 400 lx	13%	13%	14%
401 - 500 lx	7%	7%	8%
> 500 lx	<b>32%</b>	<b>32%</b>	<b>32%</b>
<b>Area de deslumbramiento &gt; 1000 lx</b>	12%	16%	13%

*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

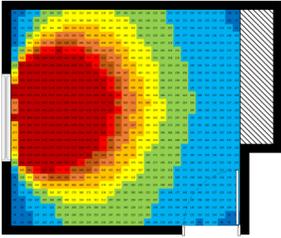
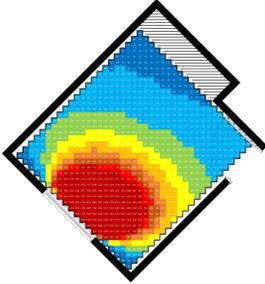
Este patrón de valores máximos por orientación, se replicó en los tres horarios de simulación, con una variación azimutal de 45° en las orientaciones correspondientes, es decir, así como a las 9:00 horas la iluminancia predominante en el rango de >500 lx se encontró hacia el sureste, a las 12:00 se ubicó al sur, mientras que a las 15:00 horas se encontró hacia el suroeste; además, el área correspondiente al valor de iluminancia predominante es de un 32% para las tres orientaciones.

La similitud entre estos tres escenarios se debe al cambio en la trayectoria solar en invierno, en la que ésta abarca un azimut de  $112^{\circ}$  -  $248^{\circ}$  y alcanza una elevación máxima de  $39^{\circ}$ ; la comparación entre estas tres orientaciones y horarios específicos se puede observar en la Tabla 17.

Al comparar los valores de las 15:00 horas de ambos días de evaluación, a pesar de que la orientación que presenta valores de deslumbramiento cambia del oeste en verano, al suroeste en invierno, se observa que los niveles y distribución de iluminancia para ambos casos tienen un comportamiento similar, como se puede observar en la Tabla 18. Esto se debe, nuevamente, al cambio en el azimut y el ángulo de elevación del sol que existe entre la temporada de verano y de invierno como se observa en la Figura 32. *Trayecto solar de días de diseño, caso de estudio y contexto.*; el 16 de mayo tiene un recorrido del noreste ( $67^{\circ}$ ) al noroeste ( $293^{\circ}$ ) y  $76^{\circ}$  de altura solar, mientras que para el 28 de enero la trayectoria solar reduce su recorrido del sureste ( $112^{\circ}$ ) al suroeste ( $248^{\circ}$ ) con  $39^{\circ}$  de altura solar.

A partir del análisis de los resultados, se realiza una comparación con los valores de confort lumínico establecidos por estándares y normativas mostrados en la Tabla 7, que sirve de evaluación del estado actual del caso de estudio. Si el espacio tiene un uso que requiere bajo enfoque visual, como una habitación, estancia o pasillo, donde el mínimo requerido en el mayor porcentaje de área sea de 100 lx, la iluminación permanecerá estable, según el día tipo de verano, en las orientaciones norte y sur, tanto a las 9:00 como a las 15:00 horas, con un ligero aumento de 100 lx a las 12:00 horas. Al comparar el comportamiento del día tipo de invierno, mientras que el norte permanece constante en 100lx, la orientación sur presenta deslumbramiento a las 15:00 horas.

**Tabla 18.** Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.

SIMULACIÓN:	Caso de Estudio	
		
DÍA	16 MAYO	28 ENERO
ORIENTACION	OESTE	SUROESTE
HORARIO	15:00	15:00
Porcentaje de Área de Distribución de Iluminancia por Rangos		
< 100 lx	3%	4%
100 - 200 lx	29%	17%
201 - 300 lx	20%	26%
301 - 400 lx	11%	14%
401 - 500 lx	7%	8%
> 500 lx	30%	32%
Área de deslumbramiento > 1000 lx	15%	13%

*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

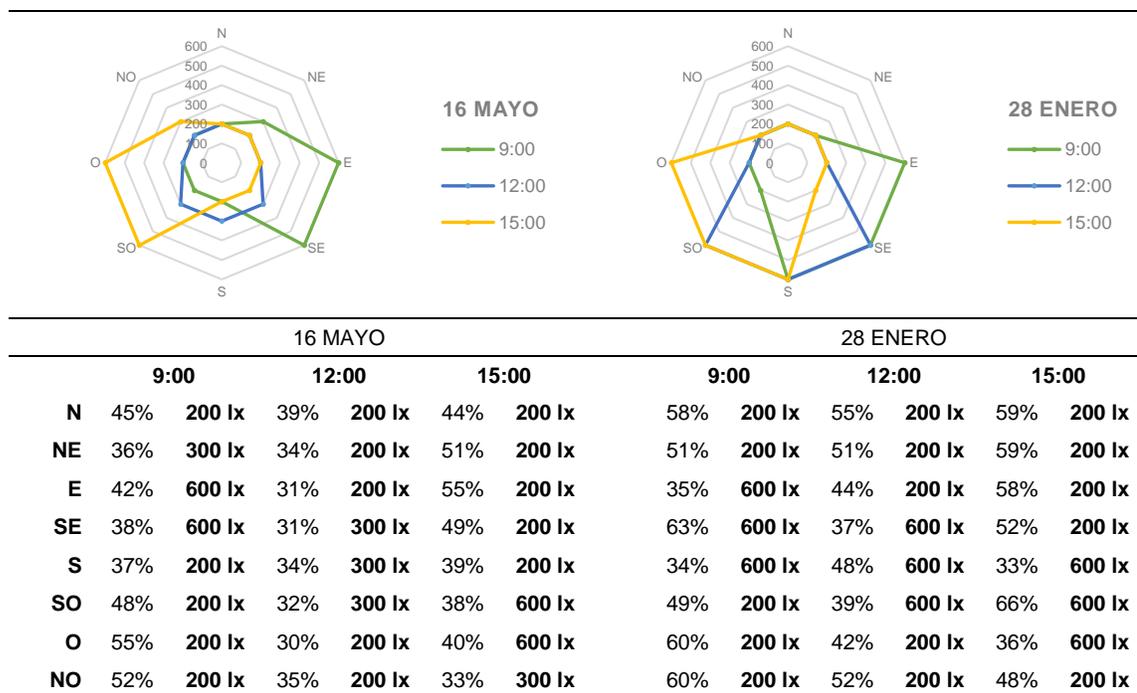
Sin embargo, si se busca que la habitación responda a los requerimientos lumínicos de las actividades que se realizan en una cocina u oficina, las condiciones del espacio resultan deficientes en todas sus orientaciones, horarios y días de evaluación, ya que ninguno logra que el valor de la iluminancia predominante corresponda al rango entre los 400 y los 500lx.

### 4.2.3. Unidad Aislada.

Con el propósito de validar la influencia de los criterios de diseño sobre los niveles de iluminancia de la habitación, se evaluó el espacio aislado sin el resto de la edificación y su contexto, para eliminar los efectos de reflexión y obstrucción que éstos pudieran causar. Los valores de iluminancia predominante de cada orientación y horario se observan en la Tabla 19.

El día 16 de mayo en horario de las 12:00 horas, de oeste a este (270°- 90° de azimut) se mantuvieron los valores de iluminancia predominante en 200 lx en un 30% del área total de la habitación, mientras que el valor aumentó a 300 lx en las orientaciones sureste, sur y suroeste; esto sucedió ya que, a diferencia del caso de estudio, la eliminación de colindancias obstructivas en la simulación de la unidad aislada permite que una mayor cantidad de luz directa se refleje del suelo hacia el interior de la habitación.

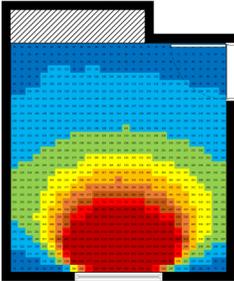
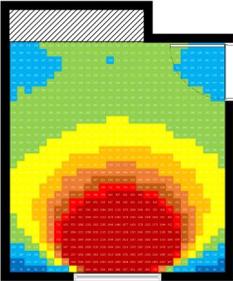
**Tabla 19.** Unidad aislada: iluminancia predominante; día, hora y orientación.



Nota. Elaboración propia.

Para entender con mayor detalle este contraste, la Tabla 20 presenta la comparación entre el caso de estudio y la simulación de la unidad aislada para la orientación sur a las 12:00 horas del 16 de mayo. Los mapas reticulares muestran que la distribución de la iluminancia alcanza mayor profundidad en la habitación en la unidad aislada que en el caso de estudio emplazado en el contexto; mientras que en el caso de estudio el rango de 201-300lx abarca un porcentaje de área de 18%, en la unidad aislada aumenta a 34%, y se convierte en el rango de iluminancia predominante en este escenario.

**Tabla 20.** Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.

<b>SIMULACION:</b>	Caso de Estudio	Unidad Aislada
		
<b>DÍA</b>	16 MAYO	16 MAYO
<b>ORIENTACIÓN</b>	SUR	SUR
<b>HORARIO</b>	12:00	12:00
<b>Porcentaje de Área de Distribución de Iluminancia por Rangos</b>		
<b>&lt; 100 lx</b>	17%	1%
<b>100 - 200 lx</b>	31%	11%
<b>201 - 300 lx</b>	18%	34%
<b>301 - 400 lx</b>	8%	17%
<b>401 - 500 lx</b>	5%	9%
<b>&gt; 500 lx</b>	21%	27%
<b>Área de deslumbramiento &gt; 1000 lx</b>	9%	11%

*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Sin embargo, esta variación no significa que las condiciones de la unidad aislada sean las adecuadas para el confort lumínico del usuario, pues a pesar de que el aumento de la recepción de luz natural de forma directa incrementa el porcentaje de área en el rango 201-300lx, también se observa una ampliación del área del rango de deslumbramiento >500lx, que pasa de 21% en el caso de estudio, a 27% en la simulación de la unidad aislada, y el porcentaje de área >1000lx se amplía de 9% a un 11% respectivamente.

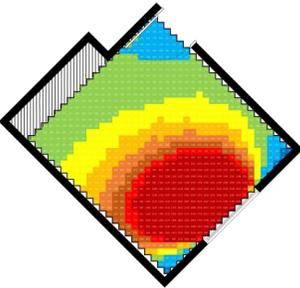
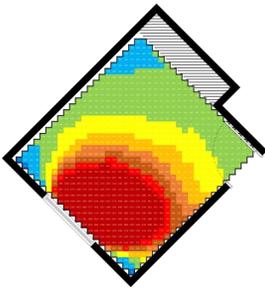
Por su parte, las 9:00 y 15:00 horas, mantuvieron el fenómeno del comportamiento inverso que se observó en los resultados de la simulación del caso de estudio. Así, se deduce de igual manera que esto se debe a una respuesta natural a la trayectoria solar de oriente a poniente, donde los valores más bajos de los rangos de iluminancia predominante, corresponden a las orientaciones opuestas a la incidencia de luz solar directa para ambos horarios. Sin embargo, a pesar de la similitud en comportamiento, se mostraron variaciones e incrementos en los valores de iluminancia correspondientes.

A las 9:00 horas del 16 de mayo, se presentaron valores de iluminancia predominante de 200 lx de sur a norte ( $180^{\circ}$ -  $360^{\circ}$ ), mientras que el noreste alcanzó los 300 lx debido a la eliminación de las colindancias obstructivas. Fueron las orientaciones este y sureste las que presentaron valores >500 lx, valor que representó el 42% y el 38% del área de la habitación respectivamente. Este aumento se debe a la altitud y azimut del sol en este horario, ya que, estas orientaciones reciben la luz directa del sol, así como por la omisión del contexto.

Finalmente, en la simulación de las 15:00 horas, el comportamiento fue inverso al de las 9:00 horas, con valores de deslumbramiento hacia el suroeste y oeste, como respuesta a las mismas condiciones del trayecto solar y la eliminación de las colindancias. En la Tabla 21 se observa la similitud entre el sureste a las 9:00 horas y el suroeste a las 15:00 horas, así como la coincidencia en la distribución de los porcentajes de área correspondiente al rango de deslumbramiento >1000lx.

Por su parte, la simulación del 28 de enero arrojó un comportamiento similar al del caso de estudio, en el cual los tres horarios presentaron el mismo patrón de valores máximos por orientación, con un cambio de azimut de 45° en cada hora en el sentido de la dirección del trayecto solar. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la eliminación de colindancias, no solo aumentó los rangos de iluminancia predominante de manera general en todas las orientaciones, sino que, también aumentó la cantidad de orientaciones con rango de > 500 lx.

**Tabla 21.** Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.

SIMULACION:	Unidad Aislada	
		
DÍA	16 MAYO	16 MAYO
ORIENTACIÓN	SURESTE	SUROESTE
HORARIO	9:00	15:00
<b>Porcentaje de Área de Distribución de Iluminancia por Rangos</b>		
< 100 lx	1%	0%
100 - 200 lx	7%	6%
201 - 300 lx	29%	31%
301 - 400 lx	16%	16%
401 - 500 lx	9%	9%
> 500 lx	<b>38%</b>	<b>38%</b>
Área de deslumbramiento > 1000 lx	17%	17%

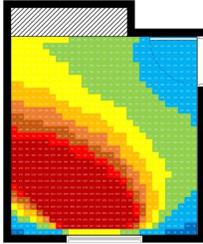
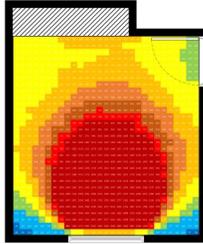
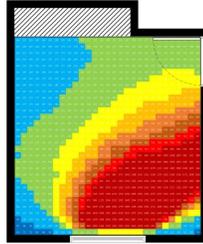
*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Las orientaciones noroeste, norte y noreste se mantuvieron en los 200lx durante los tres horarios de evaluación. Este resultado responde tanto al trayecto solar como al aislamiento del espacio, ya que, al ser las orientaciones opuestas al azimut solar, reciben la luz de forma indirecta durante los tres horarios de evaluación, pues a pesar de que se eliminaron las colindancias y el contexto, la habitación recibe iluminación difusa del cielo y del suelo de forma constante.

Así mismo, la orientación sur se mantiene en el mismo valor de iluminancia predominante durante los tres horarios de evaluación. Sin embargo, a diferencia de las orientaciones anteriores y debido a la disminución en el ángulo de elevación del sol, el sur recibe la mayor cantidad de iluminancia directa a lo largo del día, por lo que conserva el rango de  $> 500$  lx como el predominante durante las tres horas de simulación, como se muestra en la Tabla 22. A pesar de que la iluminancia predominante coincide en los tres horarios de simulación, la distribución del porcentaje de áreas presentó diferencias en cada escenario. Como se puede observar en los mapas reticulares, mientras que a las 9:00 y a las 15:00 horas el porcentaje de área predominante es de 34% y 33% respectivamente, a las 12:00 horas el porcentaje aumentó a un 48%; además se observa que la penetración de la luz y la distribución de la iluminancia en el interior alcanza mayor profundidad que en los otros dos horarios.

Cabe destacar que, a pesar del aumento en los porcentajes de área de los rangos de iluminancia de 201-400lx, las condiciones del escenario evaluado no alcanzan condiciones de calidad lumínica confortable, pues el área para el rango de deslumbramiento  $>1000$  lx abarca porcentajes mayores a 10% durante los tres horarios; mientras que las 9:00 y las 15:00 horas alcanza un 14% de área, a las 12:00 horas este rango llega al 22%.

**Tabla 22.** Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.

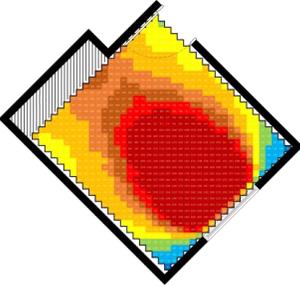
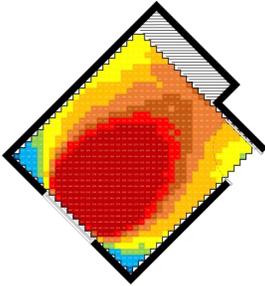
SIMULACIÓN:	Unidad Aislada		
			
DÍA	28 ENERO	28 ENERO	28 ENERO
ORIENTACION	SUR	SUR	SUR
HORARIO	9:00	12:00	15:00
Porcentaje de Área de Distribución de Iluminancia por Rangos			
< 100 lx	1%	1%	1%
100 - 200 lx	14%	3%	18%
201 - 300 lx	25%	4%	29%
301 - 400 lx	17%	22%	12%
401 - 500 lx	8%	21%	7%
> 500 lx	<b>34%</b>	<b>48%</b>	<b>33%</b>
Área de deslumbramiento > 1000 lx	14%	22%	14%

*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Sin embargo, los escenarios del 28 de enero con un mayor porcentaje de área correspondiente al rango de deslumbramiento >500 lx, son las orientaciones sureste a las 9:00 horas y el suroeste a las 15:00 horas, con valores de 63% y 66% respectivamente. Los mapas reticulares y distribución de porcentaje de áreas correspondientes a cada escenario se observan en la Tabla 23.

Además, es relevante destacar que la proporción correspondiente a valores > 1000 lx en el espacio, es de 23% para ambos casos, lo cual convierte a estos escenarios en los más alejados de los niveles de confort lumínico de las condiciones simuladas. Una vez más, este comportamiento se debe a la combinación del trayecto, azimut y ángulo de elevación solar, sumada a la eliminación de los edificios colindantes, lo cual permite que la luz llegue de forma casi directa al interior del espacio.

**Tabla 23.** Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.

SIMULACIÓN:	Unidad Aislada	
		
<b>DIA</b>	28 ENERO	28 ENERO
<b>ORIENTACIÓN</b>	SURESTE	SUROESTE
<b>HORARIO</b>	9:00	15:00
<b>Porcentaje de Área de Distribución de Iluminancia por Rangos</b>		
< 100 lx	0%	0%
100 - 200 lx	3%	3%
201 - 300 lx	3%	2%
301 - 400 lx	10%	12%
401 - 500 lx	21%	16%
> 500 lx	<b>63%</b>	<b>66%</b>
<b>Área de deslumbramiento &gt; 1000 lx</b>	23%	23%

*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Tras el análisis de las condiciones de diseño de la unidad aislada, durante los dos días de simulación y los 3 horarios de evaluación, se pueden destacar algunas conclusiones iniciales de la comparación de estos escenarios frente a los niveles mínimos de confort lumínico establecidos en la Tabla 7. Sin embargo, es importante considerar que pocas veces se presentan condiciones de diseño en las que no existe un contexto que coloque colindancias que actúen como elementos reflexivos u obstructivos con influencia directa en el interior de los espacios, por lo que las conclusiones del estudio bajo estas condiciones de diseño, más que describir escenarios posibles, representan un punto de comparación.

Las tres orientaciones más estables bajo las condiciones de diseño del caso aislado son noroeste, norte y noreste. Mientras que la orientación norte se mantiene estable durante los dos días de simulación y los tres horarios de evaluación, con una iluminancia predominante de 200lx, el noreste y noroeste presentan una variación entre los 200lx y los 300lx en el día de diseño de verano y en invierno se mantienen estables en 200lx. Estas orientaciones resultan ideales para habitaciones como salas de estar y recámaras según la Tabla 7.

Por el contrario, el resto de las orientaciones presenta una variación significativa de iluminancia durante los tres horarios de evaluación y los dos días de diseño, por lo que resultan poco aptas para mantener el confort del usuario frente a cualquier actividad, a lo largo del día y del año.

#### **4.2.4. Estrategia de diseño: Reflectancia**

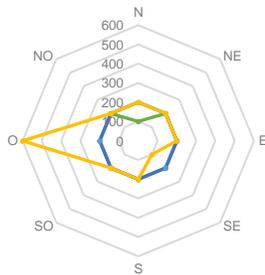
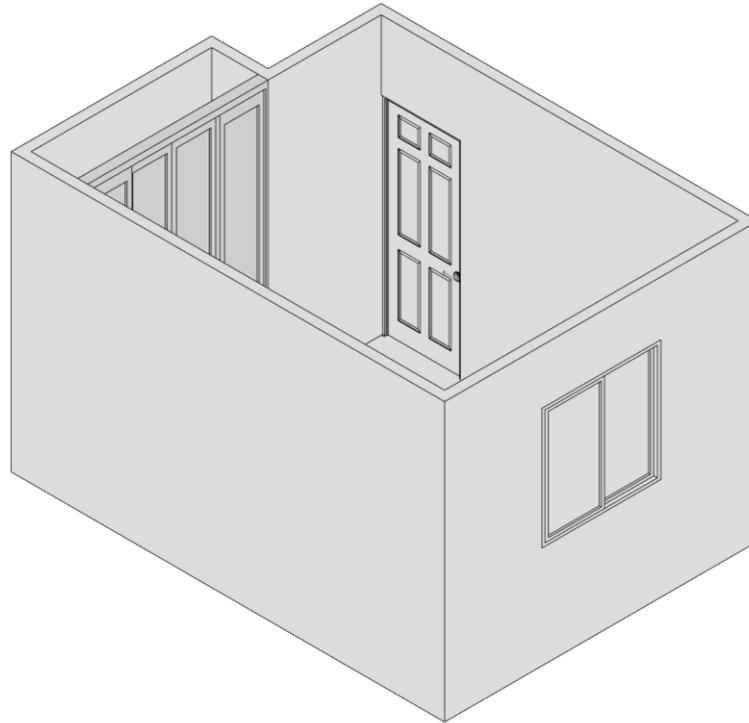
En el marco teórico se estableció que la reflectancia juega un valor primordial en la distribución de la luz en un espacio, tanto por la iluminación que pueden aportar las colindancias por reflexión de los rayos solares directos, como por influencia en la redirección y redistribución de la misma una vez que entra en la habitación.

La unidad de análisis en su estado actual cuenta con un mueble fijo de color café chocolate colocado al fondo del espacio en la pared contraria al vano de la ventana. Según se plantea en el marco teórico, el muro de fondo, después del techo, es una de las superficies que más influye en la distribución de la luz en el espacio interior, por lo que cambiar su color y por ende su valor de absortividad se entiende como una estrategia de iluminación natural.

Así, tras el ajuste del valor de absortancia del muro de 0.82 a 0.30 se realizó la simulación en los días críticos para los tres horarios de análisis y se observó el comportamiento de la iluminancia predominante en cada escenario de evaluación según se observa en la Tabla 24.

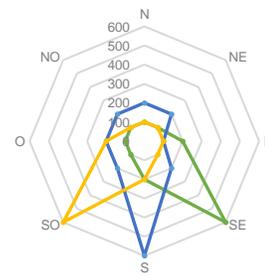
En el día de diseño de verano, se pueden observar varios cambios significativos en la distribución de los valores de iluminancia predominante por orientación, ya que, a diferencia del caso de estudio, cinco de ellas conservaron estable el valor de la iluminancia constante durante los tres horarios de evaluación. Esto se le atribuye a que, al modificar el color del muro más alejado de la ventana, se aumentó su capacidad de reflectancia de 18% a 70%, lo cual permitió, no solo una penetración de la luz más profunda, si no una distribución homogénea.

**Tabla 24. Reflectancia: iluminancia predominante; día, hora y orientación**



**16 MAYO**

— 9:00  
— 12:00  
— 15:00



**28 ENERO**

— 9:00  
— 12:00  
— 15:00

	16 MAYO						28 ENERO					
	9:00		12:00		15:00		9:00		12:00		15:00	
<b>N</b>	34%	<b>100 lx</b>	38%	<b>200 lx</b>	34%	<b>200 lx</b>	46%	<b>100 lx</b>	38%	<b>200 lx</b>	43%	<b>100 lx</b>
<b>NE</b>	40%	<b>200 lx</b>	39%	<b>200 lx</b>	38%	<b>200 lx</b>	42%	<b>100 lx</b>	37%	<b>200 lx</b>	42%	<b>100 lx</b>
<b>E</b>	32%	<b>200 lx</b>	38%	<b>200 lx</b>	38%	<b>200 lx</b>	37%	<b>200 lx</b>	37%	<b>100 lx</b>	48%	<b>100 lx</b>
<b>SE</b>	36%	<b>200 lx</b>	40%	<b>200 lx</b>	37%	<b>100 lx</b>	32%	<b>600 lx</b>	38%	<b>200 lx</b>	43%	<b>100 lx</b>
<b>S</b>	33%	<b>200 lx</b>	40%	<b>200 lx</b>	35%	<b>200 lx</b>	38%	<b>200 lx</b>	33%	<b>600 lx</b>	38%	<b>200 lx</b>
<b>SO</b>	37%	<b>200 lx</b>	40%	<b>200 lx</b>	38%	<b>200 lx</b>	36%	<b>100 lx</b>	36%	<b>200 lx</b>	32%	<b>600 lx</b>
<b>O</b>	39%	<b>200 lx</b>	42%	<b>200 lx</b>	30%	<b>600 lx</b>	42%	<b>100 lx</b>	33%	<b>200 lx</b>	39%	<b>200 lx</b>
<b>NO</b>	38%	<b>200 lx</b>	39%	<b>200 lx</b>	41%	<b>200 lx</b>	42%	<b>100 lx</b>	39%	<b>200 lx</b>	34%	<b>100 lx</b>

Nota. Elaboración propia.

Fueron el noreste, este, sur, suroeste y noroeste, las orientaciones que se mantuvieron en el rango de 200lx durante los tres horarios de evaluación. La Tabla 25 muestra los mapas de iluminación reticulares para la comparación de la distribución de iluminancia en el caso de estudio y en la simulación con la modificación de la reflectancia del mueble.

**Tabla 25.** Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.

<b>SIMULACIÓN:</b>	Caso de Estudio	Reflectancia
<b>DIA</b>	16 MAYO	16 MAYO
<b>ORIENTACIÓN</b>	ESTE	ESTE
<b>HORARIO</b>	15:00	15:00
<b>Porcentaje de Área de Distribución de Iluminancia por Rangos</b>		
< 100 lx	42%	36%
100 - 200 lx	34%	38%
201 - 300 lx	10%	12%
301 - 400 lx	5%	5%
401 - 500 lx	3%	3%
> 500 lx	5%	5%
<b>Área de deslumbramiento &gt; 1000 lx</b>	0%	0%

*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

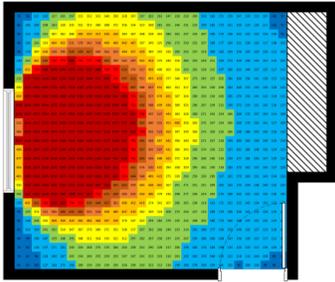
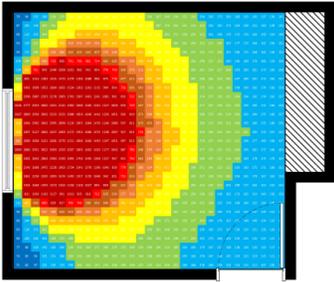
Los resultados muestran que, con la modificación de la reflectancia, el porcentaje disminuye un 6% para el rango < 100 lx y se distribuye en los siguientes dos rangos de iluminancia de entre de 100lx y 300lx, lo cual representa una ganancia para la sensación de la distribución de la luz en el espacio.

Además, cabe destacar que el cambio de reflectancia de la superficie no incrementó los porcentajes de área de valores  $> 500$  lx o los de deslumbramiento  $>1000$  lx, lo cual representa una modificación sin repercusiones negativas para el confort lumínico en el espacio para los usuarios.

En la Tabla 26 se muestra la comparación entre el caso de estudio y el criterio de reflectancia en la orientación oeste a las 15:00 horas del 16 de mayo, escenario que ha correspondido a las peores condiciones de distribución de iluminancia en las simulaciones anteriores. Como se puede observar, los valores de iluminancia mayores a los 400lx se mantienen iguales en ambos escenarios. En el resto de los rangos, las variaciones son mínimas, sin embargo, el cambio de reflectancia tiende a disminuir el porcentaje de área correspondiente en los rangos  $< 100$  lx y de  $100 - 200$  lx, y aumentar la iluminación del espacio en los valores de entre  $201 - 400$  lx.

Esta variación en los porcentajes de áreas de iluminancia, se debe a que, con el aumento de la reflectancia del muro de fondo, la luz dentro del espacio se refleja y logra una distribución más homogénea; en la **Tabla 26** se puede observar cómo el color azul fuerte cerca del closet desaparece, y los colores azul claro, verde y amarillo alcanzan una mayor profundidad en el espacio. Sin embargo, a pesar de estos cambios positivos, la modificación de la reflectancia no representa una solución absoluta, ya que la iluminancia predominante se mantuvo en el rango  $>500$ lx con un 30% del área del espacio y los valores de deslumbramiento  $>1000$ lx permanecieron iguales que en el caso de estudio.

**Tabla 26.** Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.

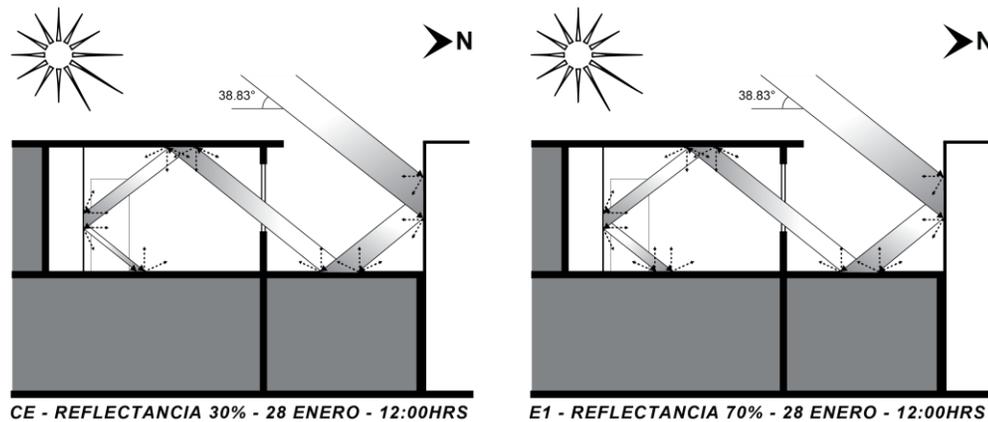
SIMULACIÓN:	Caso de Estudio	Reflectancia
		
<b>DIA</b>	16 MAYO	16 MAYO
<b>ORIENTACIÓN</b>	OESTE	OESTE
<b>HORARIO</b>	15:00	15:00
<b>Porcentaje de Área de Distribución de Iluminancia por Rangos</b>		
<b>&lt; 100 lx</b>	3%	2%
<b>100 - 200 lx</b>	29%	27%
<b>201 - 300 lx</b>	20%	21%
<b>301 - 400 lx</b>	11%	13%
<b>401 - 500 lx</b>	7%	7%
<b>&gt; 500 lx</b>	<b>30%</b>	<b>30%</b>
<b>Área de deslumbramiento &gt; 1000 lx</b>	15%	15%

*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Por su parte, el día de diseño de enero mantuvo relativamente el mismo comportamiento de iluminancias predominantes por orientación al que se presentó en el caso de estudio. Esto se le atribuye a que en el día de análisis de invierno el ángulo de elevación del sol es relativamente bajo, de  $38.83^\circ$ , y a pesar del ajuste en la reflectancia del muro más alejado de la ventana, en las orientaciones de este a oeste, la luz solar continúa entrando de forma directa en el espacio. Las variaciones significativas se observaron en el horario de las 12:00 horas para las orientaciones de noroeste a noreste ( $315^\circ$ -  $45^\circ$ ), que en el caso de estudio tuvieron una iluminancia predominante de 100lx y con el ajuste de la reflectancia, este valor logra subir a 200lx.

Esta variación se le adjudica al juego de reflexión de los rayos solares en las superficies de los edificios colindantes según el ángulo de elevación del sol a esa hora. La Figura 37 muestra este trayecto trazado y el cambio que sucede al final según el valor de la reflectancia del muro más alejado de la ventana, de 30% en el caso de estudio, a 70% en esta estrategia de diseño.

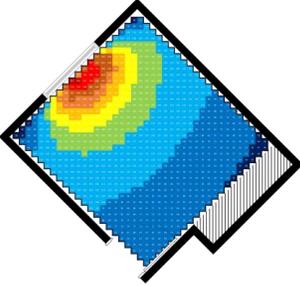
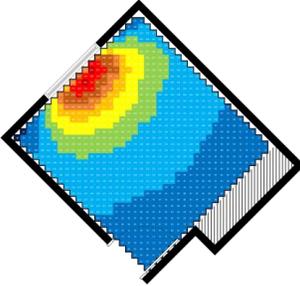
**Figura 37.** Reflectancia 30% y 70%, 28 de enero, 12:00 horas, Norte.



*Nota.* Elaboración propia.

La Tabla 27 muestra un aumento del 7% en el área de iluminancia predominante para el rango de 100 – 200lx en la orientación noroeste, que pasó de 32% en el caso de estudio a 39% con el ajuste de reflectancia. Además, a pesar de que la iluminancia predominante cae en el mismo rango en ambos casos, hacia el noroeste se presentó un comportamiento diferente al observado el día de verano tanto en la Tabla 25 para el este como en la Tabla 26 para el oeste, ya que el área de deslumbramiento presentó una disminución del 4%, lo cual eliminó la presencia valores > 1000 lx.

**Tabla 27.** Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.

<b>SIMULACIÓN:</b>	Caso de Estudio	Reflectancia
		
<b>DIA</b>	28 ENERO	28 ENERO
<b>ORIENTACIÓN</b>	NOROESTE	NOROESTE
<b>HORARIO</b>	12:00	12:00
<b>Porcentaje de Área de Distribución de Iluminancia por Rangos</b>		
<b>&lt; 100 lx</b>	29%	31%
<b>100 - 200 lx</b>	32%	39%
<b>201 - 300 lx</b>	14%	13%
<b>301 - 400 lx</b>	7%	7%
<b>401 - 500 lx</b>	4%	3%
<b>&gt; 500 lx</b>	13%	7%
<b>Área de deslumbramiento &gt; 1000 lx</b>	4%	0%

*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Así, como primera estrategia de iluminación natural, el análisis de los resultados permite identificar la mejora de la calidad lumínica en el espacio a partir de la modificación de la reflectancia del muro más alejado de la ventana. Sin embargo, este criterio de diseño, no presentó resultados lo suficientemente significativos para que su aplicación sea suficiente para cubrir las necesidades del usuario en la mayoría de los escenarios de evaluación.

#### **4.2.5. Estrategia de diseño: Ventanas Dobles**

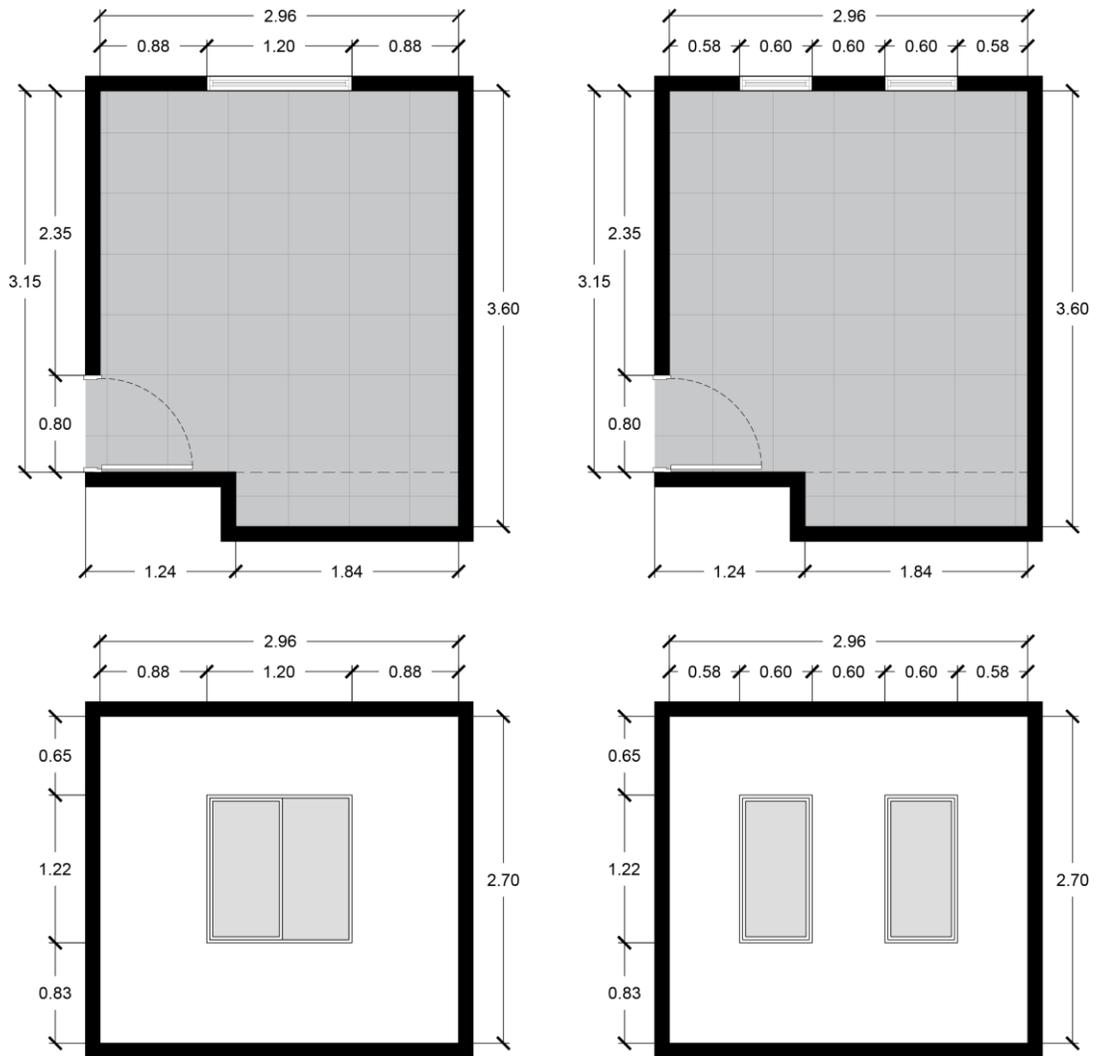
Como se mencionó en el marco teórico, las ventanas como estrategia de iluminación natural se enfrentan a distintas variables de diseño que se deben considerar para que su integración sea efectiva, tales como: su posición, orientación, configuración, tamaño, distribución y proporción, tanto respecto a la fachada en la que se encuentran, como respecto al espacio que iluminan. Por ello, la variación en las propiedades de una ventana, puede representar cambios considerables en la cantidad de iluminación y forma en la que distribuye la luz en una habitación.

Para validar este criterio, se decidió realizar la simulación de una variación en las características de la ventana de la unidad de análisis. El caso de estudio cuenta con una ventana de 1.20m x 1.22m, con un área total de 1.46m<sup>2</sup>, colocada al centro del muro a una altura de 0.83m a su paño inferior. El criterio de configuración de ventanas dobles presenta la misma área total pero distribuida en dos ventanas de 0.60m x 1.22m, con una separación entre ellas de 0.60m y colocadas a la misma altura según se observa en la Figura 38.

A partir de esta modificación se realizó la simulación en las ocho orientaciones, para ambos días de análisis durante los tres horarios establecidos, y se evaluó el comportamiento de la iluminancia predominante en cada uno de los 48 escenarios como se muestra en la Tabla 28, se compararon estos resultados tanto entre ellos, como frente al caso de estudio, para evaluar si este ligero cambio representa algún resultado importante en la calidad lumínica del espacio.

En la gráfica de los resultados para el 16 de mayo, inmediatamente se pueden observar varios cambios significativos en la distribución de los valores de la iluminancia predominante en las diversas orientaciones. Como se puede leer en la gráfica de la Tabla 29, en el horario de las 12:00 horas, el rango de iluminancia predominante varió del rango de 100-200lx al rango < 100lx en la mayoría de las orientaciones, a excepción del sur y suroeste que se mantuvieron en los 200lx como en el caso de estudio.

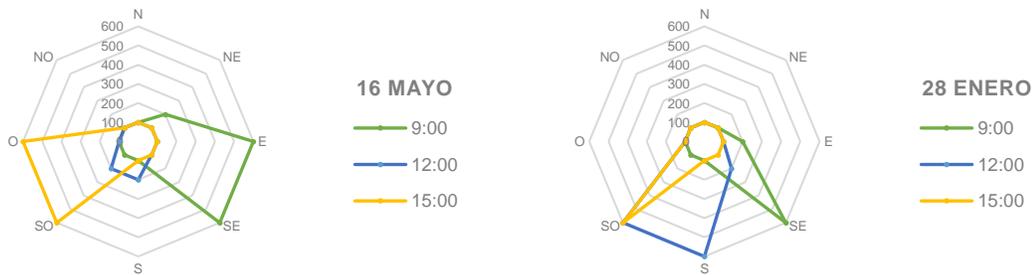
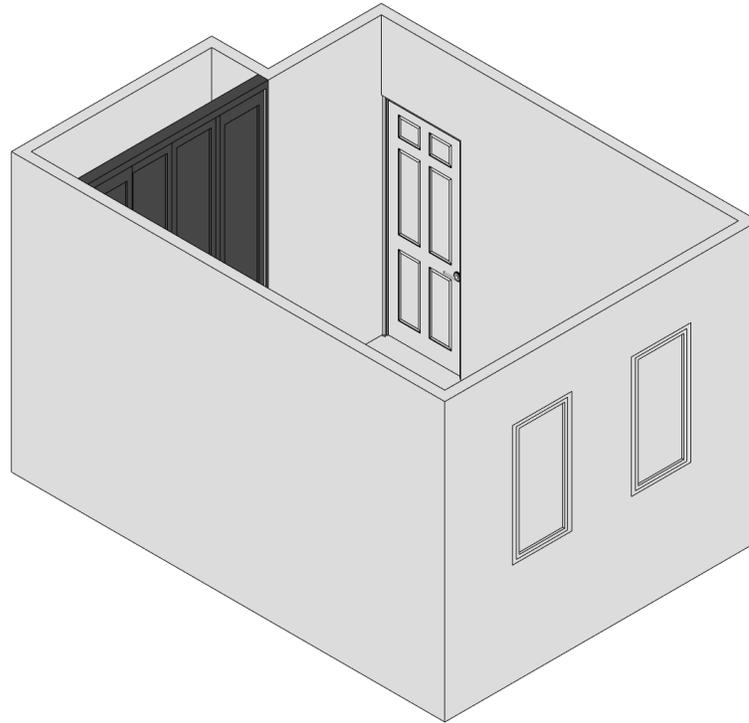
**Figura 38.** Planta y elevación, caso de estudio y ventanas dobles.



*Nota.* Elaboración propia.

De la misma manera, en este horario, todas las orientaciones presentaron un aumento en el porcentaje de área correspondiente al rango de iluminancia  $<100\text{lx}$  y la variación fue de hasta un 8%, como se puede observar para la orientación sureste, que pasó de 19% del área total del espacio dentro de este rango, a 27%, lo cual la convirtió en la iluminancia predominante.

**Tabla 28. Ventanas dobles: iluminancia predominante; día, hora y orientación**

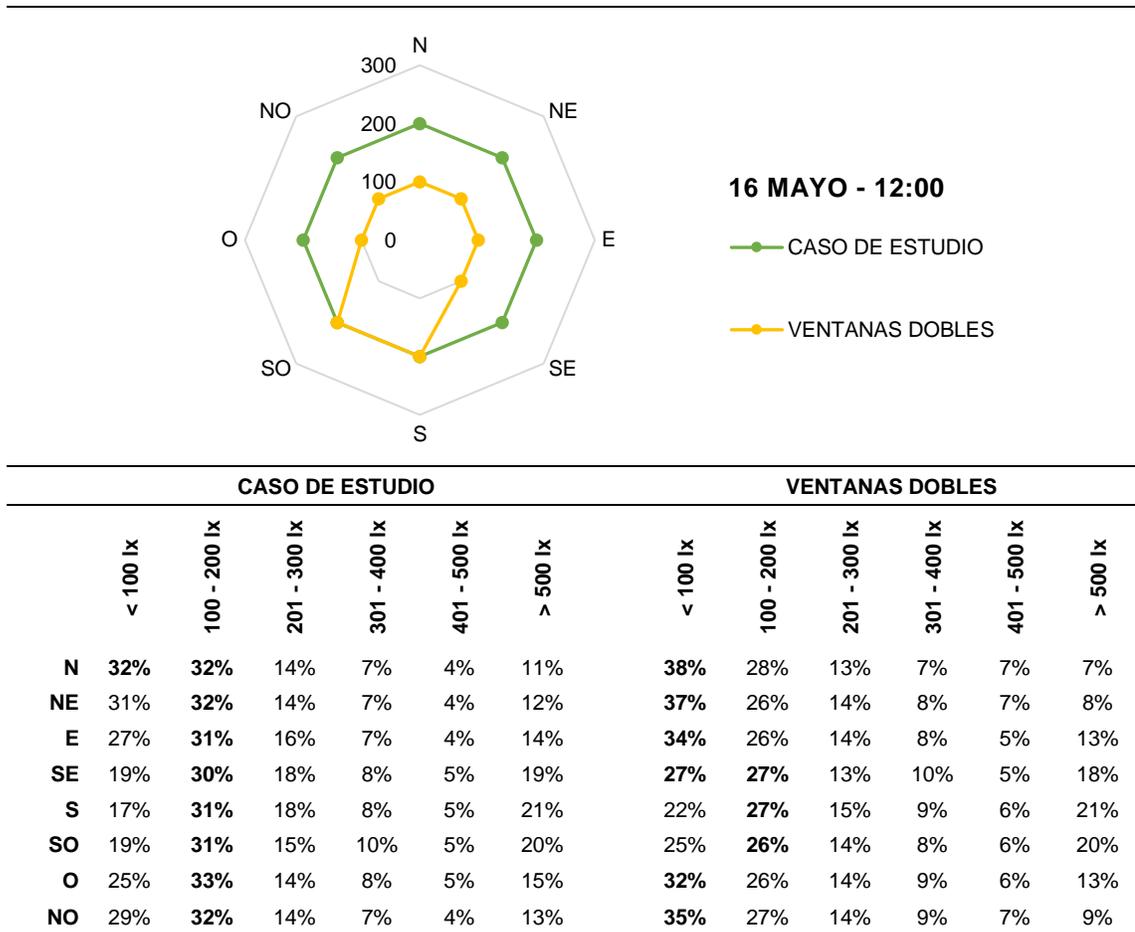


	16 MAYO						28 ENERO					
	9:00		12:00		15:00		9:00		12:00		15:00	
<b>N</b>	45%	<b>100 lx</b>	38%	<b>100 lx</b>	42%	<b>100 lx</b>	56%	<b>100 lx</b>	48%	<b>100 lx</b>	53%	<b>100 lx</b>
<b>NE</b>	27%	<b>200 lx</b>	37%	<b>100 lx</b>	44%	<b>100 lx</b>	50%	<b>100 lx</b>	48%	<b>100 lx</b>	50%	<b>100 lx</b>
<b>E</b>	31%	<b>600 lx</b>	34%	<b>100 lx</b>	48%	<b>100 lx</b>	28%	<b>200 lx</b>	44%	<b>100 lx</b>	55%	<b>100 lx</b>
<b>SE</b>	27%	<b>600 lx</b>	27%	<b>100 lx</b>	47%	<b>100 lx</b>	29%	<b>600 lx</b>	27%	<b>200 lx</b>	50%	<b>100 lx</b>
<b>S</b>	38%	<b>100 lx</b>	27%	<b>200 lx</b>	36%	<b>100 lx</b>	27%	<b>100 lx</b>	34%	<b>600 lx</b>	27%	<b>100 lx</b>
<b>SO</b>	42%	<b>100 lx</b>	26%	<b>200 lx</b>	27%	<b>600 lx</b>	41%	<b>100 lx</b>	27%	<b>600 lx</b>	29%	<b>600 lx</b>
<b>O</b>	46%	<b>100 lx</b>	32%	<b>100 lx</b>	31%	<b>600 lx</b>	53%	<b>100 lx</b>	38%	<b>100 lx</b>	27%	<b>100 lx</b>
<b>NO</b>	47%	<b>100 lx</b>	35%	<b>100 lx</b>	26%	<b>100 lx</b>	51%	<b>100 lx</b>	44%	<b>100 lx</b>	45%	<b>100 lx</b>

Nota. Elaboración propia.

Por su parte, el resto de los porcentajes de área correspondientes a los rangos de iluminancia de 201 – 500lx se mantuvieron relativamente intactos, mientras que el rango de deslumbramiento >500lx presentó una disminución del porcentaje de área en las ocho orientaciones. Esto significa que, con la modificación de la configuración de área de ventanas dobles, la disminución del porcentaje de área correspondiente a los valores más brillantes, se reflejó en el aumento del área para los valores más oscuros.

**Tabla 29.** Iluminancia predominante por orientación, 16 de mayo, 12:00 horas, caso de estudio y ventanas dobles



Nota. Elaboración propia.

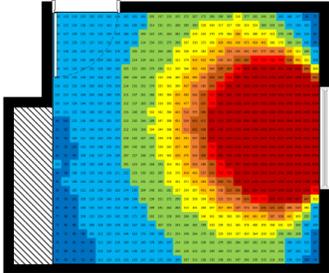
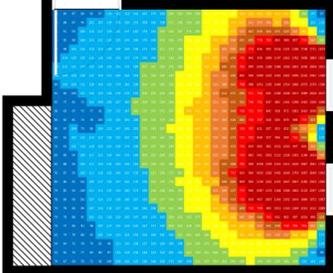
Todo lo anterior se le atribuye mayormente a que, al dividir el área de la ventana, el elemento de muro entre ellas representa una barrera para la recepción de luz en el espacio; al mismo tiempo, al acercar el área acristalada a los muros, permite la reflexión de la luz en los mismos, lo cual la convierte en difusa y por ende disminuye su intensidad. La combinación de estos factores tiene por resultado que la luz directa se pierda conforme entra en el espacio y se generen mayores áreas de baja iluminancia, mayormente cerca del muro más alejado de la ventana.

Por su parte, para los horarios de las 9:00 y las 15:00 horas el criterio de las ventanas dobles no representó cambios tan significativos en la iluminancia predominante. A pesar de que para el este y el sureste se observa un cambio significativo del rango predominante de 100 – 200 lx a > 500 lx, la variación es solo de un aumento del 3% del área correspondiente. La Tabla 30 muestra una comparativa entre el caso de estudio y el criterio de diseño a las 9:00 horas. En esta, se observa nuevamente que el cambio más significativo corresponde al aumento de las áreas <100lx, que aumentaron un 6% y una respectiva disminución en el porcentaje correspondiente al rango de 201 – 300lx, mientras que el área de deslumbramiento disminuye solo un 3%.

Este comportamiento se le adjudica a la unión de dos factores: trayecto solar y obstrucción. Al igual que en el caso de estudio, la luz en este horario llega de forma directa y ocasiona problemas de deslumbramiento, sin embargo, la división del área acristalada en dos ventanas ocasiona por su parte, que el área de iluminación se distribuya de forma transversal en el espacio, lo cual disminuye el alcance de profundidad que tiene la luz y por ende, aumenta los porcentajes de área en rangos de iluminancia deficientes.

Durante el horario de las 15:00 horas, se mantuvieron los valores <100lx en las orientaciones de norte a sureste (0°- 135°), así como el rango >500lx hacia el oeste. Sin embargo, resulta interesante analizar las orientaciones suroeste y noroeste, pues a pesar de que ambas presentaban un valor predominante de 100-200lx en el caso de estudio, la primera aumentó a >500 lx, mientras que la segunda disminuyó a <100lx.

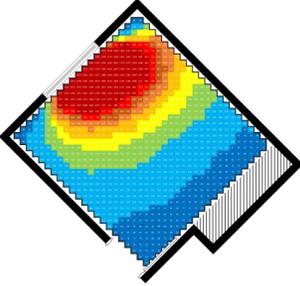
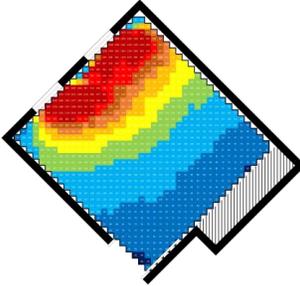
**Tabla 30. Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.**

<b>SIMULACIÓN:</b>	Caso de Estudio	Configuración de Ventanas: Ventanas Dobles
		
<b>DÍA</b>	16 MAYO	16 MAYO
<b>ORIENTACION</b>	ESTE	ESTE
<b>HORARIO</b>	9:00	9:00
<b>Porcentaje de Área de Distribución de Iluminancia por Rangos</b>		
<b>&lt; 100 lx</b>	6%	12%
<b>100 - 200 lx</b>	<b>29%</b>	27%
<b>201 - 300 lx</b>	20%	14%
<b>301 - 400 lx</b>	12%	10%
<b>401 - 500 lx</b>	5%	6%
<b>&gt; 500 lx</b>	28%	<b>31%</b>
<b>Área de deslumbramiento &gt; 1000 lx</b>	15%	12%

*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

En la Tabla 31 se observa la comparación entre el caso de estudio y el criterio de ventanas dobles para la orientación suroeste a las 15:00 horas. Aunque la simulación mostró el aumento de 5% en el rango < 100lx, como se ha observado y explicado anteriormente, la disminución que presentó en el rango predominante del caso de estudio, es el mismo porcentaje de área que aumentó el rango de iluminación deficiente. Sin embargo, a pesar de que el área de los valores de iluminancia >500lx se mantuvo relativamente igual, el porcentaje de deslumbramiento >1000lx disminuyó de 10% a 5%. Esto se le atribuye a las condiciones antes explicadas, en las que el área entre las ventanas obstruye la luz que recibe y la distancia entre las mismas permite que se refleje en los muros laterales.

**Tabla 31.** Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.

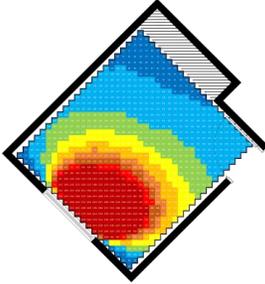
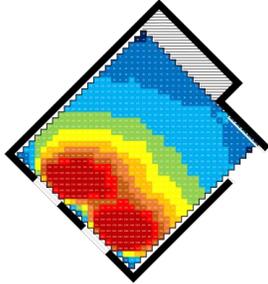
<b>SIMULACIÓN:</b>	Caso de Estudio	Configuración de Ventanas: Ventanas Dobles
		
<b>DÍA</b>	16 MAYO	16 MAYO
<b>ORIENTACION</b>	NOROESTE	NOROESTE
<b>HORARIO</b>	15:00	15:00
<b>Porcentaje de Área de Distribución de Iluminancia por Rangos</b>		
< 100 lx	19%	26%
100 - 200 lx	31%	26%
201 - 300 lx	14%	13%
301 - 400 lx	7%	8%
401 - 500 lx	6%	6%
> 500 lx	23%	22%
<b>Área de deslumbramiento &gt; 1000 lx</b>	10%	5%

*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Por su parte, en el suroeste, lo que se observa no es un aumento en el área de iluminancia predominante > 500 lx, sino una disminución del 5% de superficie en el rango de 100 – 200lx, como se muestra en la Tabla 32. El aumento en el rango <100 lx fue del 7%, y la disminución del área de deslumbramiento >1000 lx fue de 5% al igual que en el noroeste.

El día de análisis de invierno presentó un comportamiento muy similar al día de verano, en donde durante el horario de las 12:00 horas, el suroeste subió a una iluminancia predominante de >500 lx, mientras que algunas de las orientaciones, que en el caso de estudio se encontraban en el rango de 100 – 200lx, disminuyeron al rango <100 lx como iluminancia predominante.

**Tabla 32.** Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.

<b>SIMULACIÓN:</b>	Caso de Estudio	Configuración de Ventanas: Ventanas Dobles
		
<b>DÍA</b>	16 MAYO	16 MAYO
<b>ORIENTACION</b>	SUROESTE	SUROESTE
<b>HORARIO</b>	15:00	15:00
<b>Porcentaje de Área de Distribución de Iluminancia por Rangos</b>		
<b>&lt; 100 lx</b>	10%	17%
<b>100 - 200 lx</b>	<b>32%</b>	<b>27%</b>
<b>201 - 300 lx</b>	15%	14%
<b>301 - 400 lx</b>	9%	9%
<b>401 - 500 lx</b>	7%	6%
<b>&gt; 500 lx</b>	<b>27%</b>	<b>27%</b>
<b>Área de deslumbramiento &gt; 1000 lx</b>	13%	8%

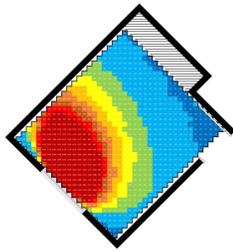
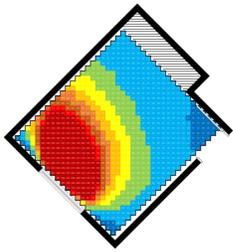
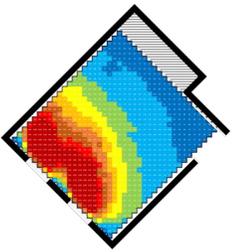
*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

En la Tabla 33 se realiza una comparativa entre el caso de estudio, el criterio de reflectancia y el criterio de configuración de ventanas dobles en el horario de las 12:00 horas. A pesar de que en los primeros dos escenarios la iluminancia predominante cae en el rango de 100-200lx, y para el criterio de diseño de ventanas dobles, el porcentaje mayor se encuentra en el rango de deslumbramiento >500 lx, es necesario comparar la distribución del resto de los valores porcentuales del área para cada rango en los tres casos, para entender que esta variación no es del todo negativa.

A pesar de que la iluminancia predominante en la configuración de ventanas dobles, corresponde al valor >500lx en un 27% del área total, en realidad es el porcentaje más pequeño en comparación, tanto con el caso de estudio, que en este

rango de iluminancia alcanzó un 30%, como con la modificación de la reflectancia, que alcanzó un 29% para este mismo rango de iluminancia, lo cual significa que la modificación del área de ventana, presentó menor área de deslumbramiento.

**Tabla 33.** Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.

SIMULACIÓN:	Caso de Estudio	Reflectancia	Configuración de Ventanas: Ventanas Dobles
			
DÍA	28 ENERO	28 ENERO	28 ENERO
ORIENTACIÓN	SUROESTE	SUROESTE	SUROESTE
HORARIO	12:00	12:00	12:00
<b>Porcentaje de Área de Distribución de Iluminancia por Rangos</b>			
< 100 lx	7%	5%	18%
100 - 200 lx	<b>34%</b>	<b>36%</b>	<b>27%</b>
201 - 300 lx	15%	16%	14%
301 - 400 lx	8%	8%	8%
401 - 500 lx	6%	6%	5%
> 500 lx	<b>30%</b>	<b>29%</b>	<b>27%</b>
Área de deslumbramiento > 1000 lx	13%	12%	7%

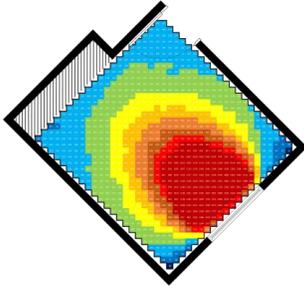
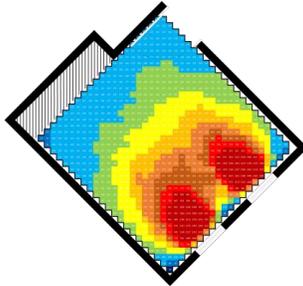
*Nota:* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Además, cabe destacar que para la configuración de ventanas dobles, el 27% de área que corresponde a la iluminancia predominante en el rango de deslumbramiento antes mencionado, es el mismo valor del porcentaje del espacio que alcanza el rango de 100 – 200lx en este mismo caso, por lo que en realidad, no existió una mejora en la distribución de iluminancia con la aplicación de este criterio de 144arbño, pues este rango disminuyó de 34% en el caso de estudio a 27% en la configuración de ventanas dobles, lo cual representó una disminución en la iluminación natural en general.

Sin embargo, a pesar de la disminución en el rango >500 lx, y en el de deslumbramiento >1000 lx, el comportamiento resulta el mismo que en el día de verano, pues el aumento de porcentaje de área se refleja en los valores < 100 lx, lo cual significa que la habitación en realidad se volvió más oscura.

A pesar de que gran parte del análisis arroje que los cambios en la distribución de la iluminación natural fueron mínimos, lo más interesante a destacar es el impacto que tiene la implementación de la estrategia de ventanas dobles en la disminución en el área de deslumbramiento. La Tabla 34 muestra cómo la orientación sureste en el horario de las 9:00 horas logra disminuir el área de deslumbramiento más del 50%, al pasar de 12% en el caso de estudio, a 5% en el criterio de ventanas dobles.

**Tabla 34.** Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.

SIMULACIÓN:	Caso de Estudio	Configuración de Ventanas: Ventanas Dobles
		
DÍA	28 ENERO	28 ENERO
ORIENTACION	SURESTE	SURESTE
HORARIO	09:00	09:00
<b>Porcentaje de Área de Distribución de Iluminancia por Rangos</b>		
< 100 lx	2%	1%
100 - 200 lx	22%	26%
201 - 300 lx	24%	19%
301 - 400 lx	13%	15%
401 - 500 lx	7%	9%
> 500 lx	<b>32%</b>	<b>29%</b>
Área de deslumbramiento > 1000 lx	12%	5%

Nota. Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Además, la orientación sureste es el único escenario en el que no se refleja el mismo comportamiento de aumento en el porcentaje de área  $<100$  lx. Esto es debido a que, con el cambio en el azimut y altitud del sol durante el periodo de invierno, los rayos solares llegan de una manera casi directa a la fachada sureste, lo cual permite que el efecto de penetración de la luz sea similar al de una sola ventana en el caso de estudio. Sin embargo, con la división del área del vano en dos elementos, el muro central entre ellos funge como barrera y obstruye directamente el paso del sol, mientras que los muros laterales sirven como reflectores y permiten que la luz se distribuya de manera homogénea en el espacio.

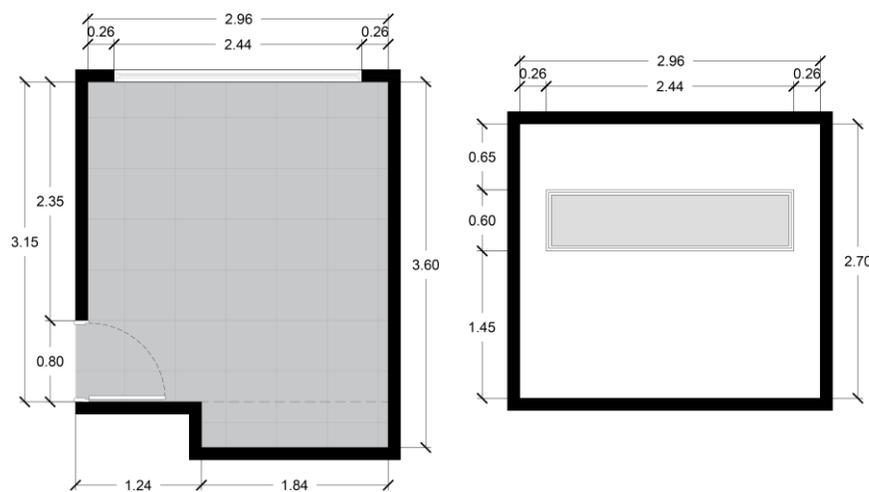
#### 4.2.6. Estrategia de diseño: Ventana Horizontal

Como se mencionó anteriormente, la configuración de la ventana en un espacio juega un papel determinante en la distribución de la luz en el espacio, no solo en su forma y tamaño, sino en su configuración y posición en el muro con respecto al resto del espacio, ya que su cercanía con muros, techo o piso cambia el comportamiento de la distribución de la luz natural debido a la reflexión que puede suceder gracias a estas superficies.

Así, la altura en la que se posicione la ventana se apoya directamente de las propiedades de color y reflexión del techo de la habitación, pues a partir de la entrada directa de la luz solar por la ventana, la proximidad con el techo permite que ésta se refleje y suceda una transformación en luz difusa y una distribución de forma más homogénea.

A partir de esta relación se delimita la evaluación del criterio de diseño de una ventana de proporción horizontal, que mantiene la misma área total de ventana que el caso de estudio, pero en una distribución de medidas de 2.44m x 0.60m y colocada a una altura de 1.45m al paño inferior del vano, como se muestra en la Figura 39.

**Figura 39.** Planta y Elevación de Configuración de Ventana Horizontal.

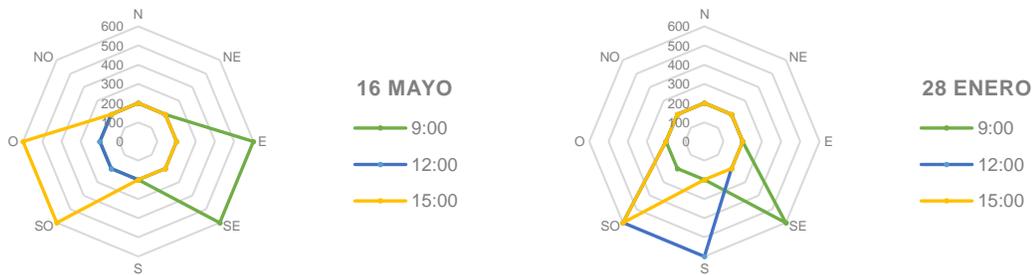
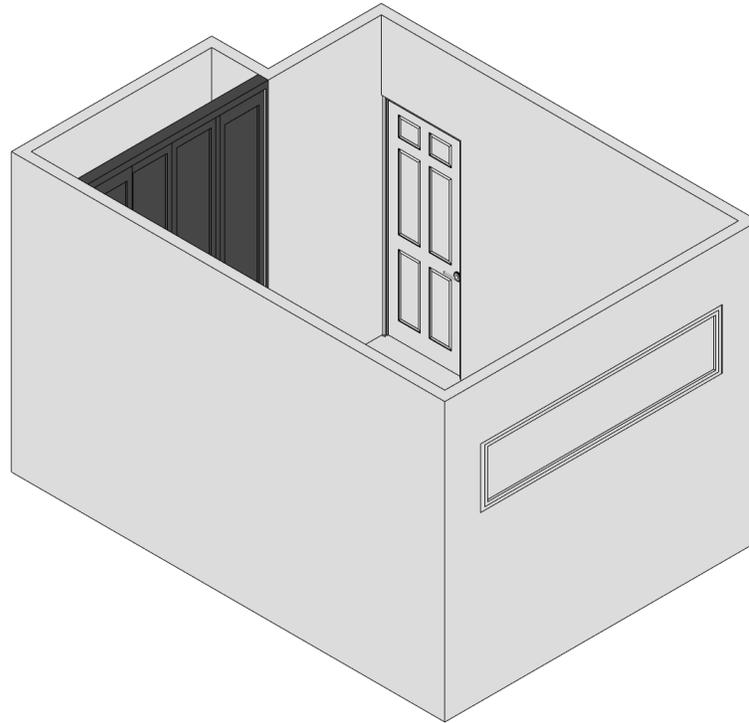


*Nota.* Elaboración propia.

En la Tabla 35 se muestra la visualización del comportamiento de la iluminancia predominante por orientación en la simulación del criterio de diseño de configuración de ventana horizontal en los días 16 de mayo y 28 de enero. De manera general inmediatamente se observó que los valores mínimos de iluminancia máxima no bajaron del rango de 100 – 200lx a diferencia del caso de estudio que sí alcanza valores < 100lx, lo cual representa una clara mejora en la calidad lumínica en la mayor parte de las orientaciones.

En la Tabla 36 se observa la comparativa de la distribución de iluminancia para la orientación norte que, tanto para el caso de estudio como para el criterio de ventanas dobles, esta orientación mantuvo el mismo valor de iluminancia predominante durante los tres horarios de evaluación. En el caso de estudio el rango mayoritario fue de <100lx, y el porcentaje de área de deslumbramiento >500lx alcanzó el 10% del espacio total. Por su parte, con el cambio de la configuración de la ventana horizontal, se observó tanto la eliminación total del área de deslumbramiento, como una distribución más homogénea de la luz natural en el espacio; el área correspondiente a los rangos de 100 – 200lx aumentó a casi 40% del espacio, mientras que el rango de 401 – 500lx disminuyó a valores menores a 3% en los tres horarios de evaluación. Esta mejora en la calidad lumínica del espacio se le atribuye a la reflexión de la luz en el techo como se mencionó anteriormente.

**Tabla 35. Ventana horizontal: iluminancia predominante; día, hora y orientación**

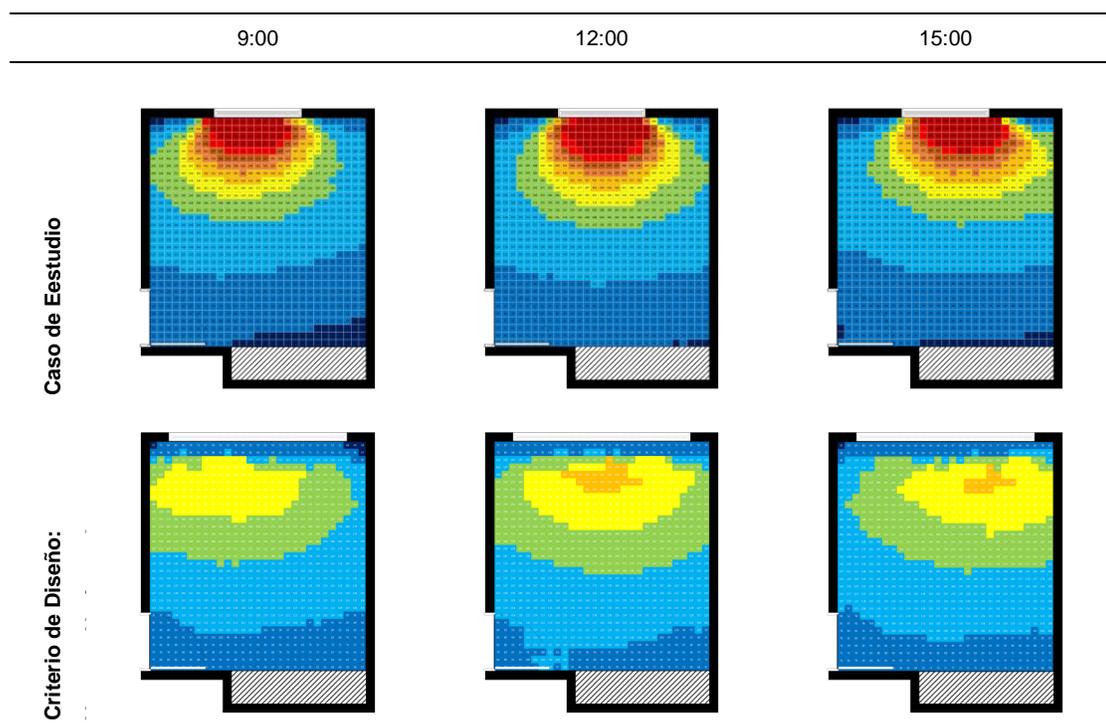


	16 MAYO						28 ENERO					
	9:00		12:00		15:00		9:00		12:00		15:00	
<b>N</b>	37%	<b>200 lx</b>	37%	<b>200 lx</b>	37%	<b>200 lx</b>	55%	<b>200 lx</b>	58%	<b>200 lx</b>	55%	<b>200 lx</b>
<b>NE</b>	31%	<b>200 lx</b>	39%	<b>200 lx</b>	47%	<b>200 lx</b>	41%	<b>200 lx</b>	51%	<b>200 lx</b>	62%	<b>200 lx</b>
<b>E</b>	38%	<b>600 lx</b>	37%	<b>200 lx</b>	52%	<b>200 lx</b>	29%	<b>200 lx</b>	40%	<b>200 lx</b>	58%	<b>200 lx</b>
<b>SE</b>	30%	<b>600 lx</b>	30%	<b>200 lx</b>	46%	<b>200 lx</b>	39%	<b>600 lx</b>	25%	<b>200 lx</b>	45%	<b>200 lx</b>
<b>S</b>	38%	<b>200 lx</b>	29%	<b>200 lx</b>	36%	<b>200 lx</b>	29%	<b>200 lx</b>	44%	<b>600 lx</b>	30%	<b>200 lx</b>
<b>SO</b>	45%	<b>200 lx</b>	34%	<b>200 lx</b>	29%	<b>600 lx</b>	43%	<b>200 lx</b>	27%	<b>600 lx</b>	39%	<b>600 lx</b>
<b>O</b>	53%	<b>200 lx</b>	37%	<b>200 lx</b>	38%	<b>600 lx</b>	58%	<b>200 lx</b>	40%	<b>200 lx</b>	28%	<b>200 lx</b>
<b>NO</b>	48%	<b>200 lx</b>	39%	<b>200 lx</b>	31%	<b>200 lx</b>	62%	<b>200 lx</b>	51%	<b>200 lx</b>	41%	<b>200 lx</b>

Nota. Elaboración propia.

Además, con la aplicación de la configuración de ventana horizontal, se observó una disminución del porcentaje del rango  $<100\text{lx}$ , así como una redistribución del área correspondiente. Las imágenes en la Tabla 36 muestran cómo en la simulación de la configuración de la ventana horizontal, existe un cambio considerable en la ubicación de estos valores en el espacio, ya que en cualquiera de los tres horarios de este caso, se puede observar que los recuadros correspondientes a valores de iluminancia  $<100\text{lx}$ , no se encuentran solo al fondo del espacio como en el caso de estudio, sino que se distribuyen también a lo largo de todo el muro de la ventana. Esto también se observó en el resto de los días y horarios simulados, y se debe a que, por la proporción y altura de la ventana, el vano se encuentra más lejos del plano de trabajo y por ende se crea un área oscura al margen del muro de la ventana, como se muestra en la Figura 40.

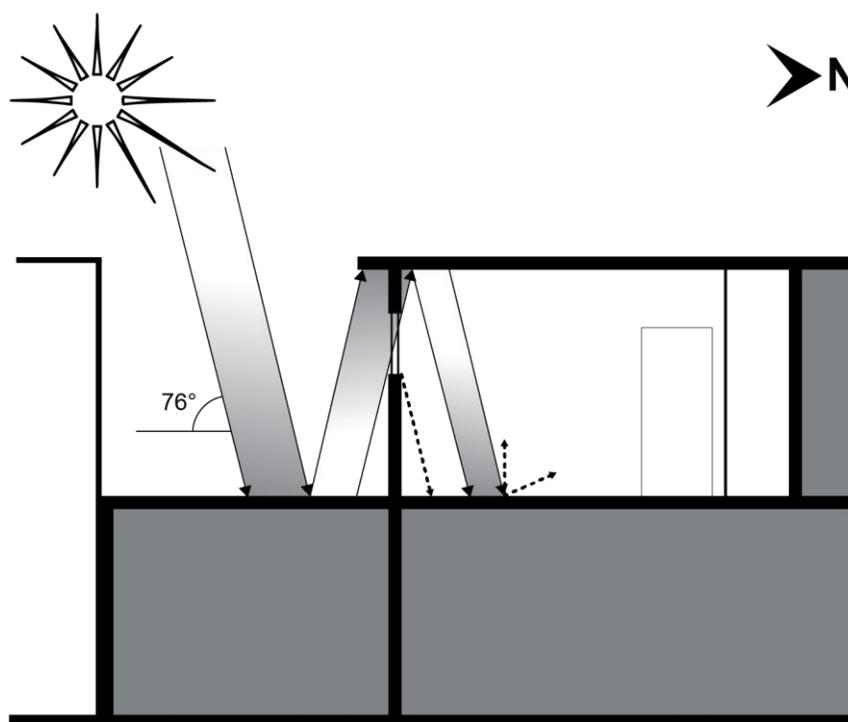
**Tabla 36.** Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.



*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Este análisis de la distribución de iluminancia en el espacio permite tomar decisiones acertadas según el uso del espacio y la distribución de los muebles correspondientes. Un primer ejemplo es que, si se coloca un escritorio recargado en este muro, mientras que en el caso de estudio recibiría valores de iluminancia de deslumbramiento, con la ventana horizontal recibe valores por debajo de los 100lx. Sin embargo, ya que la iluminancia predominante es de 200lx y estos niveles resultan ideales para una estancia según la Tabla 7, el margen de oscuridad que se crea en el muro de la ventana resulta ideal para colocar una televisión sobre él, pues se disminuye el contraste entre la luz exterior y el mueble, mientras que la iluminancia 100 – 200lx se distribuye en el espacio habitado donde se puede colocar un sillón y una mesa de centro, que estarán iluminadas de manera adecuada.

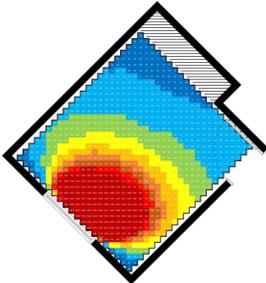
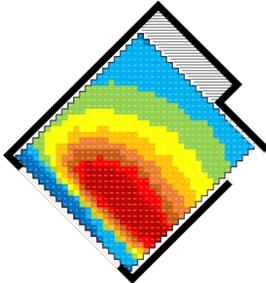
**Figura 40.** Ventana horizontal: reflexión, 16 de mayo, 12:00 horas, Sur.



*Nota.* Elaboración propia.

Además del aumento de los valores de iluminancia predominante a 200lx en la mayoría de las orientaciones, el sureste y el suroeste presentaron cambios significativos. La Tabla 37 muestra una comparación de la distribución de los porcentajes de áreas de iluminancia entre el caso de estudio y el criterio de diseño de ventana horizontal en la orientación suroeste a las 15:00 horas.

**Tabla 37.** Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.

<b>SIMULACIÓN:</b>	Caso de Estudio	Criterio de Diseño: Ventana Horizontal
		
<b>DÍA</b>	16 MAYO	16 MAYO
<b>ORIENTACION</b>	SUROESTE	SUROESTE
<b>HORARIO</b>	15:00	15:00
<b>Porcentaje de Área de Distribución de Iluminancia por Rangos</b>		
< 100 lx	10%	5%
100 - 200 lx	32%	22%
201 - 300 lx	15%	20%
301 - 400 lx	9%	14%
401 - 500 lx	7%	10%
> 500 lx	27%	29%
<b>Área de deslumbramiento &gt; 1000 lx</b>	13%	0%

*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Al revisar la distribución de porcentajes de área bajo el criterio de ventana horizontal, se presentó un patrón similar al cambio que se observó con las ventanas dobles, en el que, a pesar de que la iluminancia predominante con la ventana horizontal aumentó del rango de 100-200lx al de >500lx, el porcentaje de área que le corresponde es solo 2% más alto al que se observa en el caso de estudio para este mismo rango de deslumbramiento. Mientras que en el caso de estudio el rango

de deslumbramiento tiene un área total de 27%, el criterio de diseño de ventana horizontal aumenta a 29%, por lo que a pesar de que, según la distribución del resto de los porcentajes de áreas, éste es el rango predominante para el criterio de diseño, en realidad la diferencia con el caso de estudio no es significativa.

En esta misma comparación de escenarios, también se observó la disminución del porcentaje correspondiente a valores  $<100\text{lx}$  mencionada anteriormente en la evaluación de la orientación norte, que en este caso disminuyó a la mitad el área de este rango, pues pasó de 10% en el caso de estudio a 5% en el criterio de ventana horizontal. Los mapas reticulares de la Tabla 37 permiten observar cómo los valores correspondientes a la iluminancia mínima se mantienen sólo en el margen del muro de la ventana, mientras que el gradiente de valores  $>100\text{lx}$  alcanza mayor profundidad en la habitación.

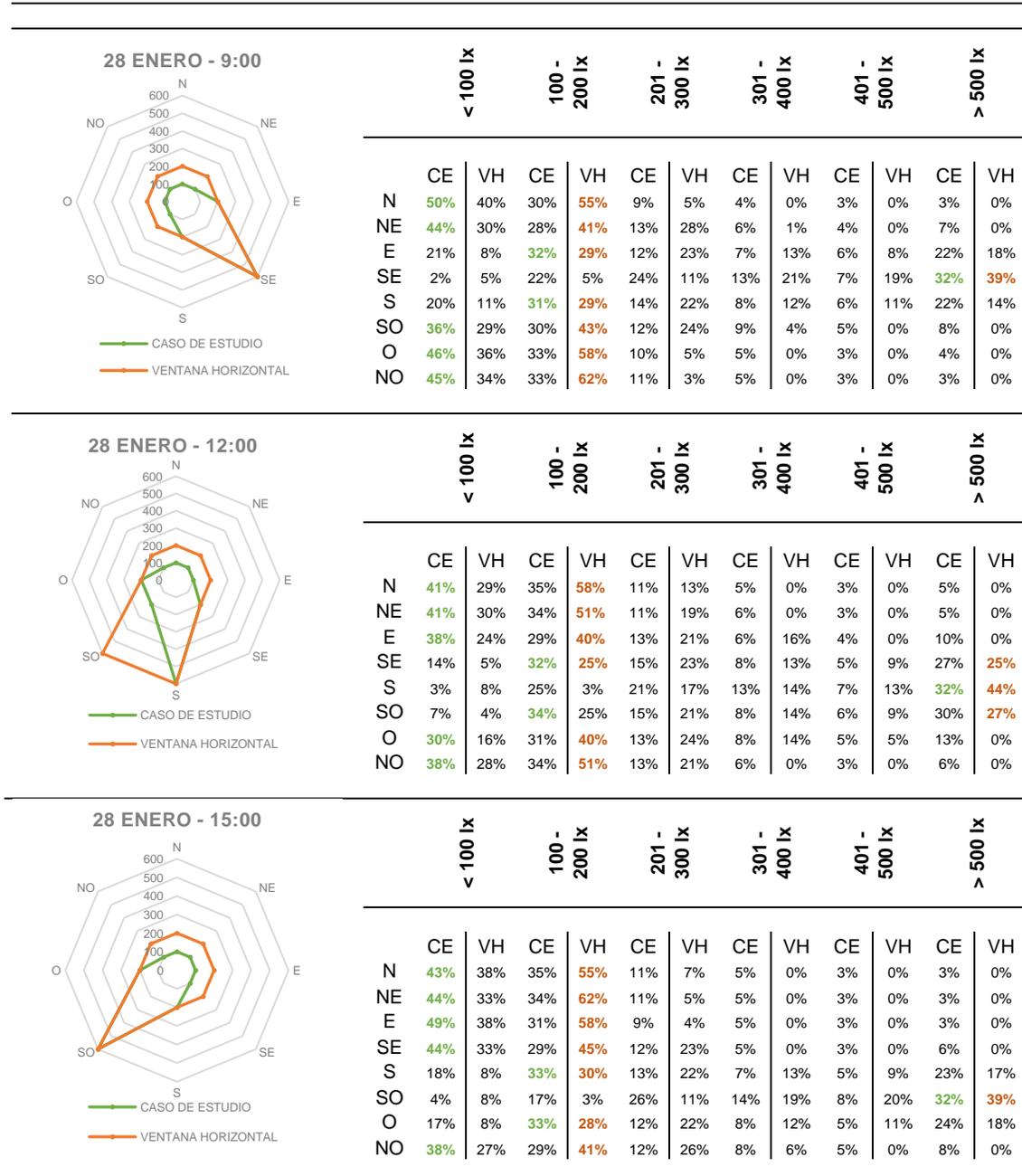
Sin embargo, el cambio más importante se observa en la eliminación total del porcentaje de área de deslumbramiento  $>1000\text{lx}$ ; mientras que en el caso de estudio el 13% del área total contaba con valores de iluminancia en este rango, con la configuración de la venta horizontal este valor desapareció por completo. Esta variación es el cambio más drástico en la disminución del deslumbramiento, no solo de este criterio de diseño, sino de todas las evaluadas anteriormente.

Así, a pesar de que el mapa reticular pueda simular que la distribución de la luz en el suroeste no es ideal porque la iluminancia predominante es de  $> 500\text{lx}$ , en realidad no alcanza valores de deslumbramiento por encima de los  $1000\text{lx}$ . Al considerar este factor con la forma en la que se distribuyen el resto de los porcentajes de área correspondientes a valores de iluminancia  $>100\text{lx}$ , se puede deducir que la aplicación de este criterio resulta en una mejora de la calidad lumínica del espacio en esta orientación en comparación al caso de estudio.

En el análisis de los resultados de la iluminancia para el día de simulación de invierno, se observó que, al igual que el día de verano, los valores máximos se encuentran en el rango de  $100 - 200\text{lx}$ , sin embargo, a diferencia de los resultados del 16 de mayo, el criterio de diseño de ventana horizontal durante el 28 de enero, arrojó un comportamiento similar al del caso de estudio.

Esta similitud se observa claramente en la Tabla 38, en donde se realiza la comparativa entre ambos escenarios para cada uno de los 3 horarios de evaluación.

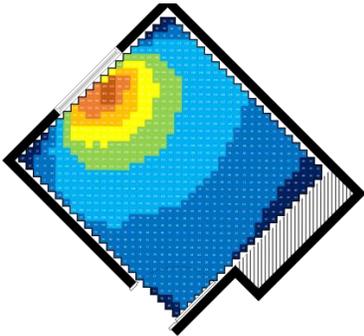
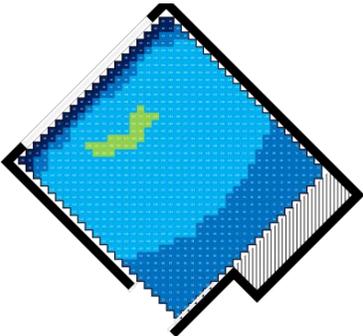
**Tabla 38. Iluminancia predominante: caso de estudio y ventana horizontal.**



Nota. Elaboración propia.

A las 9:00 horas los dos cambios significativos fueron el aumento de la iluminancia predominante al rango de 100 – 200lx para las orientaciones de sur a este (180°- 90° de azimut), y la eliminación de los porcentajes de área correspondientes a rangos >500lx para las orientaciones de suroeste a noreste (225°- 45° de azimut). Debido al cambio de azimut y disminución en la altura solar en invierno, la presencia de iluminación natural resulta más complicada en este periodo, especialmente para las orientaciones oeste, noroeste y norte, por lo que el aumento de la calidad lumínica a las 9:00 horas representa una mejora para el confort lumínico del usuario. La Tabla 39 muestra los mapas reticulares de distribución de iluminancia para la orientación noroeste en el caso de estudio comparado con el criterio de diseño de ventana horizontal.

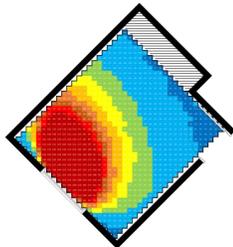
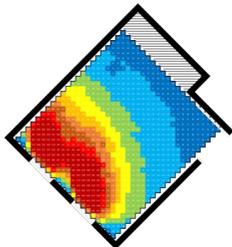
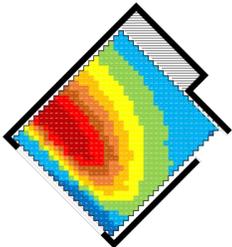
**Tabla 39.** Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.

<b>SIMULACIÓN:</b>	Caso de Estudio	Criterio de Diseño: Ventana Horizontal
		
<b>DÍA</b>	28 ENERO	28 ENERO
<b>ORIENTACION</b>	NOROESTE	NOROESTE
<b>HORARIO</b>	09:00	09:00
<b>Porcentaje de Área de Distribución de Iluminancia por Rangos</b>		
< 100 lx	45%	27%
100 - 200 lx	33%	41%
201 - 300 lx	11%	26%
301 - 400 lx	5%	6%
401 - 500 lx	3%	0%
> 500 lx	3%	0%
<b>Área de deslumbramiento &gt; 1000 lx</b>	0%	0%

*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Por otra parte, a las 12:00 horas se observó un comportamiento similar a los resultados arrojados en la simulación del criterio de ventanas dobles, pues a diferencia del caso de estudio, el suroeste presentó un aumento en su iluminancia predominante y pasó de corresponder al rango de 100-200lx, al >500lx. La comparativa entre estos tres escenarios se puede observar en la Tabla 40.

**Tabla 40.** Mapa de distribución de iluminancia de caso de estudio.

<b>SIMULACIÓN:</b>	Caso de Estudio	Criterio de Diseño: Ventanas Dobles	Criterio de Diseño: Ventana Horizontal
			
<b>DÍA</b>	28 ENERO	28 ENERO	28 ENERO
<b>ORIENTACIÓN</b>	SUROESTE	SUROESTE	SUROESTE
<b>HORARIO</b>	12:00	12:00	12:00
<b>Porcentaje de Área de Distribución de Iluminancia por Rangos</b>			
<b>&lt; 100 lx</b>	7%	18%	4%
<b>100 - 200 lx</b>	<b>34%</b>	<b>27%</b>	25%
<b>201 - 300 lx</b>	15%	14%	21%
<b>301 - 400 lx</b>	8%	8%	14%
<b>401 - 500 lx</b>	6%	5%	9%
<b>&gt; 500 lx</b>	<b>30%</b>	<b>27%</b>	<b>27%</b>
<b>Área de deslumbramiento &gt; 1000 lx</b>	13%	7%	0%

*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Según se observa en la Tabla 40, a pesar de que bajo el criterio de ventana horizontal el rango predominante corresponde al valor >500lx, en realidad se mantuvo el 27% que resultó en la simulación de ventanas dobles. Sin embargo, el verdadero cambio se ve en la disminución del porcentaje correspondiente a valores <100 lx y en el aumento de los valores dentro del rango de 201 – 400lx. Igualmente, los valores correspondientes al rango de deslumbramiento se disminuyeron por completo.

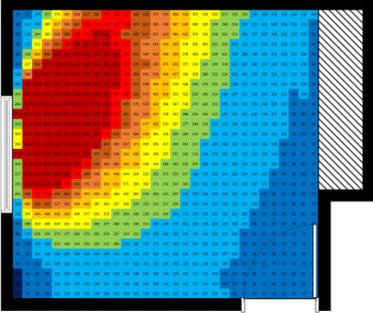
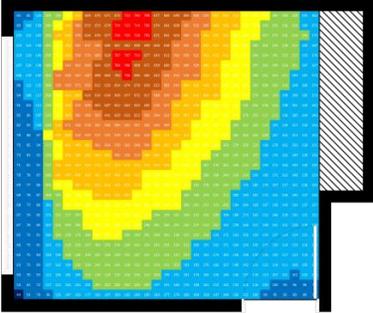
Así, a pesar de que por el valor de la iluminancia predominante en el caso de estudio se pudiera interpretar que este es un mejor escenario lumínico, en realidad la estrategia de ventana horizontal logra mejores condiciones de confort lumínico en general.

Por último, como se observa en la Tabla 41. *Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento*. el horario de las 15:00 horas se asemeja al descrito a las 09:00 horas, ya que, a excepción del aumento del rango mínimo a valores de 100 – 200lx, el patrón de distribución de iluminancia predominante en las ocho orientaciones resulta similar al del caso de estudio. Sin embargo, a pesar de la coincidencia de los valores de luz natural en una misma orientación, la distribución de los porcentajes de área es lo que determina la calidad de la iluminación en el espacio.

Para terminar con el análisis de los resultados bajo la metodología de iluminancia predominante y para reiterar la importancia de considerar la distribución de los porcentajes de áreas en la evaluación integral de la calidad lumínica de un espacio, la Tabla 41 muestra una comparativa entre el caso de estudio y el criterio de ventana horizontal para la orientación oeste a las 15:00 horas. Si sólo se evaluara el valor de la iluminancia predominante, pudiera parecer que la calidad lumínica entre ambos escenarios es la misma, pues ambos se encuentran en el rango 100-200lx, sin embargo, la comparación de la distribución de los porcentajes de área para el resto de los rangos de iluminancia, muestran una conclusión distinta.

A simple vista y revisión de los mapas reticulares de la distribución lumínica, es clara la diferencia en la calidad de iluminación del espacio en cada escenario; en la simulación de ventana horizontal se elimina por completo el rango de deslumbramiento, al mismo tiempo que el área del rango <100 lx se reduce a la mitad. Cabe destacar, que los porcentajes de área correspondientes a valores en los rangos entre 300 – >500lx presentan menores diferencias que en el caso de estudio, es decir, la variación de valores oscila entre el 11% y el 18%, lo cual significa que estos porcentajes se distribuyen de manera homogénea en el espacio y disminuyen los contrastes lumínicos.

**Tabla 41. Mapa de distribución de iluminancia y deslumbramiento.**

<b>SIMULACIÓN:</b>	Caso de Estudio	Criterio de Diseño: Ventana Horizontal
		
<b>DIA</b>	28 ENERO	28 ENERO
<b>ORIENTACIÓN</b>	OESTE	OESTE
<b>HORARIO</b>	15:00	15:00
<b>Porcentaje de Área de Distribución de Iluminancia por Rangos</b>		
<b>&lt; 100 lx</b>	17%	8%
<b>100 - 200 lx</b>	<b>33%</b>	<b>28%</b>
<b>201 - 300 lx</b>	12%	22%
<b>301 - 400 lx</b>	8%	12%
<b>401 - 500 lx</b>	5%	11%
<b>&gt; 500 lx</b>	24%	18%
<b>Área de deslumbramiento &gt; 1000 lx</b>	9%	0%

*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

La aplicación del criterio de diseño de ventana horizontal presentó las mejoras más tangibles en la calidad lumínica del espacio a lo largo de los dos días y tres horarios de evaluación. Esta modificación en la configuración del área de la ventana distribuyó de una manera más homogénea la iluminancia en el espacio, lo cual se observó con el aumento en los valores de los porcentajes de área en los rangos de 100-200lx, algunos de los cuales alcanzaron valores por encima del 50% del espacio. Además, la configuración del área de ventana en un vano horizontal resulta la estrategia con menos deslumbramiento en todas las orientaciones y horarios evaluados, pues mantiene en 0% el área de los valores >1000 lx en el 93% de los escenarios simulados.

## **CAPÍTULO V. Conclusiones**

La relación entre la luz natural y el ser humano es indiscutible, su presencia en el espacio habitable dicta el desempeño físico y mental de los usuarios. Sin embargo, a partir de la universalización de la electricidad, el diseño arquitectónico ha dejado en segundo plano el papel de la luz natural como fuente de iluminación y su aprovechamiento se ha limitado a su aplicación en energías renovables.

En regiones áridas, la inclusión de la luz natural y sus propiedades de iluminación e influencia en el bienestar del usuario pierden prioridad frente a las ganancias térmicas que representa para los espacios interiores. Esto se refleja en los reglamentos de edificación locales, que se limitan a definir sólo el tamaño de la ventana, sin especificar los niveles de iluminación que deben alcanzar para que este criterio responda efectivamente al confort visual del usuario que lo habita.

La presente investigación abordó la búsqueda del confort visual del usuario, enfocado específicamente en la calidad lumínica del espacio a partir del desarrollo de un método de evaluación de distribución de iluminancia predominante en un espacio, con el que se valoró el desempeño de estrategias de iluminación natural en comparación con valores mínimos de iluminancia establecidos por estándares internacionales.

A partir del método de evaluación, se revisaron distintas variaciones de diseño como: orientación, reflectancia de los muros, así como el tamaño y forma de la ventana. Con el análisis de los resultados obtenidos, se logró encontrar una respuesta a la pregunta de investigación que busca identificar las estrategias de iluminación natural óptimas para el confort visual en espacios según las necesidades de iluminancia en viviendas de regiones áridas.

Esta pregunta se transformó en el objetivo general de investigación, y se logró cumplir a partir de la comprobación de la hipótesis, que establece que: *Las estrategias óptimas de iluminación natural para el confort visual en viviendas de regiones áridas son aquellas que, según las necesidades del usuario, logran conservar un ambiente lumínico con niveles de iluminancia dentro del rango de 200-500 lx en el 40% del espacio, mientras mantienen por debajo del 5% el área correspondiente a valores  $\geq 1000$  lx.*

Cabe destacar que para el estudio de iluminación se desarrolló una metodología que permite encontrar los días de diseño a partir de los datos de iluminancia directa del archivo climático con las 8760 horas del año. Este método difiere de otros métodos en lo que se trabaja con el tipo de cielo y resultó una de las principales aportaciones de la presente investigación.

Los resultados de monitoreo, muestran que la unidad de análisis cumple con los niveles mínimos de iluminancia para el confort lumínico del usuario según lo establecido por las normativas, sin embargo, debido a que la metodología de medición desarrollada maneja solo 4 puntos de lectura, se determina que los resultados del monitoreo en sitio no son representativos de la calidad lumínica del espacio en su totalidad y no reflejan adecuadamente el comportamiento real de la iluminación natural. Esta conclusión se corrobora al comparar el monitoreo con los resultados de simulación de la unidad de análisis en Design Builder.

Los resultados de simulación del caso de estudio, ayudaron a concluir que los criterios mínimos de diseño para la iluminación natural establecidos por las normativas de construcción actuales son deficientes, pues mientras que las orientaciones que mantienen estables sus niveles de iluminancia predominante a lo largo del día no alcanzan los valores mínimos de confort, las orientaciones que sí entran en el rango de iluminancia ideal, no cubren el 40% del espacio como se estableció en la hipótesis y presentan porcentajes altos de deslumbramiento de hasta el 16%.

Por otra parte, el estudio de modificación de reflectancia mostró que es una estrategia adecuada para obtener una distribución de iluminancia homogénea, pero no es efectiva por sí sola para lograr un aumento en los niveles de luz natural para el confort lumínico, pues la iluminancia predominante mantuvo el mismo valor en 77% de los casos. Además, tampoco influye en el deslumbramiento, ya que se encontró que estas se mantuvieron iguales en 81% de los casos.

Las ventanas dobles, disminuyeron el porcentaje de área de deslumbramiento en un 5 a 8% en todos los casos, sin embargo, se vieron afectados los niveles de luz natural en todo el espacio, pues la iluminancia predominante para un 72% de las condiciones simuladas fue de 100lx, valor deficiente frente a los niveles mínimos de confort establecidos por las diferentes normativas.

Por último, la ventana horizontal resultó ser la mejor estrategia para el confort lumínico, ya que, del total de las 48 simulaciones, el 83% presentaron una iluminancia predominante por encima de los 200lx, y de noroeste a noreste se mantuvieron estables los niveles de iluminancia a lo largo del día y del año. Además, se eliminó por completo el deslumbramiento para un 98% de los escenarios simulados.

Un aspecto importante a destacar, es que, a pesar de que el 52% de los casos evaluados alcanzaron niveles de iluminancia predominante por encima de los 200lx, ninguno de los escenarios estudiados alcanzó los 500lx como lo establece la hipótesis, por lo que se establece que hubo un incumplimiento parcial con los criterios establecidos.

Según los alcances y limitaciones de la investigación, se señala que no se evaluó la combinación entre las estrategias, variaciones en el tamaño de área de ventana, influencia de persianas y sombreados, así como la inclusión de una segunda entrada de luz natural, por lo que continuar o generar este enfoque en futuros estudios a partir de la metodología desarrollada representa un área de oportunidad.

Además, el estudio deja abierta una opción de continuidad bajo otros enfoques, por lo que se recomienda explorar la inclusión de otras variables de iluminación, como la disponibilidad de luz natural y el factor de luz días y su relación en otros factores del confort visual como el color de la luz y la visibilidad. Así mismo, a pesar de la existencia de una basta cantidad de estudios que abordan la relación entre la luz natural y la ganancia térmica, en estudios futuros se propone integrar un análisis de los cambios en la carga térmica por efecto de las técnicas evaluadas, enfoque que se puede lograr desde el mismo programa de simulación Design Builder.

Así, el trabajo responde las preguntas de investigación y cumple con los objetivos al evaluar y determinar las estrategias óptimas para el confort visual en la ciudad de Mexicali, sin embargo, el desarrollo del método de iluminancia predominante y distribución de porcentajes de áreas para el procesamiento de los datos de la simulación se señala como la aportación más trascendente, pues a pesar de la amplitud de normativas que regulan el diseño y monitoreo de la iluminación de los espacios interiores, existe una deficiencia en la determinación de los procesos para la simulación y evaluación de manera digital. Esto se concluye, no solo por la falta de estándares que dicten metodologías, sino también porque, tras la valoración de las distintas herramientas de simulación existentes, se observa que los resultados que se generan, ya sean numéricos o gráficos, no son concluyentes y no llevan a una interpretación concisa de las condiciones evaluadas de los espacios.

## Bibliografía

### A

- Acosta, I., Campano, M., Leslie, R., & Radestky, L. (2019, 15 noviembre). *Daylighting design for healthy environments: Analysis of educational spaces for optimal circadian stimulus*. ScienceDirect. Recuperado 5 de octubre de 2021, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X19309867>
- Ahmad, A., Kumar, A., Prakash, O., & Aman, A. (2020). Daylight Availability Assessment and the Application of Energy Simulation Software – A literature review. *Materials Science for Energy Technologies*, 3, 679-689. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2020.07.002>
- Ahmed, D., Abdelkader, M., & Nessim, A. A. (2023). Effect of adaptive facades on daylight -An analytical study in hot arid climate. *Arts and Architecture Journal*, 4(1), 1-26. <https://doi.org/10.21608/aaaj.2023.287433>
- Ahmad, R., & Reffat, R. (2018, 1 julio). *A comparative study of various daylighting systems in office buildings for improving energy efficiency in Egypt*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710217304138?via%3Dihub>
- Ali, L. A., & Mustafa, F. A. (2024). Evaluating the impact of mosque morphology on worshipers' visual comfort: Simulation analysis for daylighting performance. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(2), 102412. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102412>
- Aljawder, H., & El-Wakeel, H. A. (2022). Architecture and privacy in islam: an analytical review. *WIT Transactions on the Built Environment*. <https://doi.org/10.2495/iha220101>
- American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers – Fundamentals. (2017).

- Amleh, D., Halawani, A., & Hussein, M. H. (2023). Simulation-Based study for healing environment in intensive care units: Enhancing daylight and access to view, optimizing an ICU room in temperate climate, The case study of Palestine. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(2), 101868. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101868>
- Ashrafian, T., & Moazzen, N. (2019). The impact of glazing ratio and window configuration on occupants' comfort and energy demand: the case study of a school building in Eskisehir, Turkey. *Sustainable Cities and Society*, 47, 101483. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101483>
- Awad, J., & Abd-Rabo, L. (2020, 1 enero). *Daylight and Energy Performance Optimization in Hot – Arid Regions: application and adaptation guide for designers in the UAE*. ScienceDirect. Recuperado 5 de octubre de 2021, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978920308143>
- Ayoosu, M. I., Lim, Y.-W., & Chung Leng, P. (2020). Daylighting Performance Assessment of Side-Lit University Lecture Theatres in the Hot-Humid Climate of Makurdi in Nigeria. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. [https://www.researchgate.net/publication/338886697\\_Daylighting\\_Performance\\_Assessment\\_of\\_Side-Lit\\_University\\_Lecture\\_Theatres\\_in\\_the\\_Hot-Humid\\_Climate\\_of\\_Makurdi\\_in\\_Nigeria](https://www.researchgate.net/publication/338886697_Daylighting_Performance_Assessment_of_Side-Lit_University_Lecture_Theatres_in_the_Hot-Humid_Climate_of_Makurdi_in_Nigeria)
- Ayoub, M. M., & Elseragy, A. (2017). Parameterization of traditional domed-roofs insolation in hot-arid climates in Aswan, Egypt. *Energy & Environment*, 29(1), 109-130. <https://doi.org/10.1177/0958305x17741285>
- Ayuntamiento de Mexicali. (2001). Reglamento De Edificaciones Para El Municipio De Mexicali.

## C

- Comisión Nacional de Vivienda CONAVI & Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano SEDATU. (2017). Código de Edificación de Vivienda (3.a ed.).

Comité Español de Iluminación (CEI), Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA), & Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España (CSCAE), (2005). Guía Técnica – Aprovechamiento de la luz natural en la iluminación de edificios [Libro electrónico]. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA). [https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10055\\_GT\\_aprovechamiento\\_luz\\_natural\\_05\\_ff12ae5a.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10055_GT_aprovechamiento_luz_natural_05_ff12ae5a.pdf)

## D

Das, A., & Paul, S. (2015, 15 noviembre). *Artificial illumination during daytime in residential buildings: Factors, energy implications and future predictions*. ScienceDirect. Recuperado 5 de octubre de 2021, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915009319>

Davila, C., & Fiorito, F. (2021, 1 diciembre). *On the combined use of laser-cut panel light redirecting systems and horizontal blinds for daylighting and solar heat control, a focus on visual comfort objectives*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X21008288#s0015>

Design Builder Software Ltd – Daylighting. (2023). <https://designbuilder.co.uk/daylighting>

Dubois, M., Bisegna, F., Gentile, N., Knoop, M., Matusiak, B., Osterhaus, W., & Tetri, E. (2015). Retrofitting the electric lighting and daylighting systems to reduce energy use in buildings: A literature review. *Energy research journal*, 6(1), 25-41. <https://doi.org/10.3844/erjsp.2015.25.41>

*Dynamic daylighting*. (2022). <https://andrewmarsh.com/software/daylight-box-web/>

## E

EADIC Escuela de Ingeniería y Arquitectura. (2013). *Cuadernos de Formación EADIC - Confort Ambiental*. <https://eadic.com/wp-content/uploads/2013/09/Tema-3-Confort-Ambiental.pdf>

Eltaweel, A., Su, Y., Mandour, M., & Elrawy, O. (2021, 1 octubre). A novel automated louver with parametrically-angled reflective slats; design evaluation for better practicality and daylighting uniformity. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710221002953>

## F

Freewan, A., & al Dalala, J. (2020, 1 abril). Assessment of daylight performance of Advanced Daylighting Strategies in Large University Classrooms; Case Study Classrooms at JUST. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016819301978#f0010>

Freewan, A., Gharaibeh, A., & Jamhawi, M. (2014, 1 octubre). Improving daylight performance of light wells in residential buildings: Nourishing compact sustainable urban form. ScienceDirect. Recuperado 19 de octubre de 2021, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210670714000316?via%3Dihub>

Fortuna, V., Widyarko, W., & Sari, J. S. (2022). The effect of lighting intensity on visual comfort in the sacred space of Buddhist Temple. *Journal of Architectural Design and Urbanism*, 4(2), 106-117. <https://doi.org/10.14710/jadu.v4i2.14134>

## G

García, O. R., Santillán, N., Quintero, M., Ojeda, S., & Velázquez, N. (2013, 1 octubre). Extreme temperature scenarios in Mexicali, Mexico under climate change conditions. ScienceDirect. Recuperado 22 de abril de 2021, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0187623613710920>

Gayatri, D., Nurachmah, E., Mansyur, M., Soewondo, P., & Suriadi, S. (2020). Relationship between wound severity, discomfort, and psychological problems in patients with a diabetic foot ulcer in Indonesia: a cross-sectional study. *Aquichan*, 20(3), 1-10. <https://doi.org/10.5294/aqui.2020.20.3.3>

- Gherri, B. (2015). *Assessment of daylight performance in buildings : methods and design strategies* / Barbara Gherri (WIT Press).  
<https://library2.deakin.edu.au/search~S1?/aGherardin%2C+Walter./agherardin+walter/-3%2C-1%2C0%2CB/frameset&FF=agherri+barbara&1%2C1%2C>
- González, M. (2016). *Efecto de la inercia térmica en un dispositivo de ventilación por extracción pasiva*. Universidad Autónoma de Baja California.

## H

- Hailu, H., Gelan, E., & Girma, Y. (2021). Indoor Thermal Comfort Analysis: A case study of modern and traditional buildings in Hot-Arid climatic region of Ethiopia. *Urban science*, 5(3), 53. <https://doi.org/10.3390/urbansci5030053>
- Hernández-Siampieri, R. & Mendoza, C. (2018) Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. Año de edición: 2018. Mc Graw Hill Education.
- Hosseini, S. N., Hosseini, S. M., & HeiraniPour, M. (2020). The role of Orosi's Islamic geometric patterns in the building façade design for improving occupants' daylight performance. *Journal of Daylighting*, 7(2), 201-221. <https://doi.org/10.15627/jd.2020.18>

## I

- Iacomussi, P., Radis, M., Rossi, G., & Rossi, L. (2015). Visual comfort with LED lighting. *Energy Procedia*, 78, 729-734. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.082>
- Illuminating Engineering Society of North América IESNA. (2000). *Lighting Handbook - Reference & Application* (9.<sup>a</sup> ed.). <https://epdf.mx/iesna-lighting-handbook-9th-ed.html>
- Instituto Nacional De Estadística Y Geografía INEGI. (s. f.). *Panorama sociodemográfico de México*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/tableros/panorama/>

## K

- Kaushik, A., Arif, M., Ebohon, O. J., Arsalan, H., Rana, M. Q., & Obi, L. (2021). Effect of indoor environmental quality on visual comfort and productivity in office buildings. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 21(6), 1746-1766. <https://doi.org/10.1108/jedt-09-2021-0474>
- Kawshalya, L. W. G., Weerasinghe, U. G. D., & Chandrasekara, D. (2022). The impact of visual complexity on perceived safety and comfort of the users: a study on Urban Streetscape of Sri Lanka. *PLOS ONE*, 17(8), e0272074. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272074>
- Kota, S. H., Haberl, J. S., Clayton, M. J., & Yan, W. (2014). Building Information Modeling (BIM)-based daylighting simulation and analysis. *Energy and Buildings*, 81, 391-403. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.043>
- Kent, M., & Shiavon, S. (2020, 1 octubre). *Evaluation of the effect of landscape distance seen in window views on visual satisfaction*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132320305345#fig1>

## L

- Lakhdari, K., Sriti, L., & Painter, B. (2021, 15 octubre). *Parametric optimization of daylight, thermal and energy performance of middle school classrooms, case of hot and dry regions*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132321005746?via%3Dihub>
- Lechner, N. (2021). *Heating, Cooling, Lighting - Sustainable Methods for Architects* (4.a ed.). Wiley.
- Lee, H., Baek, S., & Lee, H. (2022, 15 mayo). *A study on the application of solar modules to light shelves to improve generation and daylighting efficiency*. Science Direct. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778822001475?via%3Dihub>

- Lin, Y., Fotios, S., Wei, M., Liu, Y., Guo, W., & Sun, Y. (2015). Eye Movement and Pupil Size Constriction Under Discomfort Glare. *IOVS Investigative Ophthalmology & Visual Science*. <https://doi.org/10.1167/iovs.14-15963>
- Liu, X., Sun, Y., Wei, S., Meng, L., & Cao, G. (2021, 1 mayo). *Illumination distribution and daylight glare evaluation within different windows for comfortable lighting*. ScienceDirect.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666950121000286>
- Lo Verso, V. R. M., Caffaro, F., & Aghemo, C. (2015). Luminous environment in healthcare buildings for user satisfaction and comfort: an objective and subjective field study. *Indoor and Built Environment*, 25(5), 809-825. <https://doi.org/10.1177/1420326x15588337>
- Luxion Advanced Lighting Technology. (s. f.). *Luxion - about*. <https://luxion.com/about.html#>

## M

- Manzan, M., & Clarich, A. (2021, 15 febrero). *FAST energy and daylight optimization of an office with fixed and movable shading devices*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132316303882#fig1>
- Marsh, A. (2019). Dynamic daylighting <https://andrewmarsh.com/software/daylight-box-web/>
- Marsh, A. (2007) RADIANCE and daylight factors. <https://andrewmarsh.com/articles/2007/radiancedf/>
- Meneses, E. A. (2016). *La representación de la luz natural en el proyecto arquitectónico* [Tesis]. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Muñoz, C. (2011). *Cómo elaborar y asesorar una investigación de tesis* (2.<sup>a</sup> ed.). PEARSON.

## N

Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008, Condiciones de iluminación en los centros de trabajo. (2008). Diario Oficial de la Federación. <http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/3581/stps/stps.htm>

## R

*RADIANCE and daylight factors.* (s. f.).

<https://andrewmarsh.com/articles/2007/radiancedf/>

Rastegari, M., Pournseri, S., & Sanaieian, H. (2021, 1 enero). *Daylight optimization through architectural aspects in an office building atrium in Tehran.* ScienceDirect.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710220300395#fig1>

Reglamento de Edificaciones para el Municipio de Mexicali (REGEDIFC). Tomo 4, de 2016. Artículo 62, Artículo 63, Artículo 64, Artículo 72 y Artículo 77. 18 de diciembre de 1998 (Mexicali).

Reinhart, C., Rakha, T., & Weissman, D. (2014). Predicting the Daylit Area—A comparison of students assessments and simulations at eleven schools of Architecture. *LEUKOS*, 10(4), 193-206. <https://doi.org/10.1080/15502724.2014.929007>

Rodríguez, J. L. G., Castilla, M., Álvarez, J. D., Rodríguez, F., & Berenguel, M. (2015). A fuzzy controller for visual comfort inside a meeting-room. *Research Gate*. 2015 23th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED). <https://doi.org/10.1109/med.2015.7158888>

## S

Sakhri, N., Moussaoui, A., Menni, Y., Sadeghzadeh, M., & Ahmadi, M. H. (2020). New passive thermal comfort system using three renewable energies: wind catcher, solar chimney and earth to air heat exchanger Integrated to real-scale test room in arid region (Experimental study). *International Journal of Energy Research*, 45(2), 2177-2194. <https://doi.org/10.1002/er.5911>

- Sepúlveda, A., de Luca, F., Thalfedt, M., & Kurnitski, J. (2020). *Analyzing the fulfillment of daylight and overheating requirements in residential and office buildings in Estonia*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132320304169>
- Sepúlveda, A., De Luca, F., Varjas, T., & Kurnitski, J. (2022). Assessing the applicability of the European Standard EN 17037:2018 for office spaces in a cold climate. *Building and Environment*, 225, 109602. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109602>
- Seyed, N., Tahsildoost, M., & Zomoridian, Z. (2020, 1 febrero). *Investigation of illuminance-based metrics in predicting occupants'™ visual comfort (case study: Architecture design studios)*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X19312654>
- Shi, L., & Lin, M. (2012, 1 enero). *A review on sustainable design of renewable energy systems*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032111003947?via%3Dihub>
- Shi, X., & Tablada, A. (2020, 1 mayo). *Influence of two motion types on solar transmittance and daylight performance of dynamic façades*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X20302486#f0030>
- Shin, J., Yun, G., & Kim, J. (2012, 1 marzo). *View types and luminance effects on discomfort glare assessment from windows*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778811004993?via%3Dihub>
- Sokół, N., Giuliani, F., & Martyniuk-Pęczek, J. (2019). Daylight within a room in the eyes of architecture students. *Proceedings of the 29th Quadrennial Session of the CIE*. <https://doi.org/10.25039/x46.2019.po127>
- Suhendri, S., Sunanda, W., & Budiarto, R. (2018). Performance of glazing materials for atrium in hot & humid climate. *MATEC web of conferences*, 186, 02007. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201818602007>

Suszanowicz, D. (2017). Internal heat gain from different light sources in the building lighting systems. *E3S web of conferences*, 19, 01024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20171901024>

Syed, A. W. (2012). *Evaluating the Daylighting Potential in the Monetary Times Building* [Tesis]. Toronto Metropolitan University.

## T

Teo, Y. H., Yap, J. H., An, H., Xie, N., Chang, J., Yu, S. C. M., Poon, W. C., Zhang, L., & Cheong, K. H. (2023). A simulation-aided approach in examining the viability of passive daylighting techniques on inclined windows. *Energy and Buildings*, 282, 112739. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112739>

## V

VELUX Group (2023) About-us. VELUX About Us. <https://www.velux.com/who-we-are/about-us>

VELUX Group (2014). Daylight, Energy and Indoor Climate Basic Book (3.0 ed.) [Libro electrónico]. VELUX Group. [https://velcdn.azureedge.net/-/media/com/articles/pdf/deic\\_basic\\_book\\_ver%203-0.pdf](https://velcdn.azureedge.net/-/media/com/articles/pdf/deic_basic_book_ver%203-0.pdf)

VELUX Group (2019). Are There Existing Daylight Design Standards? Learn about the First European Standard. ArchDaily. [https://www.archdaily.com/919662/are-there-existing-daylight-design-standards-learn-about-the-first-european-standard?ad\\_source=search&ad\\_medium=search\\_result\\_articles](https://www.archdaily.com/919662/are-there-existing-daylight-design-standards-learn-about-the-first-european-standard?ad_source=search&ad_medium=search_result_articles)

Vu, N., & Shin, S. S. (2016). *A large-scale daylighting system based on a stepped thickness waveguide*. <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Large-Scale-Daylighting-System-Based-on-a-Stepped-Vu-Shin/494b08d43ec33b40c7369fa6006837f92145b81a>

## W

Warrier, G. A., & Raphael, B. (2017). Performance evaluation of light shelves. *Energy and Buildings*, 140, 19-27. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.068>

## Y

Yildiz, N. (2022). Examination of visual comfort parameters in an educational building. *Bilecik şeyh edebali üniversitesi fen bilimleri dergisi*, 9(1), 479-494. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.1079488>

Yu, F., Wennersten, R., & Leng, J. (2020, 1 diciembre). *A state-of-art review on concepts, criteria, methods and factors for reaching "thermal-daylighting balance"*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132320306995?via%3Dihub>

## Z

Zayed., A., Elkhateib, M., Mahdy, M., & Elwy, I. (2018, 1 octubre). *Exploring dynamic slat system for enhancing daylighting distribution at deep office spaces in hot arid regions*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218308154>

Zhen, M., Du, Y., Hong, F., & Bian, G. (2019, 10 noviembre). *Simulation analysis of natural lighting of residential buildings in Xi'an, China*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719329262?via%3Dihub>

## Anexos

### Anexo A: Tablas de datos de monitoreo

**Tabla A1.** Niveles de Iluminancia por Cuadrante y Horario Registrados en Monitoreo de Unidad de Análisis el 22 de mayo de 2022.

HORA	CUADRANTES			
	A	B	C	D
<b>8:00</b>	731 lx	673 lx	313 lx	265 lx
<b>10:00</b>	1410 lx	1026 lx	615 lx	637 lx
<b>12:00</b>	1432 lx	954 lx	779 lx	713 lx
<b>14:00</b>	1721 lx	1502 lx	1066 lx	769 lx
<b>16:00</b>	1866 lx	1657 lx	970 lx	671 lx
<b>18:00</b>	1606 lx	1029 lx	492 lx	364 lx

*Nota.* Elaboración propia a partir de monitoreo

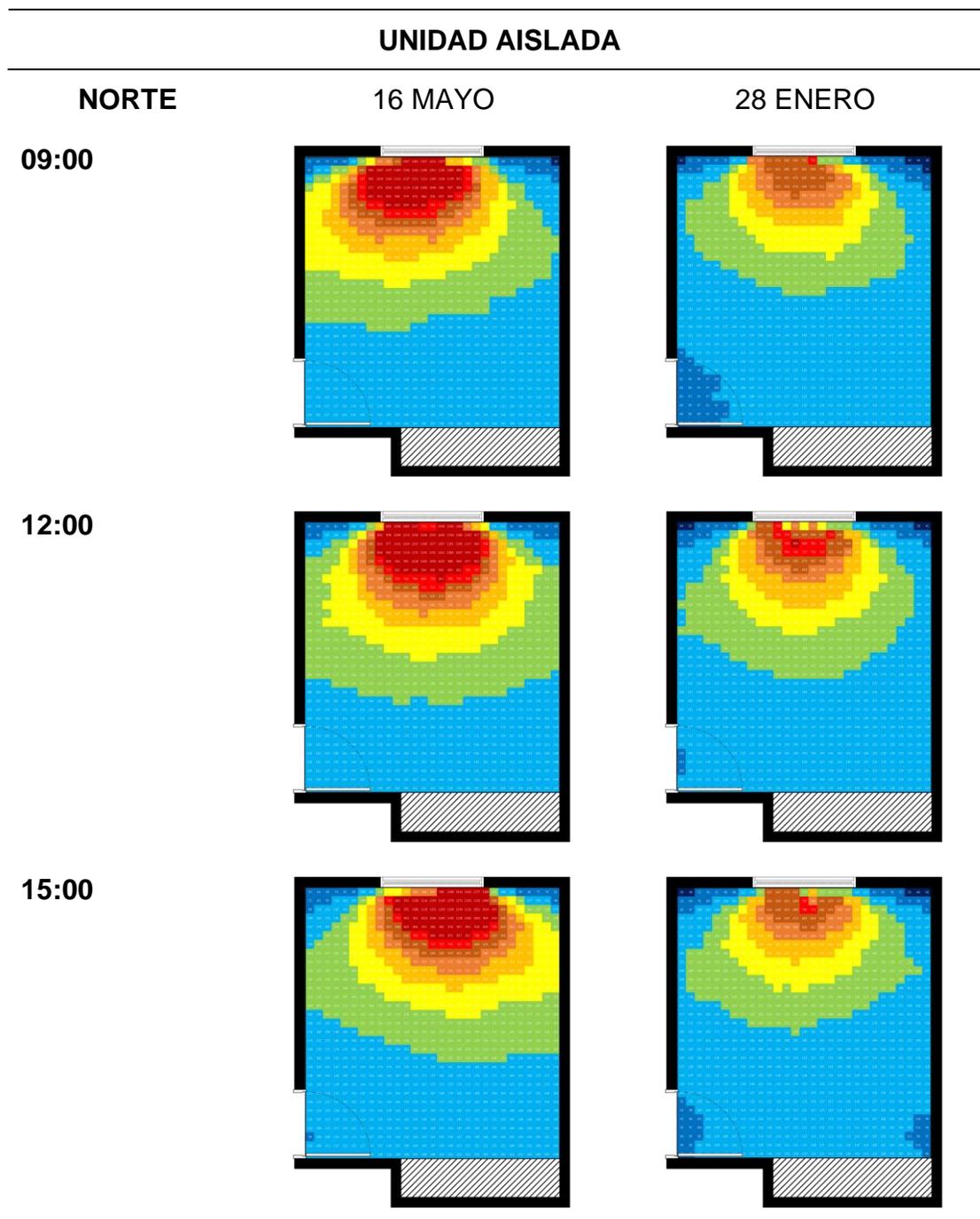
**Tabla A2.** Niveles de Iluminancia por Cuadrante y Horario Registrados en Monitoreo de Unidad de Análisis el 09 de septiembre de 2022.

HORA	CUADRANTES			
	A	B	C	D
<b>8:00</b>	370 lx	297 lx	98 lx	89 lx
<b>10:00</b>	603 lx	397 lx	147 lx	167 lx
<b>12:00</b>	465 lx	359 lx	127 lx	122 lx
<b>14:00</b>	2,010 lx	1,590 lx	634 lx	626 lx
<b>16:00</b>	995 lx	939 lx	348 lx	294 lx
<b>18:00</b>	306 lx	131 lx	66 lx	75 lx

*Nota.* Elaboración propia a partir de monitoreo

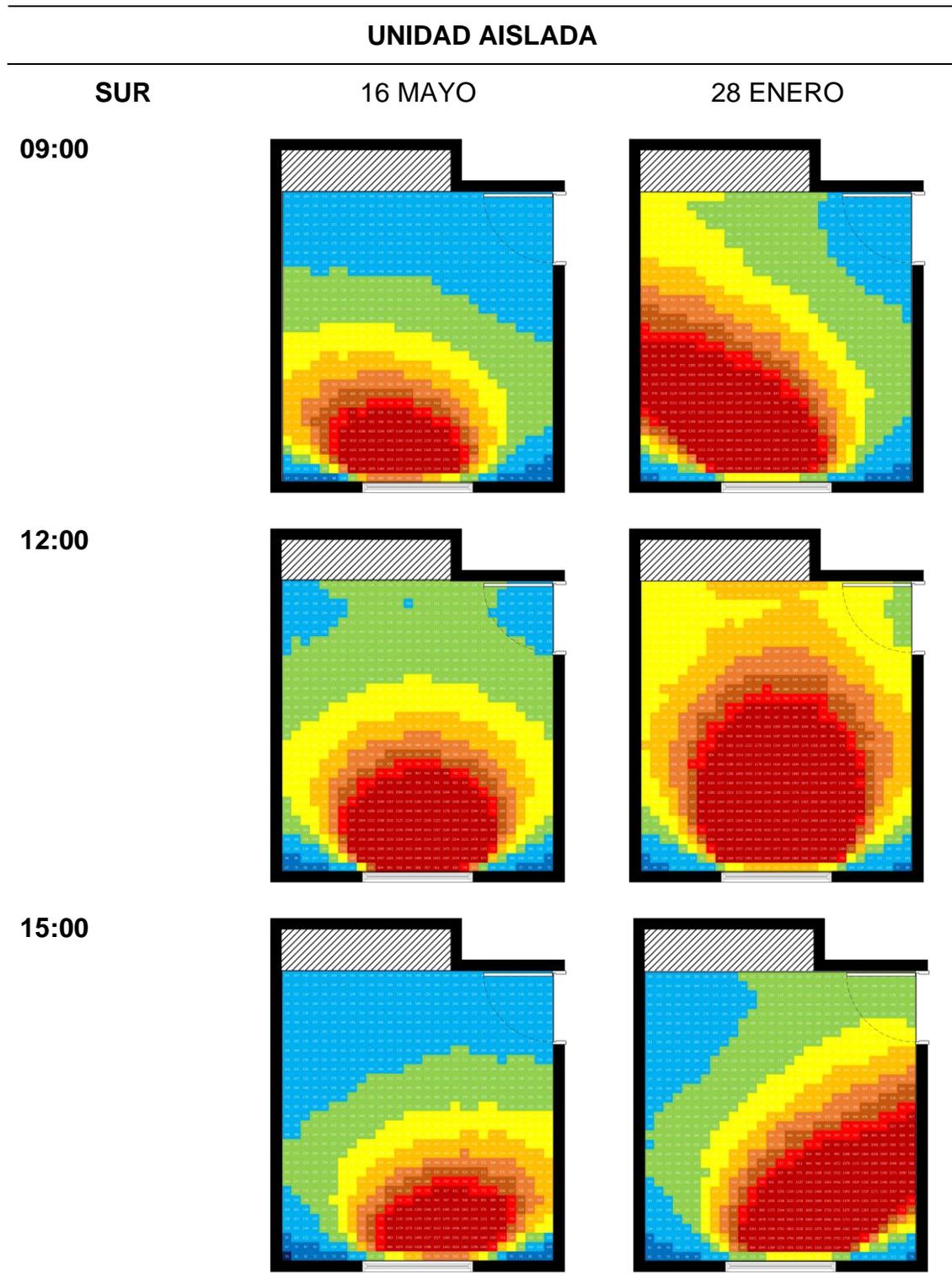
**Anexo B: Tablas de mapas de distribución de iluminancia para 240 escenarios de simulación.**

**Tabla B1.** *Mapa de distribución de iluminancia.*



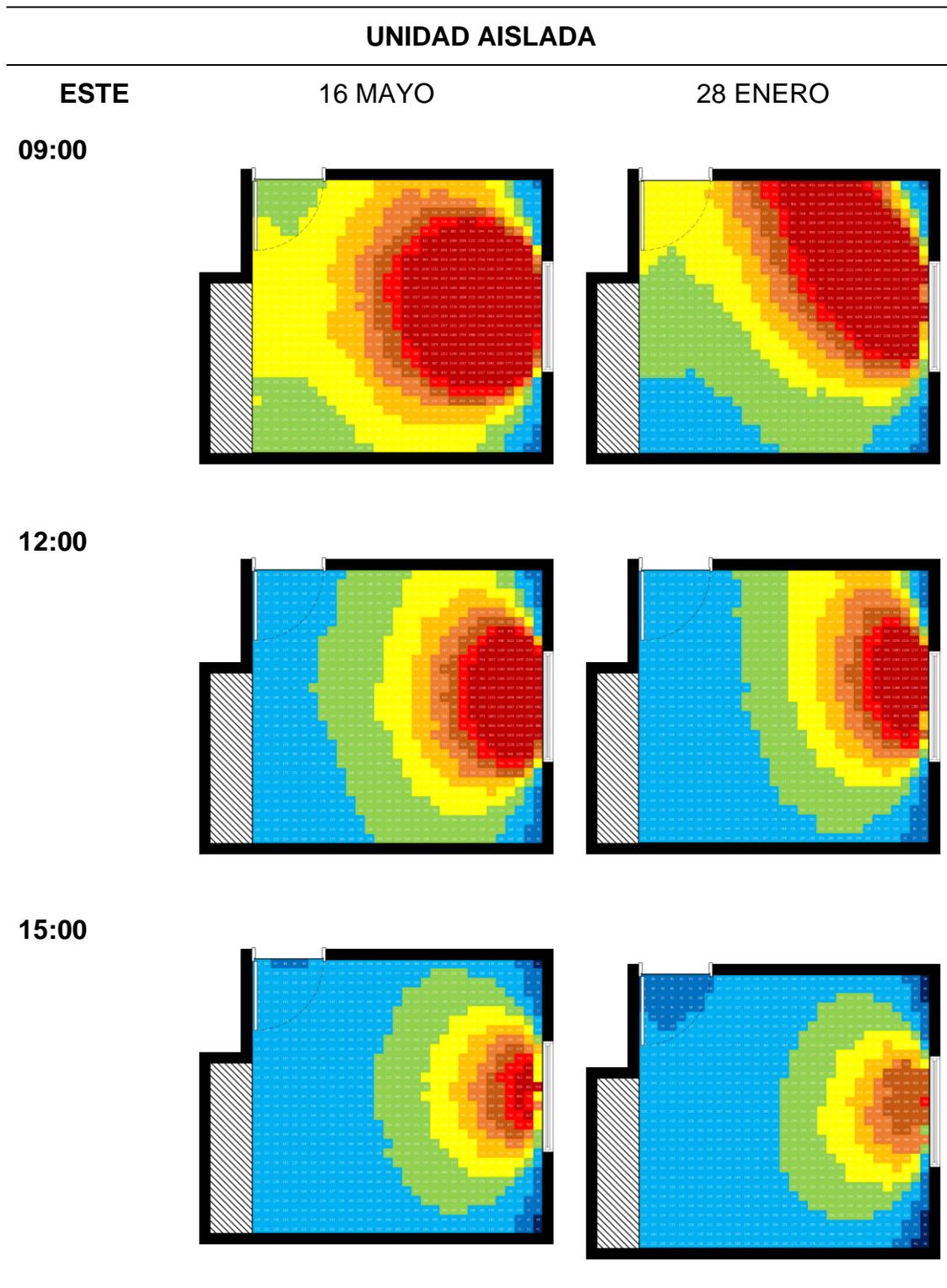
*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

**Tabla B2.** Mapa de distribución de iluminancia.



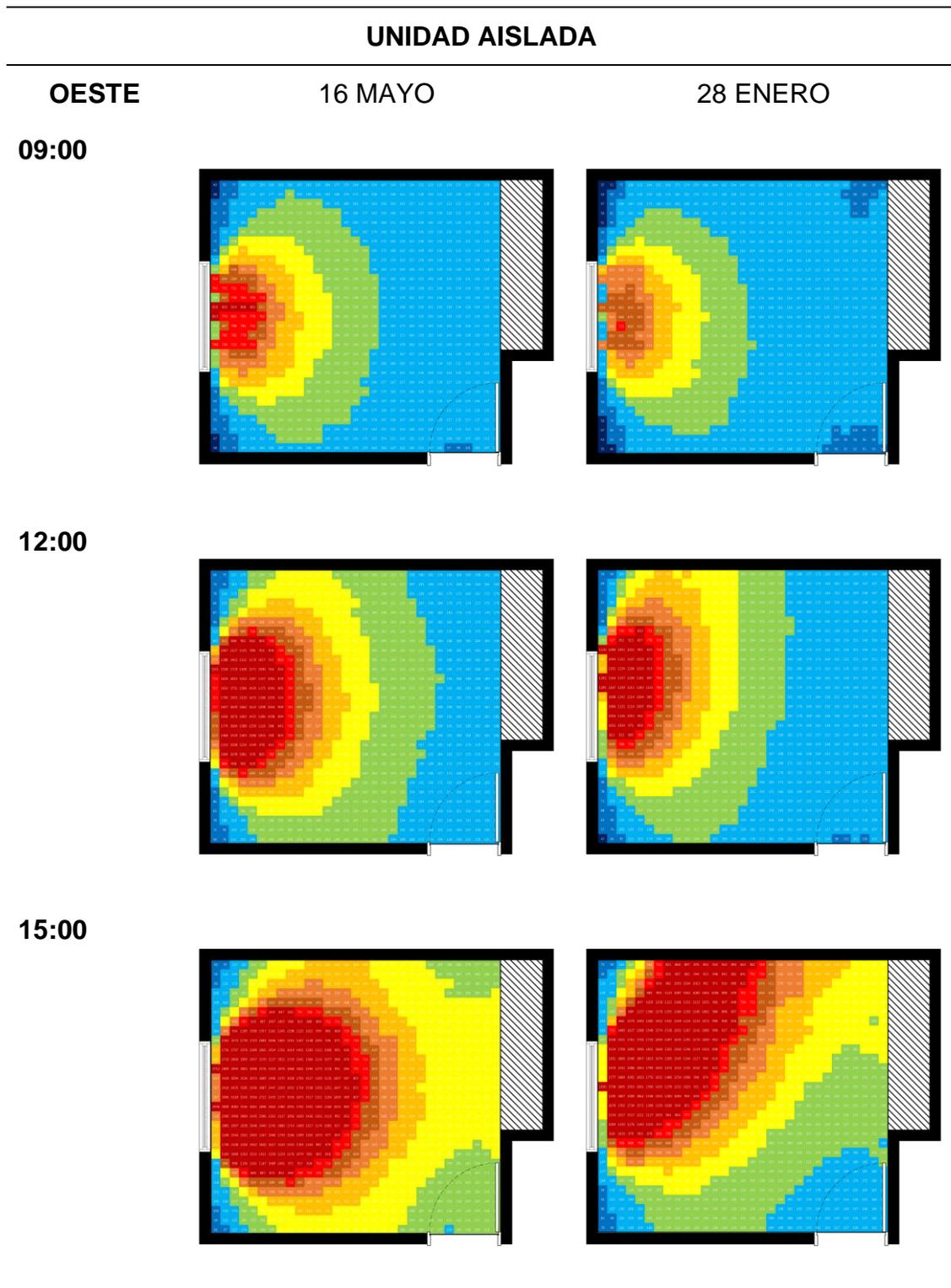
*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

**Tabla B3.** Mapa de distribución de iluminancia.



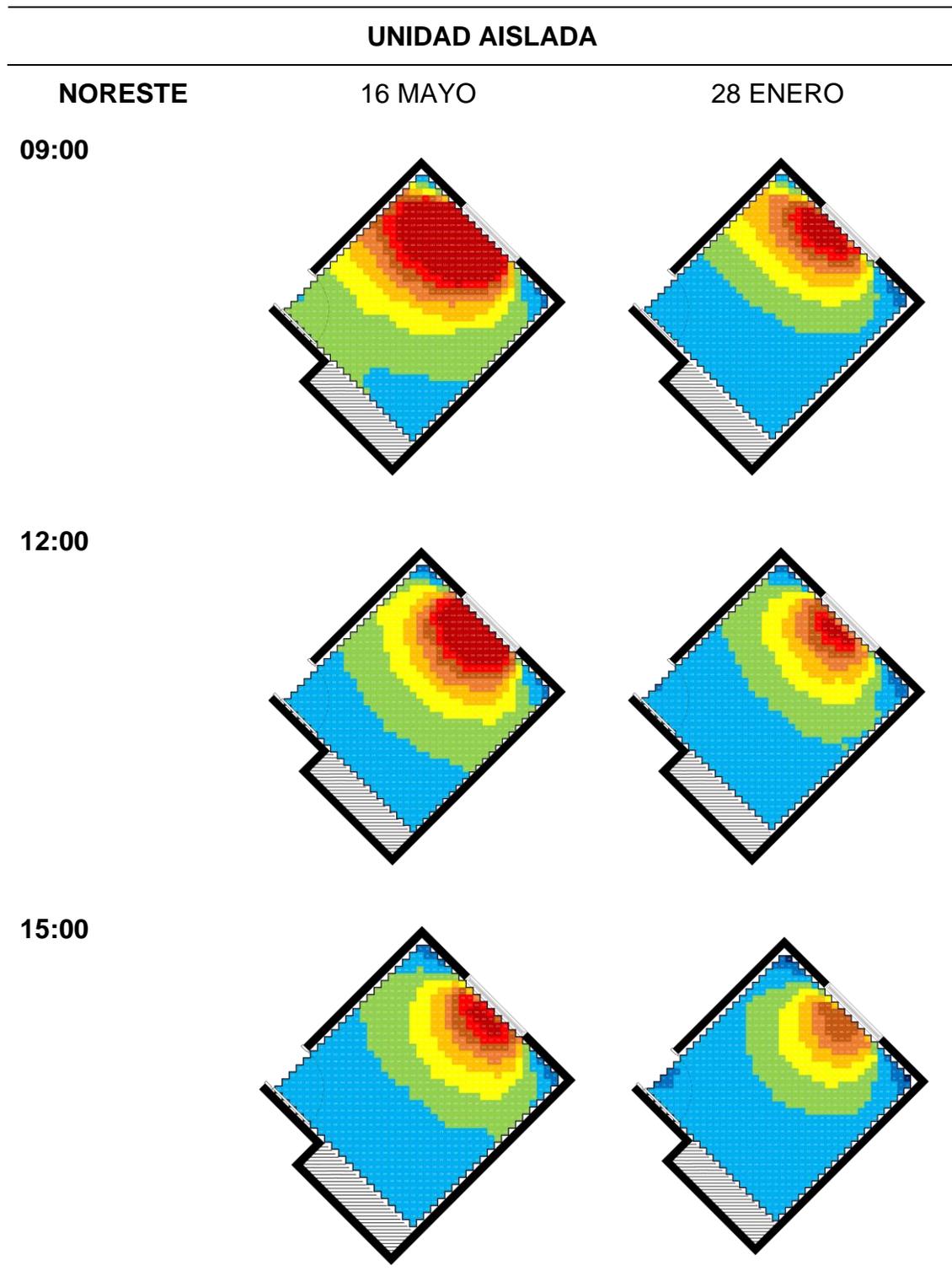
*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

**Tabla B4.** Mapa de distribución de iluminancia.



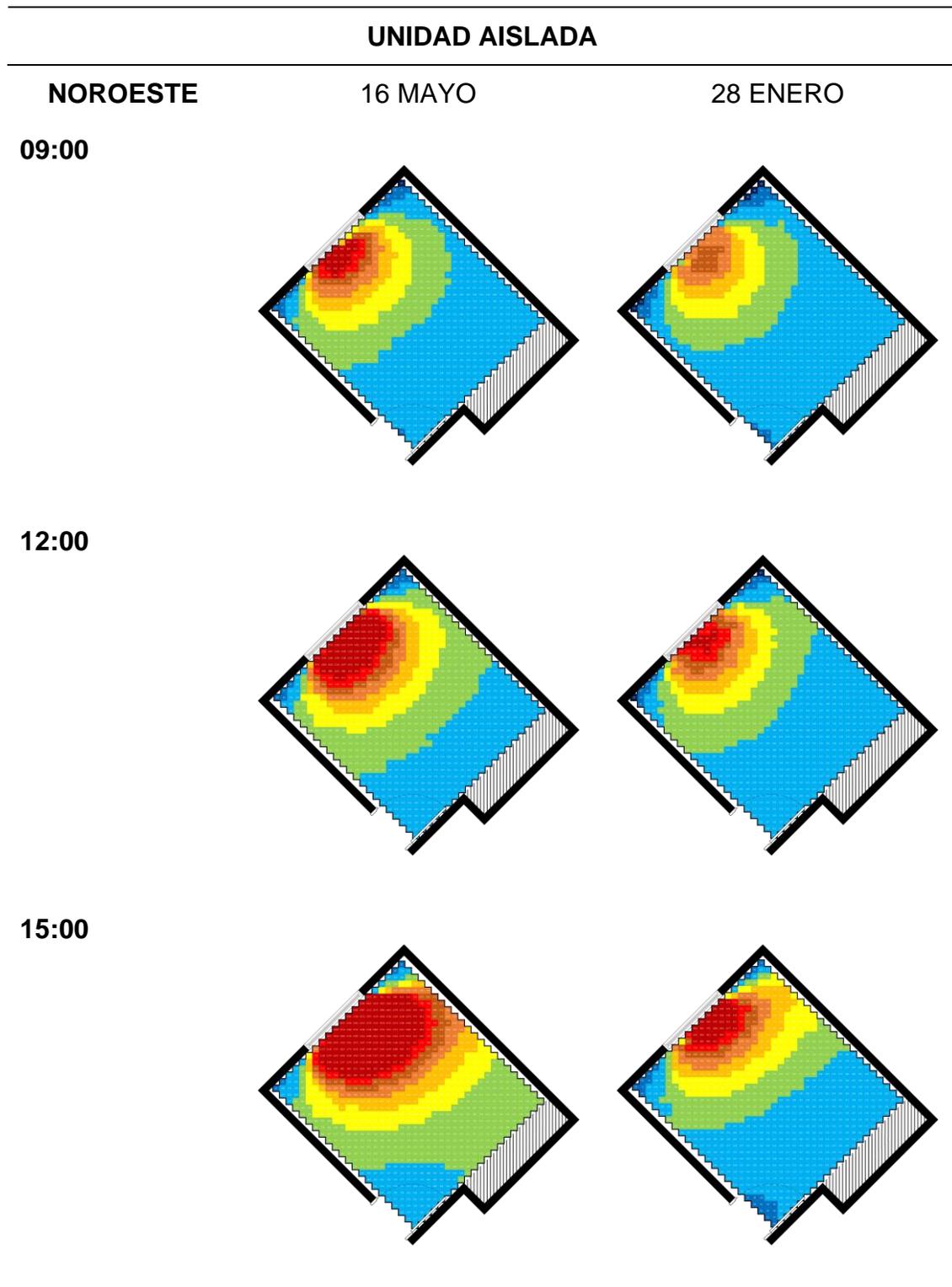
*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

**Tabla B5.** Mapa de distribución de iluminancia.



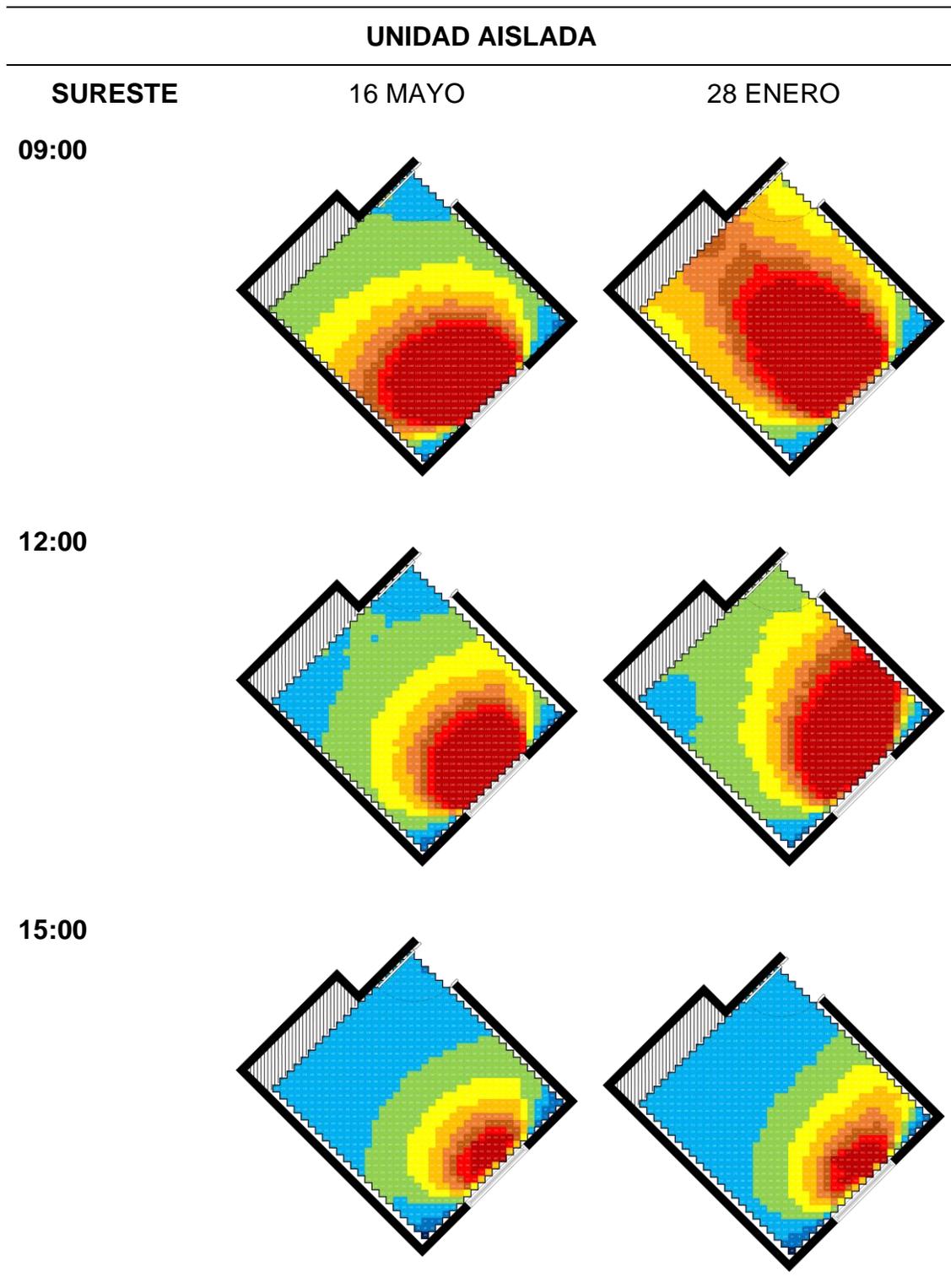
*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

**Tabla B6.** Mapa de distribución de iluminancia.



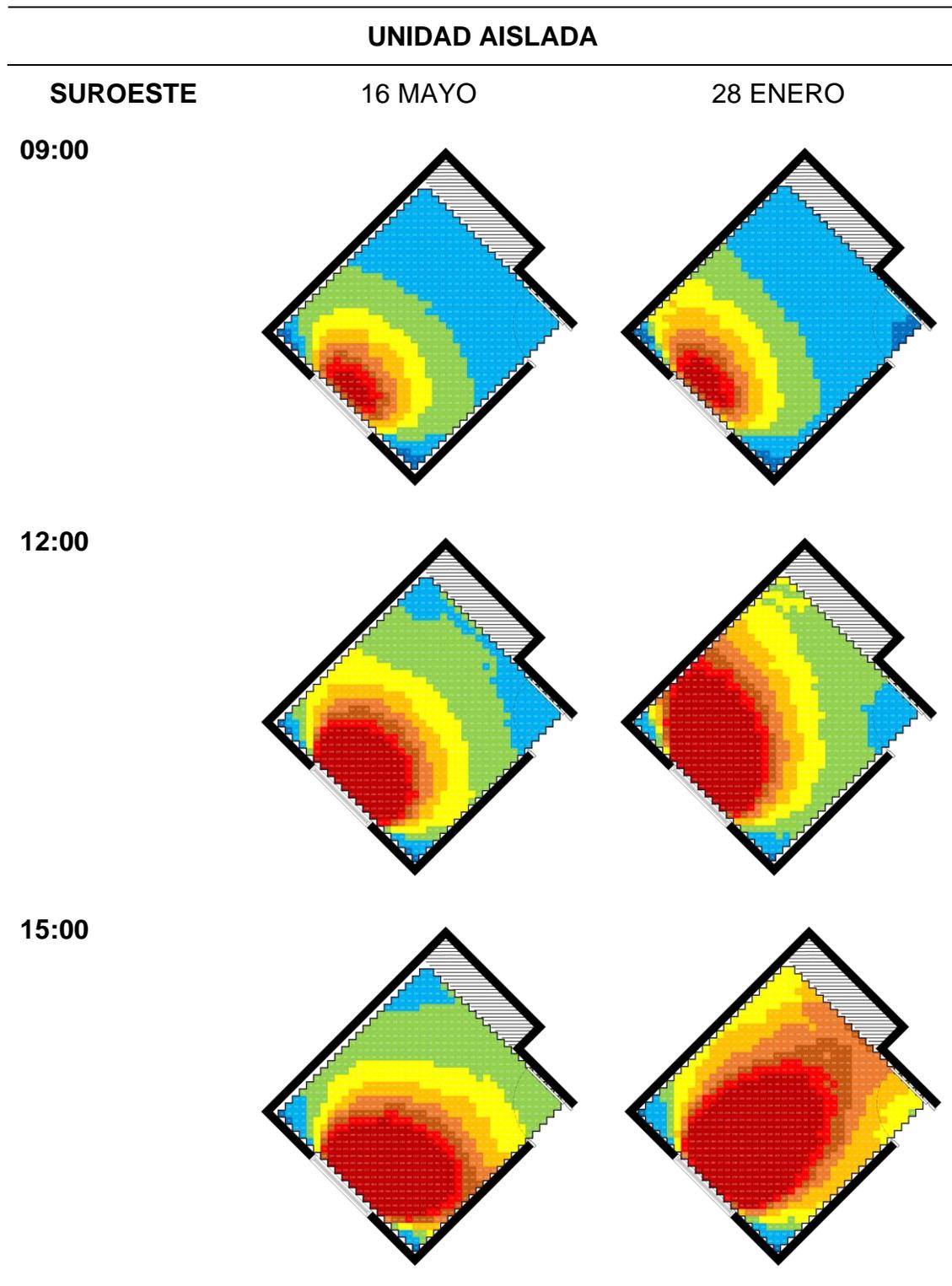
*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

**Tabla B7.** Mapa de distribución de iluminancia.



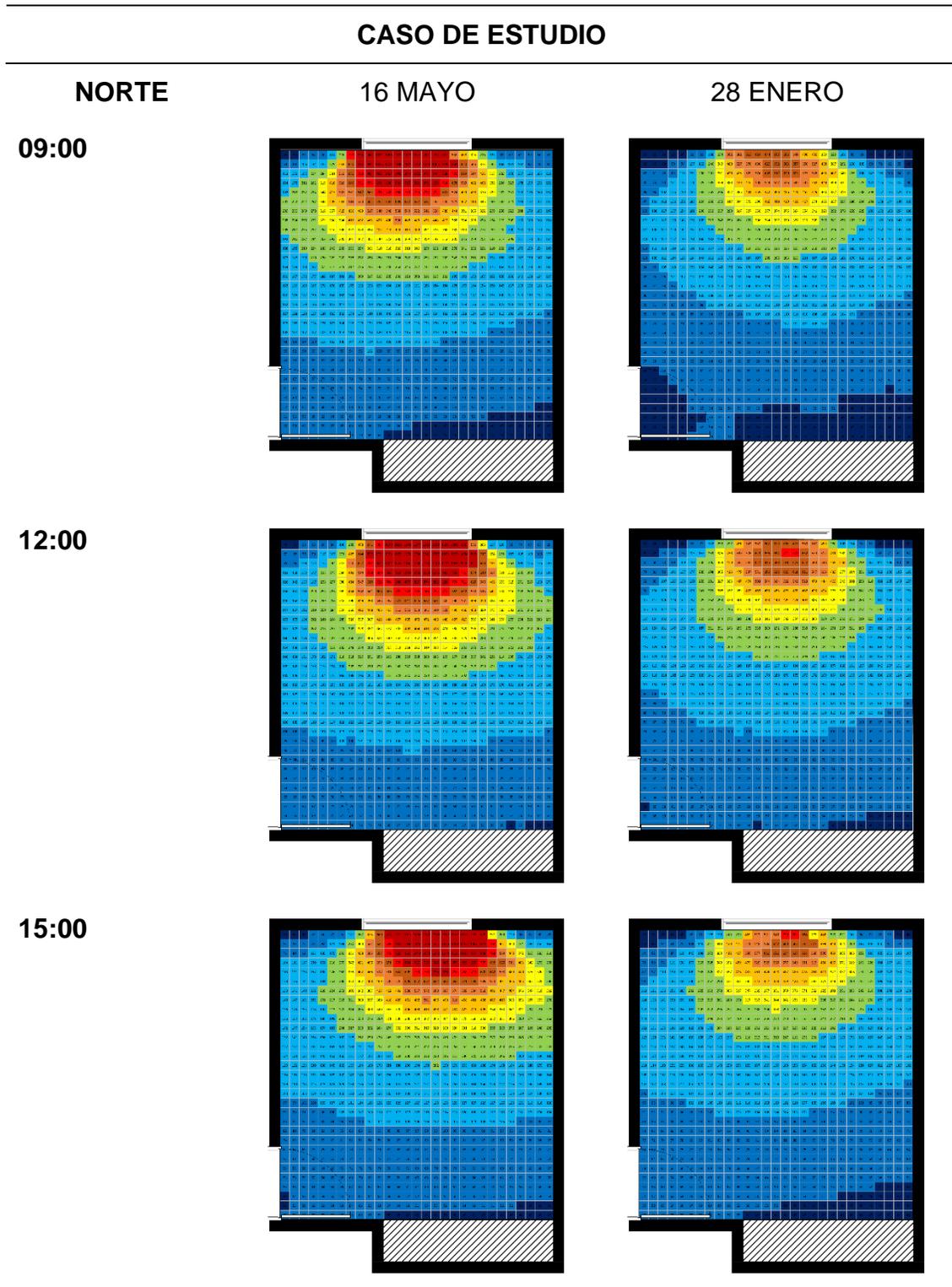
*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

**Tabla B8.** Mapa de distribución de iluminancia.



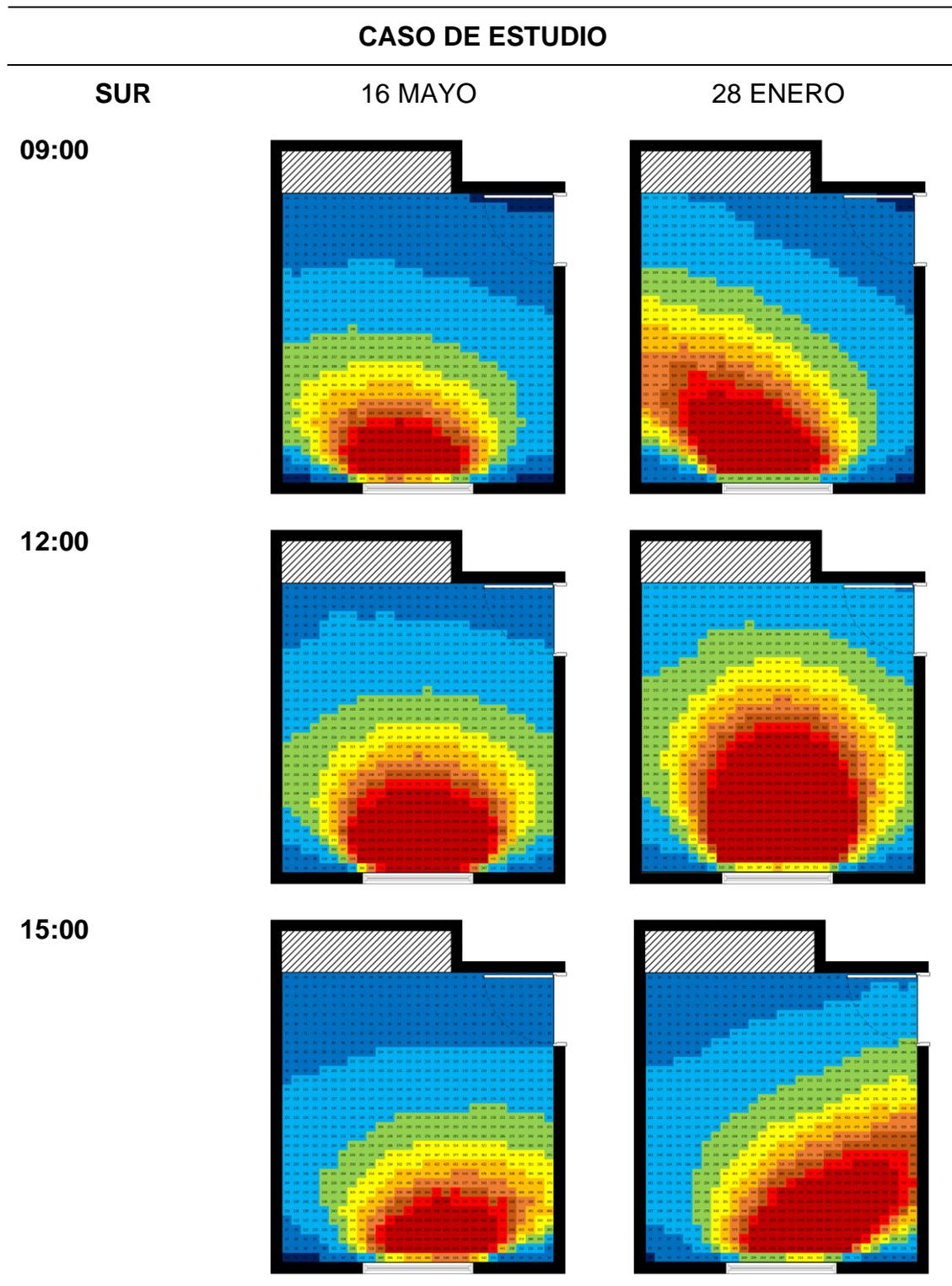
*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

**Tabla B9. Mapa de distribución de iluminancia.**



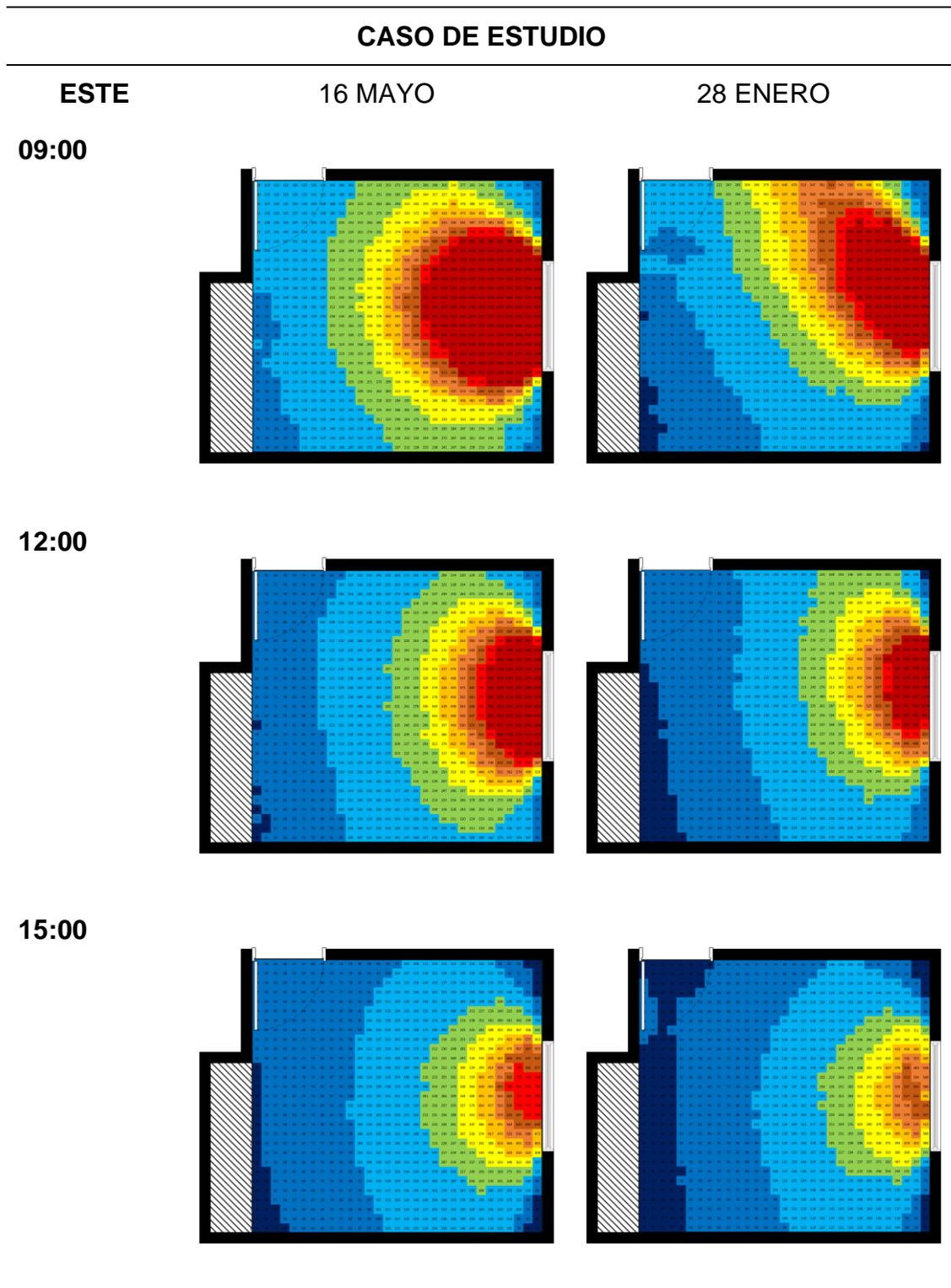
*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

**Tabla B10.** Mapa de distribución de iluminancia.



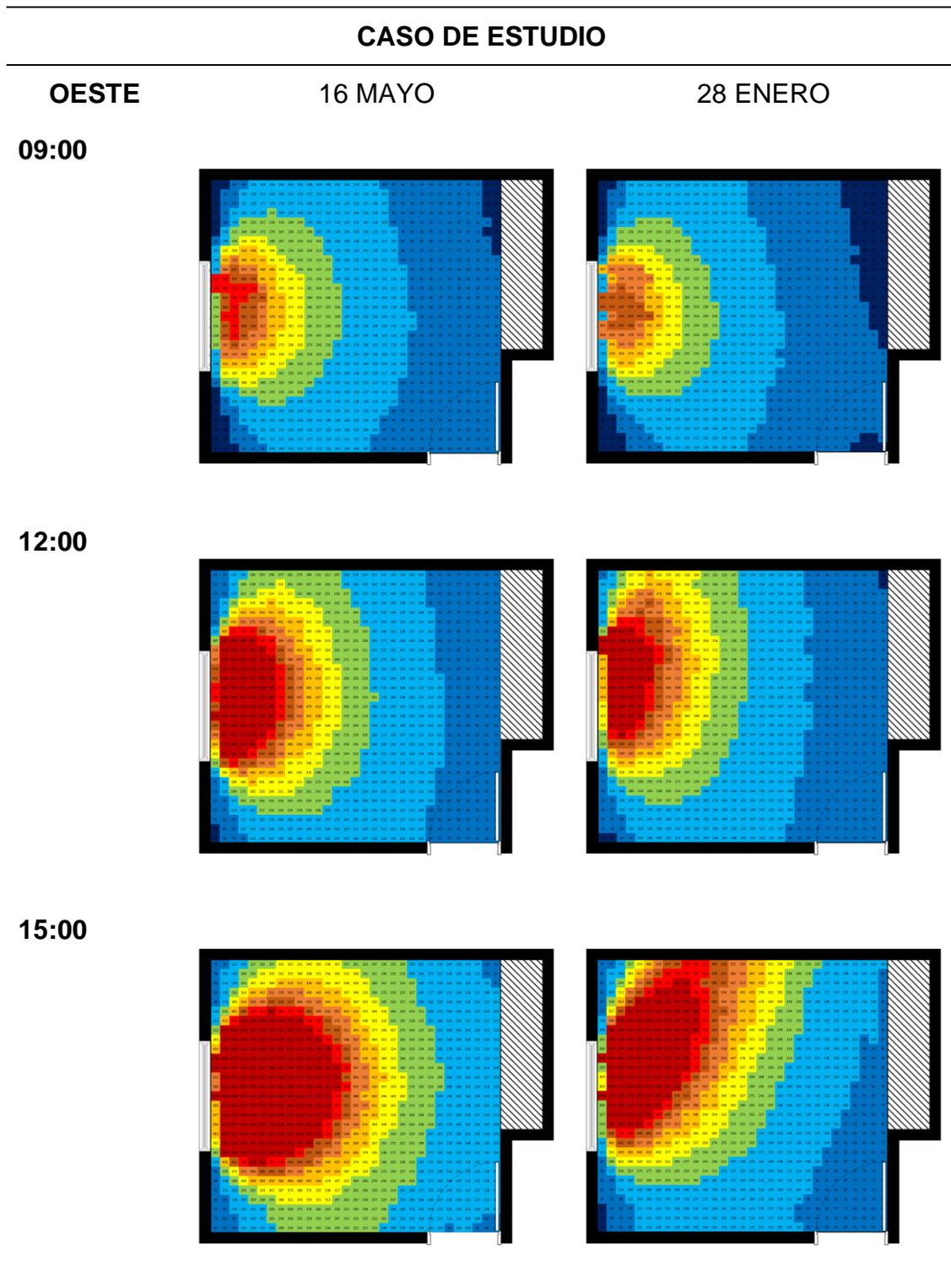
*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Tabla B11. Mapa de distribución de iluminancia.



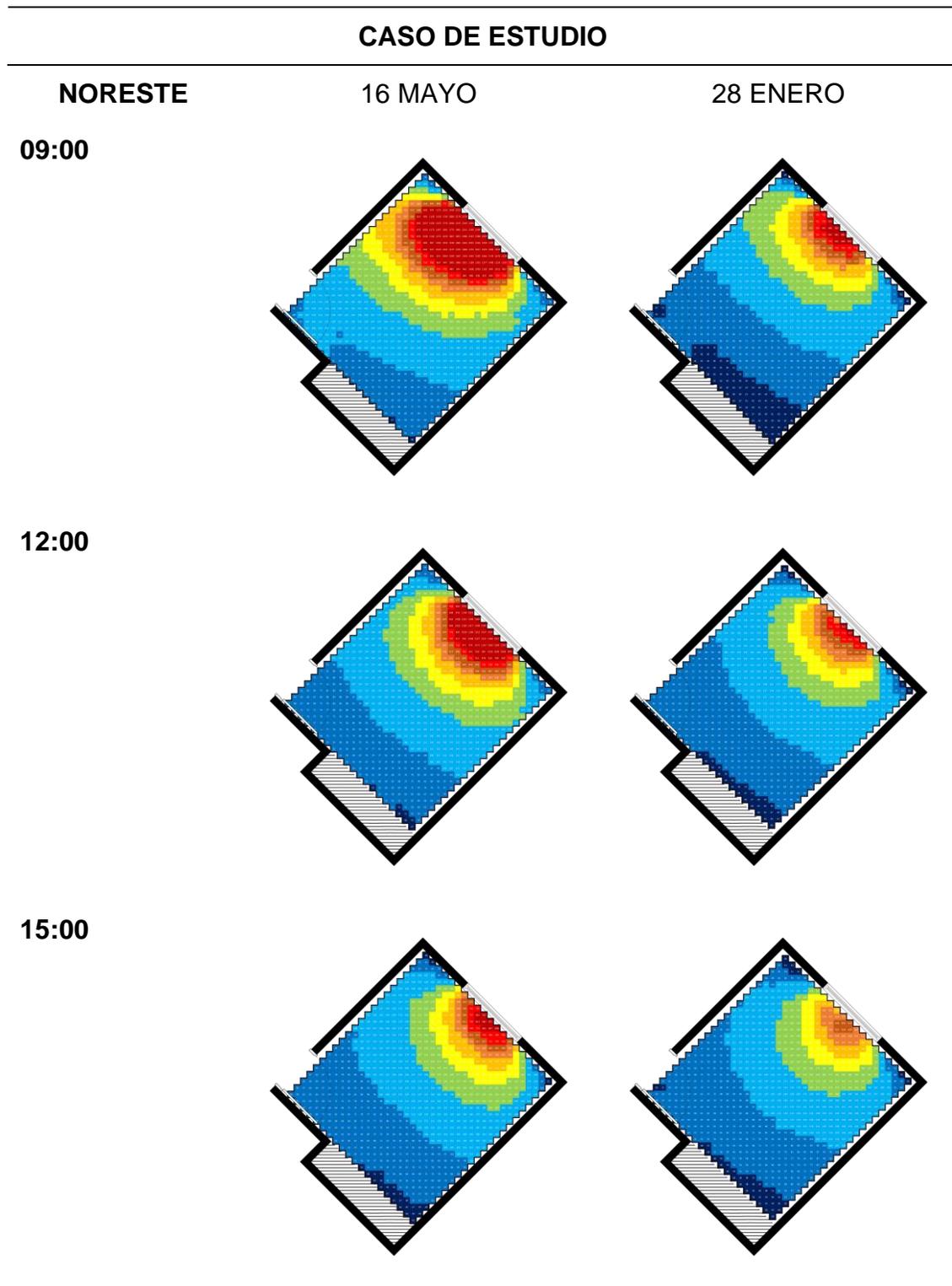
Nota. Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Tabla B12. Mapa de distribución de iluminancia.



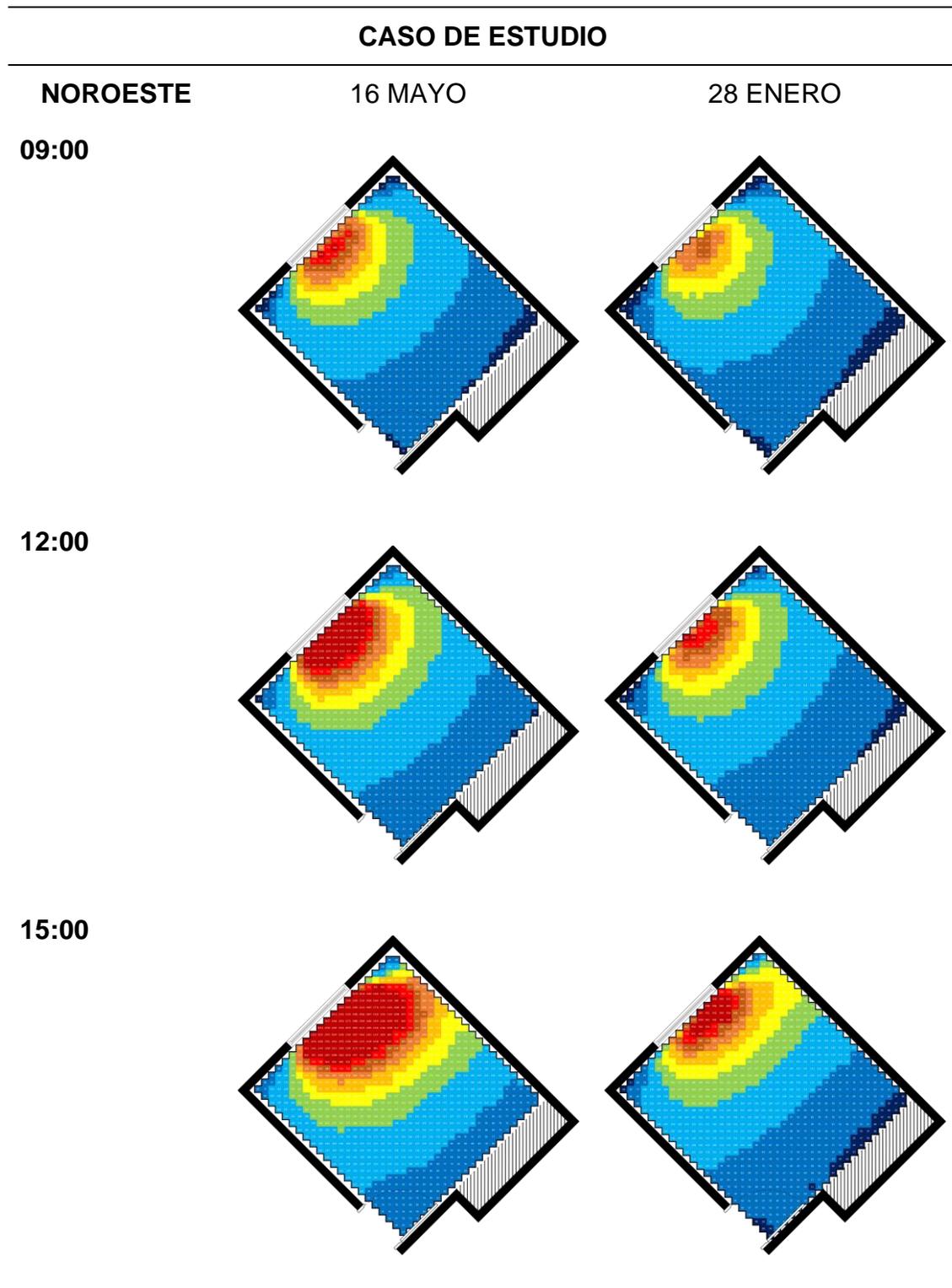
Nota. Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

**Tabla B13.** Mapa de distribución de iluminancia.



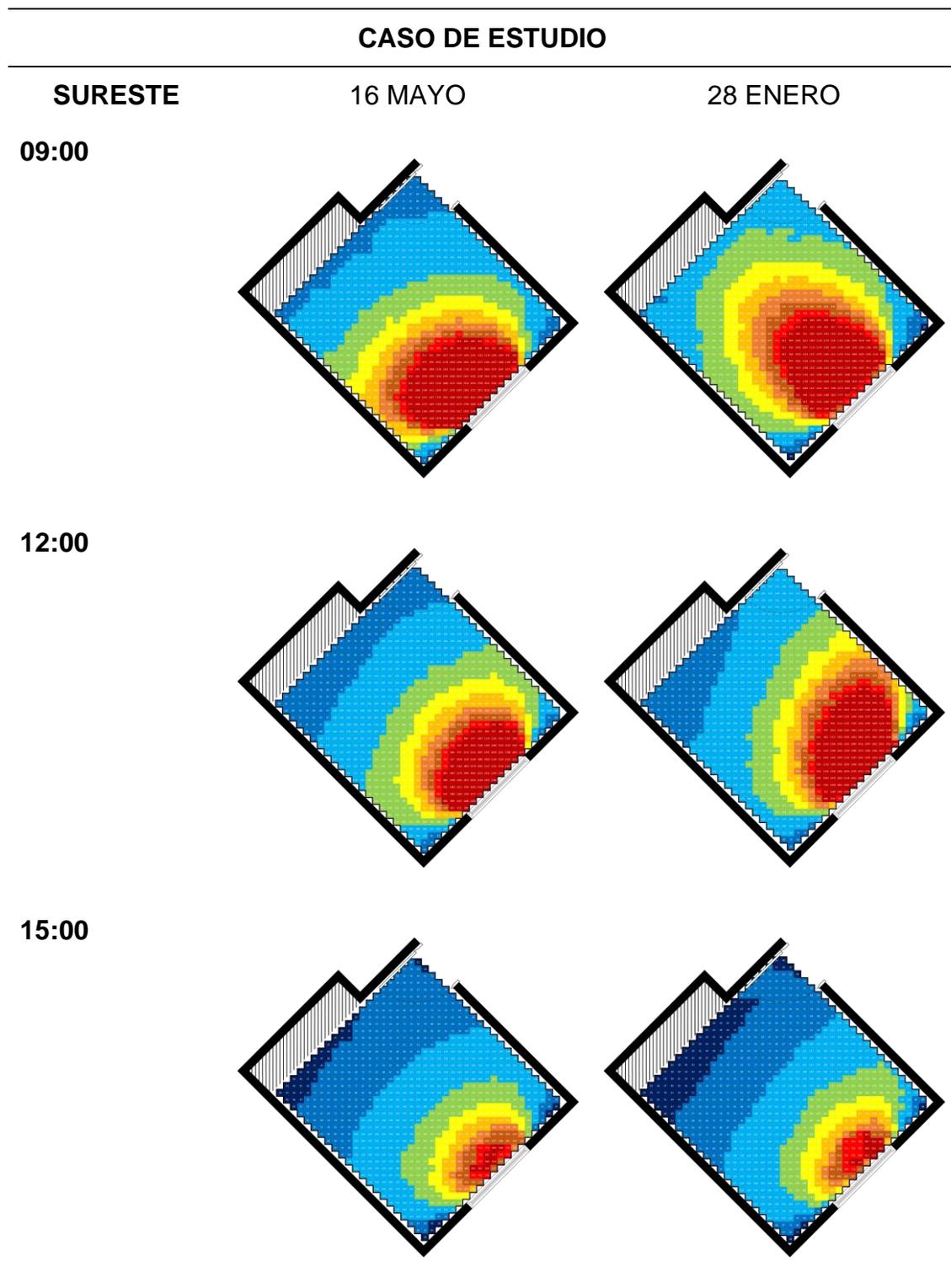
*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

**Tabla B14.** Mapa de distribución de iluminancia.



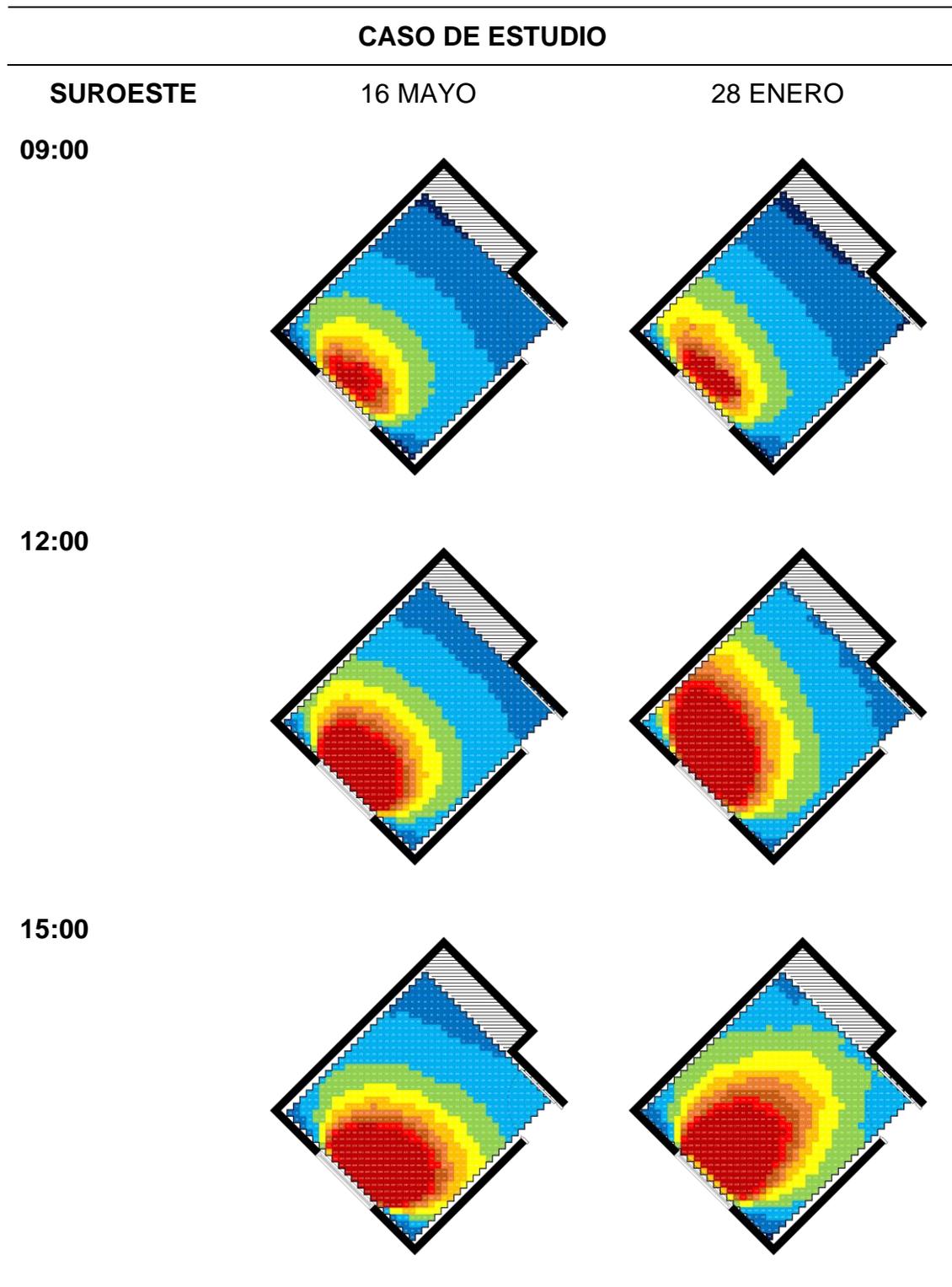
*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

**Tabla B15.** Mapa de distribución de iluminancia.



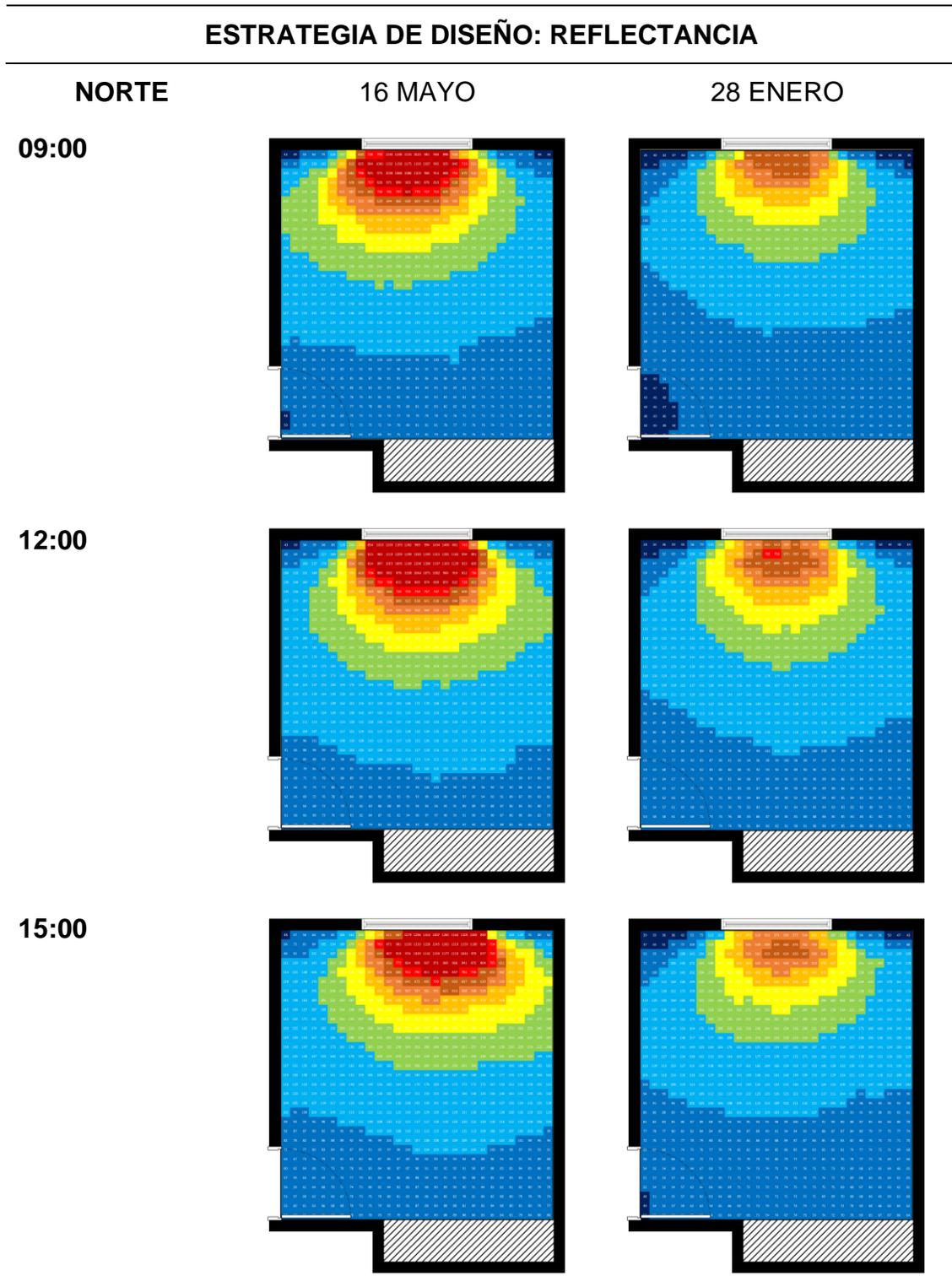
*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

**Tabla B16.** Mapa de distribución de iluminancia.



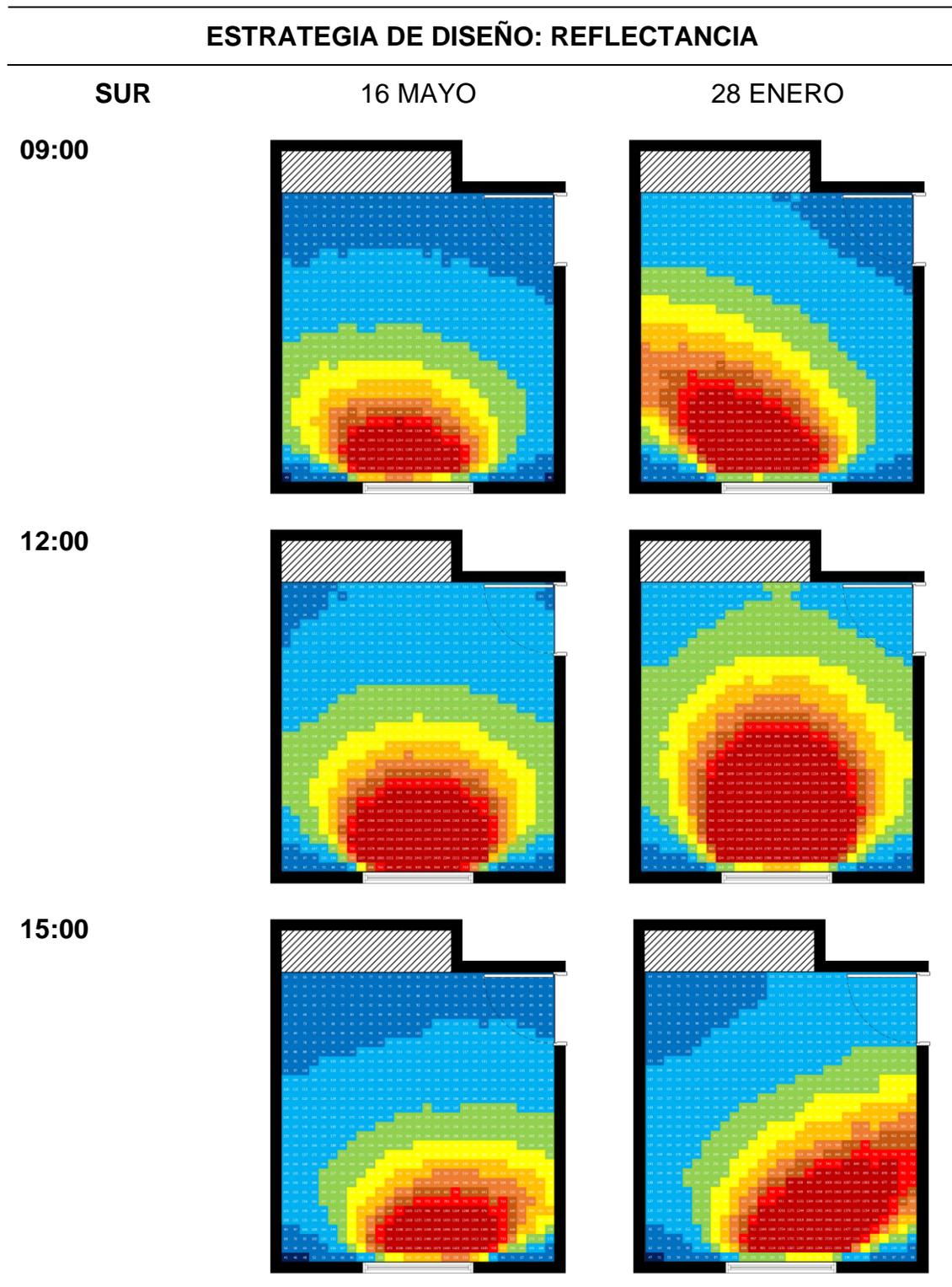
*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Tabla B17. Mapa de distribución de iluminancia.



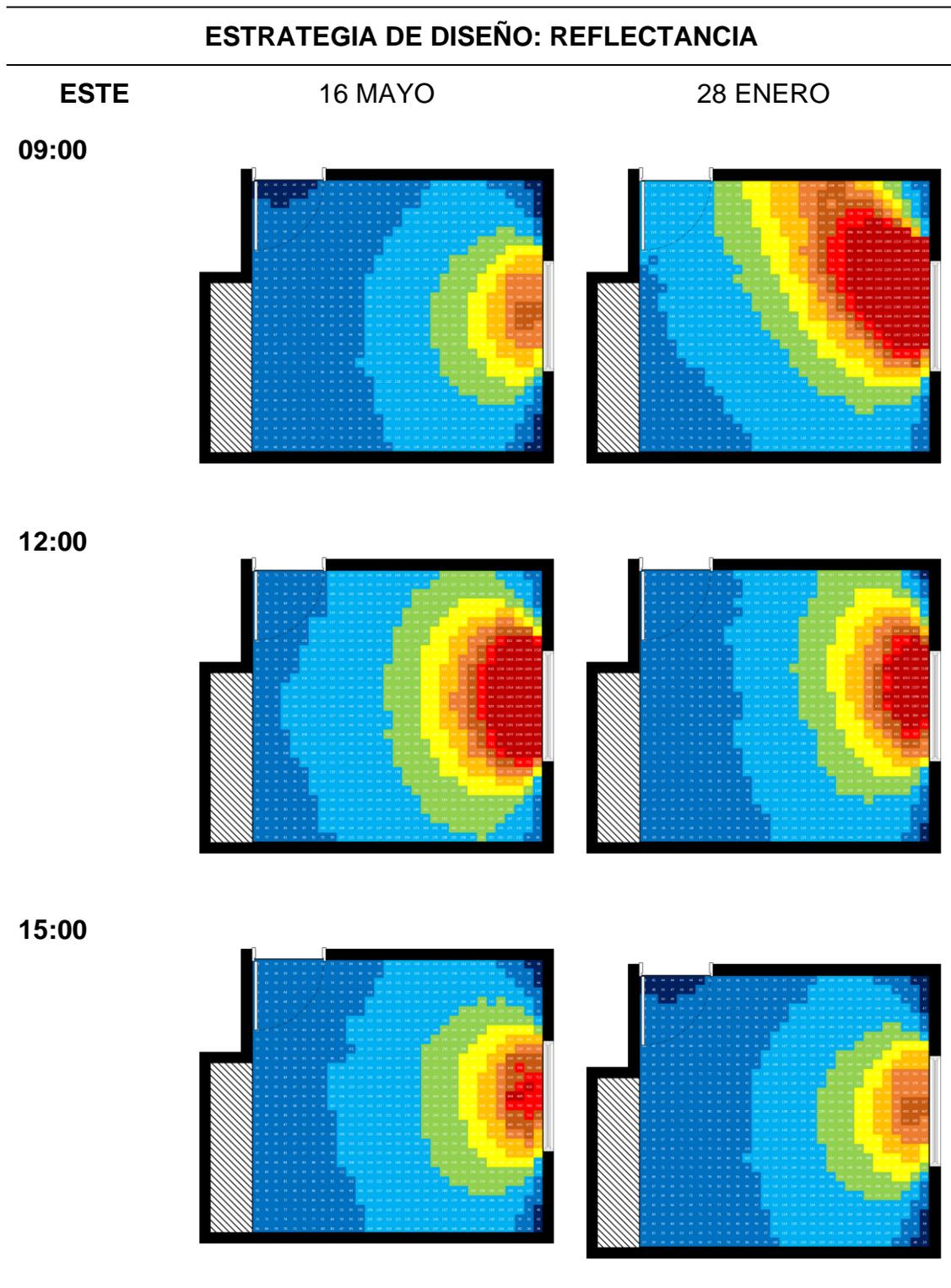
Nota. Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

**Tabla B18.** Mapa de distribución de iluminancia.



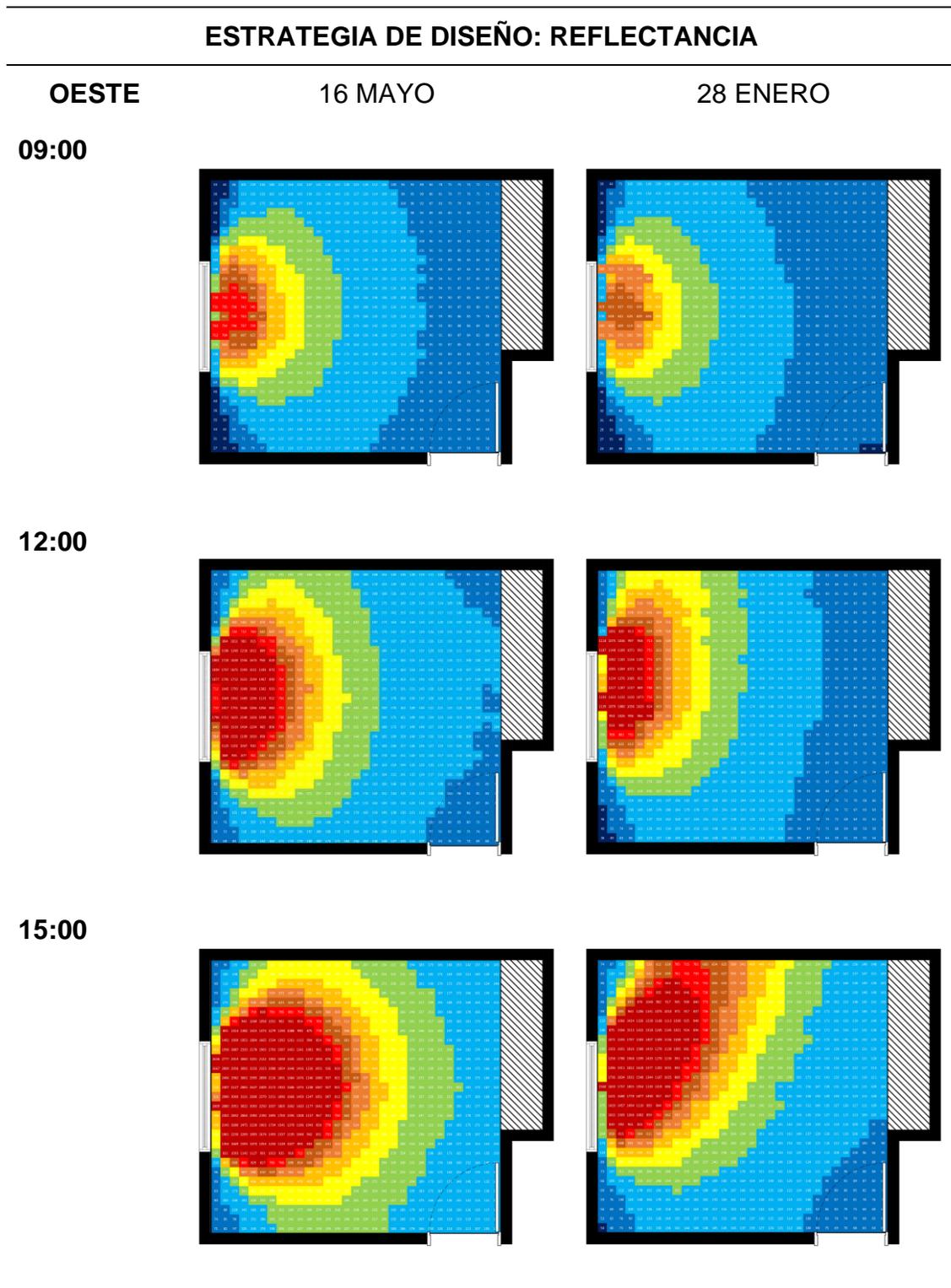
*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Tabla B19. Mapa de distribución de iluminancia.



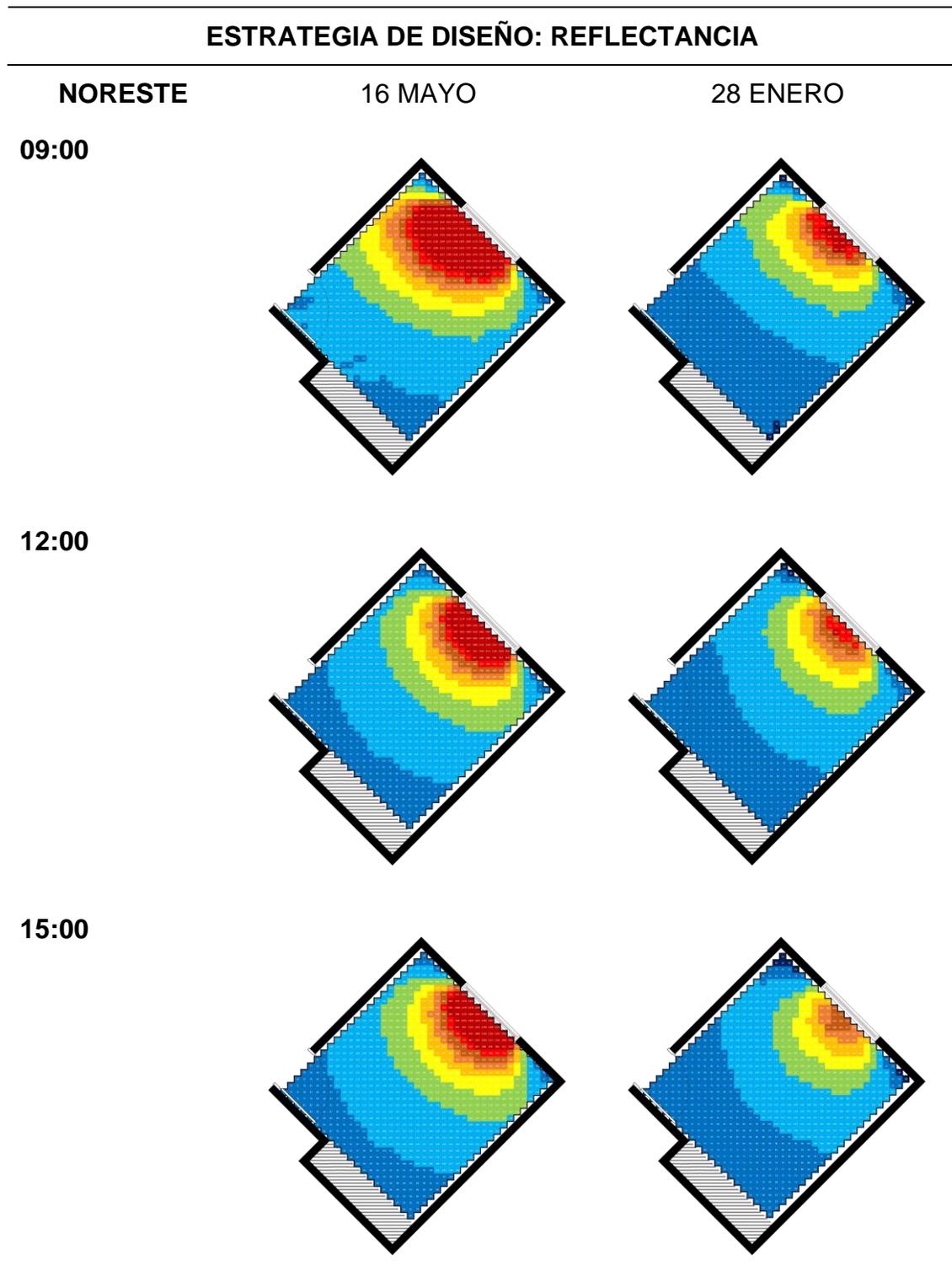
Nota. Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Tabla B20. Mapa de distribución de iluminancia.



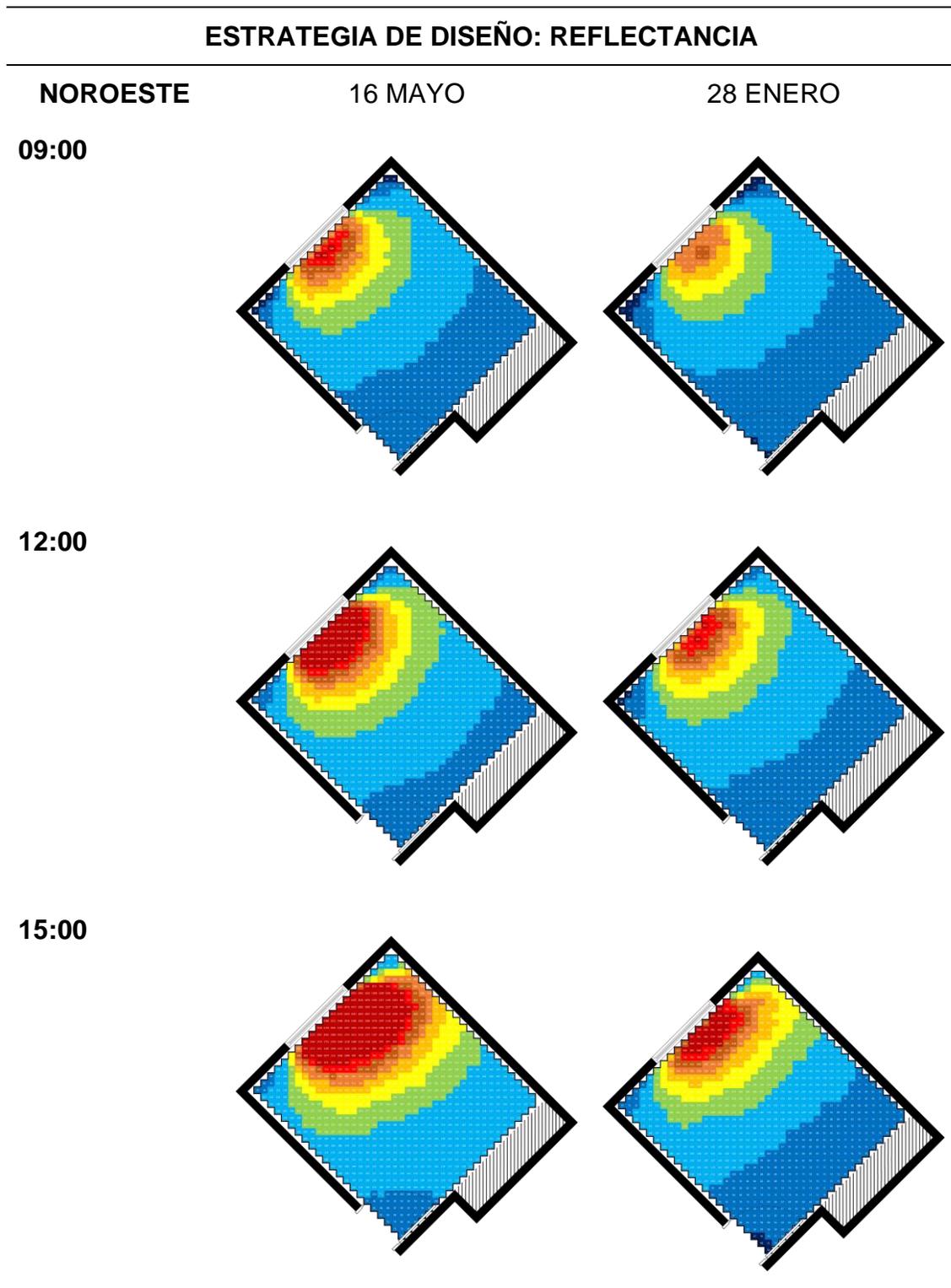
Nota. Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

**Tabla B21.** Mapa de distribución de iluminancia.



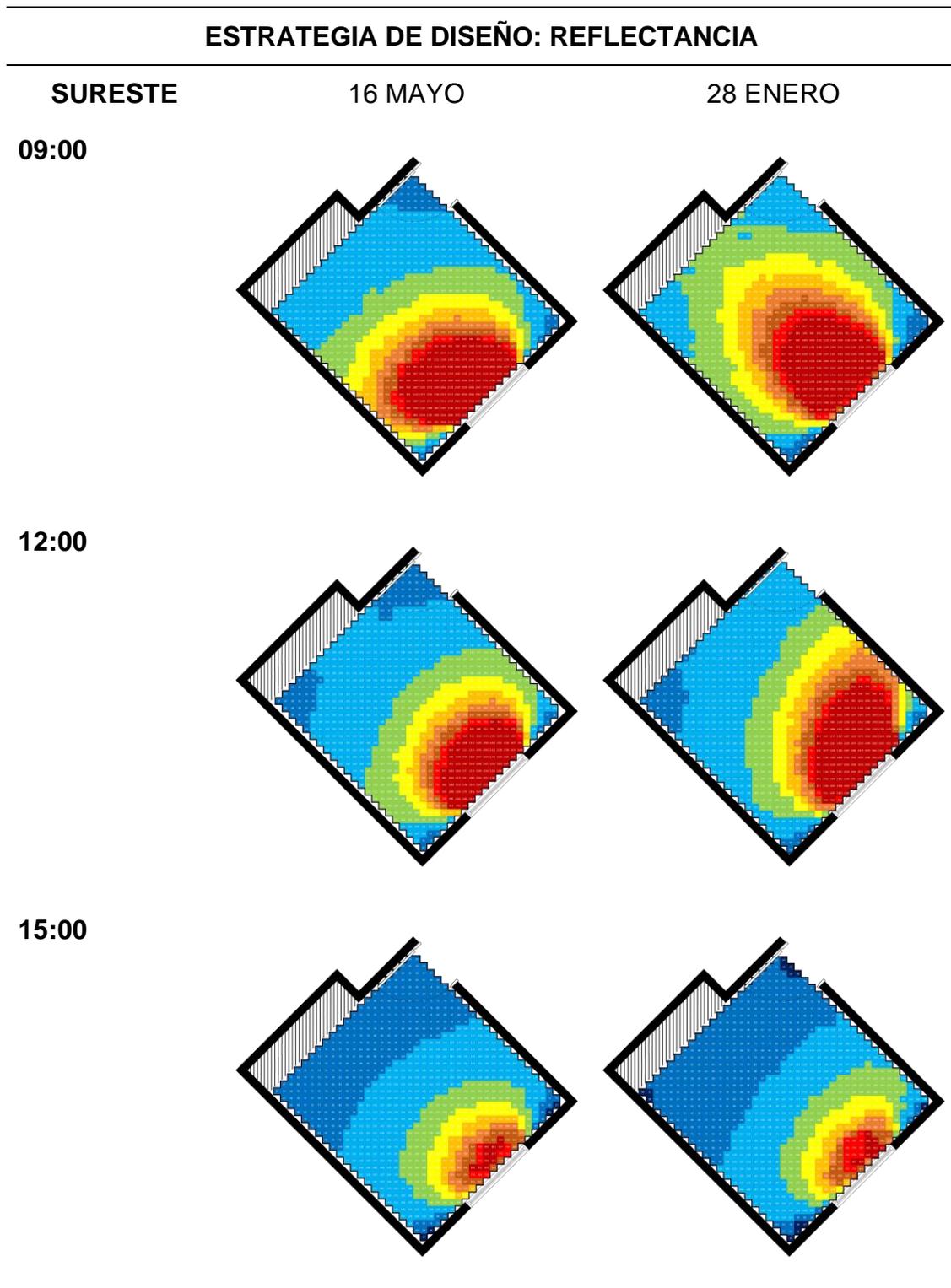
*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

**Tabla B22.** Mapa de distribución de iluminancia.



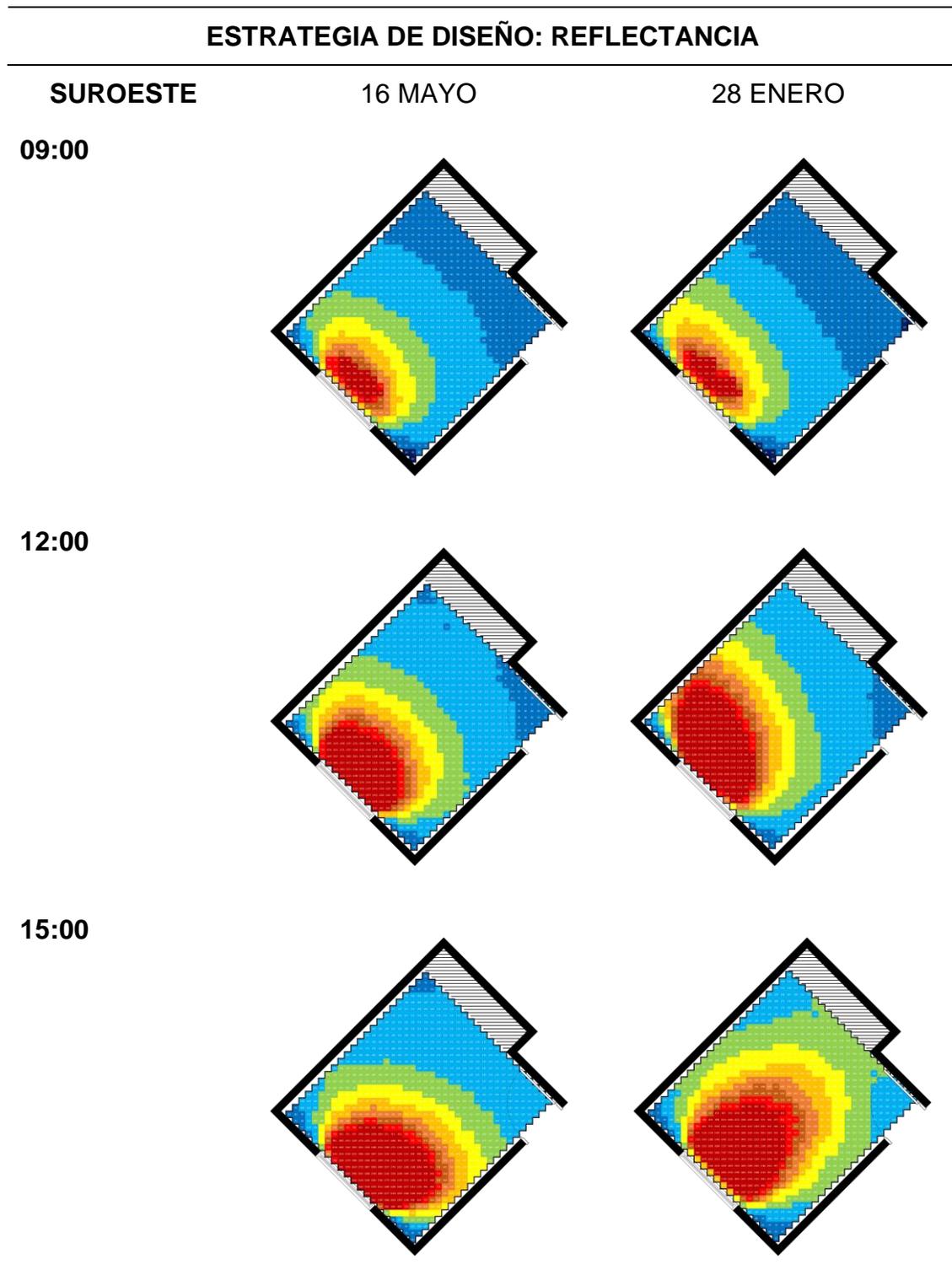
*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

**Tabla B23.** Mapa de distribución de iluminancia.



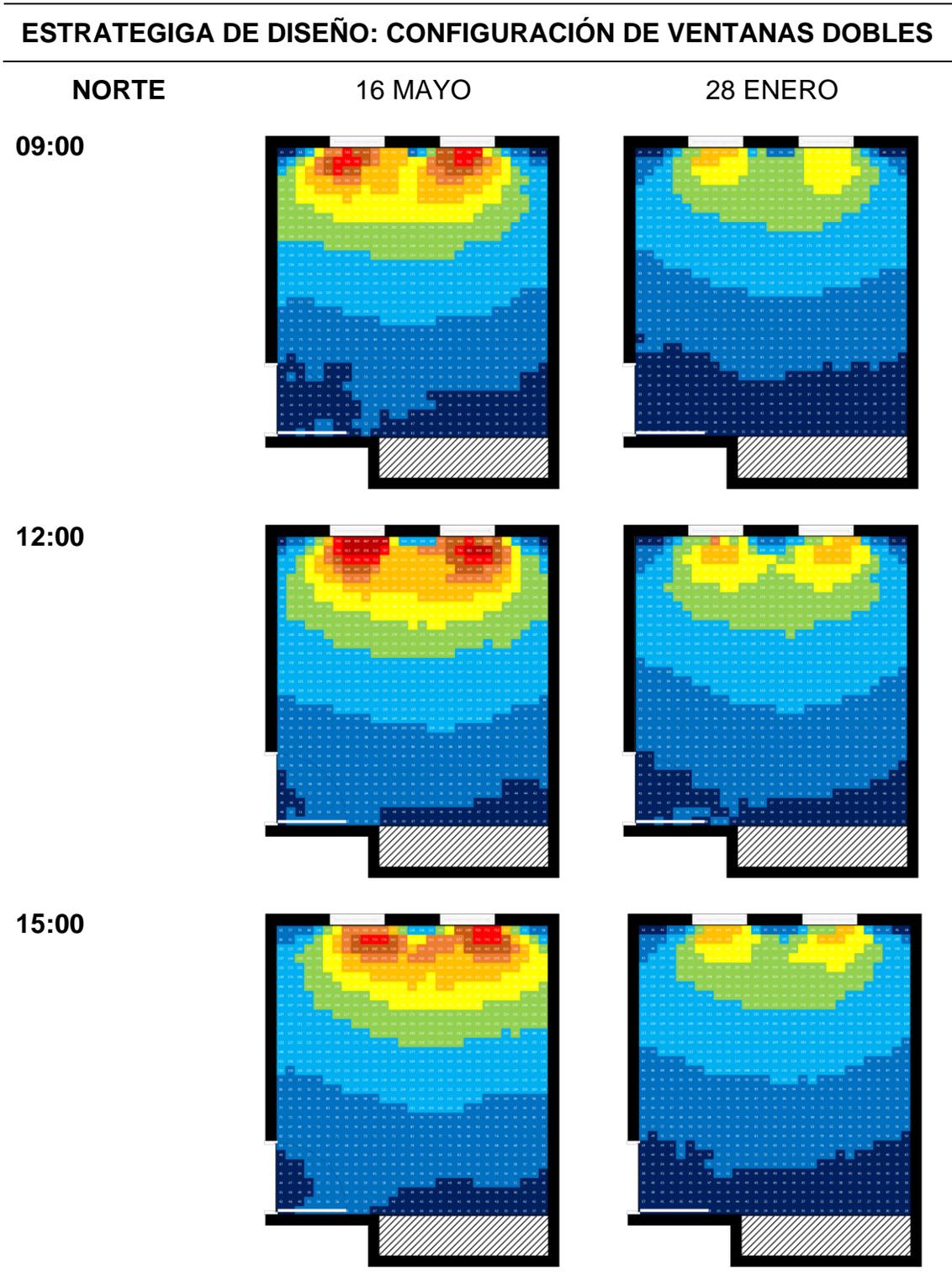
*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

**Tabla B24.** Mapa de distribución de iluminancia.



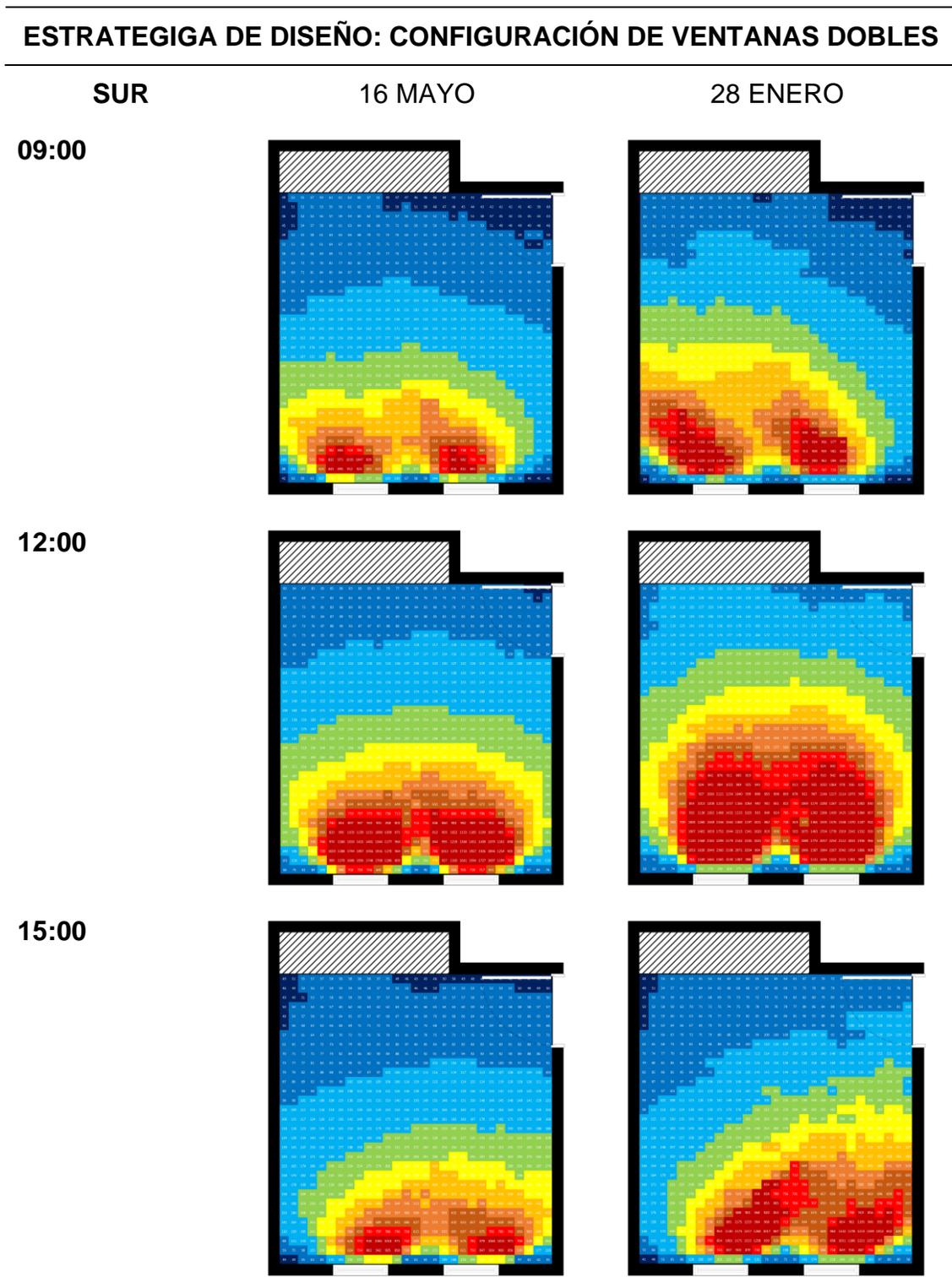
*Nota.* Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Tabla B25. Mapa de distribución de iluminancia.



Nota. Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Tabla B26. Mapa de distribución de iluminancia.



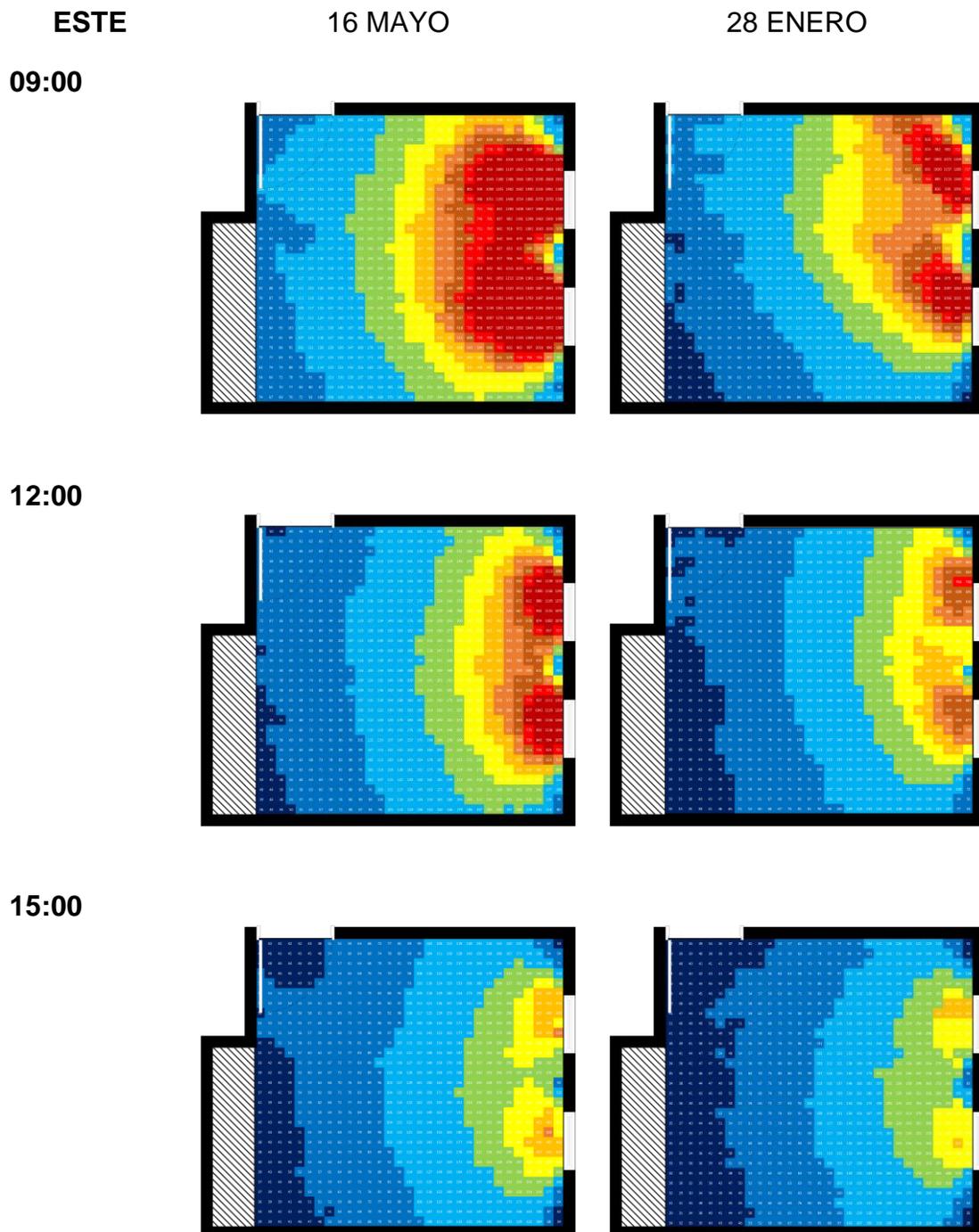
Nota. Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Tabla B27. Mapa de distribución de iluminancia.

---

**ESTRATEGIA DE DISEÑO: CONFIGURACIÓN DE VENTANAS DOBLES**

---



---

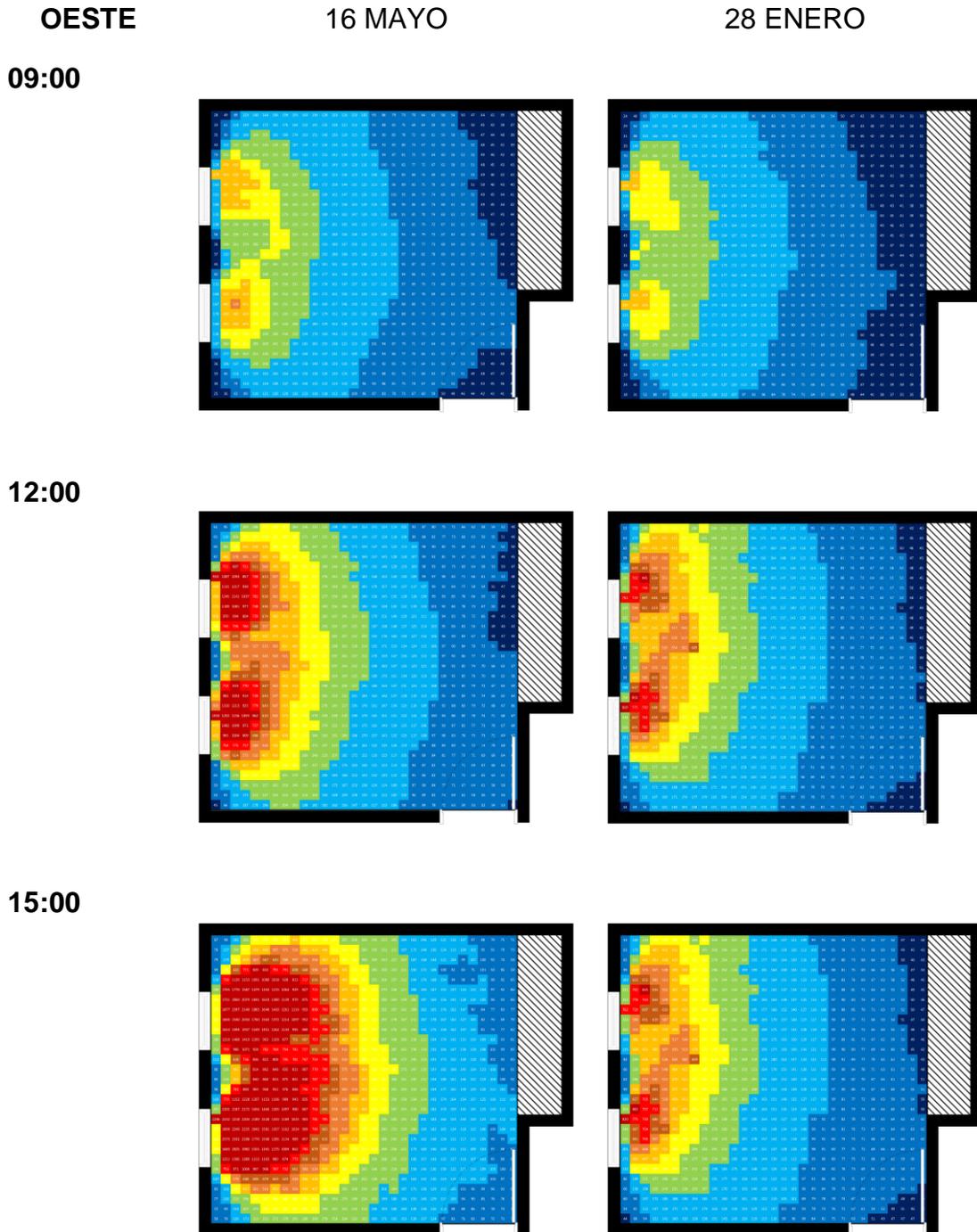
Nota. Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Tabla B28. Mapa de distribución de iluminancia.

---

**ESTRATEGIA DE DISEÑO: CONFIGURACIÓN DE VENTANAS DOBLES**

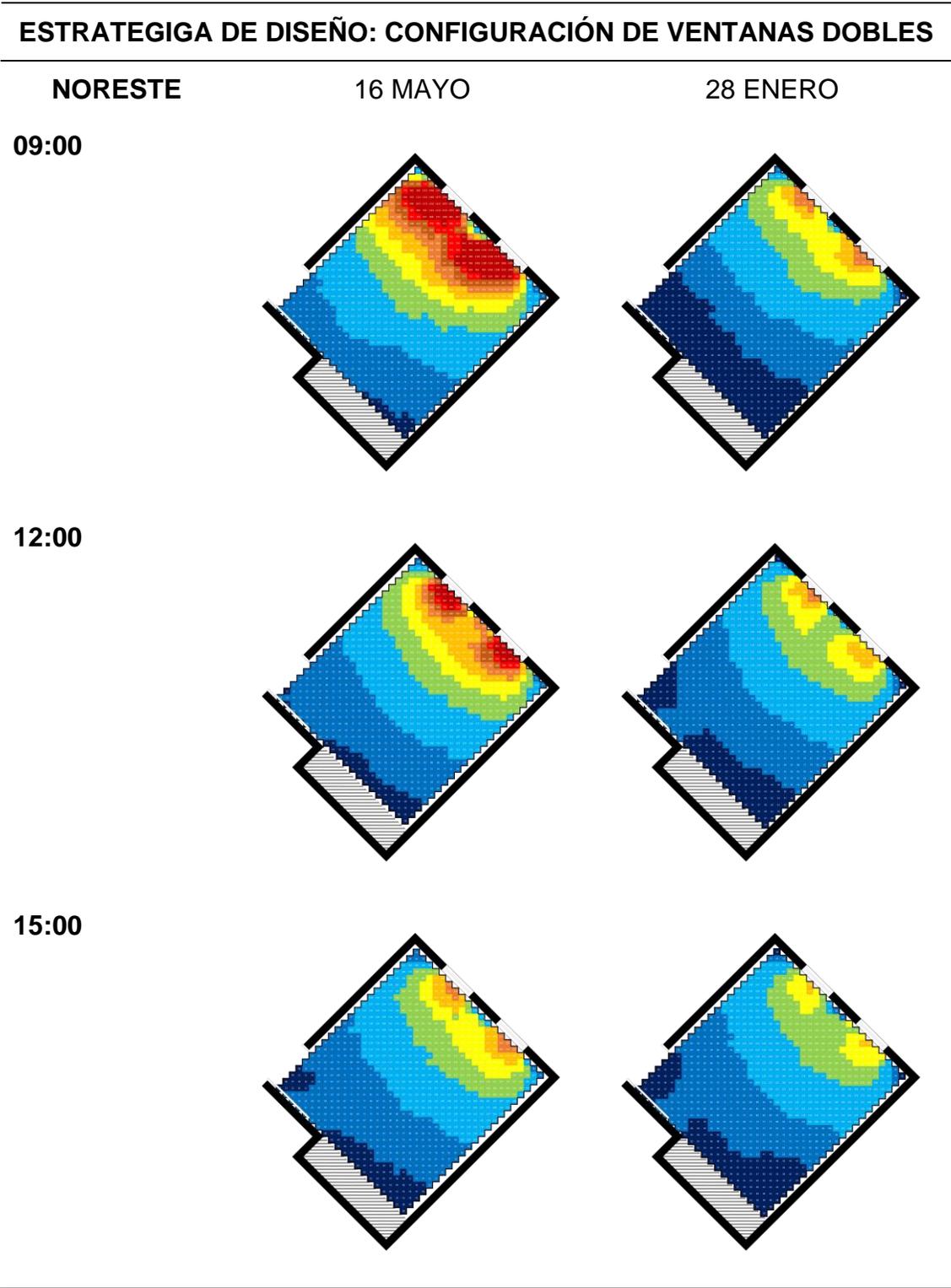
---



---

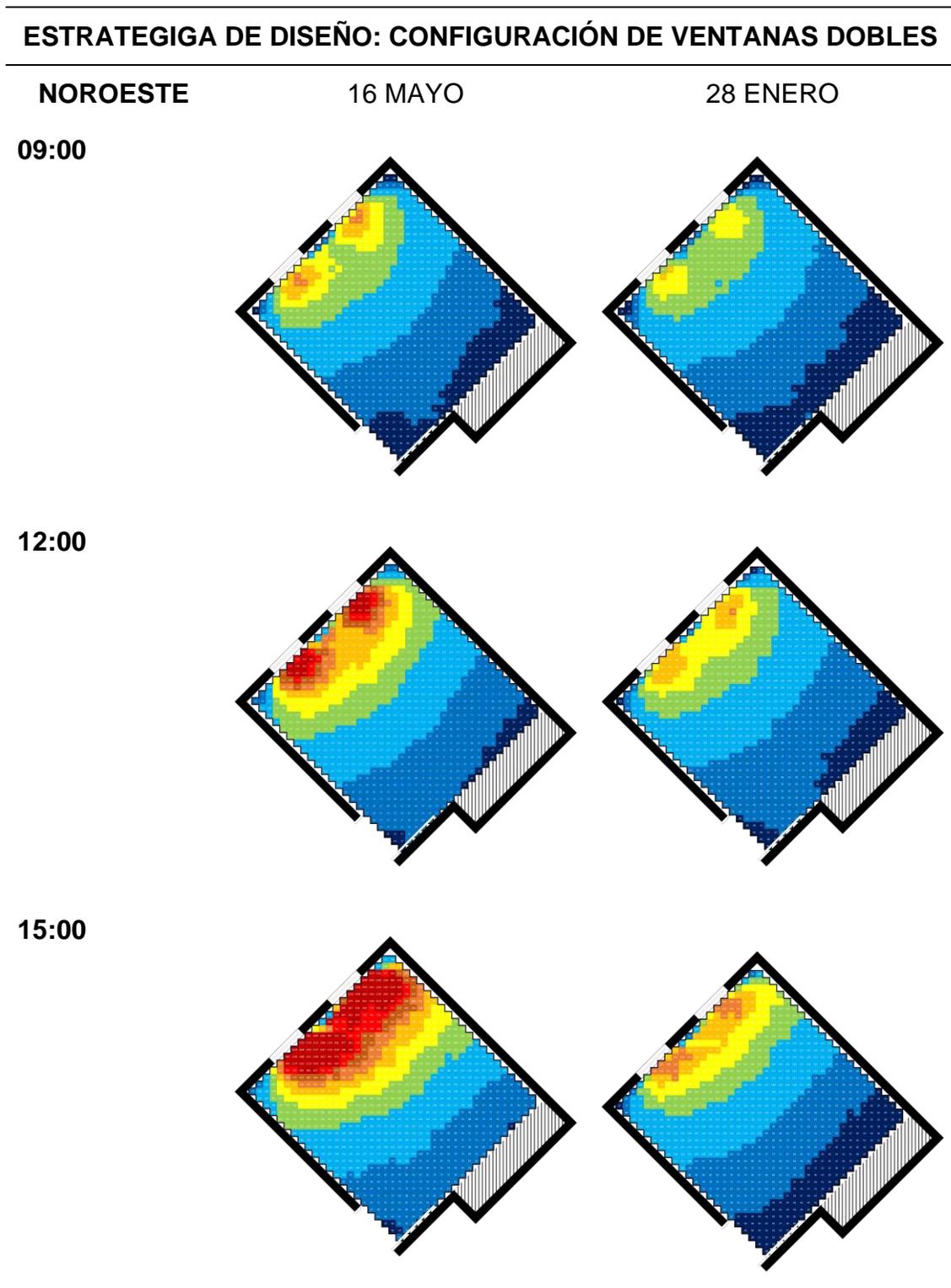
Nota. Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Tabla B29. Mapa de distribución de iluminancia.



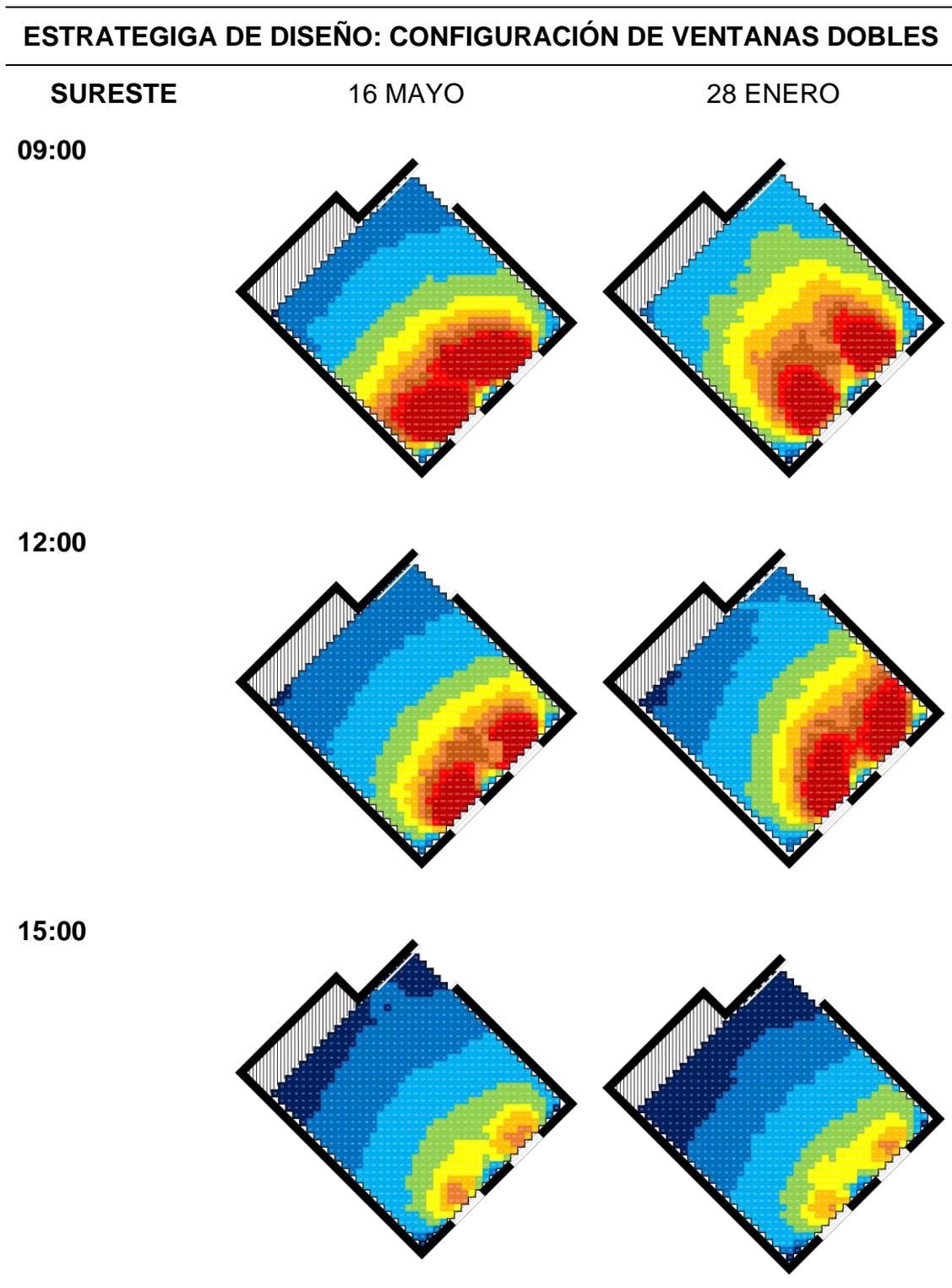
Nota. Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Tabla B30. Mapa de distribución de iluminancia.



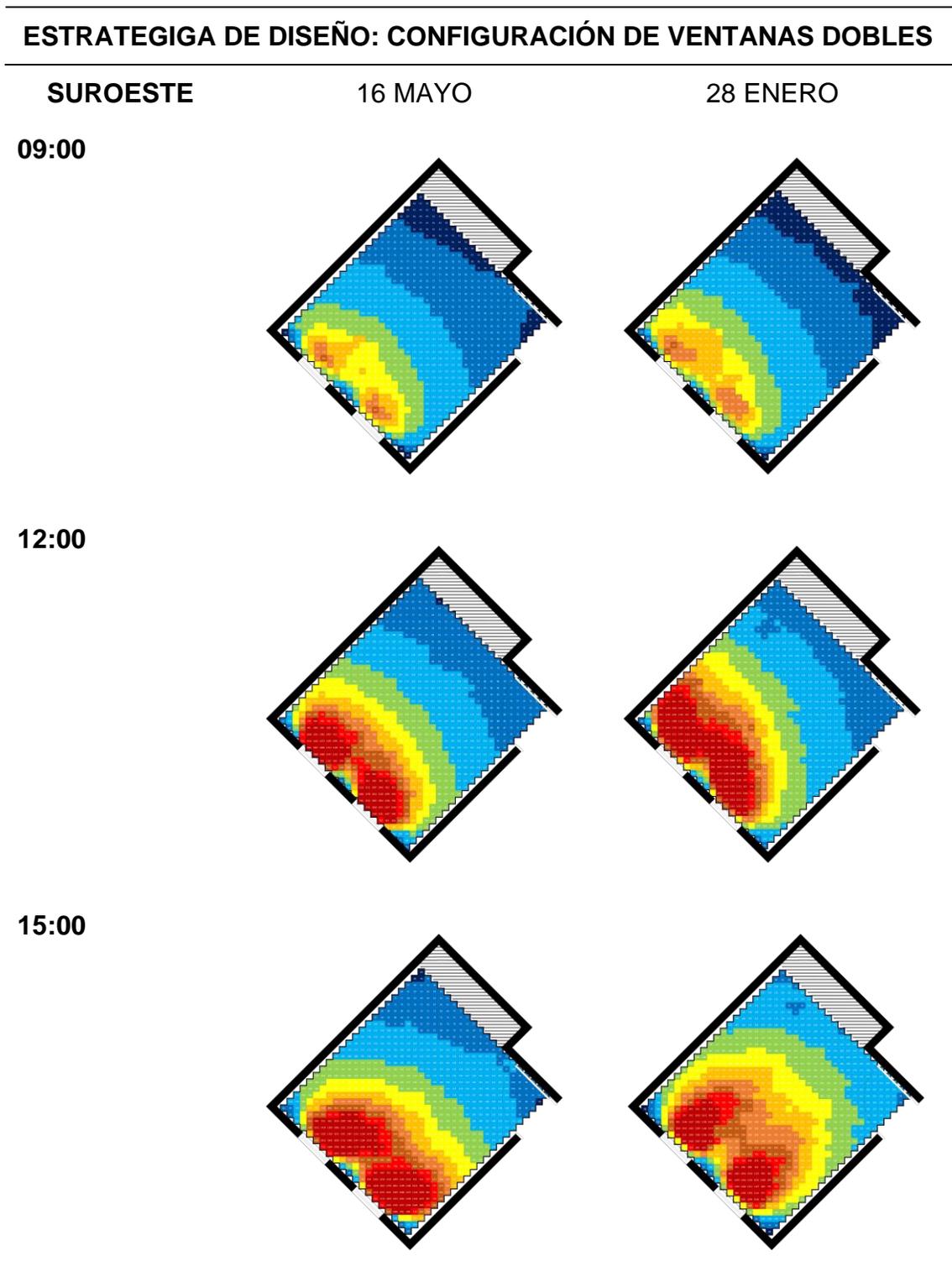
Nota. Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Tabla B31. Mapa de distribución de iluminancia.



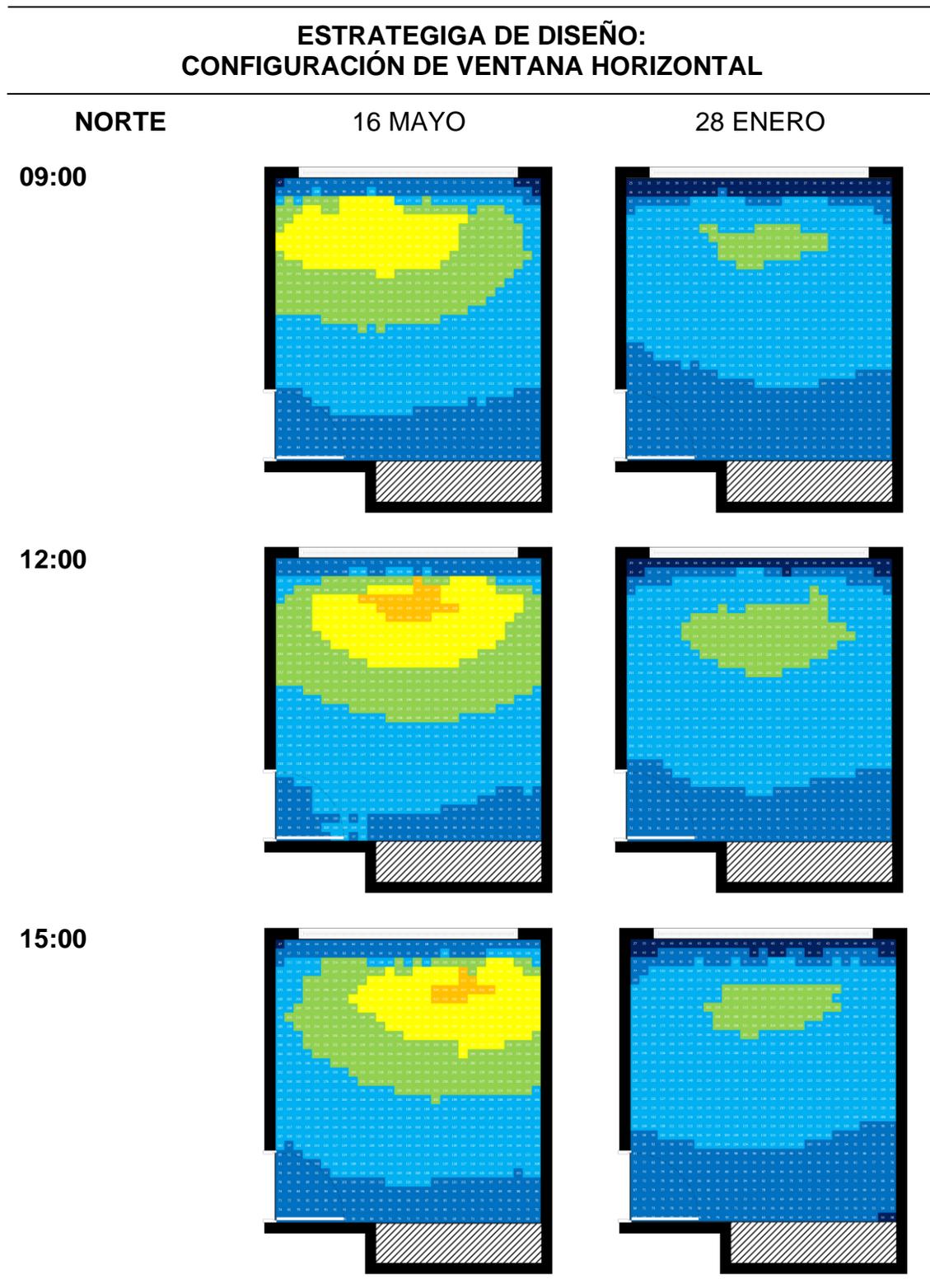
Nota. Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Tabla B32. Mapa de distribución de iluminancia.



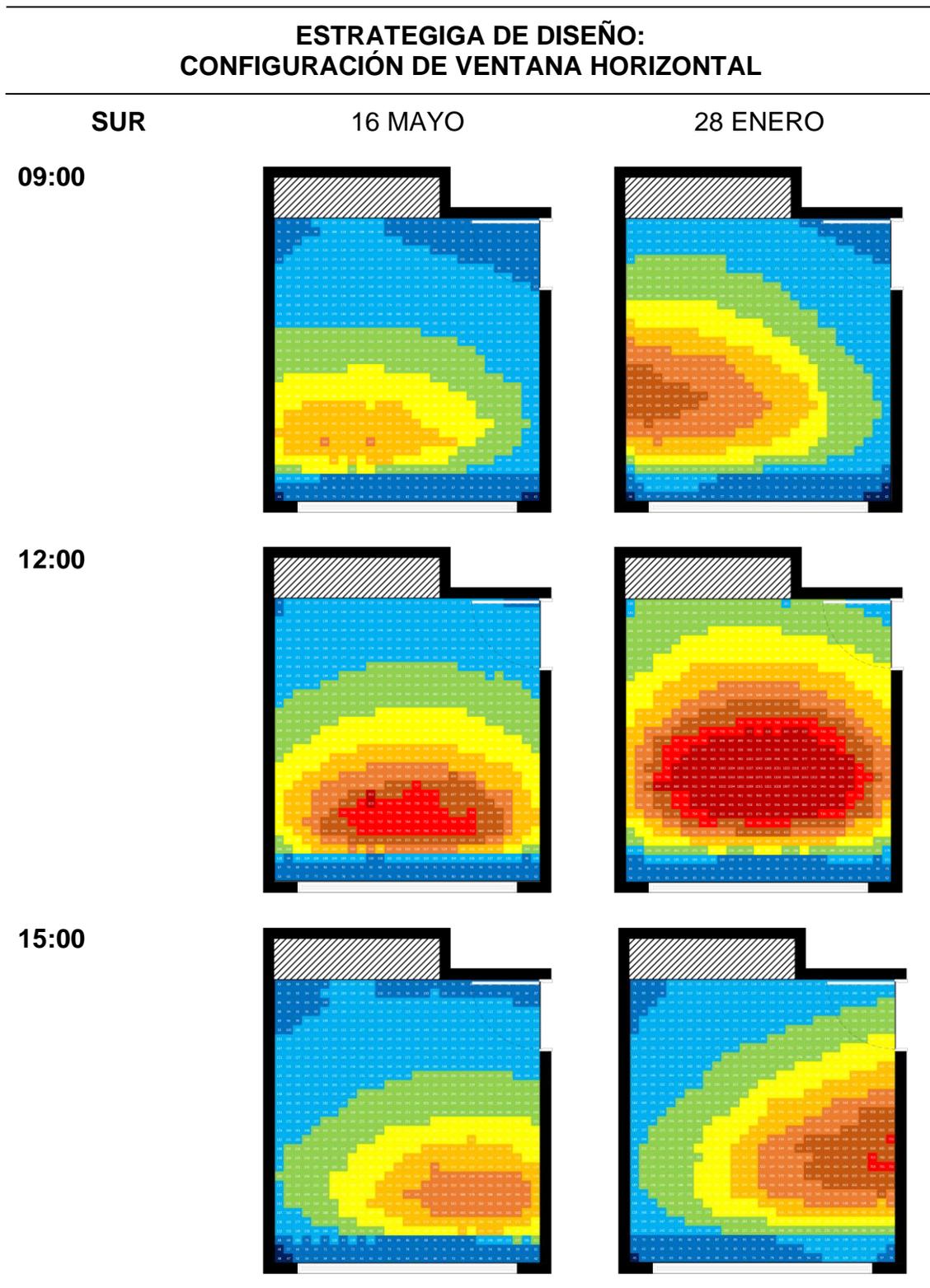
Nota. Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Tabla B33. Mapa de distribución de iluminancia.



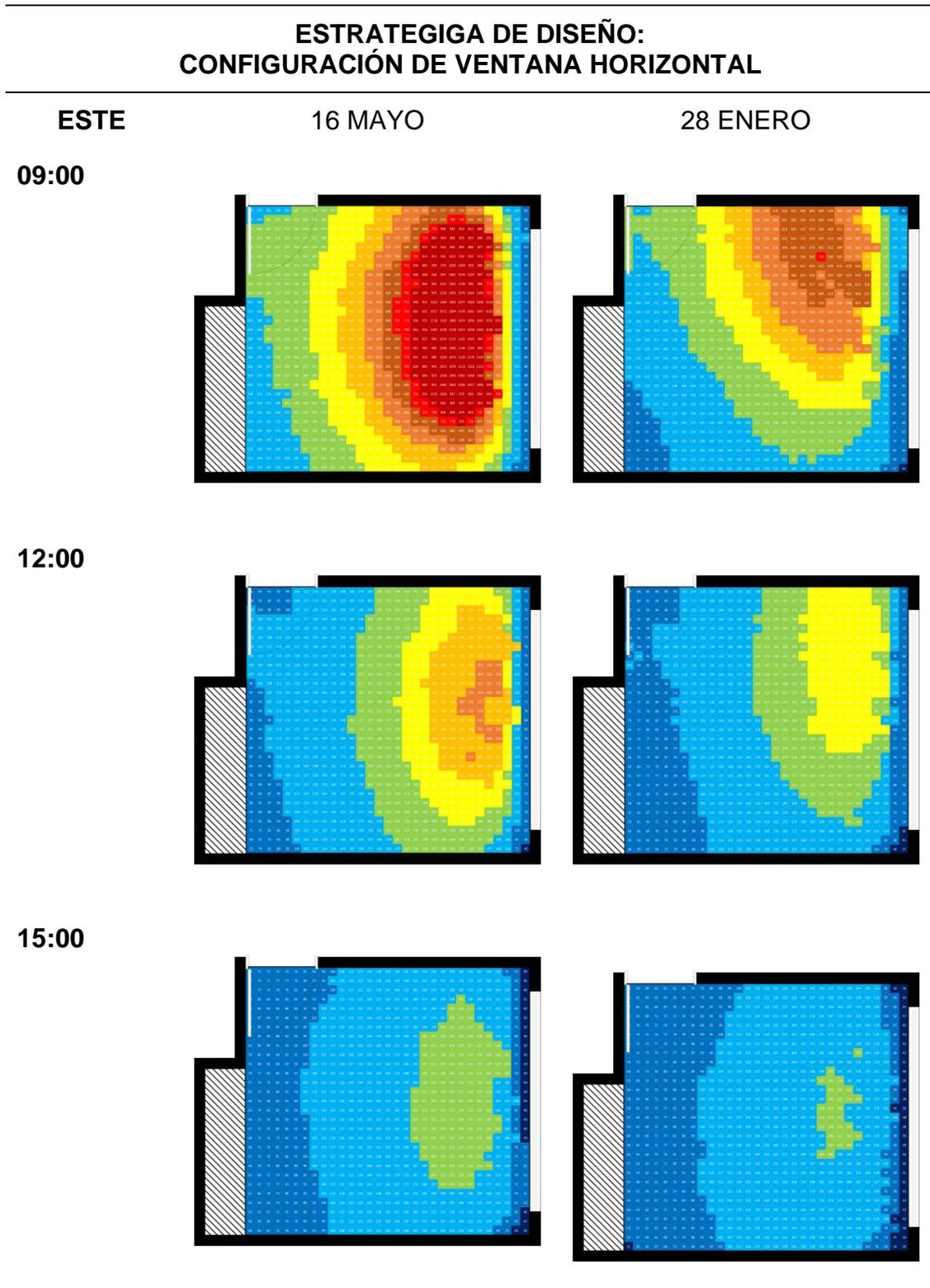
Nota. Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Tabla B34. Mapa de distribución de iluminancia.



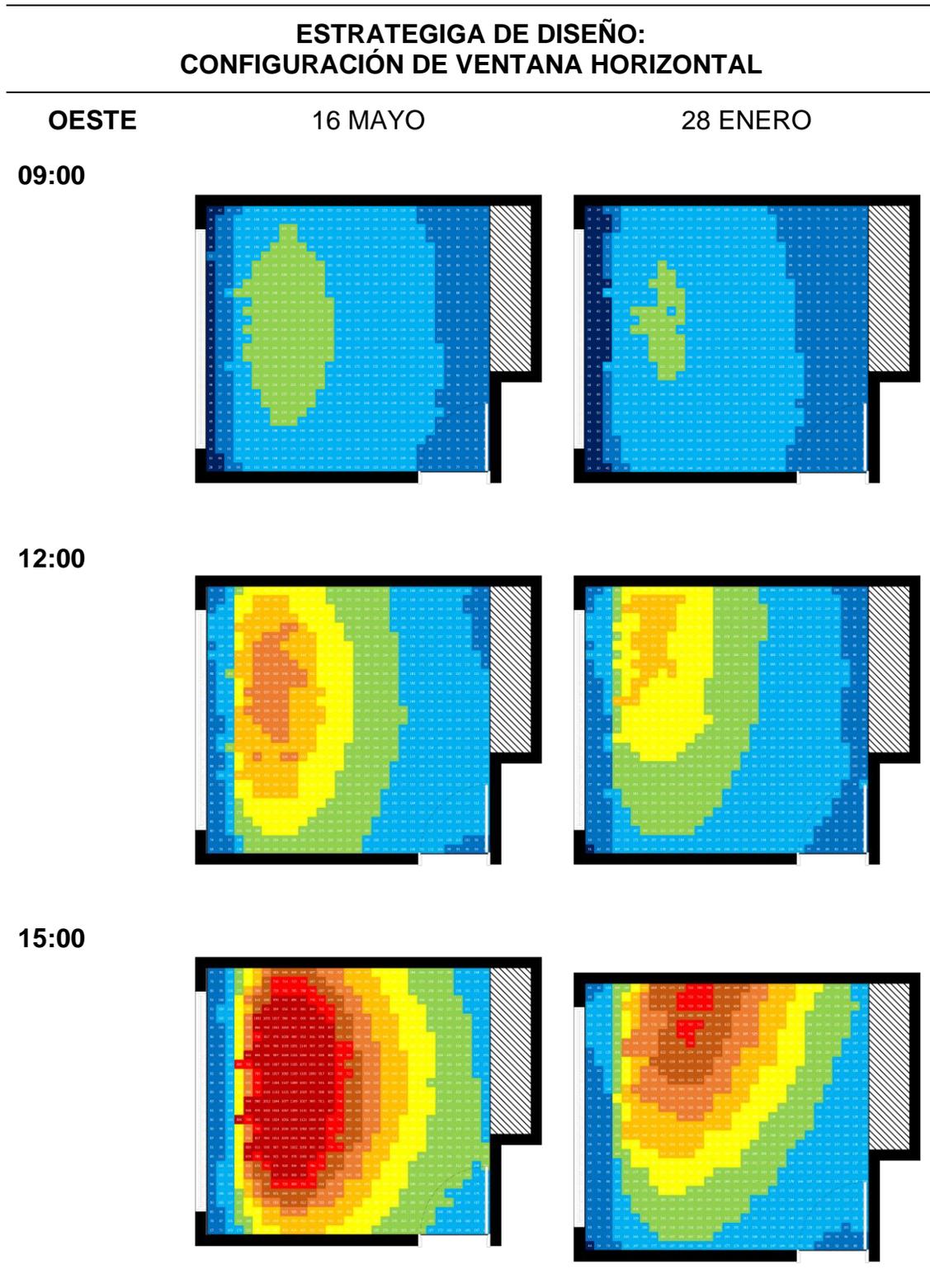
Nota. Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Tabla B35. Mapa de distribución de iluminancia.



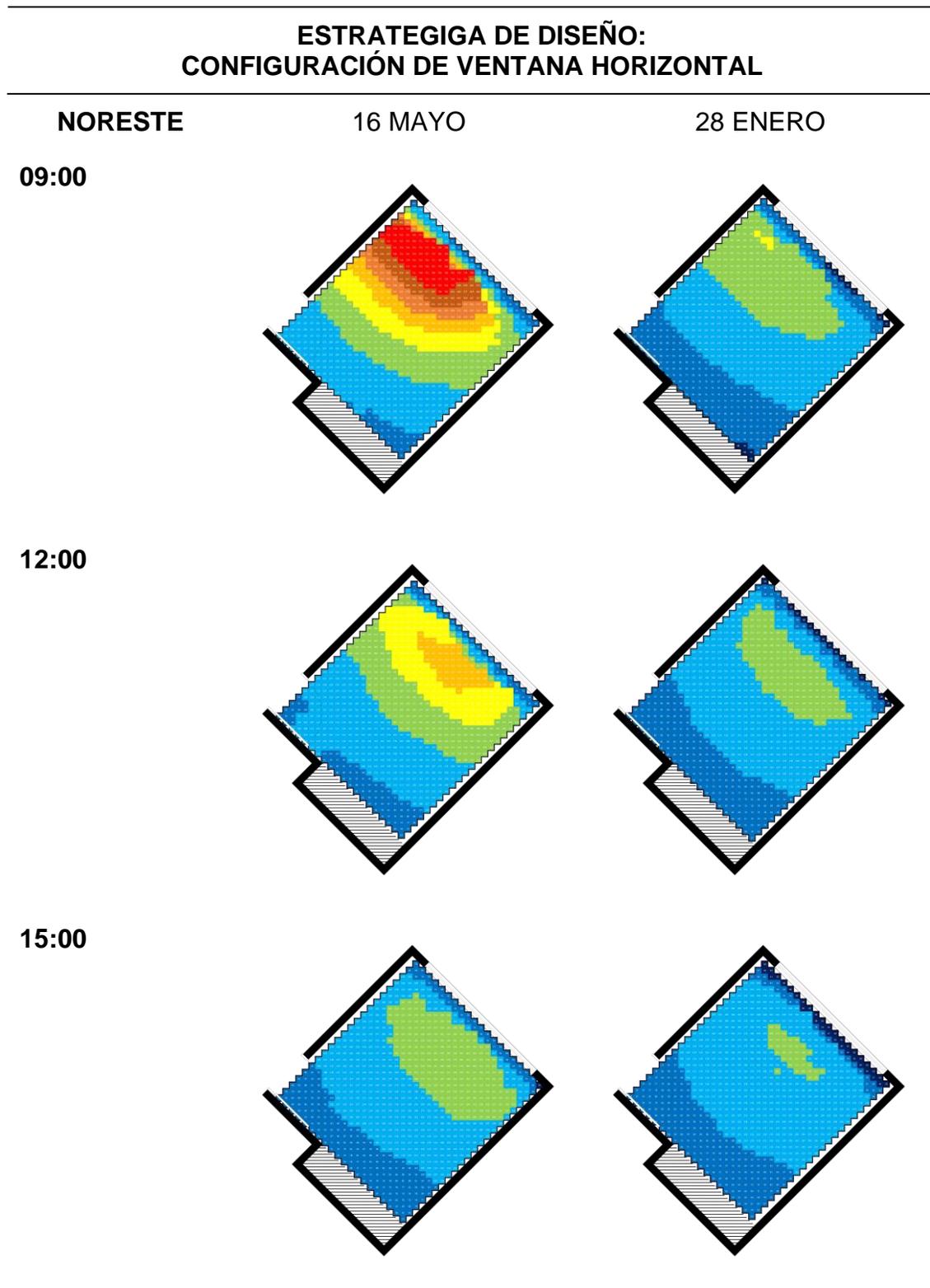
Nota. Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Tabla B36. Mapa de distribución de iluminancia.



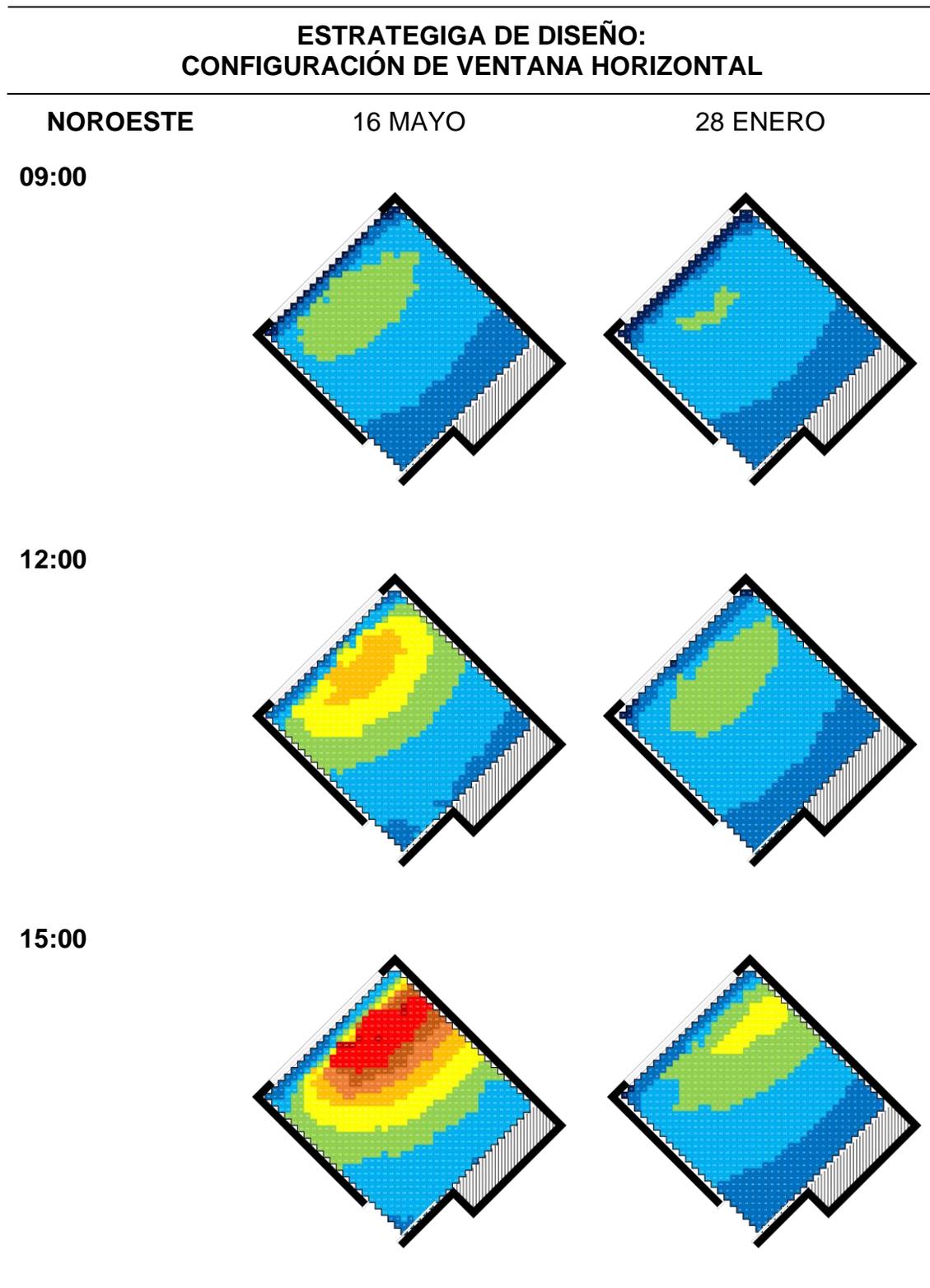
Nota. Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Tabla B37. Mapa de distribución de iluminancia.



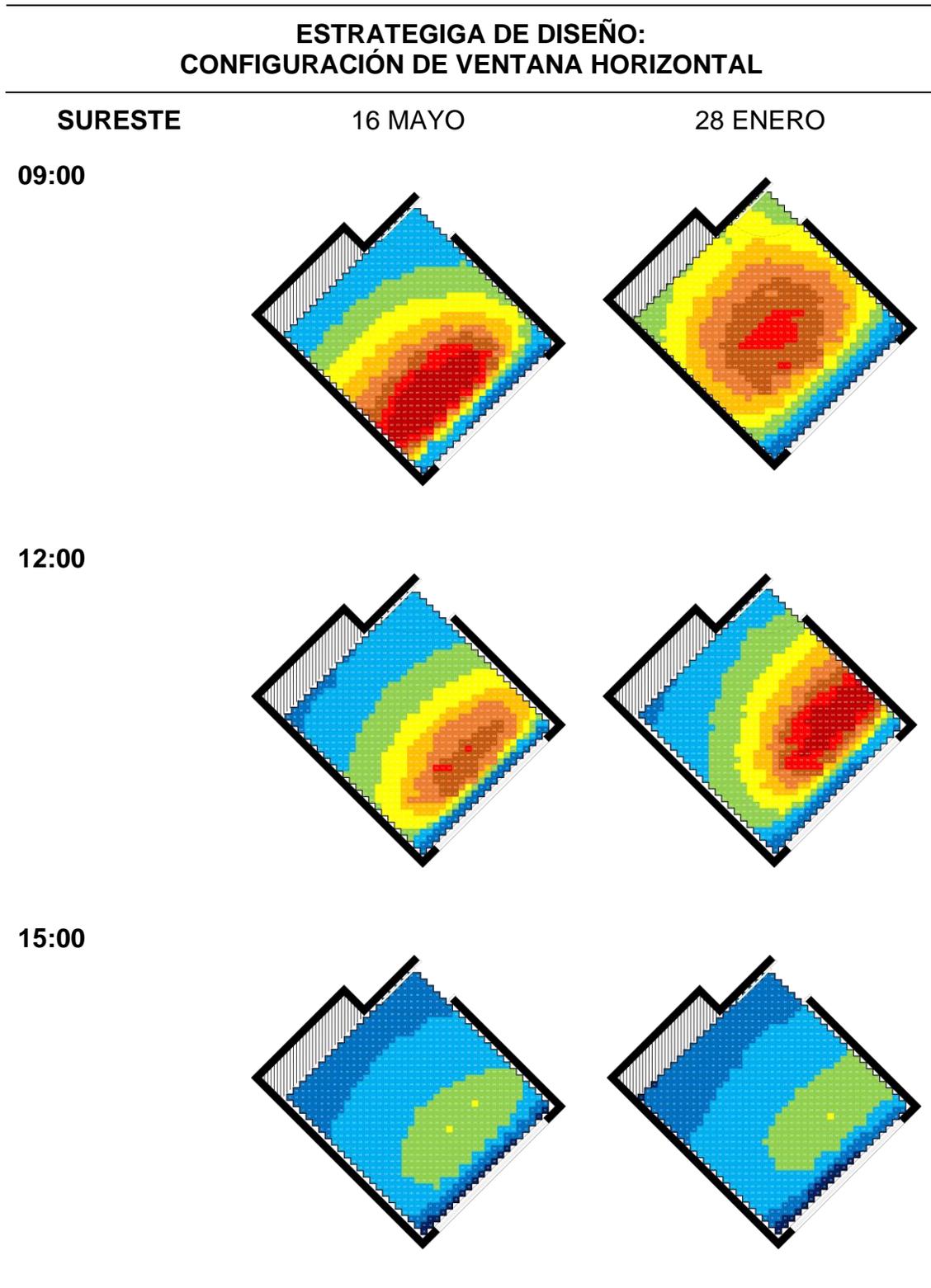
Nota. Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Tabla B38. Mapa de distribución de iluminancia.



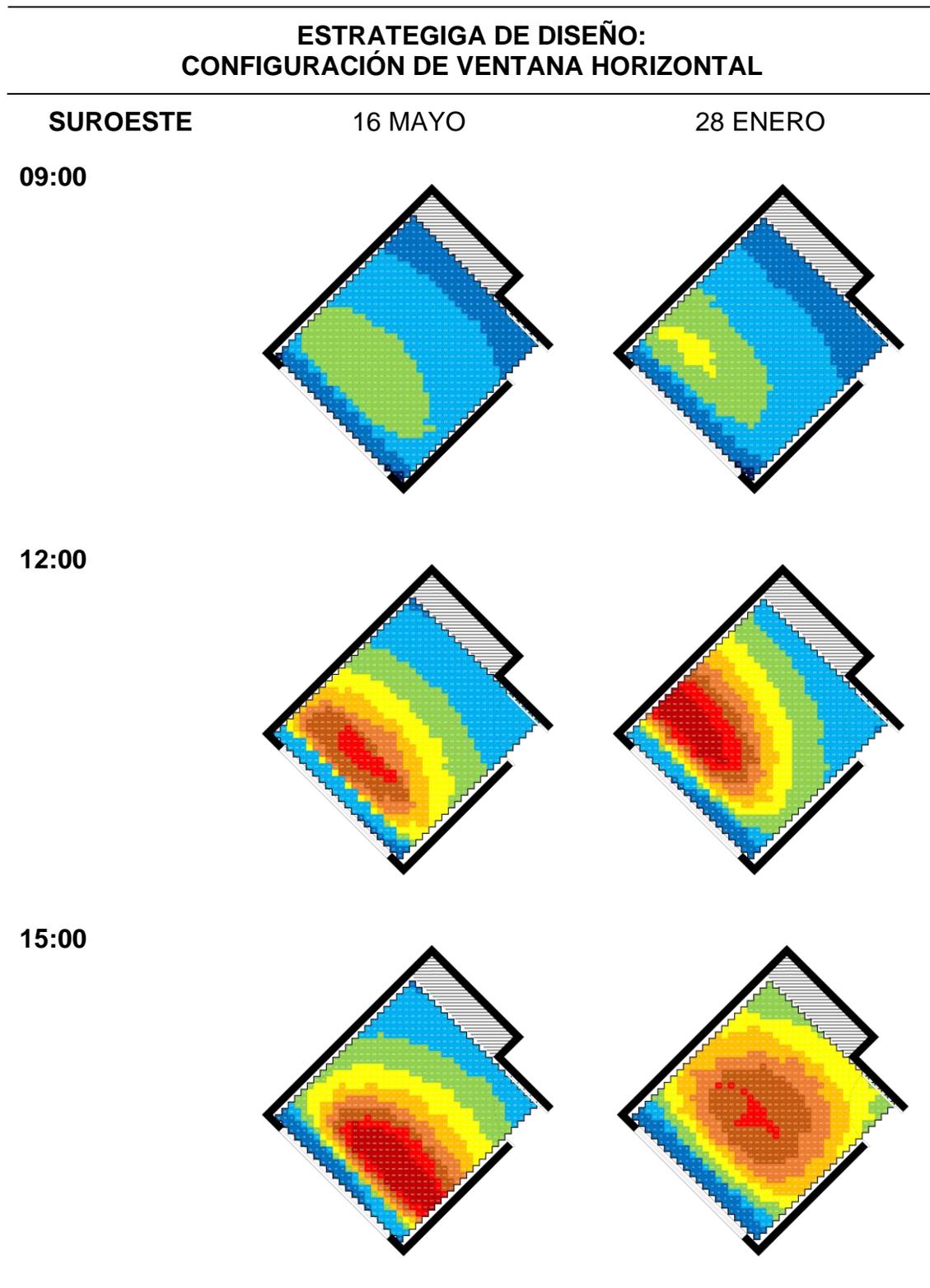
Nota. Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Tabla B39. Mapa de distribución de iluminancia.



Nota. Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder

Tabla B40. Mapa de distribución de iluminancia.



Nota. Elaboración propia a partir de simulación en Design Builder