



FACULTAD de
ARQUITECTURA
CONSTRUCCIÓN
y DISEÑO
UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO

Tesis para optar al grado de
Magíster en Hábitat Sustentable y Eficiencia Energética

Impacto de los cortasoles verticales en la velocidad de viento y la distribución del flujo de aire interior en función de modelos de confort térmico adaptativo.

Nombre tesista:

Marzo, 2022

Daniel Bedoya Vásquez

Prof Guía: Laura Marín Restrepo

Prof Co-Guía: Nelson Arias Jiménez



MAGÍSTER EN
HÁBITAT SUSTENTABLE Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

5 Años

Qualitas
PROGRAMA ACREDITADO

Desde el 07 de diciembre de 2017
Hasta el 07 de diciembre de 2022

SEDE Concepción MODALIDAD Presencial

Resumen

Resumen

Las ciudades tropicales cuentan durante todo el año con altos niveles de radiación solar sobre las superficies edificadas, lo cual solo se ve condicionado por el factor de nubosidad propio del clima de cada región específica. Debido a esto, la arquitectura tropical ha adoptado un lenguaje propio, empleando dispositivos de sombreado que disminuyen la incidencia directa del sol en vanos y paños vidriados, controlando de esta forma el ingreso de la radiación solar directa en los espacios habitables. Sin embargo, aunque estos dispositivos protegen del impacto del sol, afectan directamente el desempeño de la ventilación natural, que pudiese aplicarse como estrategia pasiva para acondicionar ambientes interiores, especialmente en climas templados húmedos, donde las temperaturas exteriores permiten su aplicación durante todo el año. El objetivo de esta investigación es analizar el impacto de los dispositivos verticales de sombreado exterior en la distribución de la velocidad del viento interior, tomando como contexto de estudio el clima templado húmedo de la ciudad de Medellín, Colombia. La evaluación de desempeño se realizó a partir del modelo de confort térmico adaptativo ASHRAE 55 de 2017, el cual permitió establecer la incidencia de las variables de diseño de los dispositivos de sombra en la ventilación natural resultante y por defecto en el confort térmico interior.

Para alcanzar el objetivo, primero se analizaron dispositivos de sombra comerciales, identificando las variaciones de longitud de los cortasoles. A partir de esto, se determinó una relación fija de separación entre cortasoles y longitud del cortasol de 0.5, con el fin de asumir unas condiciones de exposición solar constantes. Se empleó la simulación de CFD para determinar la variación de la velocidad del viento y su distribución al interior del espacio. Estas velocidades se asumieron como un caudal fijo durante todo el año para simular el comportamiento térmico, para su posterior evaluación bajo el modelo de confort térmico adaptativo.

Los resultados muestran que para una velocidad exterior de 2.45 m/s, la distribución y las velocidades de viento interior se ven afectadas por la densidad de dispositivos en fachada, a menor separación entre dispositivos, mayor fricción y menor ingreso de viento. El impacto sobre el confort térmico a partir de las velocidades del viento obtenidas se ve afectado por el aumento del rango de temperatura de confort, descrito por el modelo ASHRAE 55 de 2017 (1.2°C para una velocidad de 0.6 m/s), con un aumento de alrededor de 876 horas anuales de confort térmico. Sin embargo, el impacto

Resumen

del caudal de viento obtenido sobre las temperaturas operativas del espacio presenta una baja afectación sobre el confort, alrededor de 87 horas anuales dentro del rango. En función de estos resultados se plantean criterios de diseño arquitectónico, determinando una eficiencia del dispositivo en función del área libre para ventilación natural y un distanciamiento mínimo entre dispositivos de sombreado, generando un atributo adicional al diseño de sombreado exterior como estrategia pasiva de confort térmico.

Palabras claves: *Cortasoles verticales, ventilación natural, clima tropical, Confort térmico adaptativo, CFD.*

Abstract

Abstract

Tropical cities have high levels of solar radiation on building facades throughout the year. Consequently, tropical architecture uses shading devices to reduce solar exposure in openings and glazed panels for controlling direct solar radiation into spaces. However, while these devices protect from the sun, they affect the natural ventilation that could be applied as a passive cooling strategy, especially in humid temperate climates where outdoor temperatures favour their use throughout the year.

This paper aims to analyse the impact of vertical solar shading on indoor thermal comfort based on its effect on airspeed and airflow distribution in the humid temperate climate of Medellín (6.25°N), Colombia. The evaluation was based on the ASHRAE-55 adaptive thermal comfort model to establish the incidence of shading devices on natural ventilation and therefore, on indoor thermal comfort.

First, commercial shading devices were analysed, identifying the variation in their lengths. Based on this, a fixed ratio of 0.5 between the solar shading spacing and its length was determined to adopt similar solar radiation conditions. Five configurations of solar shading spacing/length were defined. Then, CFD simulation was used to establish the airspeed variation and its distribution within a space. Finally, these speeds were assumed as a fixed airflow throughout the year for simulating thermal performance, which was then analysed under the adaptive thermal comfort model.

The results show that for an outdoor speed of 2.5 m/s, the airflow distribution and speed are affected by the density of the solar shading, the lower the separation between devices, the higher the friction and the lower the entry of wind. Thermal simulations with the airflow estimated show a slight change in operating temperatures is identified, increasing comfort hours by about 1-2% per year, being higher in the configuration with the longest spacing. Moreover, when considering the effect of air speeds on thermal comfort as described by ASHRAE 55 (1.2°C for a speed of 0.6 m/s) hours in comfort decrease around 9% per year in the configuration with the smallest spacing.

Based on these results, an efficiency for the solar shading is suggested in function on the free area for natural ventilation and a minimum spacing between shading devices. This is expected to be useful as an input for solar shading design as a passive strategy in humid temperate climates, considering not only solar protection but also natural ventilation.

Abstract

Keywords: *vertical solar shading, shading devices, natural ventilation, tropical climate, adaptive thermal comfort, CFD*

Índice

Índice general

Resumen	i
Abstract.....	iii
Índice general.....	v
Índice de tablas	viii
Índice de figuras	ix
Estructura de la tesis	xi
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Problema de investigación.....	2
1.3. Preguntas e hipótesis de investigación	3
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos.....	3
1.5. Síntesis de la metodología de investigación.....	4
Capítulo 2. Marco Teórico	6
2.1. Ventilación natural y confort térmico en clima tropical	6
2.2. Dispositivos de protección solar	9
2.3. Impacto de elementos en fachada en el viento interior	11
2.4. Marco normativo cortasoles y ventilación natural.....	14
2.4.1. Certificación Edge (Sistema de certificación internacional)	14
2.4.2. Código técnico de las edificaciones (CTE España)	15
2.4.3. Energy conservation building code (ECBC India).....	16
2.4.4. Política pública de construcción sostenible del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (Política pública local)	18

Índice

2.4.5. Decreto 1285 de 2015 (Normativa nacional).....	18
2.4.6. Guía de criterios ambientales para el diseño y construcción de vivienda urbana del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (guía nacional).	19
Capítulo 3. Metodología	20
3.1. Caso de estudio	20
3.2. Metodología general.....	22
3.3. Objetivo específico 1: Caracterización de los dispositivos de sombreado exterior.....	24
3.3.1. Revisión de catálogos comerciales.....	24
3.3.2. Revisión de proyectos.....	24
3.3.3. Diseño de experimento.....	25
3.4. Objetivo 2: Análisis del impacto de los dispositivos de sombreado en la ventilación natural	26
3.4.1. Simulación CFD.....	30
3.4.2. Lectura de resultados velocidad del viento interior.....	31
3.4.3. Definición de caudales de ventilación para el análisis de confort térmico.	32
3.5. Objetivo 3 Simulación térmica y evaluación sobre el modelo de confort térmico adaptativo	32
3.5.1. Simulación térmica	32
3.5.2. Evaluación de confort térmico adaptativo y lectura de resultados	33
Capítulo 4. Resultados	35
4.1. Caracterización de dispositivos	35
4.1.1. Revisión de implementación de dispositivos de sombreado en proyectos de arquitectura	35
4.1.2. Revisión de catálogos comerciales.....	36
4.2. Resultados del viento interior	39
4.2.1. Ventilación unilateral	39
4.2.2. Ventilación cruzada	41

Índice

4.3. Confort térmico adaptativo	45
4.4. Recopilación de resultados	48
4.5. Criterios de diseño	52
4.5.1. Sobre la orientación	52
4.5.2. Sobre la geometría y las características físicas	54
Capítulo 5. Discusión y conclusiones	56
5.1. Sobre la hipótesis y los objetivos	56
5.2. Implicaciones teóricas y prácticas.....	58
5.3. Limitaciones del estudio	60
5.4. Futuras investigaciones.....	60
Referencias bibliográficas	62
Anexo A. Cálculo de velocidades ponderadas por área (Ventilación cruzada).....	67
Anexo B. Graficación de temperaturas y confort térmico adaptativo anual	73

Índice

Índice de tablas

Tabla 1. Valores de SHGC Equivalente máximo para cada fachada del clima templado localizado en la franja tropical (para latitudes menores a 15°norte).	16
Tabla 2. Coeficientes de sombreado equivalente para latitudes menores a 15°Norte para dispositivos de sombreado verticales	17
Tabla 3. Planilla de clasificación de proyectos.....	25
Tabla 4. Escenarios de simulación.....	28
Tabla 5. Valores de la solución de envolvente térmica para el caso base de estudio	33
Tabla 6. Aumento del rango de temperatura de confort en función de la velocidad promedio interior (ASHRAE, 2017).	34
Tabla 7. Revisión de proyectos de arquitectura.....	35
Tabla 8. Implementación de lamas verticales en proyectos revisados, según uso de la edificación..	36
Tabla 9. Revisión de dispositivos de sombreado vertical en catálogos comerciales	37
Tabla 10. Valores de longitud y distanciamiento de los dispositivos de sombreado.....	39

Índice

Índice de figuras

Figura 1. Ángulos VSF y HSF para protectores horizontales y verticales	19
Figura 2. Rangos de oscilación de temperatura exterior anual por hora para la ciudad de Medellín.	20
Figura 3. Niveles de radiación solar para la ciudad de Medellín.	21
Figura 4. Rangos de temperatura de confort térmico adaptativo ASHRAE 55 para la ciudad de Medellín.	22
Figura 5. Metodología general.....	23
Figura 6. Categorización de dispositivos	24
Figura 7. Geometría base, caso de estudio para ventilación cruzada.....	27
Figura 8. Geometría base, caso de estudio para ventilación unilateral.....	27
Figura 9. Definición de variables de dirección del viento exterior para las fachadas analizadas con ventilación cruzada.	28
Figura 10. Definición de variables de dirección del viento exterior para las fachadas analizadas con ventilación unilateral	28
Figura 11. Dimensiones del túnel de viento en función del valor H, basada en Kosutova et al (2019)	30
Figura 12. Datos de velocidad y dirección del viento medidos en la estación meteorológica tomada de Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM (2018).	31
Figura 13. Implementación de dispositivos de sombreado exterior en los proyectos revisados.....	36
Figura 14. Definición de la variable dependiente “D” distanciamiento entre elementos.....	39
Figura 15. Resultados de velocidad interior de viento según dirección predominante de viento para las variaciones de cortasoles verticales para la estrategia de ventilación unilateral.	40
Figura 16. Resultados de velocidad interior de viento según dirección predominante de viento para las variaciones de cortasoles verticales para la estrategia de ventilación cruzada.....	42
Figura 17. Velocidades ponderadas de viento interior para las 5 direcciones de viento predominante y las distintas configuraciones de cortasoles.	44

Índice

Figura 18. Renovaciones de aire por hora de los escenarios simulados para la estrategia de ventilación cruzada.	45
Figura 19. Confort térmico espacial según velocidades de viento interior. Los resultados corresponden a el porcentaje del espacio que se encuentra por encima del 80% de horas anuales de confort térmico bajo el modelo adaptativo ASHRAE 55.....	46
Figura 20. Comparativo de confort térmico espacial para ventilación cruzada	47
Figura 21. Recopilación de resultados para la orientación 1 – Dirección predominante Norte, todas las configuraciones de cortasoles.	48
Figura 22. Recopilación de resultados para la orientación 2 – Dirección predominante Noreste, todas las configuraciones de cortasoles.	49
Figura 23. Recopilación de resultados para la orientación 3 – Dirección predominante Este, todas las configuraciones de cortasoles.	50
Figura 24. Recopilación de resultados para la orientación 4 – Dirección predominante Noreste, todas las configuraciones de cortasoles.	51
Figura 25. Recopilación de resultados para la orientación 5 – Dirección predominante Sur, todas las configuraciones de cortasoles.	52
Figura 26. Recomendación de orientación de elementos para la dirección crítica del viento	53
Figura 27. Direcciones de viento predominante óptimas según los resultados obtenidos para ventilación cruzada.	54
Figura 28. Direcciones de viento predominante con mejor desempeño según los resultados obtenidos para ventilación unilateral.	54
Figura 29. Recomendaciones de configuración geométrica para los cortasoles verticales	55

Estructura de la tesis

Estructura de la tesis

La tesis se estructura bajo 5 capítulos principales: Introducción, Marco teórico, Metodología, Resultados y Conclusiones.

El capítulo 1 presenta la introducción, incluyendo en primer lugar un contexto general de la investigación como el contexto climático de las ciudades tropicales en función de las condiciones ambientales características del trópico y las estrategias pasivas que emplea la arquitectura para mitigar las afectaciones del clima en los espacios interiores. A partir de esto se presenta, en segundo lugar, la problemática de la investigación, en función de la falta de información en especial en normativas y estándares de referencia sobre los impactos que se pueden generar en las condiciones de viento interior para confort térmico a partir de los elementos de protección solar. En tercer lugar se plantea los objetivos de la investigación y para finalizar se presenta una breve descripción de la metodología empleada para lograr los objetivos planteados.

El capítulo 2 presenta el marco teórico de la investigación, estructurándose bajo 4 temas principales. En primer lugar, la ventilación natural y confort térmico en climas tropicales, en segundo lugar, los dispositivos de protección solar, en tercer lugar, el impacto de elementos en fachada en el desempeño térmico interior y por último el marco normativo sobre cortasoles y ventilación natural, teniendo en cuenta los estándares de referencia y normativa tanto nacional como internacional empleada en Colombia para análisis de desempeño ambiental.

El capítulo 3 presenta la metodología empleada en la investigación, estructurada según los objetivos específicos planteados y definiendo las actividades para lograr cada objetivo. Se divide en cinco capítulos principales, en primer lugar, define el caso de estudio y el contexto climático de la investigación. En segundo lugar, se plantea una metodología general de la investigación. Por último el tercer, cuarto y quinto capítulo corresponden a los objetivos específicos de la investigación: Caracterización de los dispositivos de sombreado exterior, análisis del impacto de los cortasoles verticales en la ventilación natural y simulación térmica y evaluación bajo el modelo de confort térmico adaptativo.

El capítulo 4 presenta los resultados de la investigación, estructurándose de la siguiente forma: los tres primeros capítulos corresponden a los resultados obtenidos de los objetivos específicos, caracterización de cortasoles, impacto sobre la ventilación y evaluación bajo el modelo de confort

Estructura de la tesis

térmico adaptativo. Se presenta un cuarto capítulo correspondiente a la recopilación de resultados y un quinto capítulo que corresponde a los criterios de diseño de cortasoles verticales en función del impacto sobre la ventilación natural interior.

Para finalizar el capítulo 5 corresponde a las conclusiones de la investigación, se estructura bajo cuatro temas principales, en primer lugar, se plantean las conclusiones sobre la hipótesis y los objetivos de la investigación. En segundo lugar, se plantean conclusiones sobre las implicaciones teóricas y prácticas, incluyéndose el análisis sobre el marco teórico de la investigación. En tercer lugar, se plantean las limitaciones del estudio. Por último, en cuarto lugar, se plantean las futuras investigaciones.

Capítulo 1. Introducción

Capítulo 1. Introducción

1.1. Antecedentes

La arquitectura en las ciudades ubicadas en el trópico debe responder a unas condiciones constantes de altos niveles de radiación solar en las superficies, debido a que el clima en estas ciudades no cuenta con unas variaciones estacionales en el año (J. C. Gamero-Salinas et al., 2020) y la variación de la radiación solar se ve afectada en mayor intensidad solo por el factor de la nubosidad del clima del lugar y la posición relativa del sol en el rango horario. Por otro lado, la temperatura estable a lo largo del año permite que los edificios empleen estrategias de ventilación natural para disminuir consumos de energía para refrigeración artificial y generar condiciones de confort al interior de los espacios (J. Gamero-Salinas et al., 2021), siendo una de las estrategias pasivas más empleadas en estos climas (Aflaki, Mahyuddin, & Mahmoud, 2015).

Gracias a esto, la concepción de los edificios en este contexto climático involucra en primer lugar estrategias de ventilación natural para climatizar pasivamente los espacios interiores (Haase & Amato, 2009), siendo una de las estrategias pasivas más determinantes para el desempeño térmico del edificio (Aflaki, Mahyuddin, & Mahmoud, 2015) y en segundo lugar, dispositivos de sombreado exterior para evitar el sobrecalentamiento a través de las superficies vidriadas expuestas a la alta radiación y evitar el ingreso de radiación directa que genere molestias visuales en el plano de trabajo, generando reducciones de hasta un 80% de ganancia solar directa (Mirrahimi et al., 2016).

Sin embargo, estos dispositivos de sombreado exterior pueden afectar negativamente la ventilación y el clima interior, ya que su porosidad puede generar una resistencia adicional a la transferencia de masa, calor y momento (Santolini et al., 2019), modificando significativamente el flujo del aire al interior de los edificios climatizados naturalmente. Esto implica una reducción en la velocidad del viento, una variación en la distribución del flujo de aire en el espacio y una variación a la temperatura del aire que es altamente dependiente de los dispositivos de sombreado (Lee et al., 2015). Si no se considera desde el diseño, todo lo anterior, puede derivar en una disminución del confort térmico de los ocupantes en climas tropicales con alto porcentaje de humedad relativa, donde se depende altamente de la velocidad del viento para disminuir la sensación térmica de los ocupantes como estrategia pasiva de climatización (Pomponi et al., 2017).

Capítulo 1. Introducción

1.2. Problema de investigación

La protección a la radiación solar de la arquitectura a partir de elementos como los cortasoles verticales, representa una de las estrategias más usadas en los climas tropicales, debido a las condiciones de exposición a los altos niveles de radiación solar de las fachadas de los edificios, sin embargo, se desconoce el impacto que estos cortasoles tienen sobre el desempeño de la ventilación natural interior en función del confort térmico, siendo esta una de las estrategias pasivas más pertinentes en los climas tropicales, debido a su efectividad en términos de ahorro energético y confort térmico, en especial en el clima templado húmedo de la ciudad de Medellín.

Las normativas y los sistemas de certificación locales que normalmente se emplean en los análisis de estrategias pasivas en Colombia no suelen tener en cuenta el impacto de los dispositivos de sombreado en función de la ventilación natural, puesto que integran solo la variable de radiación solar para su análisis. El Código técnico español define y clasifica los dispositivos de sombreado y plantea el cálculo teórico del Factor de sombra modificado (Ministerio de Transporte Movilidad y Agenda Urbana, 2020), el ECBC de India, define el cálculo para el SHGC equivalente, teniendo en cuenta no solo el coeficiente de ganancia solar del vidrio, si no la equivalencia de los dispositivos de sombra, este Código plantea exigencias para latitudes entre 0° y 15°N (Kumar et al., 2009), siendo posible una homologación con la ciudad de Medellín, solo en términos de mecánica solar. El Sistema de certificación Edge, uno de los más utilizados en Colombia, clasifica los dispositivos de sombreado y plantea el cálculo teórico de la radiación solar transferida (EDGE User Guide 2, 2019), sin embargo no define su afectación a la ventilación natural y limita su análisis solo en función del área de abertura libre para ventilar naturalmente los espacios. El decreto 1285 de 2015, define lineamientos para la reducción de agua y energía en la construcción en Colombia, dentro de estos lineamientos clasifica los dispositivos de protección solar solo en función del ángulo resultante entre la extensión del elemento y la fachada y basados en este ángulo define la efectividad del dispositivo de sombreado (Decreto 1285, 2015), sin embargo no se mencionan estrategias para mitigar el impacto de los elementos de protección solar sobre la ventilación natural interior.

El impacto de elementos en fachada sobre la ventilación natural y el confort térmico ha sido ampliamente estudiado, estas investigaciones se han centrado en dispositivos como balcones o aleros horizontales (Amini et al., 2021)(Izadyar et al., 2020)(Montazeri & Blocken, 2013), lamas horizontales en función de su ubicación en fachada y no de su composición geométrica (Kosutova et al., 2019) y elementos de doble fachada en función de la reducción de cargas de refrigeración según el flujo de

Capítulo 1. Introducción

viento en el espacio intermedio (Nishikawa et al., 2020). Sin embargo el impacto del sistema de cortasoles verticales en fachada y su composición geométrica, sobre la ventilación natural y el confort térmico en climas tropicales ha sido poco estudiado generándose así una brecha de desempeño desde el diseño de estrategias pasivas de confort térmico y ahorro energético, desconociendo el resultado global de la implementación la la protección solar.

1.3. Preguntas e hipótesis de investigación

De acuerdo con lo anterior surgen como preguntas de investigación, ¿cuánto disminuyen las velocidades del viento en función del área libre en fachada?, ¿el impacto de esas velocidades del viento disminuye las horas anuales de confort térmico en el espacio?, ¿a partir de la dirección predominante del viento y el área libre de abertura en fachada se puede determinar la eficiencia de los cortasoles verticales en función de la velocidad del viento interior para alcanzar el confort térmico? En función de estas preguntas se plantea como hipótesis que la densidad de los cortasoles en fachada genera altas disminuciones de velocidad interior del viento, lo que deriva en una afectación directa de las horas de confort al año bajo el modelo adaptativo del estándar ASHRAE 55.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Analizar el impacto que tienen los cortasoles verticales en la velocidad y distribución de flujo de viento en edificios climatizados naturalmente en climas templado húmedo como el de la ciudad de Medellín, evaluando su efecto en el confort térmico interior bajo el modelo adaptativo ASHRAE 55, con el fin de determinar una eficiencia de la ventilación natural del dispositivo en función de las características físicas y geométricas del elemento y generando criterios de diseño para la protección solar en la arquitectura.

1.4.2. Objetivos específicos

- 1. Caracterizar los cortasoles verticales más comunes en climas templados húmedos, identificando sus dimensiones de longitud, separación entre elementos, distancia entre el elemento y la fachada, ángulo de la normal del elemento con respecto a la fachada y uso predominante.
- Cuantificar el impacto que tienen los cortasoles verticales exteriores sobre la ventilación natural interior, determinando variaciones en las velocidades interiores ponderadas, distribución de velocidades de viento en el espacio y renovaciones de aire por hora.

Capítulo 1. Introducción

- Evaluar el desempeño de los cortasoles verticales en las horas de confort térmico interior, considerando el modelo de confort térmico adaptativo ASHRAE 55, según las variaciones en la velocidad y distribución del aire que generan los cortasoles verticales.
- Definir eficiencia de los dispositivos de sombreado exterior en función de la ventilación natural y el confort térmico adaptativo con el fin de generar criterios de diseño de la ventilación natural de edificios con estrategias de protección solar y plantear insumos que permitan conocer el funcionamiento global de los dispositivos de sombreado.

1.5. Síntesis de la metodología de investigación

La metodología que se empleó en esta investigación es de carácter cuantitativa-experimental y se divide en cuatro etapas relacionadas a cada objetivo específico, determinando actividades con el fin de alcanzar los objetivos planteados. En primer lugar, se caracterizaron los cortasoles verticales en función de su aplicabilidad en el medio con una revisión de proyectos representativos, catálogos comerciales que determinaron dimensiones estándares de los cortasoles y una revisión normativa que permitió enmarcar los cortasoles verticales en estándares tanto locales como internacionales y encontrar vacíos en el conocimiento. A partir de esta caracterización se plantea una geometría base según las exigencias para edificios ventilados naturalmente del sistema de certificación Edge y se definió la variable independiente del experimento con 5 variaciones de cortasoles verticales comerciales, cada uno con un distanciamiento específico según el cálculo de ganancia solar equivalente que se asumió fija para cada una de las variaciones de cortasoles.

En segundo lugar, se cuantificó el impacto de los cortasoles verticales en las velocidades de viento interior y su distribución espacial, a partir del software CFD de Autodesk, que permitió proyectar el comportamiento del caso base de modelación según la variación de cortasoles verticales. En función de estos resultados se obtiene una velocidad ponderada de aire interior que se traduce en renovaciones de aire fija para el análisis de simulación térmica que posteriormente determinará el indicador anual de horas de confort térmico adaptativo ASHRAE 55 de cada una de las variaciones de cortasoles verticales.

Los resultados se analizaron en función de las velocidades de viento interiores y el confort térmico espacial producto de las velocidades y las temperaturas resultantes, analizando porcentaje del espacio que se encuentra por encima del 80% de horas anuales de confort térmico adaptativo

Capítulo 1. Introducción

cumpliendo con el modelo ASHRAE 55. Para finalizar se plantean criterios de diseño de cortasoles verticales según afectación del confort térmico interior y la distribución de velocidades interiores.

Capítulo 2. Marco teórico

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. Ventilación natural y confort térmico en clima tropical

Se analizaron investigaciones sobre confort térmico en clima tropical, sin embargo, al ser este un tema ampliamente estudiado, se acotó la búsqueda de información solamente a los que involucraran temas sobre ventilación natural en los edificios. También se analizaron climas que, si bien no son tropicales, tienen condiciones de altas temperaturas como los climas cálidos y húmedos subtropicales.

Zune y compañía estudiaron el diseño pasivo vernacular para confort térmico en el clima tropical de Myanmar. Definen que el clima tropical se caracteriza por alta humedad, alta temperatura e intensa insolación; por lo tanto, la vivienda tropical tradicional depende predominantemente de la ventilación natural y el enfriamiento pasivo para el confort térmico. A partir de esto encontraron en su momento un vacío en el conocimiento sobre la vivienda vernácula en Myanmar en especial a lo referente a las condiciones del cambio climático. La investigación revisó las técnicas de diseño pasivo utilizadas en las casas vernáculas de Myanmar para lograr el confort térmico. Se evaluaron utilizando métodos de diseño experimental a partir de simulaciones en el clima típico y en escenarios futuros para Myanmar y concluyeron que las estrategias de diseño pasivo vernáculo de las viviendas no son suficiente para los escenarios futuros de cambio climático. En lo referente a ventilación natural e infiltraciones mencionan que La protección contra vientos fuertes y la prevención del crecimiento de moho es una prioridad en la vivienda de Myanmar. Por lo tanto, el diseño de la ventilación es necesario para proporcionar salud confort térmico. Debido a las influencias culturales y los requisitos de seguridad, las ventanas y las puertas funcionan de diferentes modos todos los días. Los respiraderos a dos aguas y las aberturas entre las secciones del techo y la pared proporcionan ventilación cruzada y ventilación impulsada por flotación para eliminar el humo de la cocina y el aire caliente de las casas, aunque las ventanas y puertas estén cerradas. Mencionan también que las viviendas vernáculas de Myanmar tienen tasas altas de infiltración de aire dado que el aire exterior ingresa a una casa a través de paredes permeables, respiraderos a dos aguas, espacios en el piso y juntas de construcción. Encontraron que la ventilación natural y el sombreado del techo en la arquitectura vernácula de Myanmar podrían haber sido un rendimiento óptimo de confort térmico en el pasado; sin embargo, el aumento de las temperaturas exteriores y los cambios en las precipitaciones provocados por el calentamiento global y el cambio climático amenazan el desempeño térmico de las viviendas de Myanmar (Zune et al., 2020).

Capítulo 2. Marco teórico

Haase & Amato estudiaron el potencial de la ventilación natural y la orientación del edificio para lograr el confort térmico en climas cálidos y húmedos. Para esto, emplearon simulaciones dinámicas en climas tropicales, subtropicales y templados, investigaron el impacto de la ubicación del edificio, el clima y la orientación en el confort térmico y encontraron que en un clima tropical la mejora del confort por ventilación natural oscila entre el 9% y el 41%, para un clima subtropical las mejoras varían entre 3% y 14% y en un clima templado las mejoras varían entre 8% y 56%. Concluyeron que la ventilación natural tiene un alto potencial en climas tropicales y templados y no en climas subtropicales (Haase & Amato, 2009).

Aflaki y compañía en el 2015 descubrieron en su investigación que “la ventilación natural es la técnica dominante en los edificios tropicales en comparación con otras estrategias de diseño pasivo. Sin embargo, la falta de cambio de temperatura entre el día y la noche, los altos niveles de humedad y la persistencia de la nubosidad limitan el uso de la ventilación natural como estrategia predominante en las regiones tropicales” (Aflaki, Mahyuddin, Al-Cheikh Mahmoud, et al., 2015). Encontraron que la ventilación natural en climas tropicales es efectiva en las edificaciones cuando se han tomado medidas de diseño que limitan la absorción de calor del entorno exterior. También determinaron bajo la revisión de estudios sobre las regiones tropicales que los conductos de ventilación, la relación ventana-pared y la relación ventana-piso, la posición y orientación del edificio son las estrategias pasivas más importantes para producir una ventilación natural eficaz (Aflaki, Mahyuddin, & Mahmoud, 2015).

Ahmed y compañía en el 2021 estudiaron la capacidad de la ventilación natural en climas cálidos de generar confort térmico, resiliencia de la ola de calor y calidad del aire interior, encontraron que la ventilación unilateral tiene muy poca capacidad de generar condiciones adecuadas de confort térmico al interior, mientras que la ventilación cruzada genera mayor impacto en términos de reducir las temperaturas de aire interior. Determinaron que los métodos actuales de ventilación natural cumplen en gran medida con los estándares de confort térmico siendo las chimeneas solares, los captadores de viento y los métodos que combinan enfriamiento por evaporación, las más efectivas ya que generan mayores tasas de ventilación, seguido de las estrategias de ventilación cruzada. La ventilación unilateral genera las condiciones más bajas de confort térmico (Ahmed et al., 2021).

Gamero y compañía en 2021 analizaron estrategias pasivas de refrigeración para disminuir el riesgo de sobre calentamiento de edificios residenciales en el clima tropical de dos ciudades,

Capítulo 2. Marco teórico

Tegucigalpa y San Pedro Sula, Honduras. Definieron que el riesgo de sobrecalentamiento se puede reducir significativamente en estos contextos tropicales utilizando únicamente estrategias de enfriamiento pasivo como medidas de adaptación al calor. Los resultados de esta investigación también mostraron que la ventilación natural, la absorción de las paredes, el coeficiente de ganancia de calor solar y los espacios semiexteriores tienen el mayor impacto en la reducción del riesgo de sobrecalentamiento en los proyectos de viviendas sociales verticales (J. Gamero-Salinas et al., 2021).

“Las ciudades con clima tropical cálido sufren generalmente de condiciones cálidas durante todo el año, lo que podría provocar un "sobrecalentamiento" de los edificios o un alto consumo de energía por refrigeración” (J. C. Gamero-Salinas et al., 2020) Gamero y compañía también analizaron el riesgo de sobrecalentamiento según tipologías de las edificaciones en Tegucigalpa, Honduras, incluyendo parámetros de exposición solar de las superficies de cubierta y propiedades térmicas de los materiales. Encontraron que el riesgo de sobrecalentamiento varía según la tipología del edificio residencial. Se descubrió que las viviendas con una exposición alta del techo y valores “U” altos en el techo tenían mayor riesgo de sobre calentamiento. Encontraron un menor riesgo de sobrecalentamiento durante las horas nocturnas, debido a la ventilación nocturna, no solo por el diseño que permite la ventilación nocturna, sino también por la necesidad del ocupante de permitir la ventilación natural en la noche para refrescarse (J. C. Gamero-Salinas et al., 2020).

En términos de metodología para análisis de ventilación natural en edificios se encontraron diversas investigaciones. Para proyectar el comportamiento del viento en la arquitectura existen las herramientas de simulación de CFD, estas permiten conocer las condiciones micro-climáticas de una zona térmica específica, creando mapas de temperatura y de distribución de flujo de viento determinando un comportamiento más detallado del espacio y sirviendo de gran apoyo a las herramientas de simulación energética como Energyplus, que brindan resultados de las zonas térmicas sin detallar su distribución espacial, siendo las herramientas de CFD de gran utilidad para los procesos de diseño (Naboni et al., 2020). Herramientas de CFD existentes en el mercado, pueden simular mapas de confort térmico a partir de la modelación de la temperatura media radiante, y mapas de velocidad y distribución del flujo de viento, dentro de estas herramientas, algunas de mayor fácil manejo y más amigables, se encuentra el CFD de Autodesk y el CFD de Designbuilder, permitiendo emplear datos de la simulación energética de Energyplus en la simulación de CFD (Naboni et al., 2020).

Capítulo 2. Marco teórico

2.2. Dispositivos de protección solar

Los dispositivos de protección solar exterior han sido ampliamente estudiados en términos del impacto sobre la ganancia solar de las superficies, ingreso de rayo de sol directo y protección de deslumbramiento en el plano de trabajo en términos de iluminación natural, siendo los dispositivos de sombreado una de las estrategias pasivas más efectivas para la eficiencia energética y el confort térmico en diferentes climas. Para efectos de esta investigación, se acotó la búsqueda de artículos relacionados con climas tropicales o cálidos.

Qahtan analizó las condiciones ambientales interiores de un edificio de oficinas que cuenta con una fachada de doble piel (DSF) en el clima tropical de Malasia, midió las temperaturas del aire interior/exterior, las temperaturas superficiales, la radiación solar global/vertical-oeste y las velocidades del aire interior, a partir de las mediciones obtuvo como resultados que la DSF es efectiva 'para controlar las ganancias de calor debido al delta de temperatura entre el exterior y el interior y las diferencias en las temperaturas superficiales, sin embargo el DSF del edificio analizado fue inadecuado para la protección de la radiación solar directa, lo que aumenta los requerimientos de refrigeración del edificio (Qahtan, 2019).

Hashemi & Khatami investigaron los efectos del sombreado en el confort térmico en viviendas de bajo costo en el clima tropical de Uganda. Evaluaron los resultados bajo el modelo adaptativo definido por el estándar CEN para edificios ventilados naturalmente, emplearon metodología de simulaciones térmicas dinámicas a través de EnergyPlus para edificios con paredes de ladrillo y techo de chapa de hierro como el método de construcción más común en Uganda. Estudiaron el efecto de estrategias como las cortinas, voladizos en cubiertas y ventanas, terrazas y árboles. Encontraron que la protección solar mejoró las condiciones de confort de los espacios analizados, sin embargo, ninguno de los escenarios cumple con los requisitos del estándar con enfoque adaptativo. Encontraron también que las estrategias de sombreado son más efectivas durante los períodos más calurosos del año, lo que reduce el riesgo de sobrecalentamiento extremo hasta en un 52 %. Los resultados arrojaron que, en términos de ganancia solar para Uganda, la orientación óptima es nortesur con aberturas preferiblemente en la fachada norte y plantearon como futuras investigaciones evaluar los efectos de otros tipos de sombreado, así como cuestiones como las estrategias de ventilación natural, los comportamientos de ocupación y los efectos microclimáticos de los árboles/plantas en el confort térmico en viviendas tropicales de bajos ingresos. (Hashemi & Khatami, 2017).

Capítulo 2. Marco teórico

Freewan estudió el impacto del sombreado exterior en las temperaturas interiores y en la iluminación natural en regiones de clima cálido subtropical. Empleó experimentos en tiempo real y simulaciones dinámicas. Analizó tres tipos de cortasoles, aletas verticales, aletas diagonales y caja de huevos en espacios con uso de oficina. Encontró que la temperatura en las oficinas con dispositivos de protección solar en comparación con la oficina sin dispositivos de protección solar se redujo a un nivel aceptable. Se mejoró el entorno visual controlando el nivel de iluminancia, mejorando la uniformidad y eliminando el deslumbramiento. Las oficinas con aletas diagonales y dispositivos de sombreado de cajas de huevos se desempeñaron mejor en comparación con la oficina con aletas verticales. (Freewan, 2014)

Al Tamimi & Fadzil estudiaron el potencial que tienen los dispositivos de sombreado en reducción de temperatura en climas tropicales para edificios residenciales. Analizaron cuatro variaciones de dispositivos de sombreado, horizontales, verticales, cajas de huevo y voladizo. Encontraron que los dispositivos sombreados tanto en habitaciones ventiladas como no ventiladas tienen un impacto considerable en la mejora de las condiciones térmicas internas. Sin embargo, los dispositivos tipo caja de huevos son los mejores para reducir la temperatura del aire interior y disminuir la cantidad de horas de incomodidad debido a su configuración que evita el ingreso de radiación solar desde distintos ángulos del sol. (Al-Tamimi & Fadzil, 2011).

Alwetaishi y compañía estudiaron dispositivos de sombreados en una región cálida, tomando como caso de estudio un edificio educativo. Investigaron los tipos de dispositivos de protección solar en relación en primer lugar con el desempeño térmico, la temperatura del aire interior, la ganancia de calor solar y la iluminación natural, y en segundo lugar con la preferencia por el confort térmico. Encontraron con esta investigación que los dispositivos de sombreado verticales eran más eficientes para el clima cálido(Alwetaishi et al., 2021).

Al-Masrani y compañía en el 2018 investigaron la optimización de dispositivos de sombreado exterior para edificios de oficina en climas tropicales. Presentaron con esta investigación los problemas y potencialidades de sistemas fijos y dispositivos de protección solar móviles a nivel local y mundial y realizaron una descripción general del desarrollo del sistema de protección solar durante los últimos 13 años. Los clasificaron según la participación energética y el enfoque de diseño fueron e identificaron tres categorías, sistemas pasivos, activos e híbridos, junto con otros tipos y modelos relevantes. Realizaron una revisión extensa de más de 70 estudios sobre dispositivos de protección

Capítulo 2. Marco teórico

solar como herramienta principal para identificar las tendencias, conceptos y problemas actuales sobre dispositivos de sombreado. Encontraron que los dispositivos de protección solar fijos han sido ampliamente estudiados en el campo de la investigación. La mayoría de los estudios de sombreado en los trópicos adoptaron dispositivos fijos de sombreado, y la mayor parte de la literatura ha identificado los dispositivos de cajas de huevos como el mejor dispositivo para mejorar la luz del día y el rendimiento térmico. A pesar de la rentabilidad y la fácil implementación de los dispositivos de protección solar fijos, su rendimiento presentó limitaciones para hacer frente a las condiciones climáticas cambiantes durante todo el año. Encontraron también que, a pesar de los avances registrados en el diseño de sombreado mecánico, este enfrenta muchas críticas debido a su complejidad, costo y alta energía operativa (Al-Masrani et al., 2018).

Dutta y compañía en el 2017 estudiaron la influencia de la orientación y el impacto del sombreado de las ventanas externas en el desempeño térmico de los edificios en clima tropical. Analizaron la influencia de la orientación del edificio en el consumo de energía. Compararon la cantidad de entrada de calor a través de ventanas en diferentes orientaciones de los muros y encontraron que la ganancia de calor a través de ventanas orientadas al sur es máxima seguida por ventanas orientadas al este, oeste y norte en un clima tropical del hemisferio norte. A partir de esto introducen un dispositivo de sombreado exterior móvil para determinar la reducción de la carga de enfriamiento en un edificio con uso de hospital. Encontraron que se puede lograr el máximo ahorro de energía en el mes de junio, es decir, un 14,9 % y un promedio de ahorro de energía del 9,8 % anual mediante persianas exteriores móviles para un edificio en un clima tropical (Dutta et al., 2017).

2.3. Impacto de elementos en fachada en el viento interior

Diversas investigaciones han analizado el impacto de los dispositivos de sombreado en la ventilación natural a partir de simulaciones de CFD, mediciones o métodos numéricos, sin embargo, la gran mayoría de investigaciones se han concentrado directamente en el dispositivo y en el espacio resultante entre el dispositivo y la fachada (Nishikawa et al., 2020)(Lee et al., 2015), debido a que estudian el impacto que este puede tener en el consumo energético en edificios con climatización activa, en especial cuando los dispositivos de sombreado hacen parte de la composición de una doble fachada o DSF por sus siglas en inglés. Debido a esto, pocas investigaciones han analizado el impacto del dispositivo de sombreado en la distribución del viento al interior de los espacios y la evaluación de este impacto a partir de estándares de confort térmico, en especial en ciudades tropicales con clima templado húmedo.

Capítulo 2. Marco teórico

Amini y otros realizaron una investigación del impacto de distintas proporciones de sombra y acristalamiento en el confort térmico, incluyendo simulaciones de CFD interior, sin embargo se concentró en un tipo de dispositivo que no cuenta con una gran obstrucción en la fachada como lo es el alero horizontal (overhang) con un ángulo de 45°, esta investigación analizó a partir de los mapas de CFD, la variación de la calidad del aire interior, la velocidad del aire interior y las temperaturas interiores y encontró que utilizando dispositivos de sombreado y apertura de ventanas, la calidad del aire puede mejorarse significativamente en escuelas. (Amini et al., 2021).

Kosutova y compañía en el 2019 analizaron la ventilación cruzada interior resultante de la configuración de lamas horizontales, empleando simulación de CFD y experimentos en túnel de viento, esta investigación si bien analiza el impacto de los dispositivos de sombreado en el ambiente interior, no evalúan los resultados en función del confort térmico y plantean como valores fijos la composición de las lamas, las variaciones se realizan a partir de la ubicación en altura de las lamas en la fachada, encontraron la disminución del caudal de viento a partir de la implementación de las lamas en fachada y que las velocidades más bajas se registraron en la configuración de la abertura que se encontraba más baja (cerca al suelo) debido a la rugosidad del terreno (Kosutova et al., 2019). Kahsay y compañía analizaron el impacto de los dispositivos de sombreado en la configuración del viento exterior y la distribución de presiones de viento en la fachada de un edificio de gran altura e investigó numéricamente el impacto del sombreado externo sobre los coeficientes de transferencia de calor por convección (Kahsay et al., 2019).

Izadayar y compañía analizaron el impacto de la geometría de los balcones en el ambiente interior, la distribución del viento interior, y el confort térmico, “La provisión de balcones cambia la presión alrededor de las fachadas del edificio y posteriormente afecta la conducción del viento NV y las fuerzas de flotabilidad. Los balcones afectan los perfiles de flujo de aire exterior e interior y la velocidad del aire interior (IAV) que pueden afectar la condición térmica interior”. Encontraron que tanto el tamaño de la abertura como el de la profundidad afectaron la distribución del aire interior, la velocidad media del aire interior y la temperatura. El mejor confort térmico y la mayor velocidad interior también ocurrieron, respectivamente, en los balcones más profundos con relación de profundidad de 35 y 30% (Izadyar et al., 2020).

Montazeri & Blocken analizaron la afectación de geometría detallada en fachada como balcones para un edificio aislado en la distribución de presión por efecto del viento en las paredes del edificio,

Capítulo 2. Marco teórico

empleando herramientas de modelación como CFD para determinar coeficientes medios de presión del viento. Encontraron que Las desviaciones promedio de las mediciones del túnel de viento son 12% y 10% para el edificio con y sin balcones, respectivamente. (Montazeri & Blocken, 2013) Montazeri y compañía también analizaron la afectación de las altas velocidades del viento en los balcones de los edificios de gran altura y plantearon analizar la estrategia de una segunda fachada semi abierta que determinara una reducción de las velocidades del viento en los balcones. Encontraron que la reducción de los gradientes de presión a lo ancho de la fachada disminuye fuertemente la velocidad del viento local. En muchas posiciones a lo largo de los balcones esto produce una mejora del confort del viento revisado bajo el estándar holandés de molestias eólicas en comparación con la situación sin la implementación de la doble fachada. (Montazeri et al., 2013).

Shetabivash en 2015 analizó la velocidad y distribución de viento interior según geometría y posición de las aberturas con un área fija y analizando solo ventilación cruzada, empleando una metodología basada en la solución numérica de volumen finito de las ecuaciones de Navier-Stokes, utilizando el CFD de Fluent. Analizó configuraciones de aberturas verticales y horizontales y diferentes posiciones en fachada y basado en eso determinó que tanto la forma como la ubicación pueden determinar el comportamiento de la corriente de flujo dentro del edificio y se puede emplear estas estrategias de posición y forma de las aberturas para aumentar la eficiencia de ventilación natural del edificio y controlar las zonas de recirculación que se forman en diferentes estancias (Shetabivash, 2015).

Barbosa y compañía estudiaron el confort térmico en edificios ventilados naturalmente con una doble fachada en el clima tropical. Evaluaron el impacto de los parámetros de diseño en el desempeño térmico de un edificio ventilado naturalmente con una fachada de doble piel. El estudio define los parámetros dimensionales para maximizar los flujos de aire del sistema y también investigó la importancia de las decisiones de diseño, como la masa térmica y los dispositivos de protección solar, en el rendimiento del sistema. Los parámetros de diseño evaluados en la investigación los clasificaron en dos grupos: en primer lugar, los parámetros de la fachada, en los que definieron variaciones de profundidad de la cavidad, dispositivos de sombreado, propiedades del vidrio de la doble piel, estructura y aberturas; en segundo lugar, los parámetros del edificio en los que definieron materiales de la fachada interior, relación ventana-pared y aberturas, número de pisos y altura de la cavidad. los parámetros de diseño clave de DSF se evaluaron individualmente en la investigación y se definieron opciones óptimas de diseño en función del confort térmico. Encontraron que los

Capítulo 2. Marco teórico

parámetros que más impactan el desempeño general del edificio son la aplicación de dispositivos de sombra dentro de la cavidad, seguidos por el ancho de la cavidad y la cavidad cónica con una capa exterior inclinada. También encontraron que los modelos optimizados con la incorporación de DSF alcanzan aproximadamente el 70% de las horas ocupadas dentro de los niveles de confort aceptables (Barbosa et al., 2015).

Lee & Chang en el 2015 investigaron la influencia de la orientación y el espesor de los dispositivos de sombra vertical en la ventilación natural y el rendimiento acústico de una fachada de doble Piel. Encontraron que diversas investigaciones indicaron que la configuración del dispositivo de sombreado afectó los patrones de flujo de aire, la velocidad del aire y la temperatura del aire en una cavidad de aire DSF. Definieron que los controles adecuados de los dispositivos de protección solar dentro de una cámara de aire DSF pueden contribuir al confort térmico y acústico al evitar el sobrecalentamiento y la transmisión de ruido. Evaluaron la correlación entre el potencial de ventilación natural y la pérdida de transmisión de ruido en función del grado de orientación y el grosor de los dispositivos de protección solar verticales dentro de una cavidad de aire DSF. Estudiaron 7 variaciones de orientación y espesor del cortasol. Encontraron que la temperatura del aire y los patrones de flujo de aire dependían en gran medida de la orientación de los dispositivos de sombreado vertical. En el caso de dispositivos de protección solar vertical en un ángulo de 0 grados (paralelo a la fachada), la temperatura del aire, la velocidad del aire y los patrones de flujo de aire mejoraron en comparación con el caso de orientación en ángulo de 90 grados. Descubrieron que los dispositivos de protección solar verticales en un ángulo de 0 grados actuaron como barreras térmicas y crearon las corrientes convectivas verticales para la disipación de calor. Concluyeron que se necesitan consideraciones cuidadosas al diseñar dispositivos de protección solar verticales para controlar el rendimiento térmico en una fachada de edificio altamente acristalada (Lee & Chang, 2015).

2.4. Marco normativo cortasoles y ventilación natural

Se revisaron los distintos estándares de referencia tanto a escala local como internacional donde se mencionen los dispositivos de sombreado exterior y se plantea un inventario de los aspectos que referencia cada estándar en función de dos temas principales: Asoleamiento y ventilación natural.

2.4.1. Certificación Edge (Sistema de certificación internacional)

- Asoleamiento:

Capítulo 2. Marco teórico

Clasifica los dispositivos de sombreado en dispositivos verticales, dispositivos horizontales, dispositivos combinados y dispositivos operables. Define una unidad de medida de la eficiencia del dispositivo según la radiación solar anual transferida al interior (Ec.1) y plantea una recomendación de ubicación del tipo de dispositivo según la orientación de la fachada, para fachadas orientadas hacia la línea del ecuador recomienda dispositivos de sombreado horizontales, para las fachadas orientadas al este/oeste, recomienda dispositivos verticales operables y para la fachada orientada a uno de los polos no requiere estrategias de sombreado.

$$AASF=1 - \frac{\text{Ganancia solar anual de una ventana con sombreado (KWh)}}{\text{Ganancia solar anual de una ventana sin sombreado (KWh)}} \quad (1)$$

Donde:

AASF= Porcentaje anual de factor solar

- Ventilación natural:

Clasifica la ventilación natural en función de la estrategia de ventilación, ventilación unilateral, ventilación cruzada, ventilación cruzada con dos espacios internos, ventilación con efecto Stack. Plantea unas exigencias en función de las proporciones del espacio ventilado naturalmente, en función del alto y el profundo del espacio (Ec.2) y según el tipo de ventilación, para ventilación unilateral se exige un radio de 1.5 y para la ventilación cruzada un radio de 5.

$$\text{Profundidad del espacio} = \frac{\text{Altura libre del espacio}}{\text{Radio}} \quad (2)$$

Plantea también una exigencia de área de abertura libre para ventilar como un porcentaje de área del espacio según el uso y las ganancias internas del edificio, para un edificio de oficinas exige un 20% de área del espacio como área libre de ventilación, asumiendo unas ganancias internas entre 15 y 30 W/m².

2.4.2. Código técnico de las edificaciones (CTE España)

- Asoleamiento:

Clasifica los dispositivos de sombreado exterior en voladizos, retranqueos, lamas horizontales y verticales, toldos y lucernarios. Plantea la expresión para el cálculo del factor solar modificado de huecos y lucernarios (Ec.3) determinando el impacto según orientación de fachada, obstáculos en la abertura, factor solar del cerramiento, las transmitancias térmicas tanto del marco de la

Capítulo 2. Marco teórico

ventana como la del vidrio y la absorptividad del marco. Para cada tipo de obstrucción o dispositivo de sombreado exterior, define un factor de sombra según la orientación de la fachada.

$$F = F_s \cdot [(1 - FM) \cdot g + FM \cdot 0.04 \cdot uM \cdot a] \quad (3)$$

Donde:

F_s =Factor de sombra de los dispositivos de sombreado

FM =Fracción del hueco ocupada por el marco de la ventana.

g =Factor solar de la parte semitransparente

U_m =Transmitancia térmica del marco

a =Absorptividad del marco

Esta normativa tiene en cuenta las condiciones climáticas de localización por fuera de la franja tropical, por lo que no tiene en cuenta el ingreso del sol para las fachadas que miran hacia uno de los polos y la fachada de mayor ganancia es la fachada que mira a la línea ecuatorial. Por lo que una homologación de los estándares de esta norma para las condiciones locales no sería pertinente.

- Ventilación natural:

No plantea estrategias de ventilación natural.

2.4.3. Energy conservation building code (ECBC India)

- Asoleamiento:

Define dos niveles de cumplimiento ECBC, ECBC + y SuperECBC. Plantea exigencias diferenciadas para la franja tropical (latitud menor a los 15° norte y sur), define valores de SHGC equivalente para las diferentes orientaciones (Tabla 1).

Tabla 1. Valores de SHGC Equivalente máximo para cada fachada del clima templado localizado en la franja tropical (para latitudes menores a 15°norte).

	SHGC Para clima templado
SHGC Máximo fachada norte ECBC	0.27
SHGC Máximo fachada diferente a norte ECBC	0.27
SHGC Máximo fachada norte ECBC+	0.25
SHGC Máximo fachada diferente a norte ECBC+	0.25

Capítulo 2. Marco teórico

Define coeficientes de factor de sombreado equivalente para cada tipo de dispositivo y plantea la expresión para el cálculo del SHGC equivalente que incluye los valores de factor solar del vidrio y factor de sombra equivalente del dispositivo de sombreado (Ec.4) (Ec.5).

$$SEF = (C3.PF^3) + (C2.PF^2) + (C1.PF) + C0 \quad (4)$$

Donde:

SEF=Factor de sombreado equivalente

PF=Factor de proyección

C1, C2, C3 y C0=Coeficiente de sombreado equivalente para latitudes menores a 15°Norte.

$$PF = D/L \quad (5)$$

Donde:

D=Distanciamiento entre dispositivos de sombreado

L=Longitud del dispositivo de sombreado.

Para los coeficientes C1, C2, C3 y C0, la normativa plantea unos valores según el tipo de protector y la orientación de fachada, en la Tabla 2. Coeficientes de sombreado equivalente para latitudes menores a 15°Norte para dispositivos de sombreado verticales se muestran los coeficientes de sombreado equivalente para dispositivos de sombreado verticales y para latitudes menores a 15°Norte.

Tabla 2. Coeficientes de sombreado equivalente para latitudes menores a 15°Norte para dispositivos de sombreado verticales

Fachada	C3	C2	C1	C0
Norte	0.14	0.39	0.62	0.99
Este	0.12	0.35	0.57	0.99
Sur	0.53	-1.35	1.48	0.88
Oeste	0.02	-0.15	0.46	1.01
Noreste	-1.64	3.07	-1.05	1.30
Sureste	0.68	-1.47	1.35	0.88
Suroeste	1.86	-3.81	2.71	0.69
Noroeste	-2.02	2.63	-0.18	1.14

Capítulo 2. Marco teórico

El ECBC plantea la expresión para el cálculo del SHGC equivalente, teniendo en cuenta el factor de sombreado equivalente exterior y el factor solar del vidrio (Ec.6)

$$SHGC Eq = SHGC Vidrio/SEF \quad (6)$$

Este estándar en términos de mecánica solar y radiación solar incidente tiene mayor similitud con el contexto de la ciudad de Medellín, debido a que involucra estrategias de sombreado para la franja tropical, con un rango de latitudes entre 0° y 15° Norte.

2.4.4. Política pública de construcción sostenible del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (Política pública local)

- **Asoleamiento:** Lineamientos generales de orientación de las fachadas y del dispositivo de sombreado. Prioriza los dispositivos de sombreado para las fachadas este/oeste. Remite al decreto nacional 1285 de 2015 y a la “Guía de criterios ambientales para el diseño y construcción de vivienda urbana”, del Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible.
- **Ventilación natural:** Plantea lineamientos generales en materia de orientación, estrategia de ventilación según la zona climática del proyecto y definición de área efectiva de ventilación según los requerimientos de renovación del aire interior (remitiendo a normativas nacionales e internacionales que no se especifican). Remite al decreto nacional 1285 de 2015 y a la “Guía de criterios ambientales para el diseño y construcción de vivienda urbana”, del Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible.

2.4.5. Decreto 1285 de 2015 (Normativa nacional)

- **Asoleamiento:**

En primer lugar, plantea que la protección solar se puede obtener mediante dispositivos de sombreado exteriores/interiores o utilizando vidrios de protección solar. Clasifica los dispositivos de sombreado en dispositivos horizontales (balcones, doseles, persianas), dispositivos verticales (persianas verticales o aletas protectoras) y dispositivos combinados horizontales y verticales (rejas metálicas).

Las estrategias de sombreado se enfocan en los ahorros energéticos. Plantea dos ángulos en función del tipo de dispositivo, “HSA” para dispositivos verticales y “VSA” para dispositivos horizontales (Figura 1). Este ángulo representa el ángulo formado entre el distanciamiento de los dispositivos “D” y la longitud del dispositivo “L”. Como exigencia plantea que el ángulo no

Capítulo 2. Marco teórico

supere los 70° con excepción de los proyectos que usen valores de SHGC combinados con el vidrio.

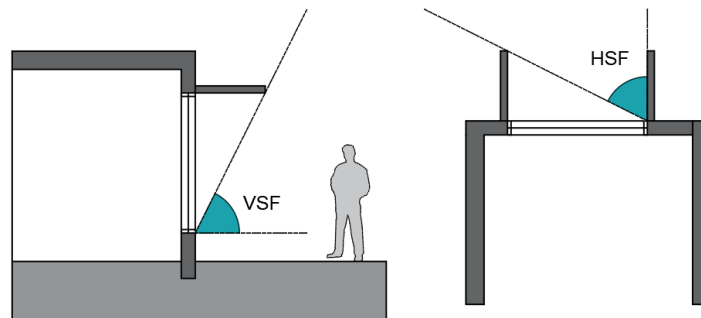


Figura 1. Ángulos VSF y HSF para protectores horizontales y verticales

- Ventilación natural:

Plantea lineamientos generales en términos de orientación del proyecto en función del viento y estrategias de ventilación natural según presiones dinámicas del viento.

2.4.6. Guía de criterios ambientales para el diseño y construcción de vivienda urbana del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (guía nacional).

- Asoleamiento:

Lineamientos generales de orientación de las fachadas en función de la ganancia solar en cada clima y recomendación general de aislamiento térmico e inercia térmica de los materiales para cada clima, sin especificar valores de exigencia.

- Ventilación natural:

Recomendaciones generales en función de la dirección y velocidad del viento exterior, recomendaciones generales de orientación y dimensionamiento de aberturas y estrategias de ventilación natural generales para cada clima.

Capítulo 3. Metodología

Capítulo 3. Metodología

3.1. Caso de estudio

El contexto en el que se enmarca esta investigación corresponde a la ciudad de Medellín, Colombia, ciudad que se encuentra dentro de la clasificación climática de Caldas-Lang como clima templado húmedo (IDEAM, 2014a) y dentro de la clasificación climática Köppen-Geiger como clima tropical lluvioso de sabana con invierno seco (IDEAM, 2014b), cuenta con una humedad relativa entre el 63% y el 73%, una temperatura entre 16°C y 32°C (Figura 2), cuenta también con una alta radiación solar durante todo el año (Figura 3) y se encuentra ubicada a una altura de 1640 msnm, que por su topografía de altas pendientes puede alcanzar hasta los 2000 msnm, estas características climáticas permiten edificios ventilados naturalmente durante todo el año. En la Figura 2 se muestra la oscilación anual de temperatura exterior de la ciudad de Medellín por hora. Estos datos de temperatura se obtuvieron del archivo climático de la estación meteorológica ubicada en el aeropuerto Olaya Herrera de la ciudad de Medellín.

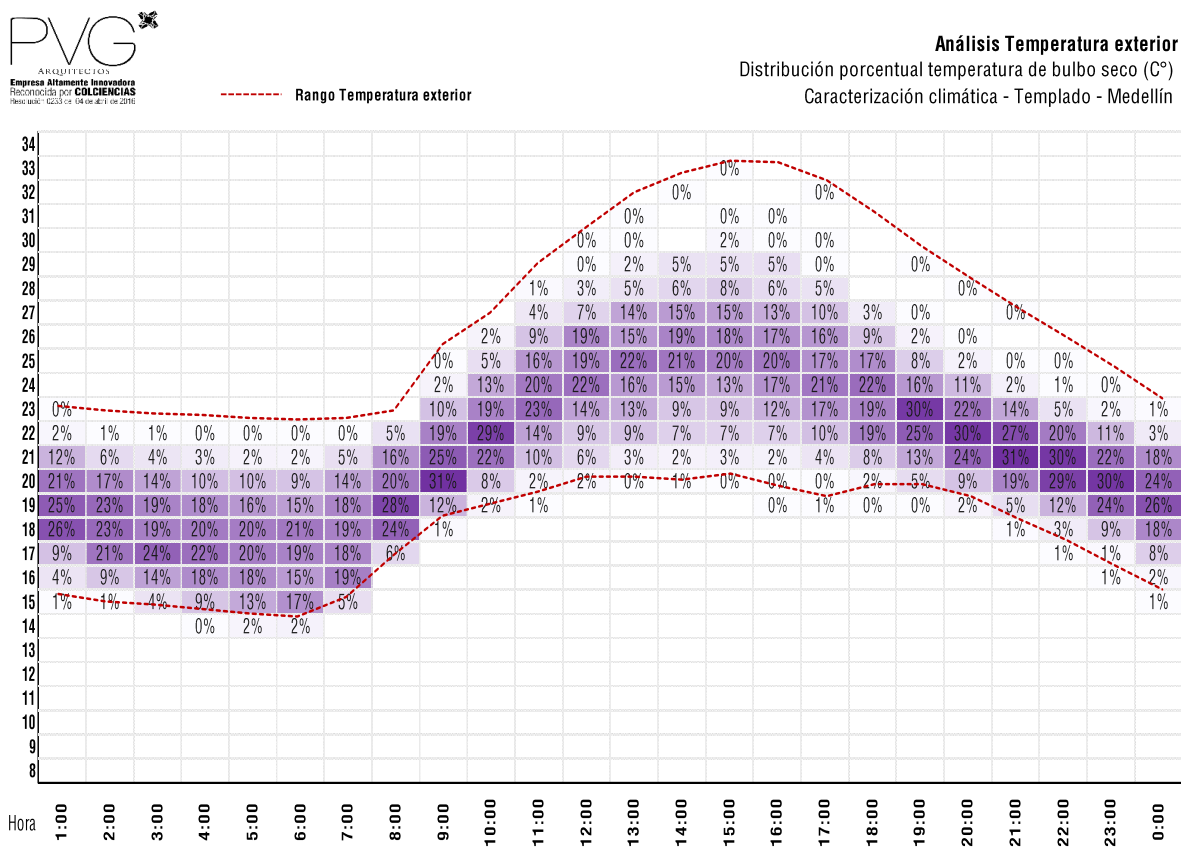


Figura 2. Rangos de oscilación de temperatura exterior anual por hora para la ciudad de Medellín.

Capítulo 3. Metodología

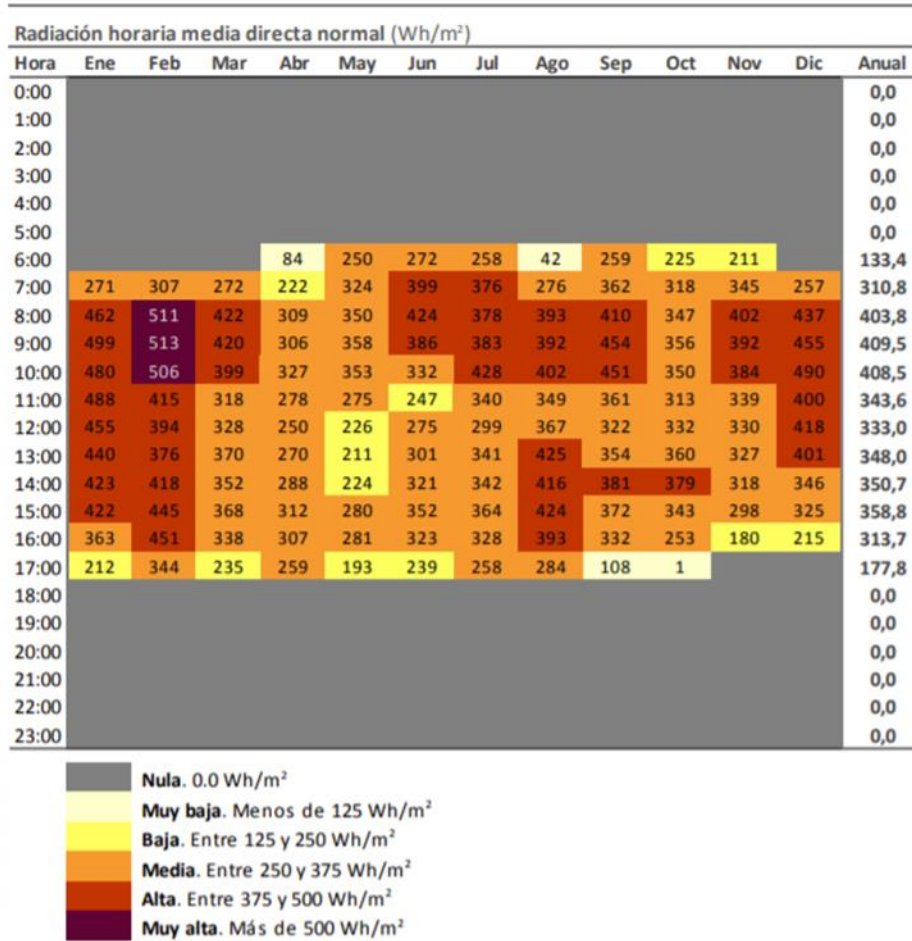


Figura 3. Niveles de radiación solar para la ciudad de Medellín.

En la Figura 4 se presentan los rangos de temperatura de confort bajo el modelo adaptativo ASHRAE 55 de 2017. Las temperaturas de confort se calcularon bajo la metodología expresada en el estándar ASHRAE para edificios ventilados naturalmente y con posibilidad de operación de la ventilación natural de parte de los ocupantes (ASHRAE, 2017).

Capítulo 3. Metodología

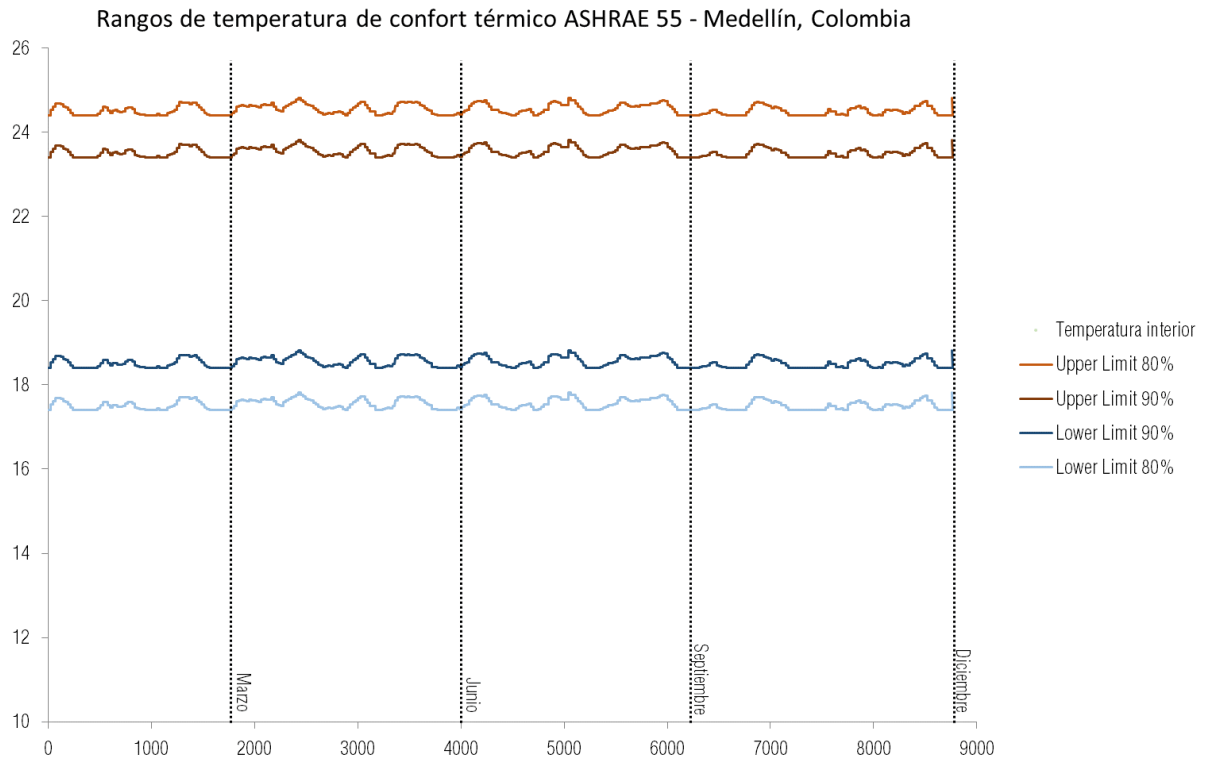


Figura 4. Rangos de temperatura de confort térmico adaptativo ASHRAE 55 para la ciudad de Medellín.

3.2. Metodología general

La metodología para emplear en esta investigación es de carácter cuantitativa-experimental y se divide en cuatro etapas relacionadas a cada objetivo específico, determinando actividades con el fin de alcanzar los objetivos planteados (Figura 5).

Capítulo 3. Metodología

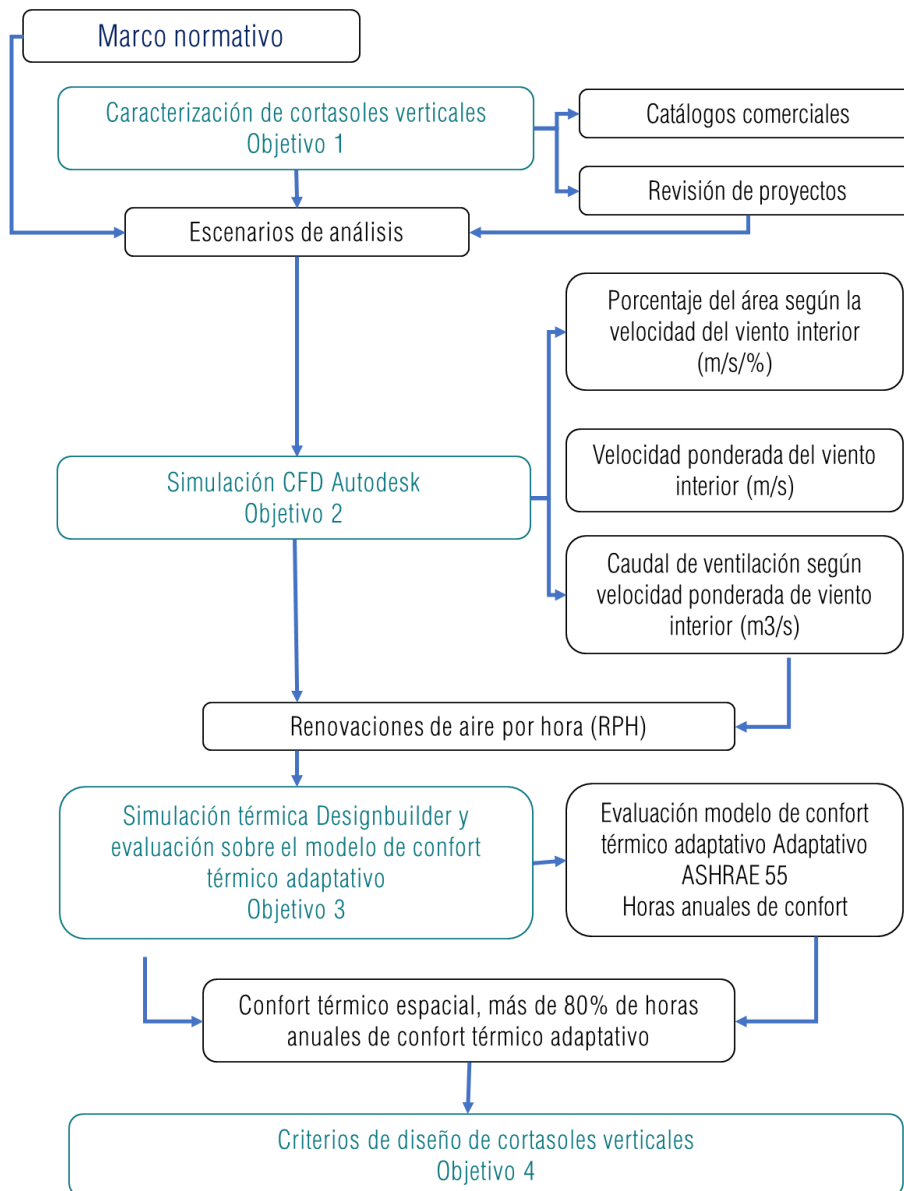


Figura 5. Metodología general

Esta investigación analizó solo los cortasoles verticales, en primer lugar, debido a que es una de las variaciones de dispositivo de sombreado que genera obstrucción directa en la fachada debido que se dispone generalmente cubriendo la totalidad del área de vidrio y puede generar mayor impacto en el viento interior y en segundo lugar porque en los últimos años se ha incrementado su uso en la arquitectura de la ciudad de Medellín. Se plantea también que la relación “D” distanciamiento entre los cortasoles sobre “L” longitud del cortasol “D/L” (ver Figura 6) de los escenarios de análisis sea la misma en todos los escenarios, lo que permitirá que el SHGC equivalente sea una variable fija. Según esto, los escenarios de análisis se definirán en función de la variación del valor “D” (ver Figura 6).

Capítulo 3. Metodología

Estas variaciones se definirán a partir del objetivo 1: Caracterización, donde se obtendrán las opciones comerciales de los cortasoles. Las variables "X" distanciamiento del cortasol con respecto a la fachada y "A" ángulo de inclinación del cortasol con respecto línea de fachada, se dejarán fijas y se se obtendrán a partir de la misma caracterización mencionada.

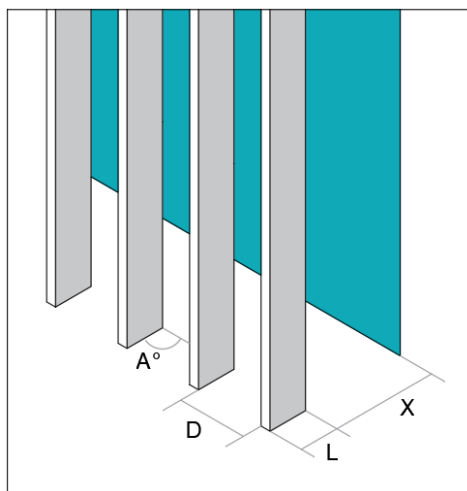


Figura 6. Categorización de dispositivos

A continuación, se presentan detalladamente las actividades.

3.3. Objetivo específico 1: Caracterización de los dispositivos de sombreado exterior.

3.3.1. Revisión de catálogos comerciales

Consultar en catálogos comerciales de empresas desarrolladoras de dispositivos de sombreado, para generar una base de datos de dispositivos de sombreado existentes en el mercado en Colombia y definir dimensiones comerciales de los cortasoles. Las empresas seleccionadas para el ejercicio de categorización de cortasoles verticales, fueron Hunter Douglas y Gaviota, The sun and shutter specialists. Se accedió a la información a través del contacto con proveedores e información publicadas en las páginas web de las empresas.

3.3.2. Revisión de proyectos

Categorización de dispositivos de sombreado exterior en función de replicabilidad del elemento en el medio y variabilidad del elemento según orientación del edificio, funcionalidad, geometría y tipo de protección solar a partir del diligenciamiento de la planilla de clasificación de proyectos (Tabla 3) los valores D, L, X y A, se encuentran especificados en la Figura 6. se planteó revisar la base

Capítulo 3. Metodología

de datos de una empresa de consultoría ambiental, los proyectos seleccionados se escogieron a partir del año 2015, correspondiente al año en el que comenzó la implementación del decreto 1285 (2015).

Tabla 3. Planilla de clasificación de proyectos

Año	Código del proyecto	Uso	Orientación fachada	Tipo de protector	D(m)	L(m)	X(m)	A(°)
-----	---------------------	-----	---------------------	-------------------	------	------	------	------

3.3.3. Diseño de experimento

A partir de la información levantada en las bases de datos especificadas anteriormente, identificaron variaciones del valor “D con el fin de definir los escenarios de análisis, que se complementaron con la revisión de estándares normativos internacionales y locales, definiendo el marco en el que se emplaza el experimento. Para el diseño del experimento se seleccionó el estándar ECBC (Kumar et al., 2009) de India como referencia para determinar un valor de SHGC equivalente homogéneo para todas las variaciones del dispositivo de sombreado exterior. Esto permitió controlar la variable de ganancia solar en las superficies vidriadas en la evaluación bajo el modelo de confort térmico adaptativo, analizando solo la influencia del viento interior en el confort. Según lo indicado por el ECBC de India, el valor de SHGC equivalente objetivo para la ciudad de Medellín (Latitud menor a 15°norte) para una fachada norte es de 0.25.

Para lograr un SHGC equivalente de esas características, es necesario acompañar la estrategia de dispositivos de sombreado externo con un vidrio de características de protección solar. Debido a esto se seleccionó un vidrio con un factor solar de 0.43, correspondiente a la referencia comercial de vidrio Coollite ST136, el caso base se analizó con estas características de SHGC. Una vez seleccionado el factor solar del vidrio del caso base, se definió la relación D/L o PF según el ECBC, dando como resultado una relación D/L de 0.5 que a partir de las ecuaciones Ec. 7, Ec.8 y Ec.9 con un SHGC del vidrio de 0.43 se obtiene un SHGC Equivalente de 0.25 cumpliendo con el estándar ECBC (Kumar et al., 2009) .

$$SEF = (C3.PF^3) + (C2.PF^2) + (C1.PF) + C0 \quad (7)$$

Donde:

SEF=Factor de sombreado equivalente

Capítulo 3. Metodología

PF=Factor de proyección

C1, C2, C3 y C0=Coficiente de sombreado equivalente para latitudes menores a 15°Norte.

$$PF = D/L \quad (8)$$

Donde:

D=Distanciamiento entre dispositivos de sombreado

L=Longitud del dispositivo de sombreado.

$$SHGC Eq = SHGC Vidrio/SEF \quad (9)$$

Los valores de C1, C2, C3 y C0, se encuentran consignados en la Tabla 2 del capítulo 2.4.3 Energy conservation building code (ECBC India).

3.4. **Objetivo 2:** Análisis del impacto de los dispositivos de sombreado en la ventilación natural

Para el análisis del impacto de los dispositivos de sombreado en la ventilación natural, se definió un espacio de oficinas teórico, sobre el que se analizaron las configuraciones de cortasoles verticales.

Las dimensiones geométricas se determinaron según el sistema de certificación Edge en la sección de ventilación natural (EDGE User Guide 2, 2019), donde se presentan unas proporciones del espacio según estrategia de ventilación (cruzada o unilateral) y un porcentaje de abertura de la ventana en función del área del local y el uso destinado a oficinas. Para la ventilación cruzada se define una relación profundidad/altura=5 (Figura 7) y para la ventilación natural unilateral, se indica una relación de profundidad/altura= 1,5 (Figura 8); el porcentaje de aberturas para las dos estrategias de ventilación es de 20% del área del espacio.

Capítulo 3. Metodología

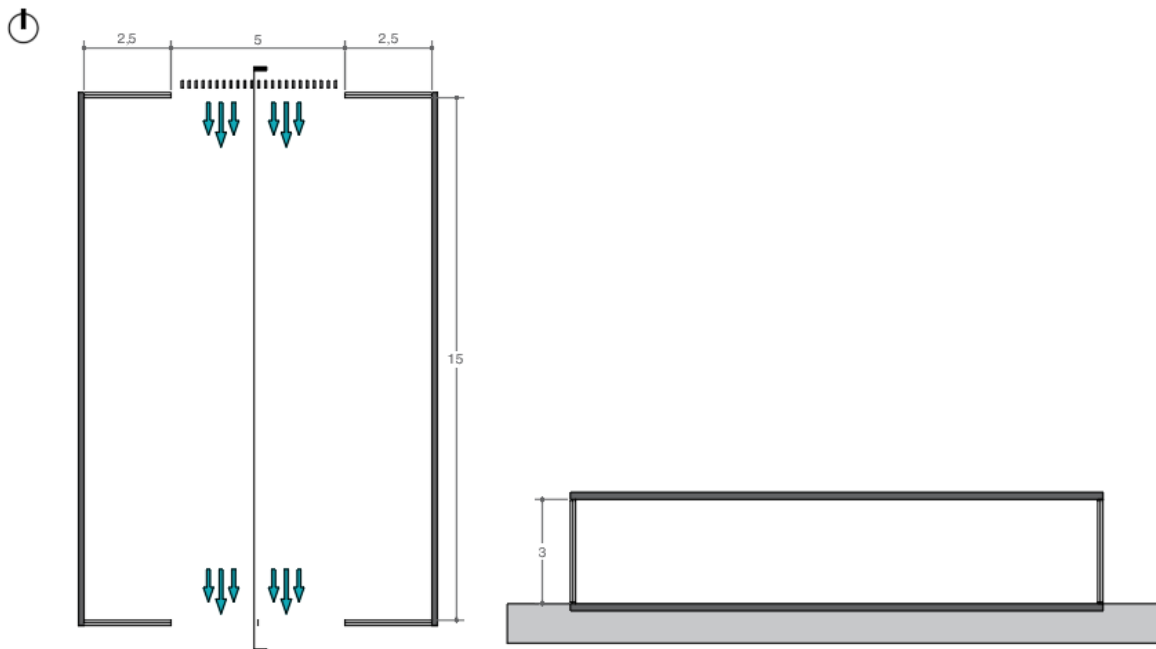


Figura 7. Geometría base, caso de estudio para ventilación cruzada

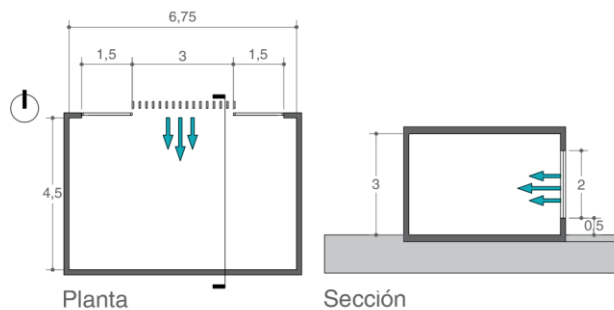


Figura 8. Geometría base, caso de estudio para ventilación unilateral

Por otro lado, respecto a la dirección del viento exterior, se asumió el análisis como un análisis simétrico donde se omiten direcciones de viento debido a que pueden ser homologables dentro de las orientaciones seleccionadas. En este sentido, para la estrategia de ventilación unilateral se seleccionaron las orientaciones "O1=Norte", "O2=Noreste" y "O3=Este" (ver Figura 9), debido a que por la configuración del viento unilateral, se estima que las demás orientaciones no implicarían alteraciones al viento interior. En Figura 9. se presentan las direcciones de viento seleccionadas para la ventilación cruzada y en Figura 10 se presentan las direcciones para la ventilación unilateral.

Capítulo 3. Metodología

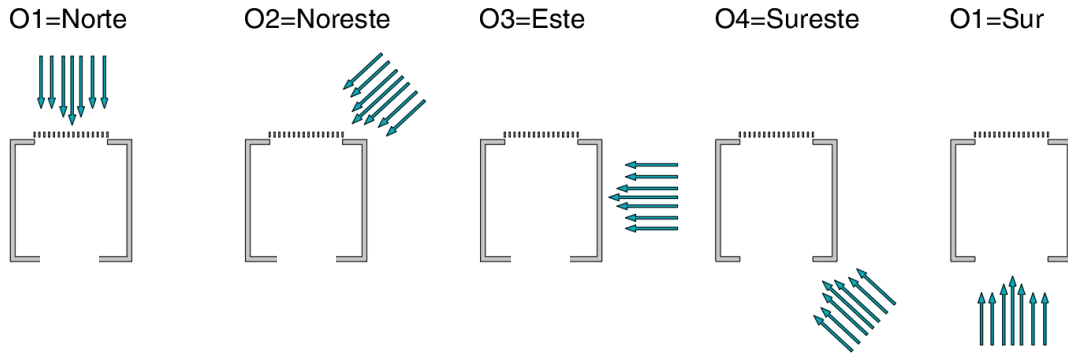


Figura 9. Definición de variables de dirección del viento exterior para las fachadas analizadas con ventilación cruzada.



Figura 10. Definición de variables de dirección del viento exterior para las fachadas analizadas con ventilación unilateral

La Tabla 4 muestra los escenarios simulados dentro de la investigación, D1,D2,D3,D4 y D5, corresponden a los cortasoles verticales analizados y seleccionados dentro de la cartacterización propuesta en el objetivo 1.

Tabla 4. Escenarios de simulación

Estrategia de ventilación	Orientación	Dispositivo	Código de escenario
Ventilación unilateral	O1	D1	VU_O1_D1
		D2	VU_O1_D2
		D3	VU_O1_D3
		D4	VU_O1_D4
		D5	VU_O1_D5
	O2	D1	VU_O2_D1
		D2	VU_O2_D2
		D3	VU_O2_D3
		D4	VU_O2_D4

Capítulo 3. Metodología

		D5	VU_O2_D5
	O3	D1	VU_O3_D1
		D2	VU_O3_D2
		D3	VU_O3_D3
		D4	VU_O3_D4
		D5	VU_O3_D5
Ventilación cruzada	O1	D1	VC_O1_D1
		D2	VC_O1_D2
		D3	VC_O1_D3
		D4	VC_O1_D4
		D5	VC_O1_D5
	O2	D1	VC_O2_D1
		D2	VC_O2_D2
		D3	VC_O2_D3
		D4	VC_O2_D4
		D5	VC_O2_D5
	O3	D1	VC_O3_D1
		D2	VC_O3_D2
		D3	VC_O3_D3
		D4	VC_O3_D4
		D5	VC_O3_D5
	O4	D1	VC_O4_D1
		D2	VC_O4_D2
		D3	VC_O4_D3
		D4	VC_O4_D4
		D5	VC_O4_D5
	O5	D1	VC_O5_D1
		D2	VC_O5_D2
		D3	VC_O5_D3
		D4	VC_O5_D4
		D5	VC_O5_D5

Capítulo 3. Metodología

3.4.1. Simulación CFD

Para el análisis de distribución de las velocidades del viento en el espacio, se empleó el software CFD de Autodesk, utilizando la misma metodología de modelado del dominio de viento exterior planteada por Kosutova (2019), donde las dimensiones del dominio de viento exterior están en función de las dimensiones de la arquitectura. Se define entonces para el eje que se encuentra paralelo a la dirección del viento un valor de $3H$ para la zona ubicada a barlovento para evitar afectaciones por el gradiente de ventilación y un valor de $15H$ para la zona ubicada a sotavento (donde $H= 15\text{m}$ para ventilación cruzada y $H=4.5\text{m}$ para ventilación unilateral). Para el eje que se encuentra perpendicular a la dirección del viento se utiliza un valor de $5H$ para cada dirección (donde $H= 10\text{m}$ para ventilación cruzada y $H= 6,75\text{m}$ para ventilación unilateral). Por último, la relación de altura del túnel de viento es $5H$ (donde $H=3\text{m}$ para ventilación cruzada y unilateral)(ver Figura 11).

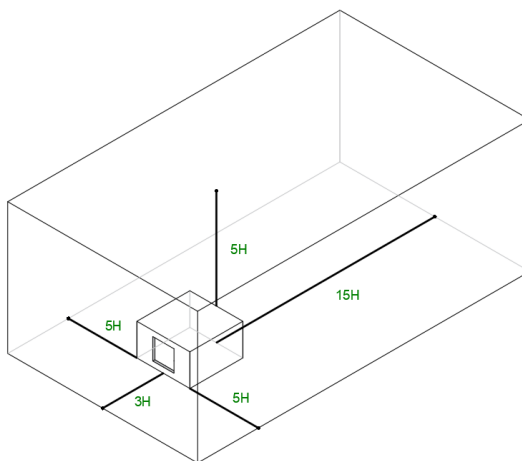


Figura 11. Dimensiones del túnel de viento en función del valor H , basada en Kosutova et al (2019)

Las condiciones de borde se definieron según los datos de la estación meteorológica ubicada en el aeropuerto Olaya Herrera de la ciudad de Medellín (IDEAM, 2018) a una altura de 10 m del nivel del suelo. La estación registró una velocidad del viento predominante entre 1,6 y 3,3 m/s. Teniendo en cuenta que el software requiere una entrada de velocidad de viento única, se trabajó con el dato medio del rango predominante = 2.45 m/s (ver Figura 12).

Capítulo 3. Metodología

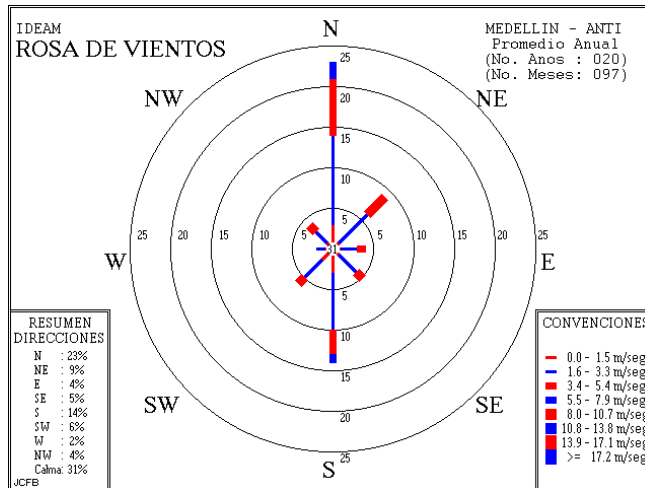


Figura 12. Datos de velocidad y dirección del viento medidos en la estación meteorológica tomada de Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM (2018).

Una vez obtenidos los resultados de las simulaciones en m/s, los resultados gráficos del CFD se escalaron a una velocidad máxima de 1.2 m/s con 12 niveles de colores en rangos de velocidad, asociados a las velocidades del viento interior que modifican el rango superior de confort térmico adaptativo del estándar ASHRAE 55 (2017).

3.4.2. Lectura de resultados velocidad del viento interior.

El análisis de los resultados de viento interior se realizó en función de dos variables:

1. **Porcentaje del área según la velocidad del viento interior:** Se obtiene a partir del resultado gráfico proveniente del CFD Autodesk, donde la velocidad del viento interior está asociada a un color dentro del rango 0 m/s a 1,2 m/s. Una vez obtenido el resultado gráfico, se procesó la imagen en el software Adobe Photoshop, donde se definió una unidad de medida de 1 Píxel. A partir del número de píxeles por color y su proporción respecto a toda la figura, se calculó el porcentaje de área del espacio afectado por una velocidad del viento interior.

Posteriormente se analizaron comparativamente los porcentajes del área del espacio por cada rango de velocidad entre 0 y 1,2 m/s de cada una de las variables de lamas verticales, determinando la modificación de las velocidades del viento interior en función del área afectada.

2. **Ponderado de velocidad del viento interior:** Valor que se obtiene expresión descrita en la Ec. 10.:

$$(V1 \times (\% \text{ de área de } V1)) + (V2 \times (\% \text{ de área de } V2)) \dots n. (10)$$

Donde:

V1, V2, V3...n=Velocidades de viento entre 0 y 1.2 m/s.

Capítulo 3. Metodología

Esta variable se plantea con el fin de analizar las variaciones de los cortasoles verticales en función de la afectación de un valor de velocidad ponderado y determinar caudales de ventilación para los análisis térmicos.

3.4.3. Definición de caudales de ventilación para el análisis de confort térmico.

Con el fin de analizar los resultados de una simulación estática de velocidades ponderadas de viento interior, en un análisis dinámico de simulación de temperatura operativa horaria, para su posterior evaluación en el modelo de confort térmico adaptativo, se convirtió la velocidad del viento interior ponderada en caudal de ventilación del espacio en l/s. Este caudal de ventilación permitió simular las velocidades del viento en el análisis térmico, asumiendo un caudal constante del espacio en función de las temperaturas de control y permitió analizar la variación de la temperatura operativa y el número de horas anuales de confort térmico adaptativo en función de la velocidad del viento.

Para el cálculo de caudales de ventilación natural en l/s se emplea el método de “British Standard” de ventilación debida al efecto del viento, en función del área de abertura (Yarke, 2005) como se expresa en la Ec.11.

$$Q= 0.025 * AV \quad (11)$$

Dónde:

Q=Caudal en m3/h

A= Área de abertura en m2

V= Velocidad interior del viento en m2/s

Se empleó el proceso de conversión de unidades de m2/h a l/s, dando como resultado el caudal de ventilación constante que se empleó en las simulaciones térmicas.

3.5. Objetivo 3 Simulación térmica y evaluación sobre el modelo de confort térmico adaptativo

3.5.1. Simulación térmica

Para el proceso de simulación térmica, se empleó el software Designbuilder, utilizando el archivo climático de la ciudad de Medellín, obtenido de la estación meteorológica del aeropuerto Olaya Herrera, ubicado al interior de la ciudad. Se definieron los valores de envolvente térmica para un

Capítulo 3. Metodología

edificio base de ladrillo con techo plano en concreto y vidrio claro 6 mm. Se analizó el proyecto con un nivel de infiltraciones de 0.7 Renovaciones por hora y se asumió una materialidad de madera para los dispositivos de sombreado (ver Tabla 5).

Tabla 5. Valores de la solución de envolvente térmica para el caso base de estudio

Soluciones de muro	Valor U (W/m ² °C)	SHGC
Muros exteriores	1,8	N/A
Techumbre	2,9	N/A
Pisos	2,9	N/A
Vidrios	5,6	0,78

Se definieron también unas ganancias internas de calor para un espacio de oficinas= 30 W/m², basados en los datos base para la certificación Edge en el apartado de ventilación natural (EDGE User Guide 2, 2019).

Para simular las condiciones de viento interior constantes, se consideraron los valores de caudales resultantes de la actividad “3.4.3 Definición de caudales de ventilación para el análisis de confort térmico.” Se empleó la metodología de cálculo de ventilación natural programada, donde se definen unos caudales constantes dentro del periodo de ocupación del espacio correspondiente a espacios de oficina “8:00 – 18:00”. Para la operación de la ventilación natural se emplean controladores de temperatura interior mínima de 20°C y máxima 27°C, correspondiente a el rango inferior y superior de temperatura de confort de la ciudad, según el estándar ASHRAE 55 (2017).

3.5.2. Evaluación de confort térmico adaptativo y lectura de resultados.

Para la evaluación de confort térmico de los espacios, se utilizó el modelo de confort adaptativo ASHRAE 55 de 2017, donde se plantean rangos de temperaturas de confort en función de la temperatura media exterior mensual (Ec.12).

$$\text{Rango Superior 80\% de aceptabilidad } ^\circ\text{C}=0.31 \text{ tpma(ext.)}+21.3$$

$$\text{Rango inferior 80\% de aceptabilidad } ^\circ\text{C}=0.31 \text{ tpma(ext.)}+14.3 \quad (12)$$

Donde:

Tpma: Temperatura media predominante del aire exterior.

Los valores del rango superior del 80% de aceptabilidad se modifican según la velocidad interior ponderada resultante del CFD, solo para temperaturas operativas que se encuentren por encima de

Capítulo 3. Metodología

los 25°C. La Tabla 6 expresa la modificación en grados centígrados del rango de temperatura de confort superior.

Tabla 6. Aumento del rango de temperatura de confort en función de la velocidad promedio interior (ASHRAE, 2017).

Velocidad del viento promedio interior	Aumento del rango de temperatura superior de confort (°C)
0.6 m/s	1.2
0.9 m/s	1.8
1.2 m/s	2.2

Los resultados se evaluaron comparativamente entre todas las variaciones de dispositivos de sombreado analizadas según el número de horas anuales dentro del rango de confort adaptativo. Este análisis además se analizó en función de la distribución espacial del confort térmico según las velocidades del viento, determinando el porcentaje del espacio que se encuentra por encima del 80% de horas anuales de confort térmico bajo el modelo adaptativo de ASHRAE 55.

Capítulo 4. Resultados

Capítulo 4. Resultados

4.1. Caracterización de dispositivos

Estos resultados corresponden al desarrollo del primer objetivo específico. Se plantea entonces la revisión de la implementación de dispositivos de sombreado en el medio, a través de la revisión de proyectos de arquitectura, catálogos comerciales y normativas locales e internacionales.

4.1.1. Revisión de implementación de dispositivos de sombreado en proyectos de arquitectura

Para la revisión de proyectos de arquitectura se revisaron 27 proyectos de arquitectura, en la Tabla 7 se muestra la revisión de proyectos con la plantilla diligenciada.

Tabla 7. Revisión de proyectos de arquitectura

Año	Código del proyecto	Uso	Tipo de protector	D(m)	L(m)	D/L	X(m)	A(°)
2021	P001	Vivienda	Lamas verticales	0.1	0.05	2	0.055	90°
2021	P002	Vivienda	Voladizo	-	-	-	-	-
2021	P003	Vivienda	Voladizo	-	-	-	-	-
2021	P004	Educativo	No tiene	-	-	-	-	-
2021	P005	Educativo	Lamas horizontales	1.2	1.3	0.92	0.1	90°
2021	P006	Oficinas	Lamas verticales	0.1	0.08	1.25	0	90°
				0.41	0.34	1.21	0.7	90°
2021	P007	Institucional	Lamas verticales	0.91	0.34	2.68	0.7	90°
				0.66	0.34	1.9	0.7	90°
2021	P008	Hospital	Voladizo	-	-	-	-	-
2020	P009	Institucional	Lamas verticales	0.36	0.27	1.33	0	33°
			Voladizo	-	-	-	-	-
2019	P010	Institucional	Doble fachada (DSF)	-	-	-	-	-
2019	P011	Hospital						

Capítulo 4. Resultados

Los resultados de la revisión de proyectos muestran que el 40% de los proyectos revisados, incluyen cortasoles verticales en la composición de fachada (Figura 13), la relación promedio de D/L es de 1.71, el valor X que más se presenta en los proyectos revisados es 0 m y el ángulo (A) que más se presenta es 90°.

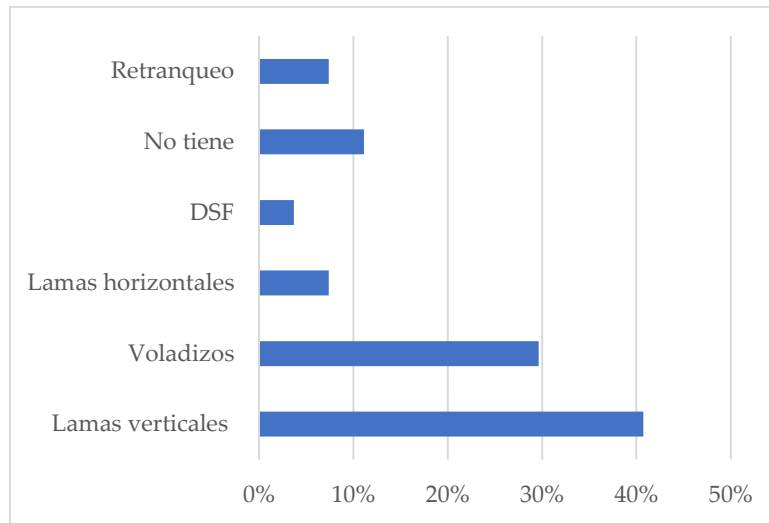


Figura 13. Implementación de dispositivos de sombreado exterior en los proyectos revisados

De los proyectos revisados los edificios de oficinas institucionales y no institucionales son los proyectos con mayor implementación de lamas verticales (Tabla 8).

Tabla 8. Implementación de lamas verticales en proyectos revisados, según uso de la edificación

Uso del edificio	Número de proyectos que implementan lamas verticales
Oficinas	2
Institucional (Oficinas)	3
Educativo	2
Vivienda	2
Hospitales	0

4.1.2. Revisión de catálogos comerciales

La Tabla 9 muestra la clasificación y dimensiones comerciales de los cortasoles verticales según la revisión de catálogos comerciales en la ciudad de Medellín.

Capítulo 4. Resultados

Tabla 9. Revisión de dispositivos de sombreado vertical en catálogos comerciales

Nombre dispositivo	Longitud L del dispositivo (m)	Distanciamiento D (m)	Ángulo A del dispositivo (°)	Área de abertura libre para ventilación (%)
Serie V	0.1	0.1	90°	76.93%
		0.12	90°	80%
	0.09	0.04	90°	57.16%
		0.05	90°	62.50%
	0.045	0.02	90°	40%
		0.03	90°	50%
Sunset	0.4	-	-	-
	0.3	-	-	-
	0.21	-	-	-
	0.12	-	-	-
Sunset V	0.3	-	-	-
		-	-	-
	0.26	-	-	-
		-	-	-
	0.21	-	-	-
		-	-	-
0.17	-	-	-	
	-	-	-	
Aerobrise	0.1	-	-	-
	0.2	-	-	-
Tubrise	0.041			
Quadrobrise	0.049	0.05	90°	-
		0.053	90°	-
	0.075	0.05	90°	-
		0.06	90°	-
	0.08	0.05	90°	-
		0.065	0.08	90°
84R	0.084	0.086	45°	-
		0.074	90°	-

Capítulo 4. Resultados

		0.069	30°	-
Quadrobrise XL	0.30	-	90°	-
	0.20	-	90°	-
Quadrobrise XLS	0.188	-	90°	-
	0.295	-	90°	
	0.34	-	90°	
	0.30	-	90°	
Cortasoles tipo B	0.026	-	90°	
	0.051	-	90°	
	0.035	-	90°	

La revisión de catálogos comerciales de cortasoles permite identificar la variedad de dimensiones comerciales existentes en el mercado. El distanciamiento no existe como medida comercial cuando se trabaja con cortasoles individuales, sin embargo existen sistemas de persianas fijas que traen consigo ya unas dimensiones de distanciamiento fijas y este sistema de persiana se conoce como lamas, en este caso el distanciamiento permitido se encuentra en función de la longitud de la lama, en estos casos específicos algunas empresas cuentan con información de área libre de abertura para ventilación, sin embargo esta solo tiene en cuenta una relación geométrica donde se obtiene el área de abertura en relación al área que ocupa la lama. Existe gran variedad de geometría de los cortasoles, existen incluso algunos dispositivos aerodinámicos que no hacen parte del presente estudio.

A partir de esta revisión se seleccionaron los cortasoles que se muestran en la Tabla 10. El criterio de selección de estos cortasoles se realizó en función de su representatividad dentro de todas las dimensiones existentes, permitiendo abarcar la gran mayoría de configuraciones de cortasoles revisada. Las configuraciones de los cortasoles se determinaron en función de la longitud expresada en la referencia comercial de los cortasoles, el distanciamiento del elemento se definió en función de la relación D/L seleccionada de 0.5, lo que implica que el distanciamiento entre elementos corresponde a la mitad de la longitud del elemento (ver Figura 14).

Capítulo 4. Resultados

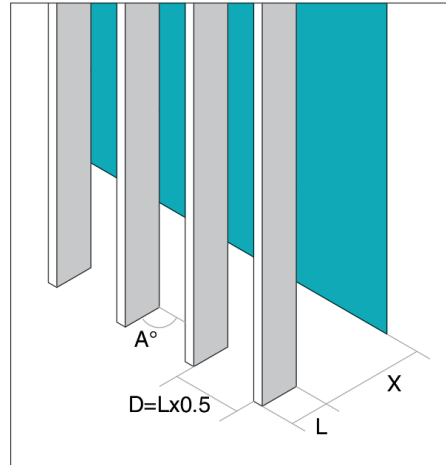


Figura 14. Definición de la variable dependiente "D" distanciamiento entre elementos.

Para la variable "L" longitud del elemento se seleccionaron las referencias comerciales que se expresan en la Tabla 10, referenciando el valor de distanciamiento "D" correspondiente.

Tabla 10. Valores de longitud y distanciamiento de los dispositivos de sombreado

Nombre dispositivo	Longitud del dispositivo (L(m))	Distanciamiento (D(m))	Código
Sunset	0.4	0.200	D1
Sunset V	0.21	0.105	D2
Aerobrise	0.1	0.050	D3
Quadrobrise	0.08	0.040	D4
Cortasoles tipo B	0.051	0.026	D5

4.2. Resultados del viento interior

4.2.1. Ventilación unilateral

En la Figura 15 se muestran los resultados de velocidad de viento interior para la estrategia de ventilación unilateral.

Capítulo 4. Resultados

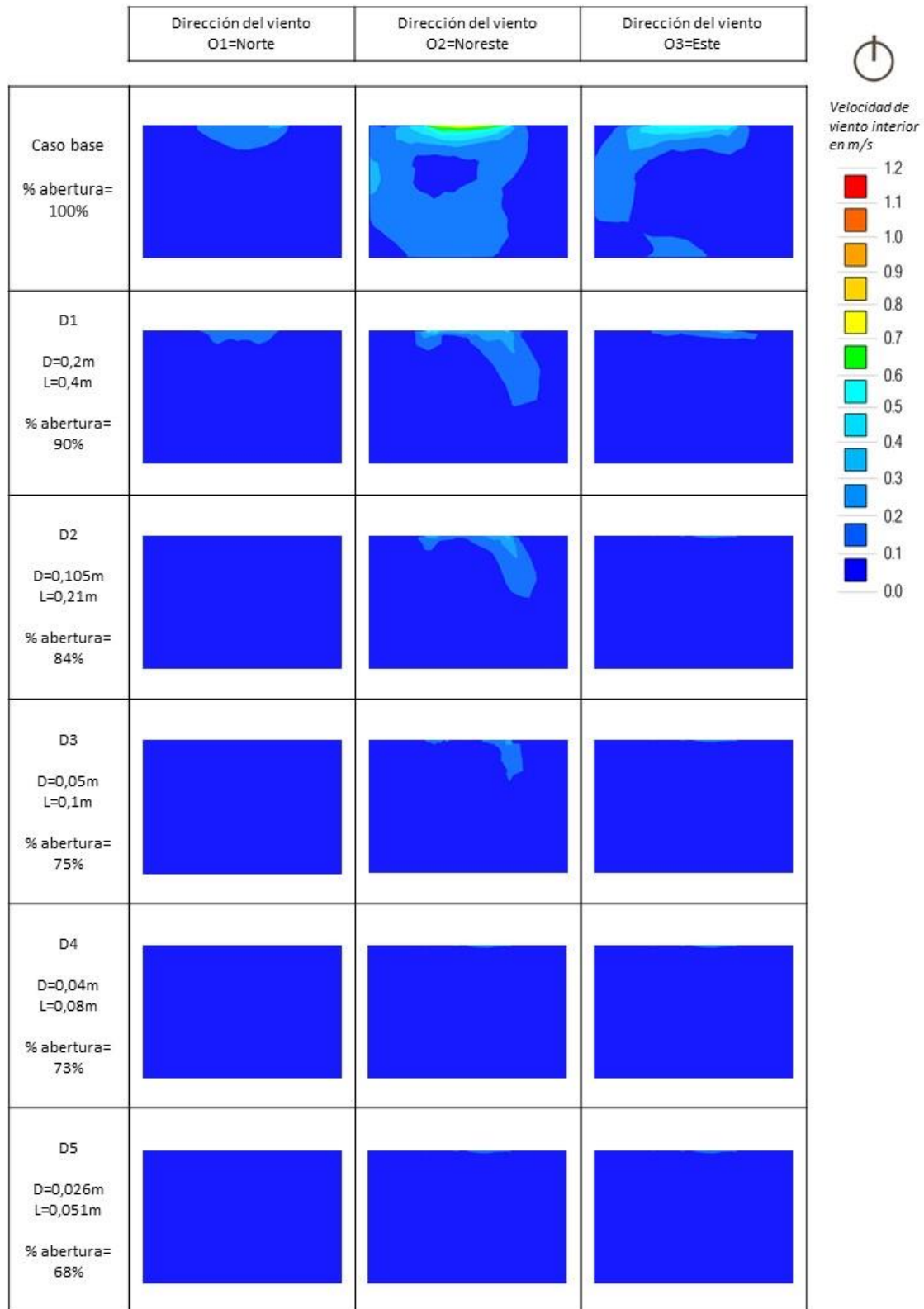


Figura 15. Resultados de velocidad interior de viento según dirección predominante de viento para las variaciones de cortasoles verticales para la estrategia de ventilación unilateral.

Capítulo 4. Resultados

Se puede observar que existe muy poca variabilidad de resultados de velocidad de viento interior, todas las velocidades de viento interior se encuentran por debajo de los 0.6 m/s, por lo que no afectarán los resultados de confort térmico interior. Sin embargo, se obtiene como resultado que la orientación que más beneficia este tipo de estrategia de ventilación unilateral es la dirección Noreste, correspondiente al ingreso de viento diagonal a la fachada analizada. Se observa también que siguiendo el mismo patrón de los resultados de la estrategia de ventilación cruzada, a partir del escenario D4, el movimiento de aire y variabilidad de las velocidades del viento interior no existe, siendo velocidades en su totalidad de 0m/s.

Debido a que los resultados de viento interior no alcanzan los 0.6 m/s correspondientes a la variación del rango superior de temperatura de confort descrito por ASHRAE (2017), no se tuvo en cuenta la estrategia de ventilación unilateral para el análisis de confort térmico adaptativo.

4.2.2. Ventilación cruzada

En la Figura 16 se muestran los resultados de la distribución de velocidades de viento interior para la estrategia de ventilación natural cruzada. Se presentan los resultados de las 5 direcciones de viento analizadas y las variaciones de cortasol vertical, incluyendo el caso base sin cortasoles.

Capítulo 4. Resultados

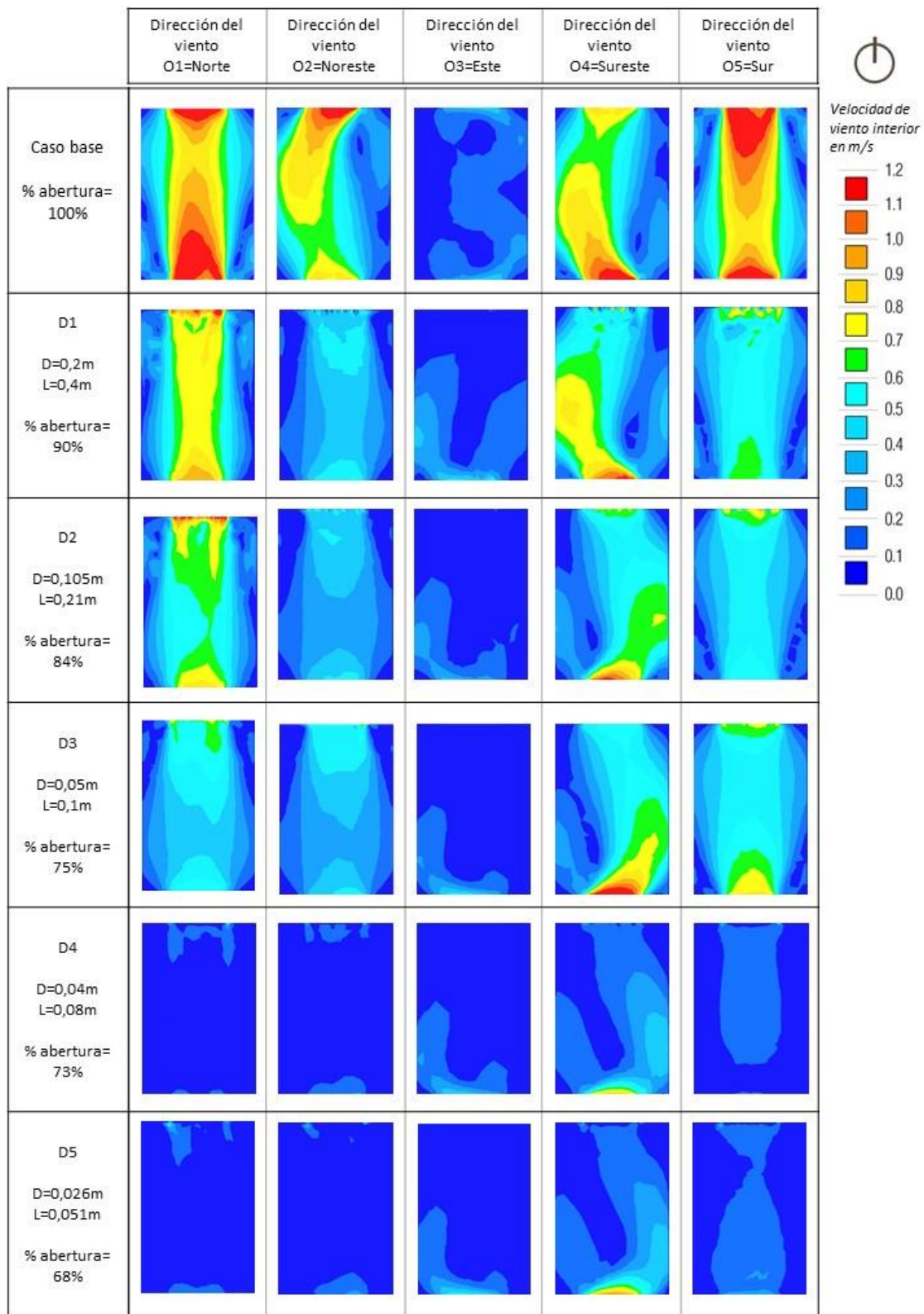


Figura 16. Resultados de velocidad interior de viento según dirección predominante de viento para las variaciones de cortasoles verticales para la estrategia de ventilación cruzada.

Capítulo 4. Resultados

Al analizar la estrategia de ventilación cruzada se obtuvo que cuando la dirección predominante de viento es paralela a la abertura, el movimiento de aire al interior del recinto es muy bajo, por lo que, si comparamos entre escenarios, encontramos muy poca variabilidad. Cuando la fachada analizada se encuentra a barlovento se puede observar que hay mayor movimiento de aire en el espacio, sin embargo, a partir del escenario D4 se encontró que las velocidades de viento al interior no superan 0.1 m/s. Los escenarios D1, D2 y D3 cuentan con velocidades interiores mayores a 0.6 m/s en un alto porcentaje del espacio, esto debido a que los cortasoles en estos tres escenarios tienen una mayor longitud y permiten tener un mayor distanciamiento para el ingreso del viento, cumpliendo con el SHGC equivalente requerido (Figura 16).

Se presentan mejores condiciones de viento interior cuando los cortasoles se encuentran ubicados a barlovento, sin embargo, cuando los cortasoles en fachada son más densos, como el caso de los escenarios D4 y D5, que cuentan con un distanciamiento entre cortasoles menores y con un bajo porcentaje de área de abertura libre para ventilar, se presentan mayores velocidades de viento cuando la dirección de viento es a sotavento de la fachada analizada (Figura 16). La dirección predominante sureste, que cuenta con ingreso diagonal desde sotavento e ingresa por la abertura opuesta a la fachada analizada también permite el ingreso de velocidades de viento por encima de 0.6 m/s, presentando un mejor comportamiento que el ingreso de viento diagonal sobre la fachada analizada.

Se produce menor porcentaje de zonas de sombra de viento y recirculación de aire cuando la dirección predominante es perpendicular a la fachada analizada, tanto para cuando la fachada se encuentra a sotavento como cuando se encuentra a barlovento.

En la Figura 17 se presentan comparativamente las velocidades ponderadas de viento interior de todos los escenarios agrupados por las 5 direcciones de viento.

Capítulo 4. Resultados

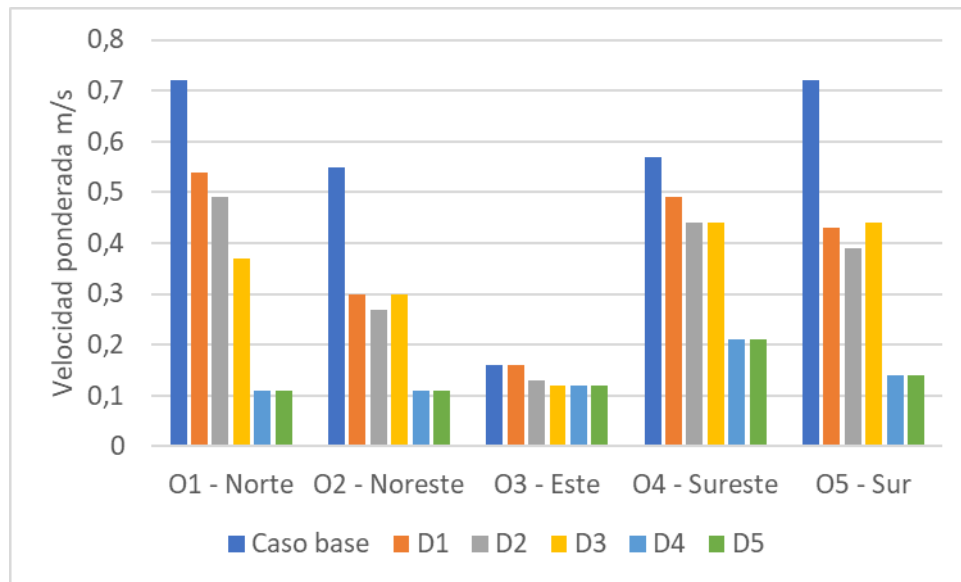


Figura 17. Velocidades ponderadas de viento interior para las 5 direcciones de viento predominante y las distintas configuraciones de cortasoles.

En la Figura 17 se observa que el caso base para todas las direcciones predominantes cuenta con mayor velocidad de viento ponderada interior, debido a que cuenta con el mayor porcentaje de abertura para ventilar naturalmente. Sin embargo, al observar las velocidades ponderadas de los cortasoles D1, D2 y D3 se encuentra que las velocidades de viento ponderadas interior alcanzan velocidades cercanas al caso base, representando una disminución entre el 45% y el 14% del cortasol D1 con respecto al caso base para todas las orientaciones, una disminución entre el 19% y el 51% para el cortasol D2 en todas las orientaciones y una disminución entre el 23% y el 49% para el cortasol D3 en todas las orientaciones. Para los dispositivos D4 y D5 que cuentan con el peor desempeño en términos de velocidades ponderadas de viento interior la disminución de velocidades alcanza 85% con respecto al caso base. La dirección de viento predominante O3 (paralela a la fachada analizada) cuenta con muy poca variabilidad entre escenarios, presentando las velocidades ponderadas más bajas.

En la Figura 18 se presenta el comparativo entre escenarios de las renovaciones de aire por hora de cada tipo de cortasol.

Capítulo 4. Resultados

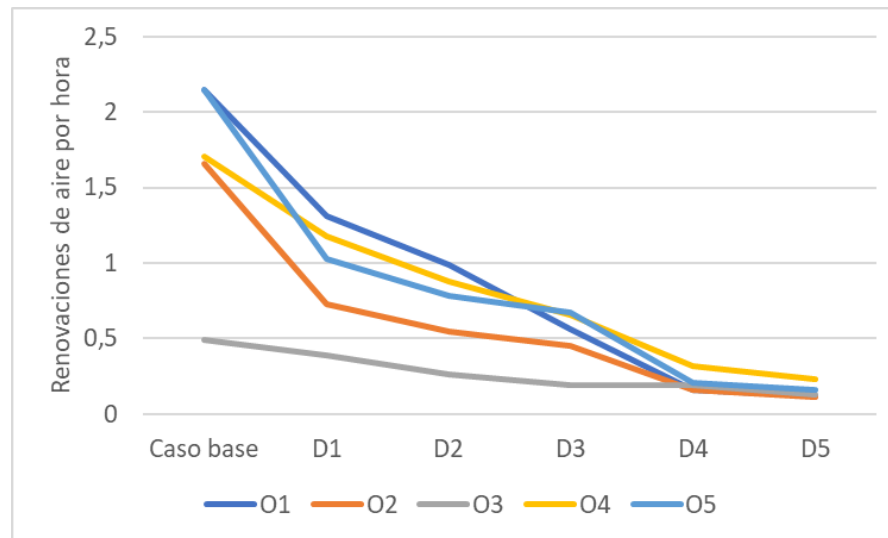


Figura 18. Renovaciones de aire por hora de los escenarios simulados para la estrategia de ventilación cruzada.

Los resultados muestran una tendencia a descender mientras el distanciamiento entre elementos desciende, los cortasoles afectan las renovaciones de aire por hora debido a que la velocidad de viento interior disminuye y el área de abertura también. La orientación 3 tiene muy poca variabilidad y se encuentra dentro del peor desempeño de los escenarios. Todas las orientaciones se igualan en los cortasoles D4 y D5 donde se encuentra el peor desempeño de los escenarios simulados, siendo un poco más altas, las renovaciones de aire por hora de la orientación 4 para estos dos cortasoles.

4.3. Confort térmico adaptativo

En el anexo B se presentan los resultados de confort térmico de los escenarios según las temperaturas operativas resultantes de la simulación térmica. Los resultados muestran que los espacios que no cuentan con velocidades por encima de 0.6 m/s, no superan el 80% de horas anuales de confort térmico debido a que no alcanzan a modificar el rango superior de la temperatura de confort por efecto del viento, según ASHRAE (2017). A partir de esto, el indicador de confort térmico adaptativo espacial resalta las velocidades que se encuentran por encima de los 0.6m/s debido a que son las velocidades que modifican los resultados de confort térmico adaptativo, asumiéndose como una velocidad constante en el espacio con el fin de comparar los resultados de viento correspondientes a una simulación estática, con los resultados de confort térmico que corresponden a una simulación dinámica.

La Figura 19 muestra los resultados de confort térmico espacial para todos los escenarios simulados de la estrategia de ventilación cruzada.

Capítulo 4. Resultados

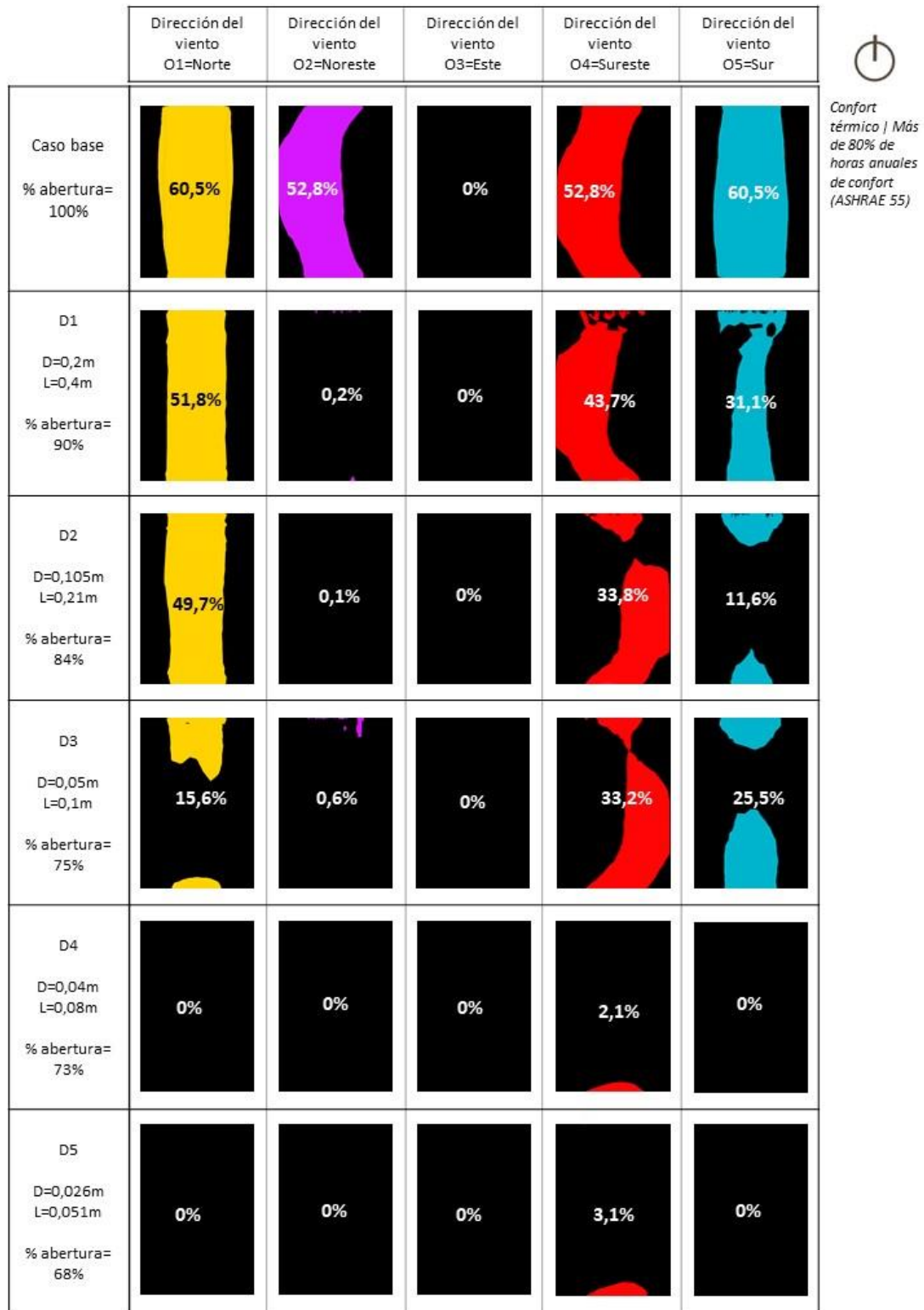


Figura 19. Confort térmico espacial según velocidades de viento interior. Los resultados corresponden a el porcentaje del espacio que se encuentra por encima del 80% de horas anuales de confort térmico bajo el modelo adaptativo ASHRAE 55.

Capítulo 4. Resultados

De la Figura 19 se obtiene como resultado de confort térmico espacial que el caso base cuenta con mayor porcentaje del espacio por encima del 80% de horas anuales de confort en todas las orientaciones, esto debido a que cuenta con mayor cantidad de espacio con velocidades de viento por encima de los 0.6 m/s. El cortasol D1 solo alcanza a superar el 50% del espacio cuando el viento se encuentra a barlovento en la fachada analizada, sin embargo, cuenta con bajo porcentaje del espacio por encima del 80% de horas anuales de confort en las demás orientaciones, alcanzando un máximo de 43.7% en la dirección predominante O2 Noreste. El porcentaje de confort térmico en el espacio está fuertemente condicionado por el porcentaje de abertura libre para ventilación natural, sin embargo, no es la única variable que influye cuando analizamos cortasoles en función de la ventilación natural. Los cortasoles D2 y D4 cuentan con un máximo de 2.1% y 3.1% respectivamente de porcentaje del espacio por encima del 80% de horas anuales de confort, y este porcentaje solo se alcanza cuando el viento proviene del sureste (O4), este resultado no solo está influenciado por el área libre de abertura para ventilación, sino también por la resistencia al viento generada por el bajo distanciamiento entre cortasoles.

En la Figura 20 se presenta la gráfica comparativa de los resultados del indicador espacial de confort térmico adaptativo.

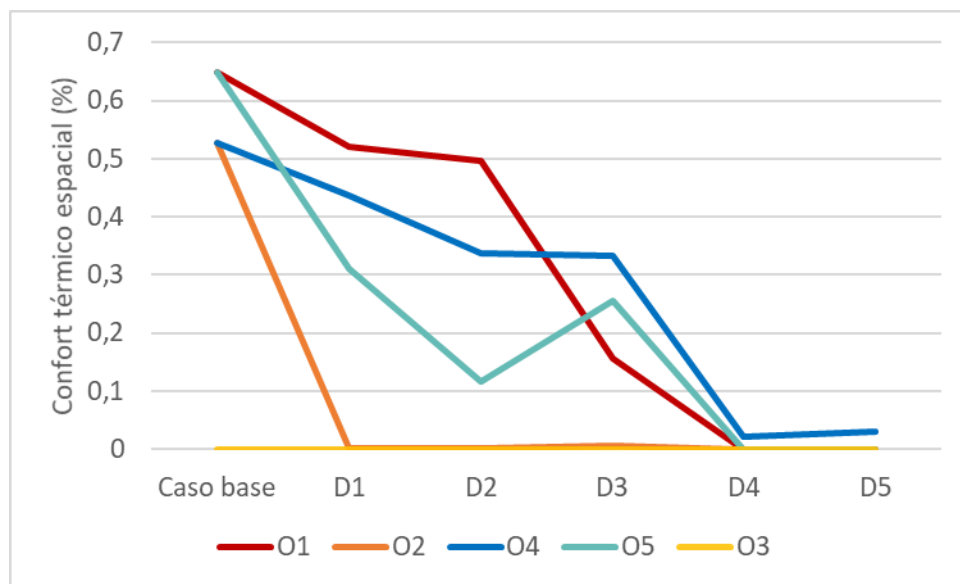


Figura 20. Comparativo de confort térmico espacial para ventilación cruzada

Los resultados indican claramente que los escenarios D4 y D5 cuentan con muy baja variación y cuentan con el 0% del espacio por encima del 80% de horas anuales de confort térmico bajo el modelo adaptativo. Comprobando así que a partir de la separación de 0.04 m entre protectores, el movimiento

Capítulo 4. Resultados

del viento interior es imperceptible y afecta directamente el confort térmico. La gráfica muestra una tendencia de a menor distanciamiento entre elementos, menor porcentaje del espacio con el 80% de horas anuales de confort, sin embargo, la tendencia no es lineal. La orientación 1 muestra el mejor desempeño en términos de confort térmico, seguido de la orientación 4.

4.4. Recopilación de resultados

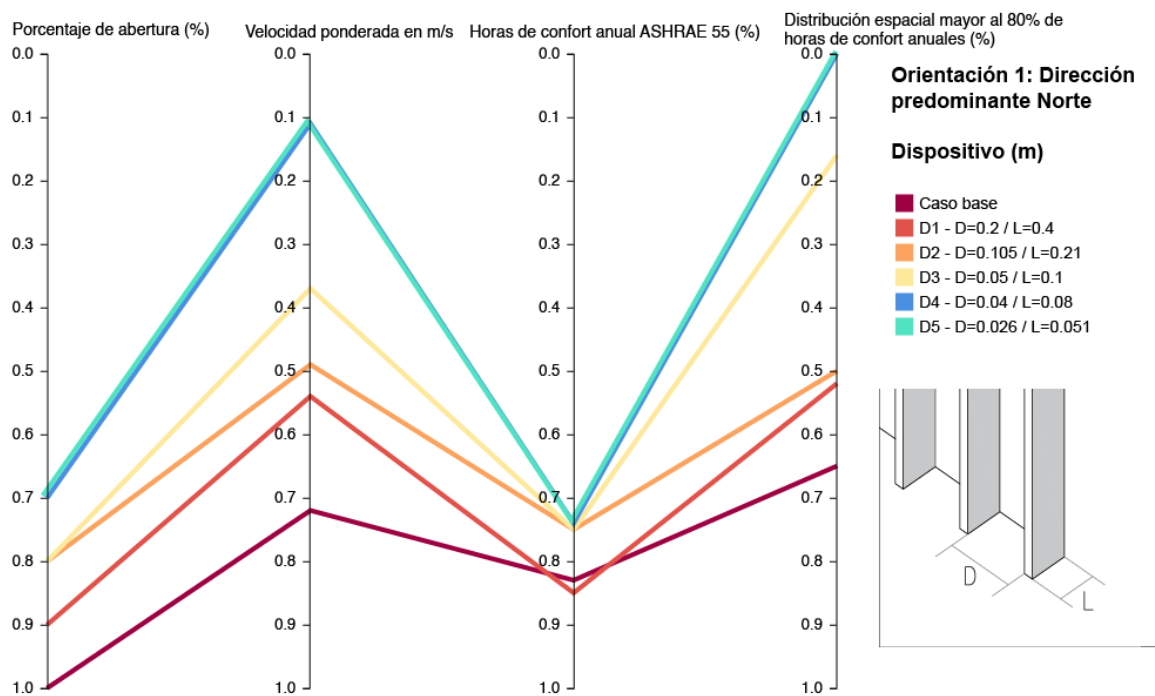


Figura 21. Recopilación de resultados para la orientación 1 – Dirección predominante Norte, todas las configuraciones de cortasoles.

Al observar los resultados obtenidos en la Figura 21, se obtiene que la variable que influye sobre la ventilación natural para confort térmico no es solo el área de abertura libre para ventilación, debido a que la relación no es directamente proporcional, si comparamos el cortasol D3 con los cortasoles D4 y D5, podemos encontrar que la diferencia de velocidades ponderadas es más alta que la diferencia entre el cortasol D1 y D2, cuando la diferencia de porcentaje de abertura se mantiene en 10%. Esto se debe a la resistencia que crean el bajo distanciamiento entre cortasoles de los escenarios D4 y D5. El cortasol D1 se encuentra con mayor porcentaje de horas anuales de confort que el caso base, pero si observamos la distribución espacial del confort, encontramos que el caso base cuenta con mayor porcentaje del espacio dentro de los niveles aceptables.

Capítulo 4. Resultados

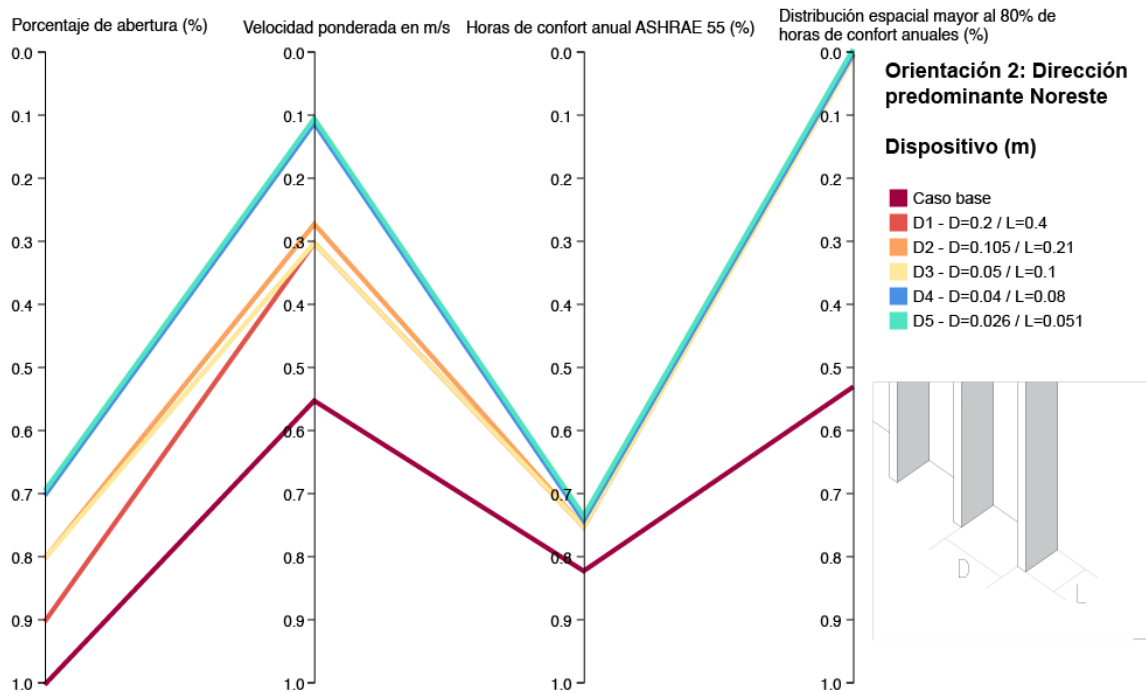


Figura 22. Recopilación de resultados para la orientación 2 – Dirección predominante Noreste, todas las configuraciones de cortasoles.

La Figura 22 muestra la baja variación de las velocidades ponderadas de viento para las distintas configuraciones de cortasoles, lo que repercute en la distribución espacial del confort térmico, ya que no alcanza velocidades por encima de los 0.6 m/s. El caso base en esta dirección de viento cuenta con un mejor desempeño debido a que no se genera resistencia al ingreso de viento en la abertura de barlovento.

Capítulo 4. Resultados

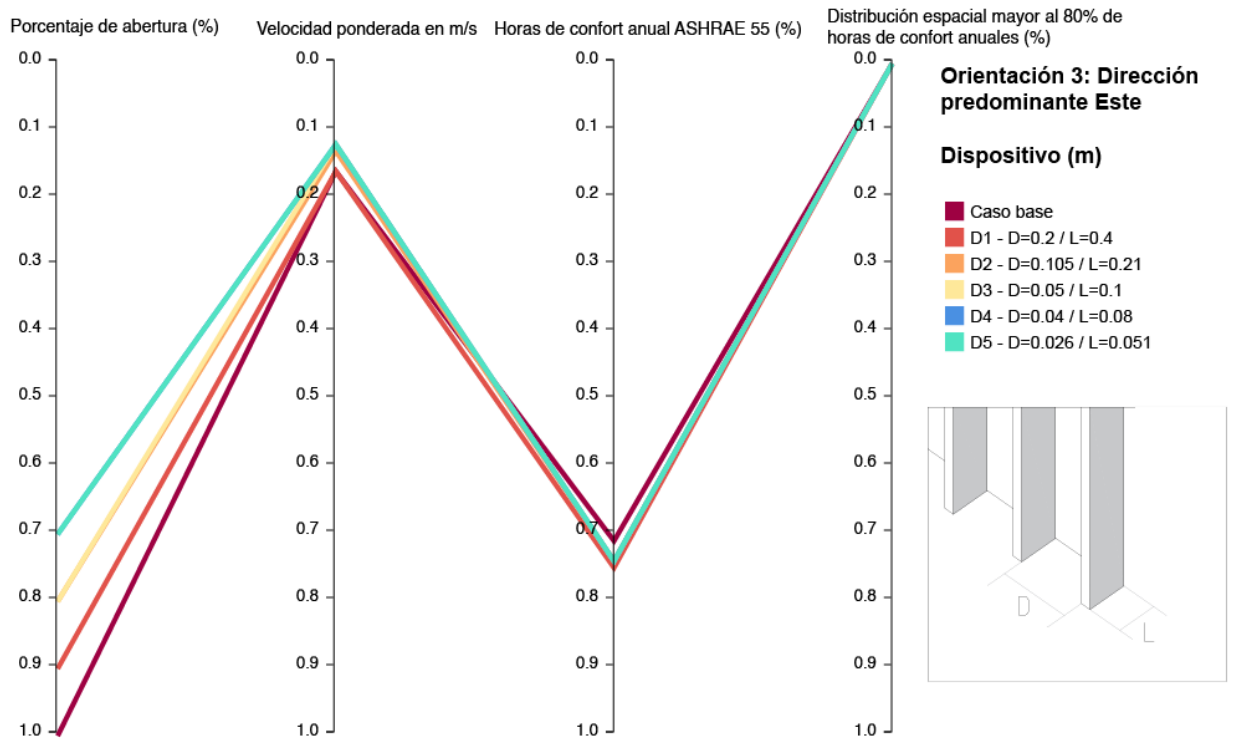


Figura 23. Recopilación de resultados para la orientación 3 – Dirección predominante Este, todas las configuraciones de cortasoles.

En la Figura 23 se encontró que la dirección del viento paralela a la fachada no permite ingreso de altas velocidades de viento, lo que repercute en el confort térmico espacial de todas las configuraciones analizadas, incluido el caso base, sin embargo, si analizamos el porcentaje global de confort del espacio, los valores se encuentran entre el 70% y el 80% de horas anuales de confort térmico adaptativo que es el resultado sin afectación de las velocidades del viento.

Capítulo 4. Resultados

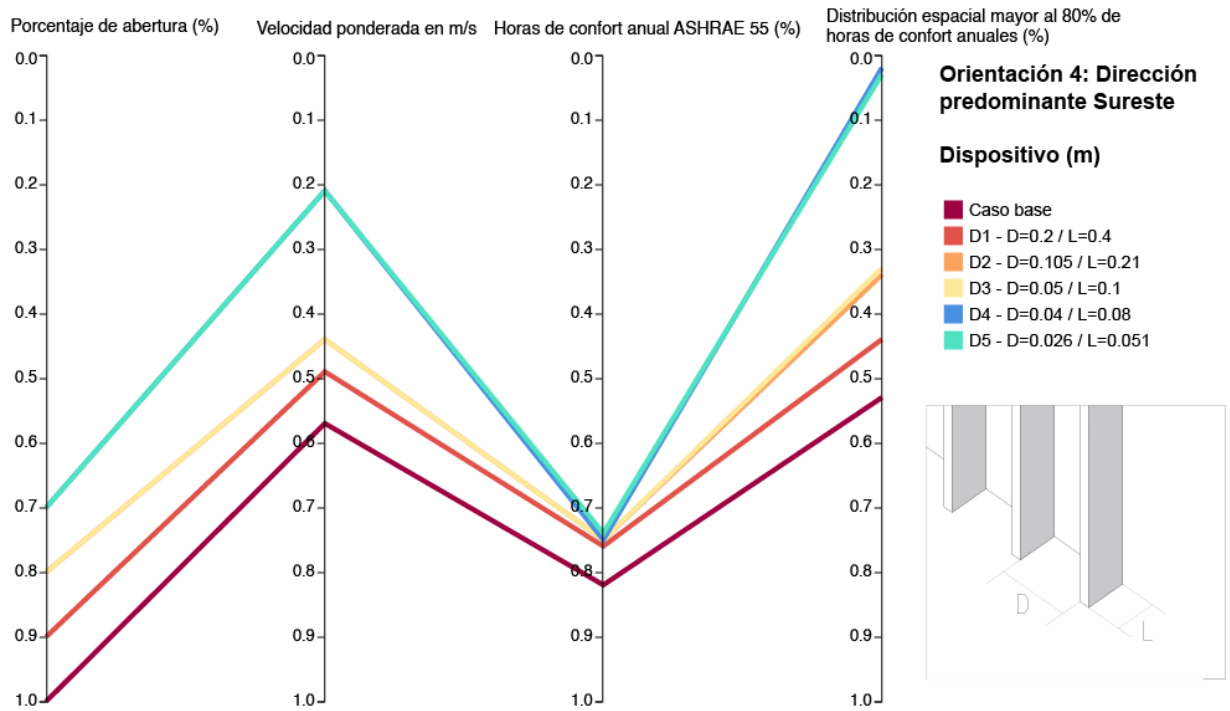


Figura 24. Recopilación de resultados para la orientación 4 – Dirección predominante Noreste, todas las configuraciones de cortasoles.

La Figura 24 muestra que la dirección de viento O4 Sureste tiene unos resultados con un mejor desempeño en términos de confort espacial, sin embargo, el mejor desempeño se observa cuando la fachada analizada se encuentra a barlovento, porque permite mayor ingreso de velocidades de viento al espacio.

Capítulo 4. Resultados

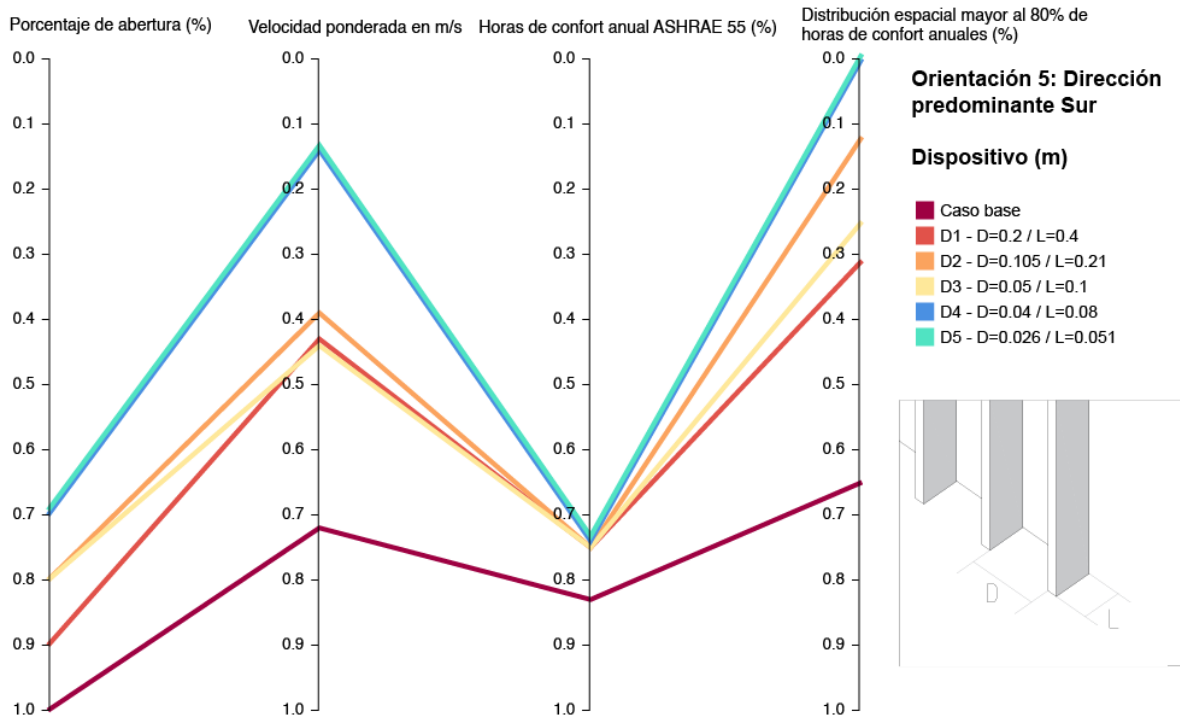


Figura 25. Recopilación de resultados para la orientación 5 – Dirección predominante Sur, todas las configuraciones de cortasoles.

En la Figura 25 se muestra que cuando el viento se encuentra a barlovento en relación con la fachada analizada, las velocidades ponderadas interiores son más bajas que cuando se encuentra a barlovento, lo que genera menor distribución espacial de confort térmico y menor desempeño. El caso base cuenta nuevamente con mejor desempeño de velocidad del viento y de confort térmico por efecto del viento.

4.5. Criterios de diseño

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten definir lineamientos generales de diseño en función de la ventilación natural. Se plantea que el primer criterio que se debe emplear es el de los requerimientos de los cortasoles en función de la radiación y la mecánica solar. Sin embargo, una vez establecidos los requerimientos en función del sol, se deben asegurar lineamientos básicos en temas de geometría de los cortasoles y orientación en función de la dirección predominante del viento en el lugar.

4.5.1. Sobre la orientación

Una vez definidas las fachadas que tendrán elementos de cortasoles verticales, se recomienda determinar la orientación del elemento en función de la dirección predominante del viento del lugar.

Capítulo 4. Resultados

Se debe evitar siempre que la dirección predominante del viento sea en dirección paralela a la fachada analizada, en caso de que esto ocurra se recomienda girar el elemento en dirección al viento para que los cortasoles no estén perpendiculares a la fachada analizada y permitan el ingreso del viento con menor resistencia (Figura 26).

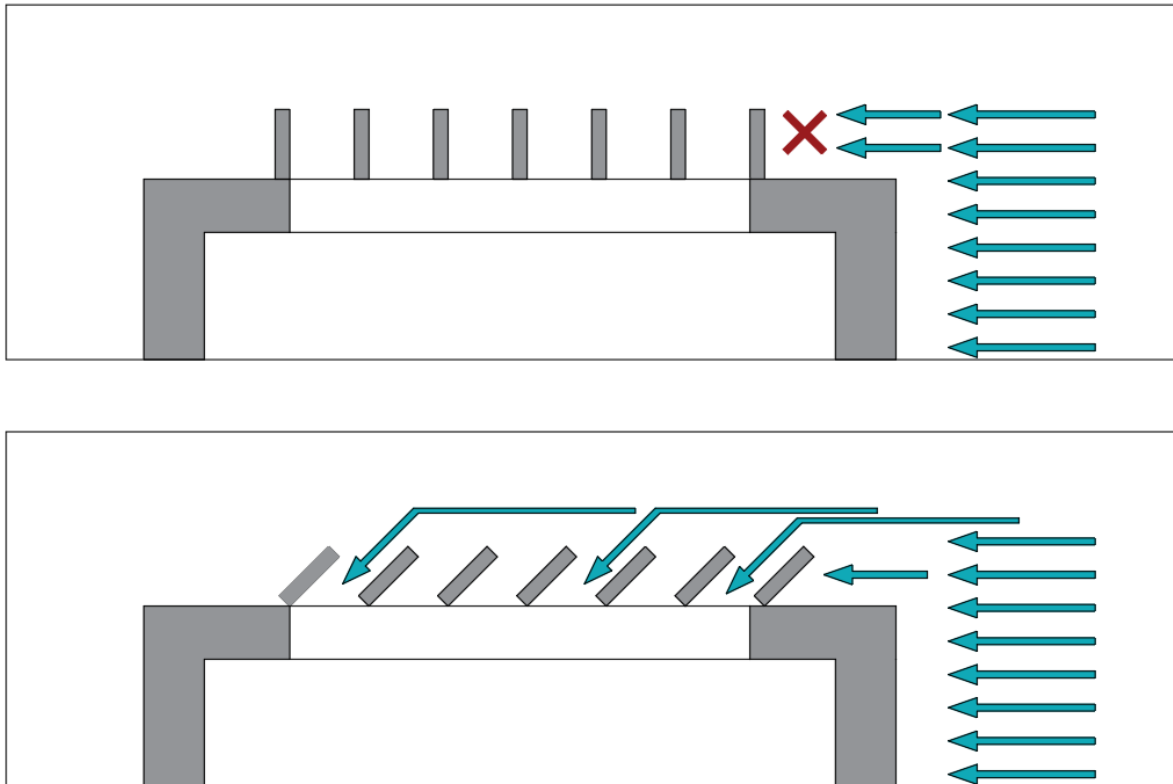


Figura 26. Recomendación de orientación de elementos para la dirección crítica del viento

Las orientaciones óptimas para la estrategia de ventilación cruzada son en orden de mejor desempeño en primer lugar la orientación 1: Norte, cuando el viento se encuentra perpendicular a la fachada y el cortasol se encuentra en dirección paralela a la dirección del viento, la fachada analizada se encuentra a barlovento. En segundo lugar, la orientación 4: Sureste, diagonal en la fachada opuesta a la fachada analizada que se encuentra a sotavento y en tercer lugar orientación 5: Sur, cuando el viento se encuentra perpendicular a la fachada y el cortasol se encuentra en dirección paralela a la dirección del viento, la fachada analizada se encuentra a sotavento (Figura 27).

Capítulo 4. Resultados

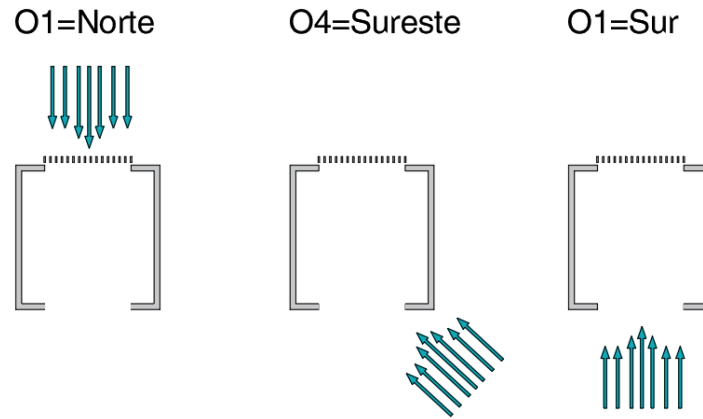


Figura 27. Direcciones de viento predominante óptimas según los resultados obtenidos para ventilación cruzada.

Para ventilación unilateral, la dirección de viento predominante que tiene mejor desempeño, según los resultados obtenidos es la O2=Noreste, diagonal a la fachada analizada y la fachada se encuentra a barlovento (Figura 28). Sin embargo, está claro que esta estrategia no alcanza niveles de velocidad de viento adecuadas para afectar el confort térmico adaptativo en las condiciones de viento exterior simuladas.

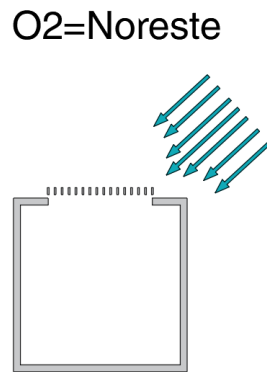


Figura 28. Direcciones de viento predominante con mejor desempeño según los resultados obtenidos para ventilación unilateral.

4.5.2. Sobre la geometría y las características físicas

Según los resultados obtenidos el distanciamiento mínimo que permite movimiento de aire interior, con velocidades considerables dentro del estándar de confort térmico bajo el modelo adaptativo ASHRAE (2017) es el de 0.05 m, distanciamientos menores a este cuentan con un movimiento de aire imperceptible y ninguna variación, afectando directamente las condiciones de

Capítulo 4. Resultados

confort interiores. Debido a esto para cumplir con los requerimientos de protección solar necesarios en la arquitectura tropical, se deben plantear cortasoles verticales con una longitud mayor, que permitan un mayor distanciamiento y evite impactos directos sobre el viento y el confort interior (Figura 29).

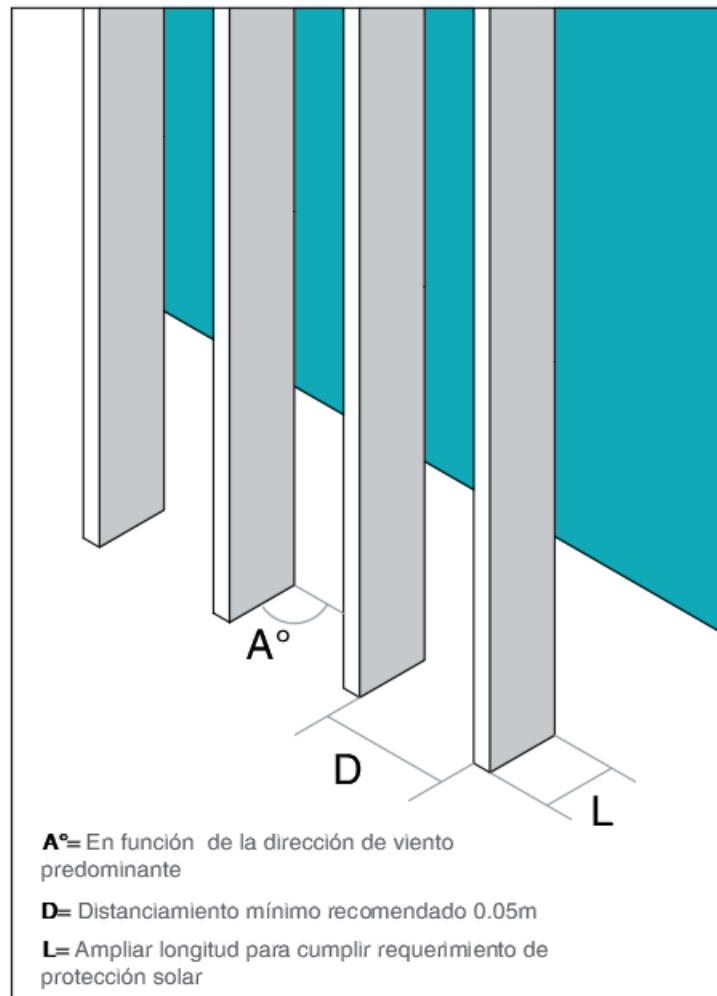


Figura 29. Recomendaciones de configuración geométrica para los cortasoles verticales

Por último, la fricción superficial del cortasol en función del material seleccionado, así como su geometría aerodinámica ayudarán a disminuir el impacto en las condiciones de viento interior, es importante seleccionar materiales con un coeficiente de rugosidad bajo y con una geometría que disminuya las aristas para que permita el ingreso directo del viento. Aclarando que estas variables no entraron en consideración de la presente investigación y que se deberá corroborar esta información con los análisis pertinentes en futuras investigaciones.

Capítulo 5. Conclusiones

Capítulo 5. Discusión y conclusiones

Mediante esta investigación se pretendió analizar el impacto que tienen los cortasoles verticales en el viento interior para confort térmico, con el fin de determinar criterios de diseño para la protección solar en la arquitectura del clima tropical. Basados en los resultados obtenidos se obtiene que efectivamente, los cortasoles verticales para climas templados húmedos tropicales en los que la ventilación natural es una de las estrategias pasivas principales para el confort térmico, impactan directamente sobre la distribución del viento al interior del espacio, afectando el confort térmico de los ocupantes. Sin embargo, al emplearse estos dispositivos se logra disminuir el impacto por radiación solar directa, por lo que se considera una estrategia pasiva altamente pertinente para el clima tropical. A partir de esto se definieron valores óptimos de distribución de protectores solares en función de la dirección predominante del viento y se definieron valores mínimos de separación entre cortasoles a partir del cual la velocidad interior no es adecuada para las condiciones de confort esperadas y se concluye que la implementación de la protección solar, acompañada de criterios de diseño que involucren menor afectación a la ventilación natural interior, puede resultar en una estrategia pasiva óptima para el clima interior de las edificaciones.

5.1. Sobre la hipótesis y los objetivos

La hipótesis de esta investigación se concluye bajo tres puntos principales, en primer lugar, se analizó el impacto de los cortasoles verticales sobre la velocidad de viento interior, en segundo lugar se interpretaron los resultados de estas velocidades bajo el impacto sobre el confort térmico en clima templado húmedo de la ciudad de Medellín y para finalizar se definieron los criterios de diseño de cortasoles verticales en función de la dirección predominante del viento y el distanciamiento entre cortasoles verticales que tenga en cuenta las condiciones de viento interior para confort térmico.

Se analizó la reducción de la velocidad ponderada interior del viento en función de la variación del distanciamiento y la longitud entre cortasoles verticales, y se concluye que se puede alcanzar una disminución de la velocidad de viento interior de un 85% correspondiente al cortasol con un área de abertura menor en comparación con el caso base, correspondiente a la abertura sin obstrucción de cortasoles verticales. Esta reducción de velocidad interior se presenta bajo una dirección predominante del viento a barlovento, en sentido perpendicular a la fachada analizada, generando amplias zonas de sombra de viento que afectan directamente sobre el confort de los ocupantes.

Capítulo 5. Conclusiones

La disminución de la velocidad del viento interior en función del porcentaje de abertura libre para ventilación de las variables analizadas no es una relación directa, ya que está influenciada por la resistencia adicional de la fricción del viento en función del distanciamiento entre elementos. Sin embargo, bajo el análisis de las variables analizadas se concluye que a mayor distanciamiento entre cortasoles verticales, mayor ingreso de velocidades de viento. La disminución de la velocidad del viento del caso base con respecto al D1 es del 25%, con respecto al D2 es del 32%, con respecto al D3 es del 49% y con respecto al D4 y D5 es del 85% sin presentarse variaciones entre estas dos últimas variables, bajo la orientación más favorable, correspondiente a barlovento en sentido perpendicular de la fachada analizada. La dirección más desfavorable para el ejercicio, correspondiente a la dirección en sentido paralelo a la fachada analizada, cuenta con una velocidad máxima de 0.16m/s del caso base y la variable D1, lo que genera unas variaciones imperceptibles entre variables que disminuyen hasta 0.12m/s correspondiente a las variables D3, D4 y D5, que si bien se genera una reducción del 25% en la realidad estas velocidades no generan impactos considerables dentro del análisis de confort térmico y se debe a que no existe diferencia de presiones considerables en las fachadas que permitan ingreso de viento por las aberturas, en el caso de los protectores además del condicionante del diferencial de presión, se adiciona las obstrucciones en fachada, por lo que la orientación 3, paralela a la fachada analizada se consideró la más desfavorable.

Si revisamos el impacto las velocidades interiores de viento sobre el confort térmico bajo el modelo adaptativo ASHRAE 55 podemos concluir que se generan reducciones de confort térmico interior para las velocidades ponderadas menores a 0.6 m/s correspondiente a la velocidad interior que modifica el rango de temperatura de confort superior según el estándar ASHRAE 55 (2017). Sin embargo, con el fin de determinar espacialmente el impacto del confort térmico se analizó el porcentaje del espacio que se encuentra por encima de los 0.6 m/s y encontrar un indicador de confort más cercano a las condiciones de viento interior, ya que para la muestra analizada estas velocidades interiores correspondían a las velocidades que permiten superar el umbral de 80% de horas anuales de confort térmico del espacio.

A partir de esto se encontró que la dirección de viento más favorable para el viento interior en función del confort térmico es la dirección a barlovento de la fachada analizada, generando mayor porcentaje del espacio por encima del 80% de horas anuales de confort, esto se debe a que el ingreso de viento es directo y perpendicular a la fachada analizada, encontrando menos obstáculos que disminuyan la velocidad de viento y genere zonas de recirculación del viento. Se concluye que las

Capítulo 5. Conclusiones

velocidades del viento afectadas por los cortasoles verticales impactan sobre las horas de confort anuales bajo el modelo adaptativo y sobre la distribución espacial del confort térmico para los edificios ventilados naturalmente. El escenario de cortasol que mejor desempeño tiene en términos de confort térmico y ventilación natural es el D1, debido a que permite el mayor ingreso de velocidades del viento al espacio y podría contar con un mejor desempeño global que el caso base, debido a que disminuye la afectación directa de la radiación solar con un SHGC equivalente de 0.25 y en cuanto al indicador de confort térmico espacial, el escenario D1 oscila entre 31.1% y 51.8% del espacio para las orientaciones más favorables, ya que las direcciones de viento O2 y O3 (Noreste y este respectivamente) siendo las más desfavorables no permiten que el espacio alcance más del 80% de horas anuales de confort térmico adaptativo.

La variabilidad del porcentaje de horas de confort al año entre los dispositivos más densos “D4” y “D5” es casi nula, debido a que no existen velocidades interiores suficientes para modificar el rango superior de la temperatura de confort y la variación solo está influida por la temperatura operativa resultante de las renovaciones de aire por hora, obtenidas en el análisis de CFD interior. El caso base sin protectores presenta mejor desempeño de confort térmico si se analiza el indicador espacial, debido a que cuenta con mayor área afectada por velocidades mayores a 0.6 m/s. Sin embargo, en periodos de calma del viento o en orientaciones que no permitan el alto ingreso de las velocidades del viento, el caso base contará con un bajo desempeño de confort térmico debido a la afectación por radiación solar directa, en comparación con las variables de cortasoles analizadas.

Por último, a partir de los resultados obtenidos se plantearon criterios de diseño generales en función del distanciamiento entre cortasoles y orientaciones predominantes del viento para climas tropicales, permitiendo concluir que el diseño de cortasoles verticales para edificios ventilados naturalmente debe contar con un análisis global de todas los fenómenos ambientales que pueden afectar el desempeño del espacio, ya que una mayor densidad de cortasoles verticales puede generar un mayor desempeño en términos de protección de radiación solar, sin embargo puede traer consigo implicaciones directas sobre el desempeño de la ventilación natural y disminuir el desempeño de confort térmico del edificio.

5.2. Implicaciones teóricas y prácticas

La normativa revisada en la presente investigación, si bien permite calcular la ventilación natural en función del área libre de abertura para ventilación natural, no tiene en cuenta el factor de la

Capítulo 5. Conclusiones

resistencia al ingreso del viento que pueden generar los elementos que obstruyen la fachada, lo que puede generar falencias en el desempeño esperado, debido a que se puede cumplir con el área de abertura pero como se puede concluir en esta investigación, con un bajo distanciamiento entre elementos se puede generar un impacto directo al confort térmico del espacio y a la velocidad del viento interior, que no está directamente relacionada con el área libre de abertura, se debe relacionar en el análisis de porcentaje de abertura que exige la norma, las condiciones geométricas de las aberturas, para determinar una eficiencia de la ventilación natural.

La afectación de la ventilación natural de los elementos en fachada ha sido ampliamente estudiada; elementos como balcones, aleros horizontales, elementos de doble fachada (DSF) y lamas horizontales (persianas o rejillas) han sido investigadas según la afectación de la velocidad de viento interior, la afectación de las presiones del viento exterior y el impacto del confort térmico. Sin embargo, estas investigaciones se centran en otros tipos de dispositivos de protección solar. Kosutova y compañía analizaron el impacto de las lamas horizontales sobre el viento interior, sin embargo, se centran en la ubicación de las lamas con respecto a la fachada y no en configuración geométrica de los elementos que componen las lamas. En su investigación concluyeron sobre factores importantes como la afectación de la rugosidad del suelo en el ingreso de aire al interior de los espacios y el impacto generado por las obstrucciones de las lamas horizontales en la velocidad del viento (Kosutova et al., 2019).

Otros estudios analizaron la afectación de los cortasoles en las cavidades de una DSF sin embargo, los elementos de doble fachada por lo general se centran en la eficiencia energética para edificios refrigerados artificialmente y en la afectación del viento en el espacio en la cavidad resultante (Nishikawa et al., 2020) (Lee & Chang, 2015). Sin embargo, Lee & Chang concluyen con respecto a la orientación óptima de los cortasoles verticales en función de la temperatura del aire de la cavidad y la distribución del flujo de viento por fenómenos convectivos, encontraron que la orientación óptima de los cortasoles es el ángulo de 0° (paralelo a la fachada), sin embargo en contraste con los resultados de la presente investigación en temas metodológicos, para unos cortasoles adosados a la fachada del edificio, sin contar con una cavidad intermedia, los resultados de ingreso de flujo de viento pueden ser completamente distintos, ya que no se produce un flujo de viento intermedio.

El impacto de la composición geométrica de los cortasoles verticales en el viento interior en función del confort térmico en climas tropicales se encuentra como un estudio pertinente para

Capítulo 5. Conclusiones

entender el funcionamiento del fenómeno y disminuir posibles brechas de desempeño en el ejercicio práctico y profesional del diseño arquitectónico, que involucre dispositivos de protección solar y ventilación natural como estrategias pasivas de eficiencia energética y confort.

Esta investigación tiene un alcance práctico y profesional en términos de criterios de diseño arquitectónico para la configuración de cortasoles verticales en fachada, permitiendo analizar de forma global los fenómenos que afectan el espacio interior cuando se cuenta con elementos de protección solar como los cortasoles verticales.

5.3. Limitaciones del estudio

Para analizar el impacto de la longitud del elemento y mayor variación de la ventilación natural, es pertinente analizar dispositivos de sombreado con una mayor longitud que la analizada hasta el momento. Los resultados de las diferentes orientaciones del viento aportarán a la investigación mayor variabilidad y permitirán concluir con mayor propiedad los resultados obtenidos. Sin embargo, se presenta como limitante de la investigación el cálculo teórico del SHGC equivalente, debido a que no involucra dentro de la metodología el espesor del elemento para determinar un factor de sombra, solo tiene en cuenta el distanciamiento y la longitud del elemento, lo que implica que el SHGC Equivalente puede tener variaciones, sin embargo, se asume sin variaciones en esta investigación para analizar el impacto en la ventilación natural y tener control sobre las variables analizadas.

Las velocidades exteriores de esta investigación son relativamente bajas si se comparan con las de otras ciudades tropicales, esto se debe a la condición topográfica de la ciudad. Si se analiza esta metodología bajo otras condiciones de velocidad de viento exterior se pueden obtener unos resultados con mejor desempeño de los cortasoles verticales. Sin embargo, es de gran pertinencia el análisis de velocidades exteriores del viento bajas debido a que el viento es altamente variable en el tiempo y permite el análisis con escenarios críticos para diferentes ciudades tropicales.

5.4. Futuras investigaciones

se plantea para futuras investigaciones analizar el indicador espacial de confort térmico en función de las velocidades interiores y también indicadores espaciales de radiación solar permitiendo variar el SHGC equivalente de los cortasoles y determinar una zonificación del confort térmico para evaluarse bajo estándares mínimos de desempeño, para esto, las futuras investigaciones podrán definir umbrales mínimos de este indicador espacial de confort térmico.

Capítulo 5. Conclusiones

También se plantea como futuras investigaciones un posible análisis de optimización multivariable de los cortasoles verticales, involucrando variables de eficiencia energética, confort térmico, velocidad de viento interior, incidencia de la radiación solar y un análisis de costo y recuperación de la inversión, con el fin de analizar la pertinencia de emplear esta estrategia pasiva en climas tropicales.

Referencias bibliográficas

Referencias bibliográficas

- Aflaki, A., Mahyuddin, N., Al-Cheikh Mahmoud, Z., & Baharum, M. R. (2015). A review on natural ventilation applications through building façade components and ventilation openings in tropical climates. *Energy and Buildings*, 101, 153–162.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.033>
- Aflaki, A., Mahyuddin, N., & Mahmoud, Z. A. (2015). *A review on natural ventilation applications through building fac components and ventilation openings in tropical climates*. 101, 153–162.
- Ahmed, T., Kumar, P., & Mottet, L. (2021). Natural ventilation in warm climates: The challenges of thermal comfort, heatwave resilience and indoor air quality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138(May 2020), 110669. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110669>
- Al-Masrani, S. M., Al-Obaidi, K. M., Zalin, N. A., & Aida Isma, M. I. (2018). Design optimisation of solar shading systems for tropical office buildings: Challenges and future trends. *Solar Energy*, 170(April), 849–872. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.047>
- Al-Tamimi, N. A., & Fadzil, S. F. S. (2011). The potential of shading devices for temperature reduction in high-rise residential buildings in the tropics. *Procedia Engineering*, 21, 273–282.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2015>
- Alwetaishi, M., Al-Khatiri, H., Benjeddou, O., Shamseldin, A., Alsehli, M., Alghamdi, S., & Shrahily, R. (2021). An investigation of shading devices in a hot region: A case study in a school building. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(3), 3229–3239.
<https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.02.008>
- Amini, R., Ghaffarianhoseini, A., Ghaffarianhoseini, A., & Berardi, U. (2021). Numerical investigation of indoor thermal comfort and air quality for a multi-purpose hall with various shading and glazing ratios. *Thermal Science and Engineering Progress*, 22(July 2020), 100812.
<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100812>
- ASHRAE. (2017). ANSI/ASHRAE Standard 55-2017 : Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. *ASHRAE Inc.*, 2017, 66.
- Barbosa, S., Ip, K., & Southall, R. (2015). Thermal comfort in naturally ventilated buildings with

Referencias bibliográficas

- double skin façade under tropical climate conditions: The influence of key design parameters. *Energy and Buildings*, 109, 397–406. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.10.029>
- Dutta, A., Samanta, A., & Neogi, S. (2017). Influence of orientation and the impact of external window shading on building thermal performance in tropical climate. *Energy and Buildings*, 139, 680–689. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.018>
- Freewan, A. A. Y. (2014). Impact of external shading devices on thermal and daylighting performance of offices in hot climate regions. *Solar Energy*, 102, 14–30. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.01.009>
- Gamero-Salinas, J. C., Monge-Barrio, A., & Sánchez-Ostiz, A. (2020). Overheating risk assessment of different dwellings during the hottest season of a warm tropical climate. *Building and Environment*, 171(November 2019). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106664>
- Gamero-Salinas, J., Monge-Barrio, A., Kishnani, N., López-Fidalgo, J., & Sánchez-Ostiz, A. (2021). Passive cooling design strategies as adaptation measures for lowering the indoor overheating risk in tropical climates. *Energy and Buildings*, 252, 111417. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111417>
- Haase, M., & Amato, A. (2009). An investigation of the potential for natural ventilation and building orientation to achieve thermal comfort in warm and humid climates. *Solar Energy*, 83(3), 389–399. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.08.015>
- Hashemi, A., & Khatami, N. (2017). Effects of Solar Shading on Thermal Comfort in Low-income Tropical Housing. *Energy Procedia*, 111(September 2016), 235–244. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.025>
- IDEAM. (2014a). *Clasificación climática de Caldas-Lang República de Colombia*. 1010000.
- IDEAM. (2014b). *Clasificación climática de Köppen-Geiger República de Colombia*. 78.
- EDGE User Guide 2, (2019). <https://www.edgebuildings.com/wp-content/uploads/2019/05/052919-EDGE-User-Guide-for-All-Building-Types-Version-2.1.pdf?MOD=AJPERES#page=>
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM. (2018). Características

Referencias bibliográficas

- Climatológicas De Ciudades Principales Y Municipios Turísticos. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*, 48.
<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Características+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Turísticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc%0Ahttp://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/1Sitios+turisticos2.pdf/cd4106e9-d608-4c29-91cc-16bee91>
- Izadyar, N., Miller, W., Rismanchi, B., & Garcia-Hansen, V. (2020). A numerical investigation of balcony geometry impact on single-sided natural ventilation and thermal comfort. *Building and Environment*, 177(February), 106847. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106847>
- Kahsay, M. T., Bitsuamlak, G. T., & Tariku, F. (2019). CFD simulation of external CHTC on a high-rise building with and without façade appurtenances. *Building and Environment*, 165(April), 106350. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106350>
- Kosutova, K., van Hooff, T., Vanderwel, C., Blocken, B., & Hensen, J. (2019). Cross-ventilation in a generic isolated building equipped with louvers: Wind-tunnel experiments and CFD simulations. *Building and Environment*, 154(October 2018), 263–280.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.019>
- Kumar, S., Rawal, R., Bajpai, A., & Rao, G. S. (2009). Energy Conservation Building Code User Guide. In *Bureau of Energy Efficiency*.
[https://ia601000.us.archive.org/35/items/gov.in.is.3346.1980/is.3346.1980.pdf%0Ahttps://irjet.net/archives/V4/i7/IRJET-V4I7111.pdf%0Awww.irjet.net%0Ahttps://beeindia.gov.in/sites/default/files/ECBC User Guide V-0.2 %28Public%29.pdf](https://ia601000.us.archive.org/35/items/gov.in.is.3346.1980/is.3346.1980.pdf%0Ahttps://irjet.net/archives/V4/i7/IRJET-V4I7111.pdf%0Awww.irjet.net%0Ahttps://beeindia.gov.in/sites/default/files/ECBC%20User%20Guide%20V-0.2%28Public%29.pdf)
- Lee, J., Alshayeb, M., & Chang, J. D. (2015). A Study of Shading Device Configuration on the Natural Ventilation Efficiency and Energy Performance of a Double Skin Façade. 118, 310–317.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.432>
- Lee, J., & Chang, J. D. (2015). Influence on Vertical Shading Device Orientation and Thickness on the Natural Ventilation and Acoustical Performance of a Double Skin Facade. *Procedia Engineering*, 118, 304–309. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.431>

Referencias bibliográficas

- Ministerio de Transporte Movilidad y Agenda Urbana. (2020). *CTE DA DB-HE/1 Cálculo de parámetros característicos de la envolvente*. 1–26.
https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DA_DB-HE-1_Calculo_de_parametros_caracteristicos_de_la_envolvente.pdf
- Decreto 1285, (2015).
- Resolución 0549 del Decreto 1285, (2015).
- Montazeri, H., & Blocken, B. (2013). CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: Validation and sensitivity analysis. *Building and Environment*, 60, 137–149. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.012>
- Montazeri, H., Blocken, B., Janssen, W. D., & van Hooff, T. (2013). CFD evaluation of new second-skin facade concept for wind comfort on building balconies: Case study for the Park Tower in Antwerp. *Building and Environment*, 68, 179–192. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.07.004>
- Naboni, E., Lee, D. S., & Fabbri, K. (2020). Thermal Comfort-CFD maps for Architectural Interior Design. *Procedia Engineering*, 180, 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.170>
- Nishikawa, S., Gomi, I., Katsumata, S., Kamata, H., Nagata, A., Kinoshita, T., & Sakuma, E. (2020). Experimental and numerical study of heat transfer from a window with an internal Venetian blind. *Energy and Buildings*, 223, 110128. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110128>
- Qahtan, A. M. (2019). Thermal performance of a double-skin façade exposed to direct solar radiation in the tropical climate of Malaysia: A case study. *Case Studies in Thermal Engineering*, 14(January), 100419. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100419>
- Shetabivash, H. (2015). Investigation of opening position and shape on the natural cross ventilation. *Energy and Buildings*, 93, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.053>
- Yarke, E. (2005). *Ventilación natural de edificios*.
- Zune, M., Rodrigues, L., & Gillott, M. (2020). Vernacular passive design in Myanmar housing for thermal comfort. *Sustainable Cities and Society*, 54(December 2019), 101992. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101992>

Referencias bibliográficas

Anexo A

Anexo A. Cálculo de velocidades ponderadas por área (Ventilación cruzada)

- Caso base
 - O1

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	9,8%	7,2%	10,2%	11,3%	8,1%	7,1%	6,9%	7,2%	9,1%	10,0%	9,2%	3,9%

- O2

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	1,4%	1,8%	3,3%	10,3%	12,5%	14,7%	9,0%	7,2%	6,5%	13,0%	15,5%	4,9%

- O3

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,1%	6,3%	48,3%	44,2%

- O4

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	2,5%	1,9%	3,8%	9,8%	10,2%	14,9%	10,7%	7,9%	8,3%	13,6%	13,2%	3,2%

- O5

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	9,8%	7,2%	10,2%	11,3%	8,1%	7,1%	6,9%	7,2%	9,1%	10,0%	9,2%	3,9%

Anexo A

- D1
 - O1

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	0,2%	0,3%	2,7%	5,5%	25,5%	9,9%	7,6%	6,7%	7,8%	13,9%	13,2%	6,7%

- O2

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	12,7%	30,7%	19,2%	18,9%	18,4%

- O3

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,3%	2,1%	10,4%	32,4%	54,8%

- O4

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	0,3%	0,8%	0,8%	3,7%	13,2%	11,0%	13,9%	10,0%	9,1%	14,4%	15,9%	6,9%

- O5

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	0,9%	7,0%	22,9%	18,8%	14,3%	14,1%	14,7%	7,0%

Anexo A

- D2
 - O1

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	0,2%	0,4%	0,6%	2,0%	7,3%	19,5%	19,7%	8,2%	8,1%	12,8%	14,9%	6,3%

- O2

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	2,4%	24,8%	32,8%	21,2%	18,6%

- O3

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	4,7%	18,9%	76,1%

- O4

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	0,2%	0,5%	0,7%	1,1%	2,0%	14,7%	14,6%	15,3%	9,3%	15,0%	18,4%	8,2%

- O5

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	0,6%	2,2%	8,5%	29,2%	19,7%	15,3%	16,6%	7,6%

Anexo A

- D3
 - O1

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	2,7%	12,7%	18,0%	25,3%	15,5%	14,9%	10,7%

- O2

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,5%	12,4%	21,0%	30,2%	20,0%	15,8%

- O3

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,3%	1,0%	2,5%	14,1%	82,1%

- O4

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	1,3%	0,7%	1,0%	1,6%	4,5%	9,9%	14,3%	14,9%	9,7%	12,4%	19,2%	10,6%

- O5

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	0,0%	0,0%	0,0%	0,4%	3,8%	7,8%	13,5%	28,3%	16,1%	14,5%	9,0%	6,6%

Anexo A

- D4
 - O1

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	7,2%	92,7%

- O2

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	7,1%	92,8%

- O3

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,7%	2,5%	16,5%	80,3%

- O4

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	0,0%	0,0%	0,1%	0,4%	0,4%	0,5%	0,6%	1,0%	8,2%	14,5%	42,2%	32,0%

- O5

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	39,3%	60,6%

Anexo A

- D5
 - O1

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,3%	6,4%	93,2%

- O2

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,4%	4,6%	94,9%

- O3

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,4%	1,1%	2,2%	13,8%	82,5%

- O4

Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	0,0%	0,1%	0,4%	0,4%	0,5%	0,7%	1,0%	1,5%	7,2%	11,4%	40,8%	36,1%

- O5

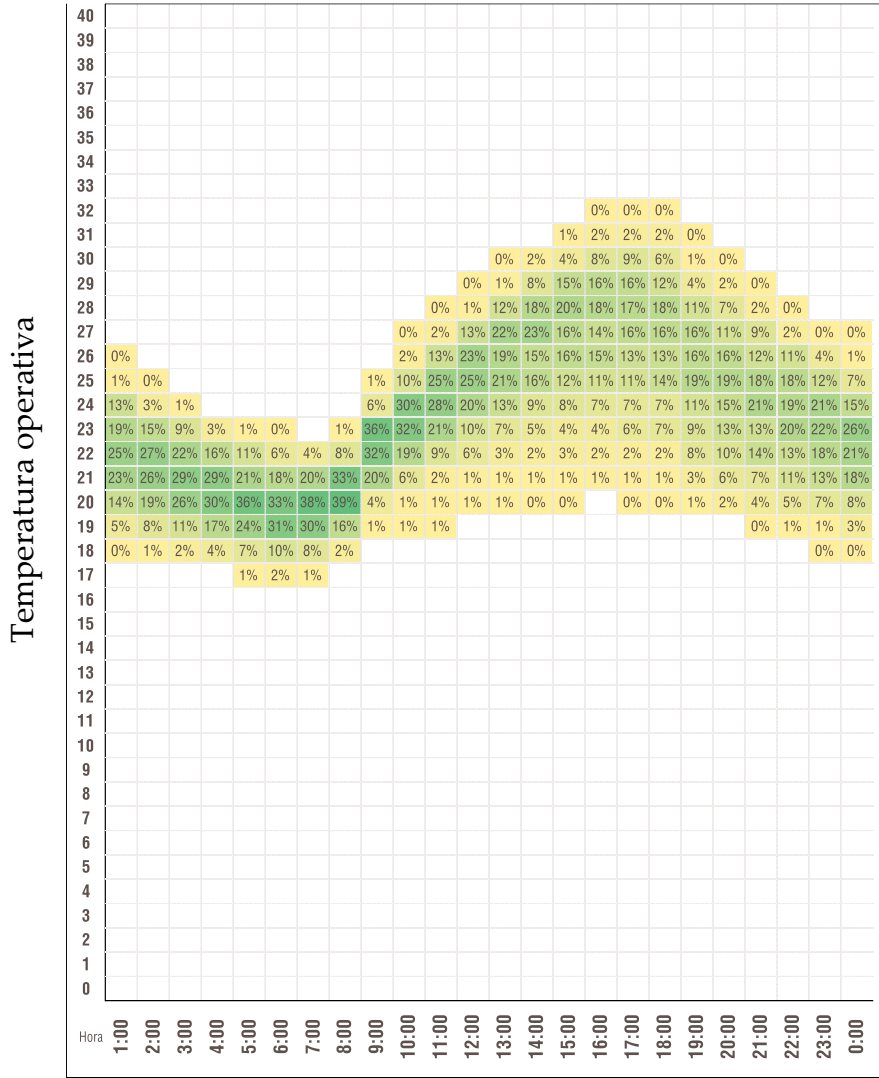
Velocidades (m/s)	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Porcentaje según área	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,6%	41,4%	57,0%

Anexo B

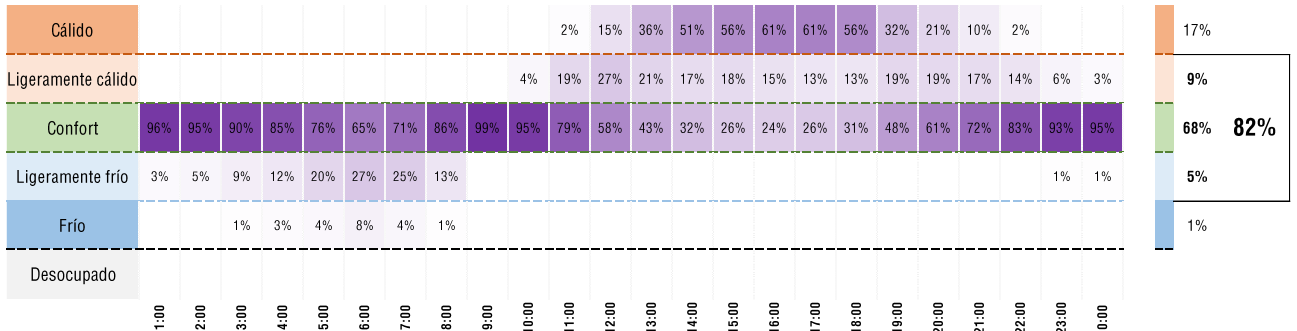
Anexo B. Graficación de temperaturas y confort térmico adaptativo anual

- Resultados evaluación de temperatura operativa y confort térmico anual - Caso base

○ Orientación 1= Norte

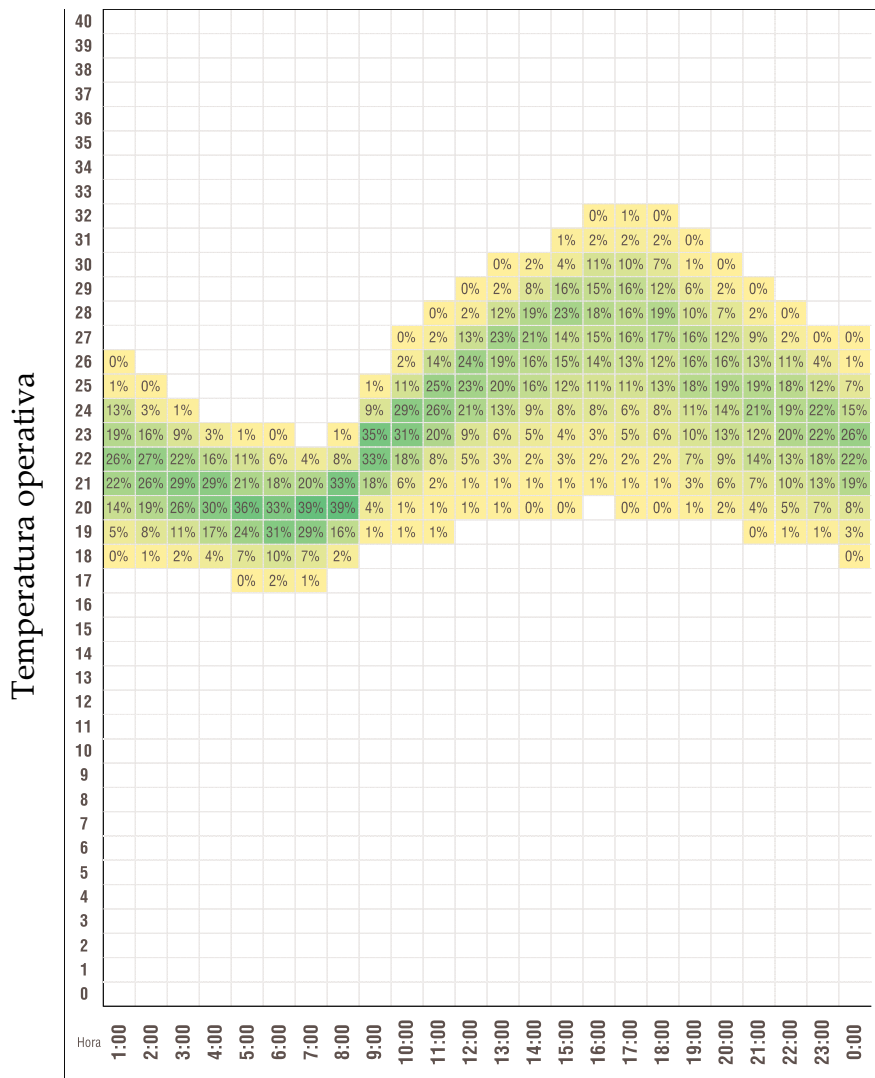


ASHRAE 55

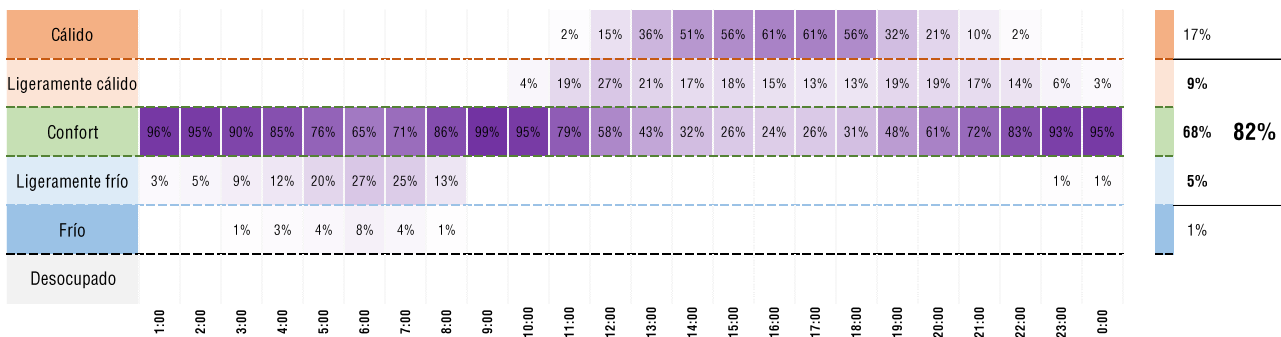


Anexo B

○ Orientación 2=Noreste

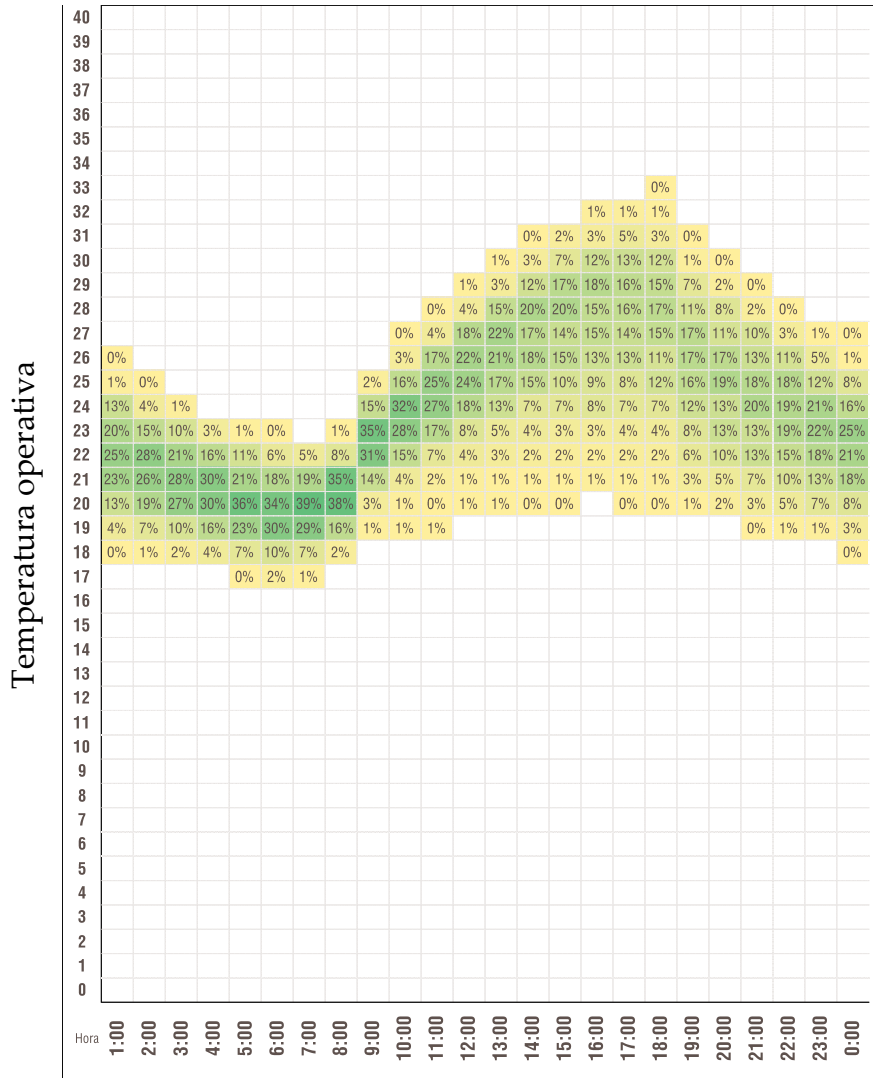


ASHRAE 55

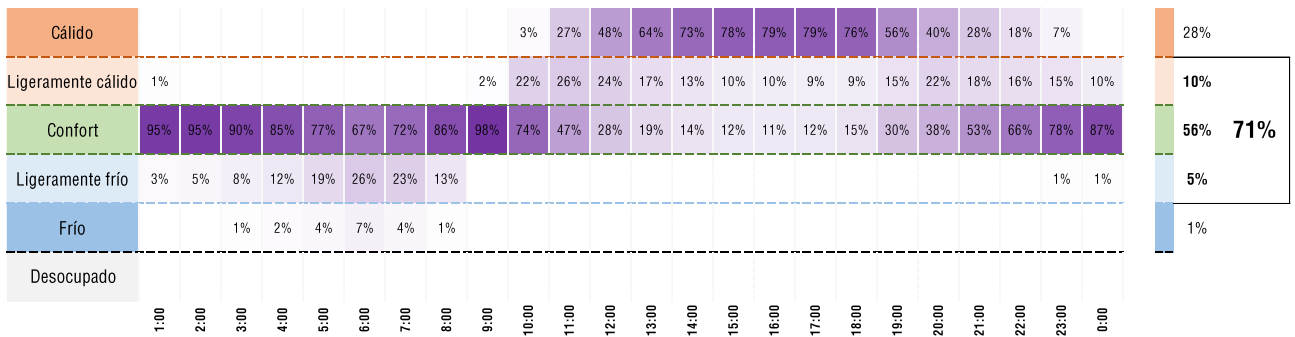


Anexo B

o Orientación 3=Este

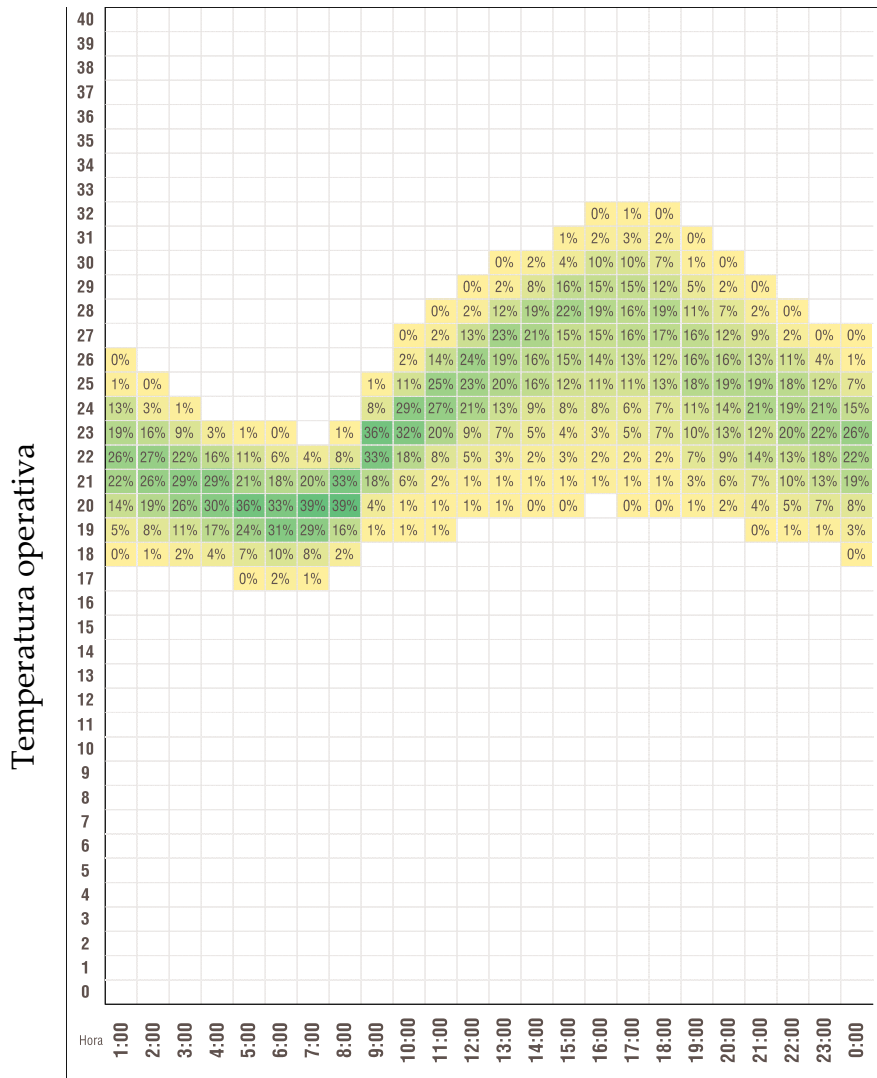


ASHRAE 55

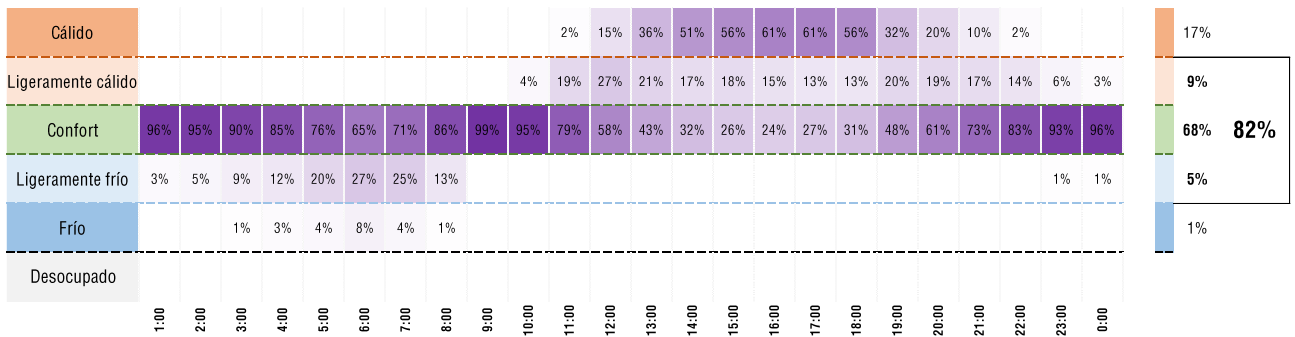


Anexo B

○ Orientación 4=Sureste

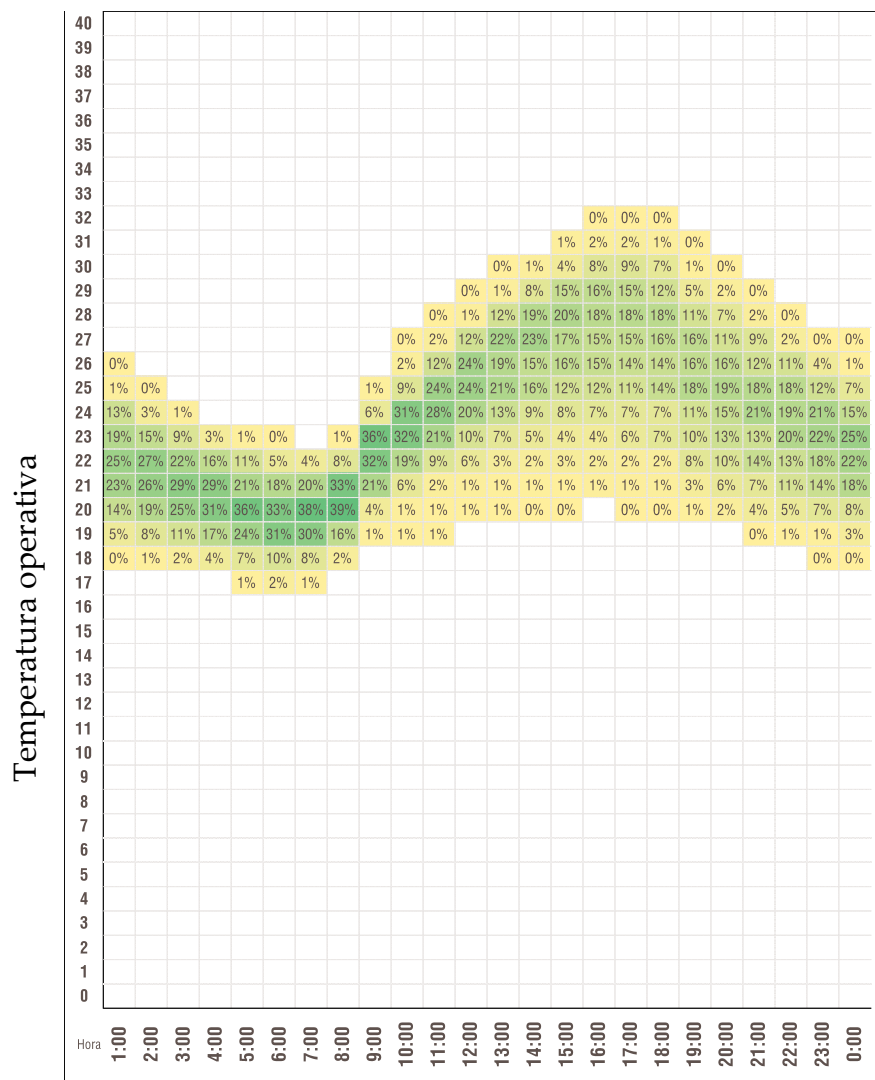


ASHRAE 55

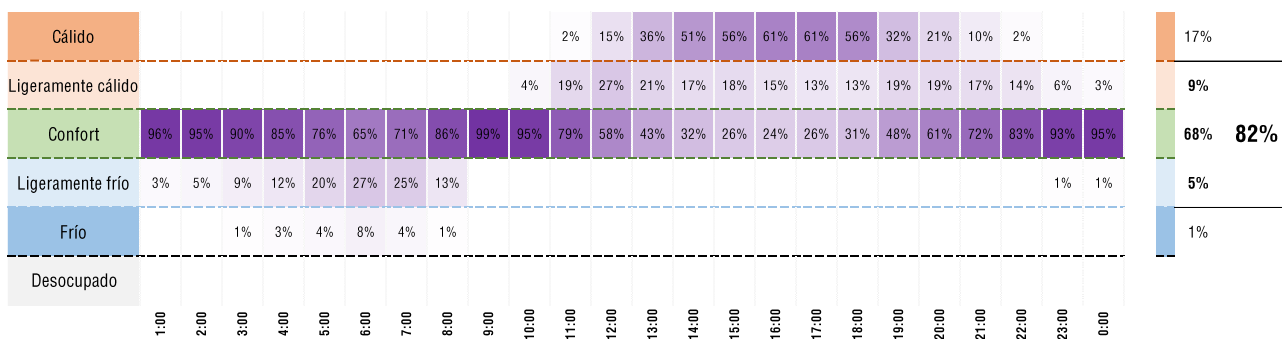


Anexo B

○ Orientación 5= Sur

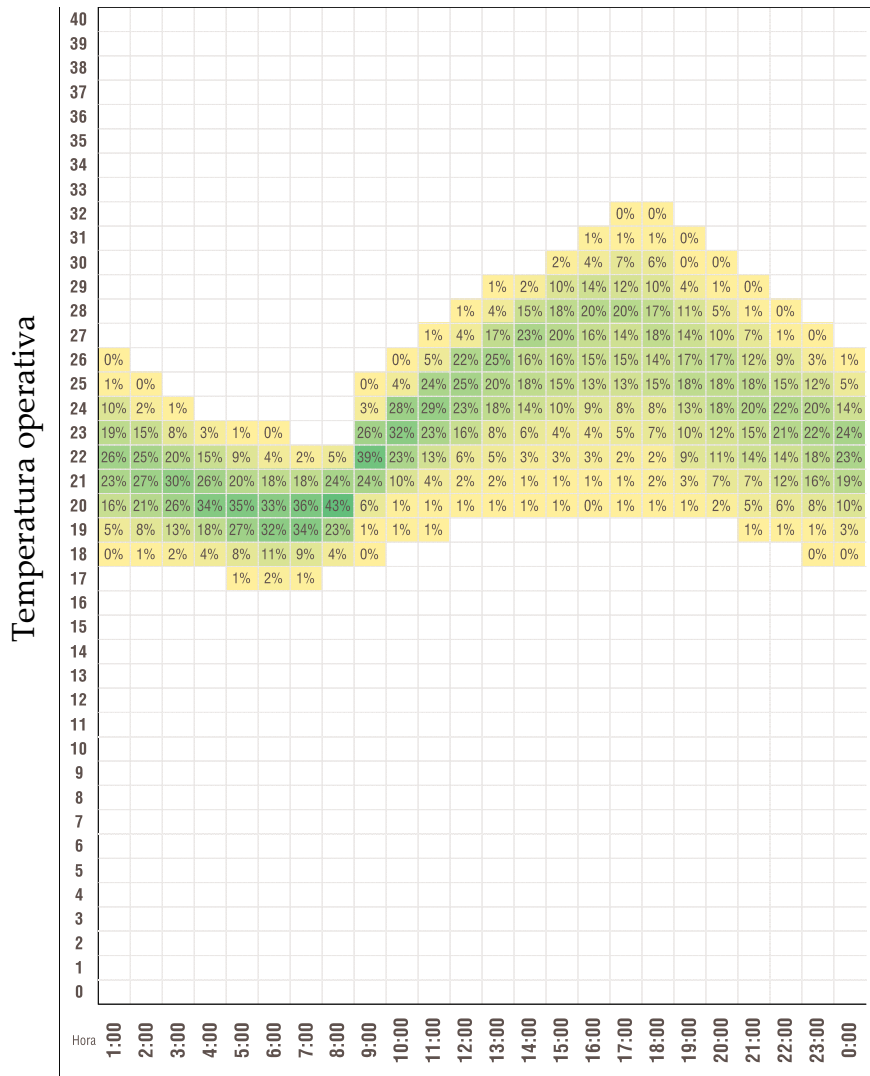


ASHRAE 55

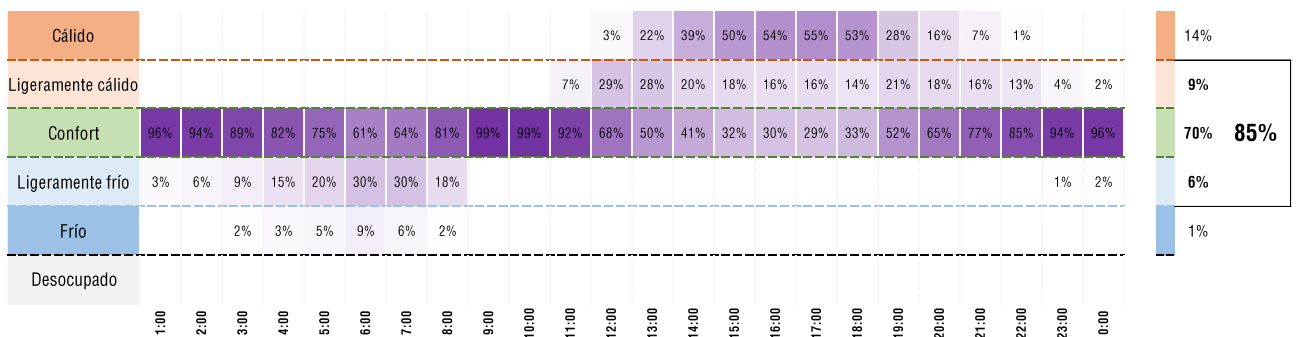


Anexo B

- Resultados evaluación de temperatura operativa y de confort térmico anual D1
 - Orientación 1= Norte

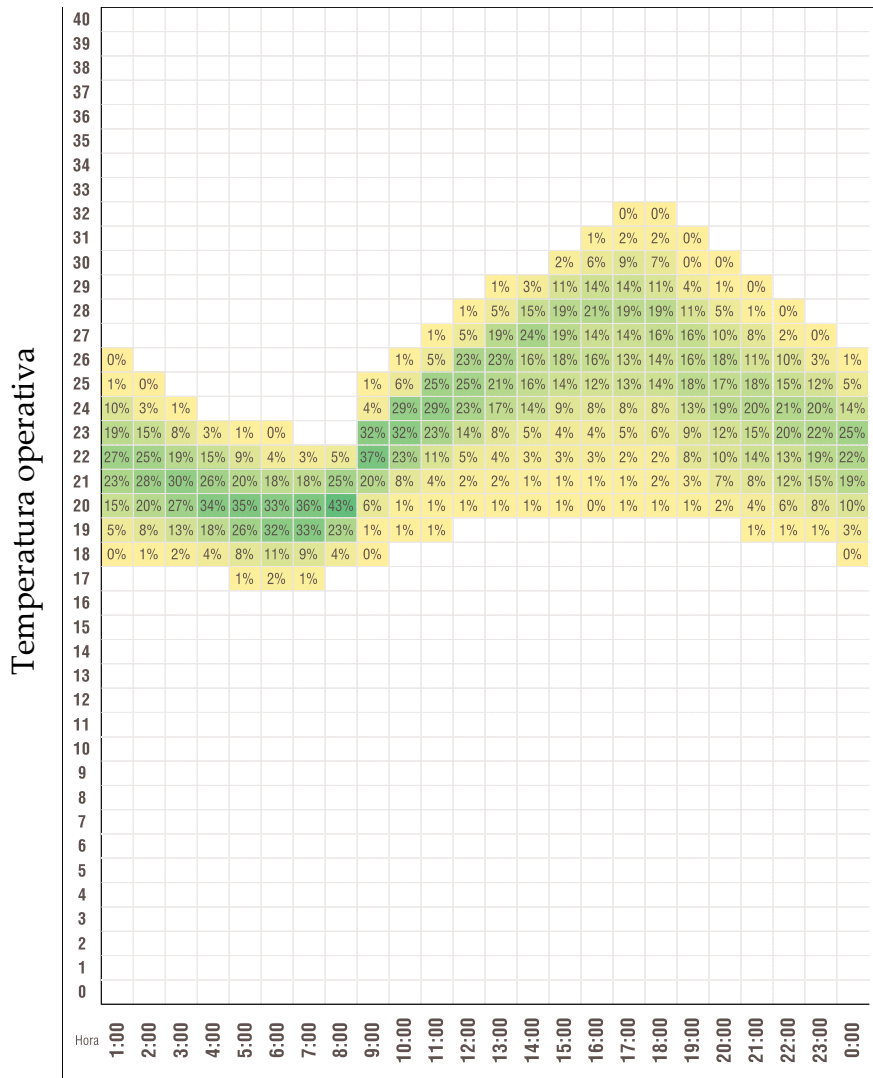


ASHRAE 55

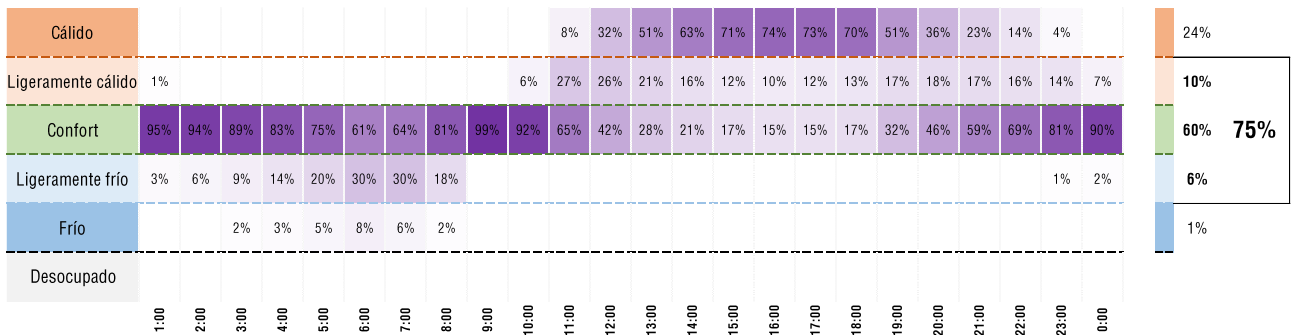


Anexo B

o Orientación 2=Noreste}

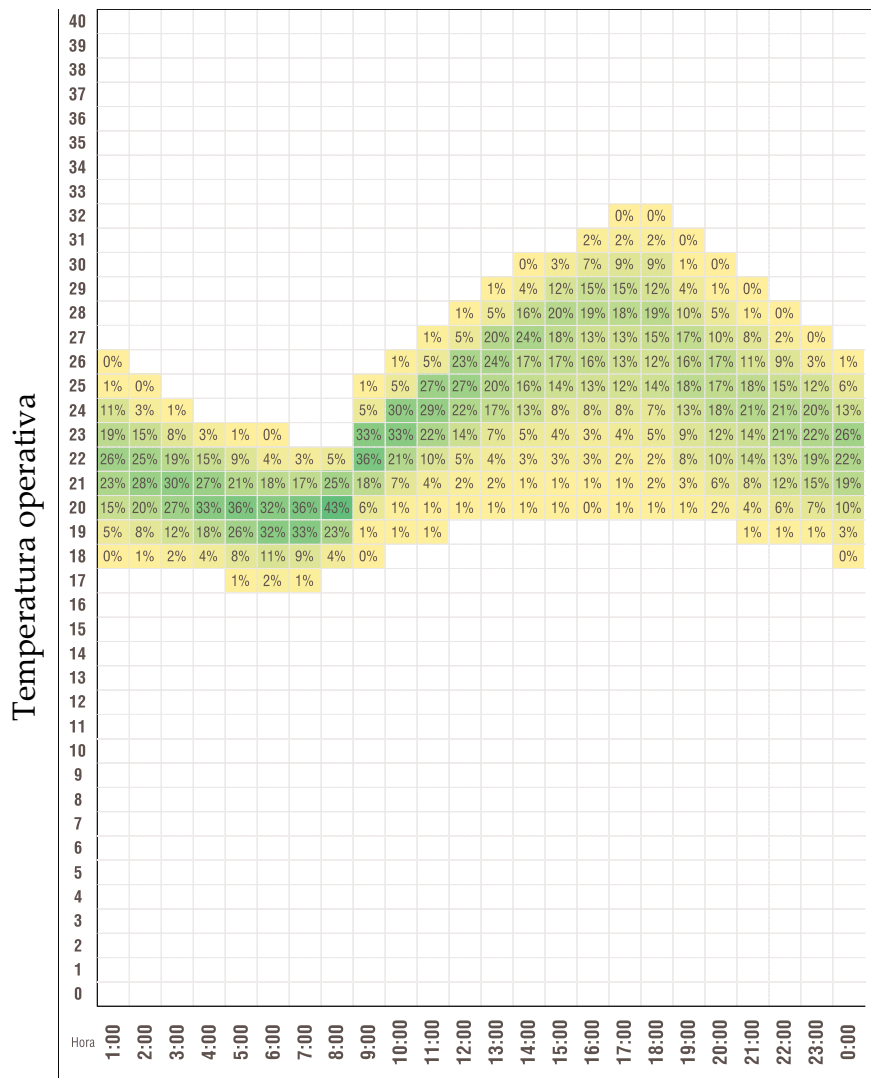


ASHRAE 55

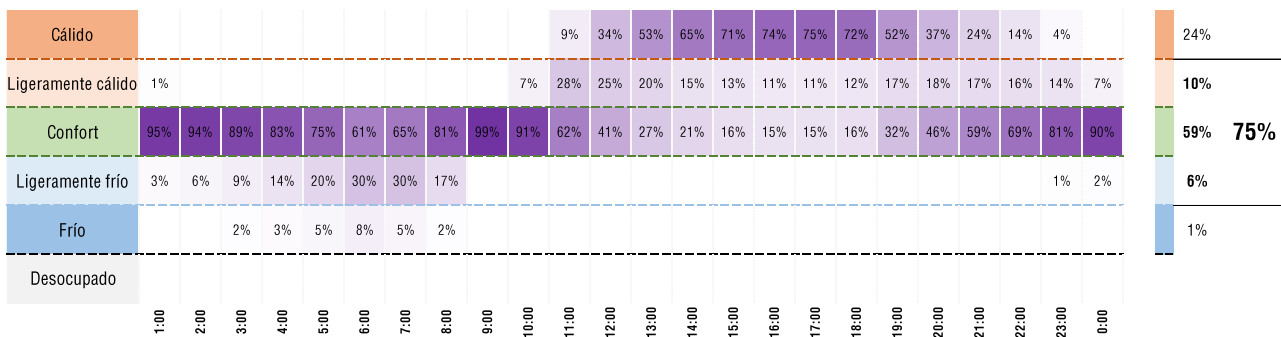


Anexo B

o Orientación 3=Este

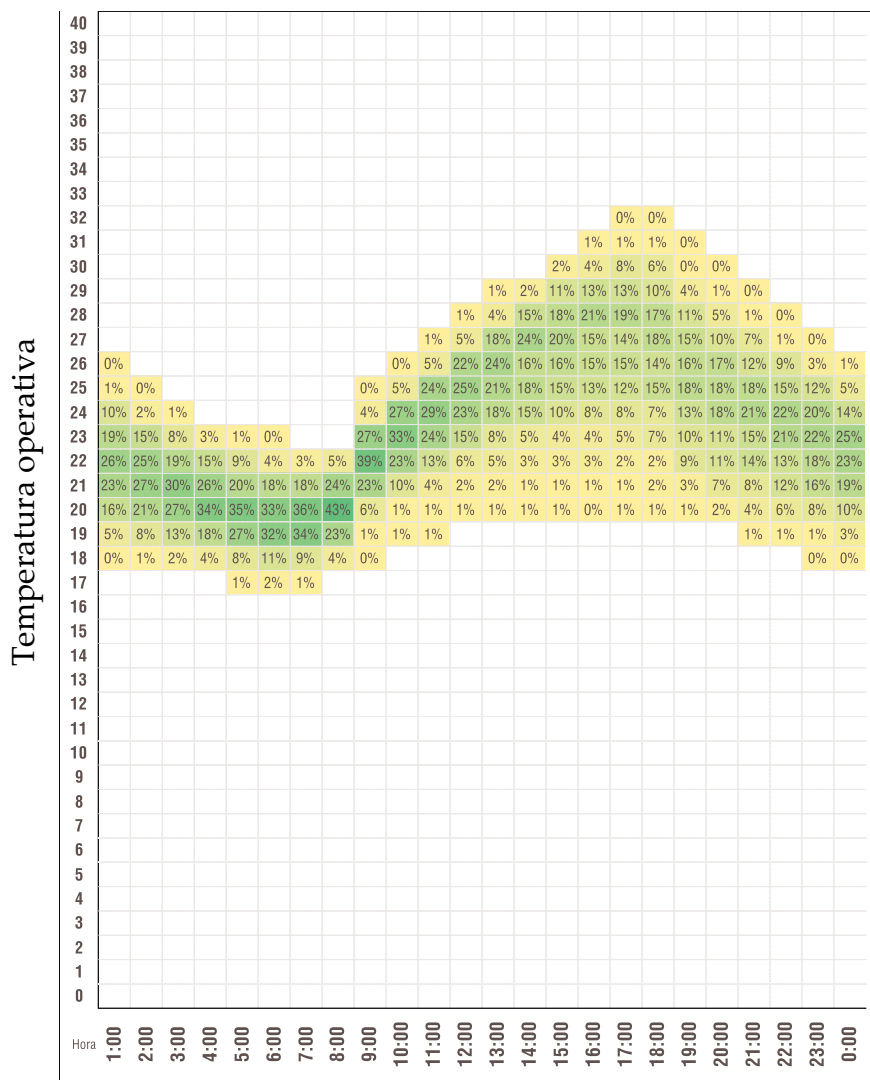


ASHRAE 55

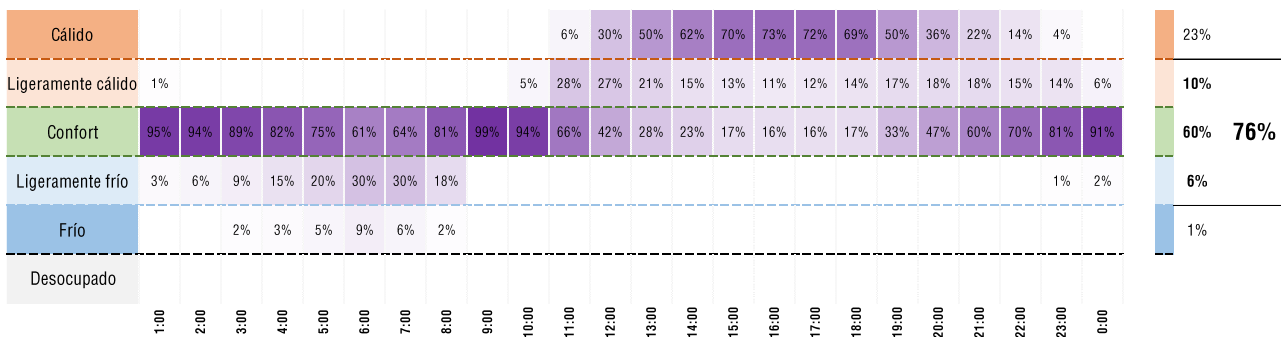


Anexo B

○ Orientación 4=Sureste

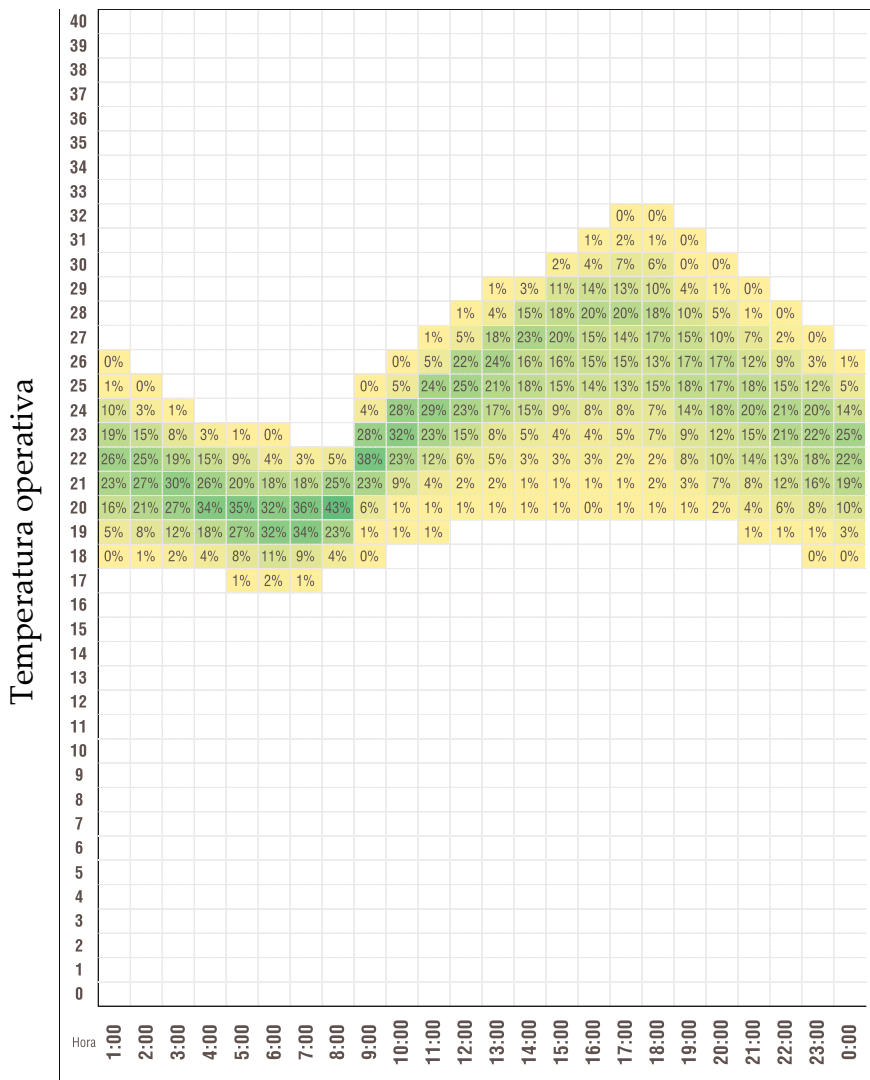


ASHRAE 55

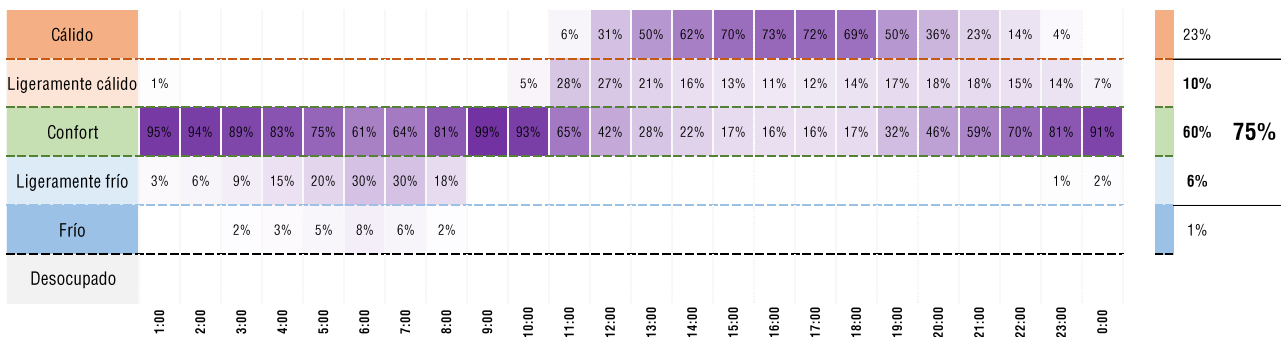


Anexo B

o Orientación 5= Sur



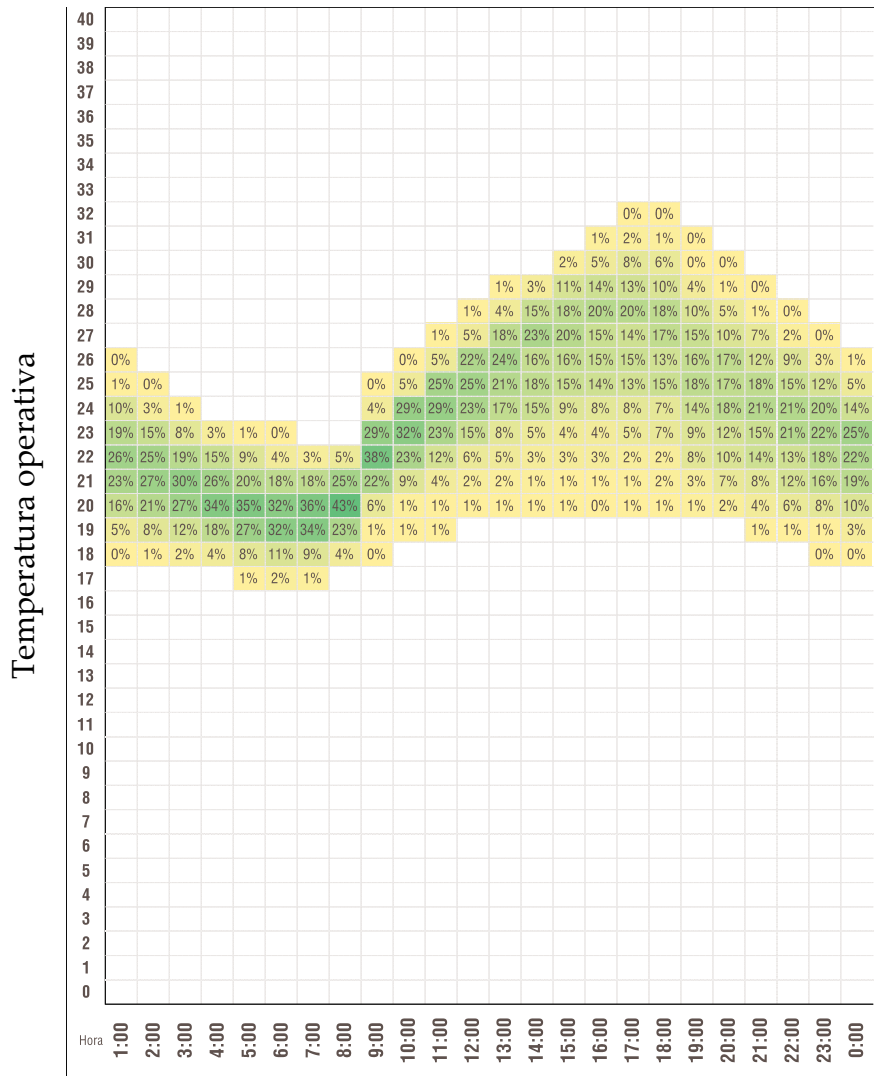
ASHRAE 55



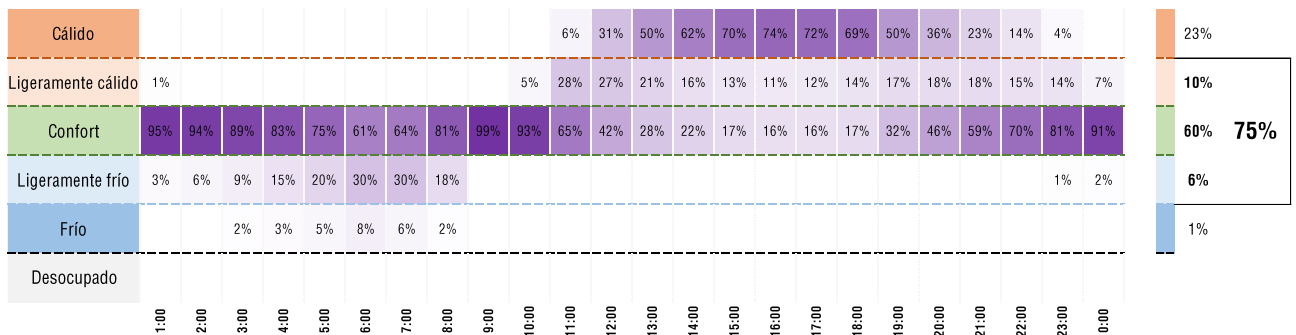
Anexo B

- Resultados evaluación de confort térmico D2

○ Orientación 1= Norte

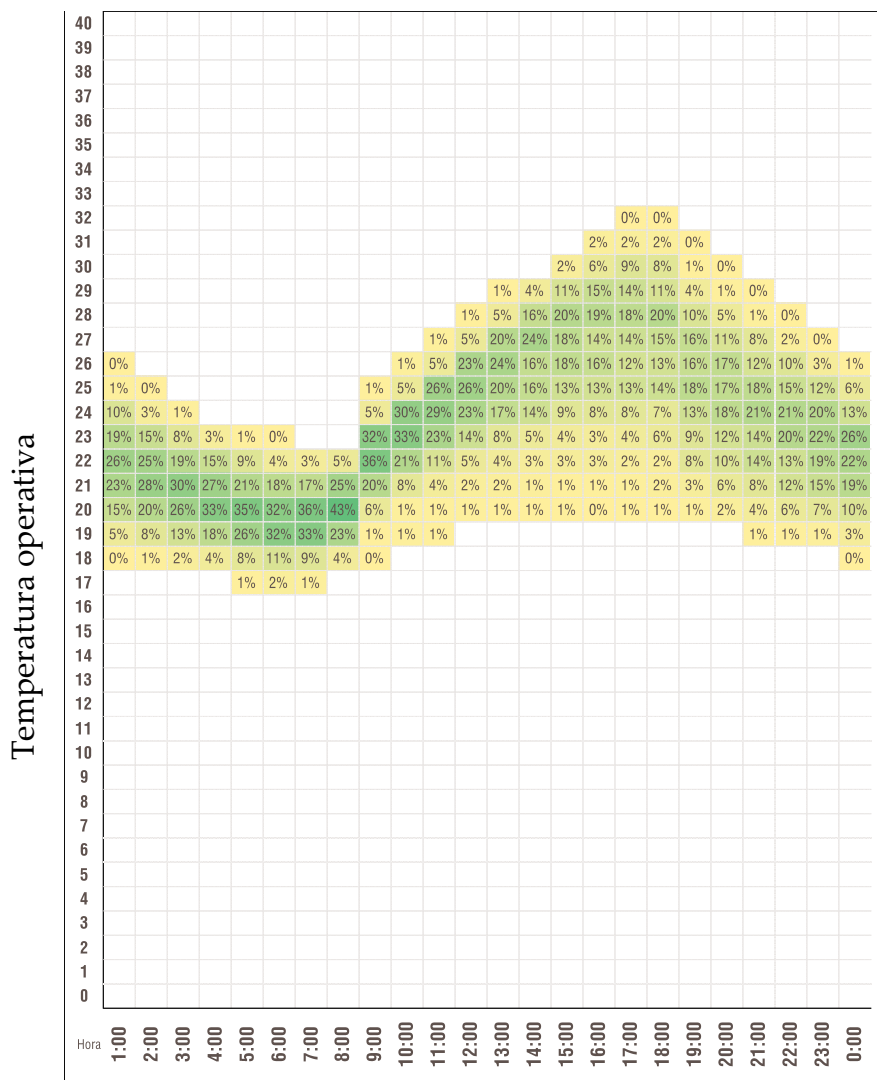


ASHRAE 55

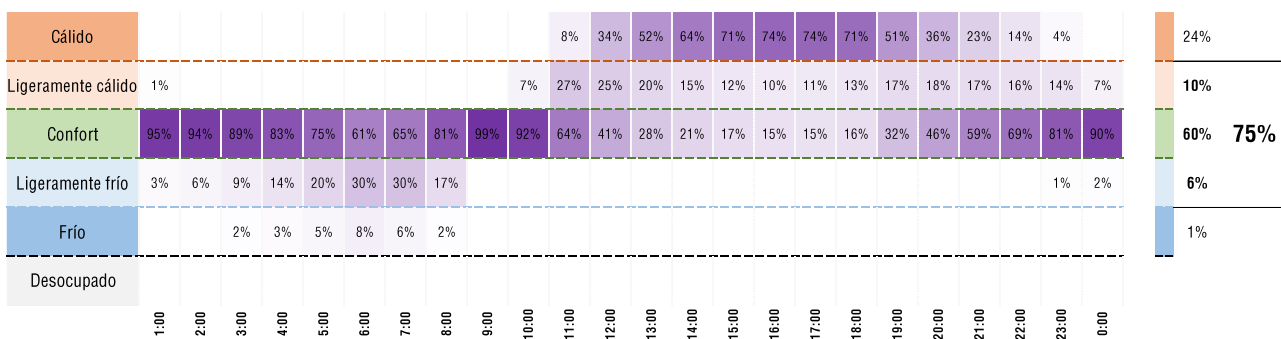


Anexo B

○ Orientación 2=Noreste

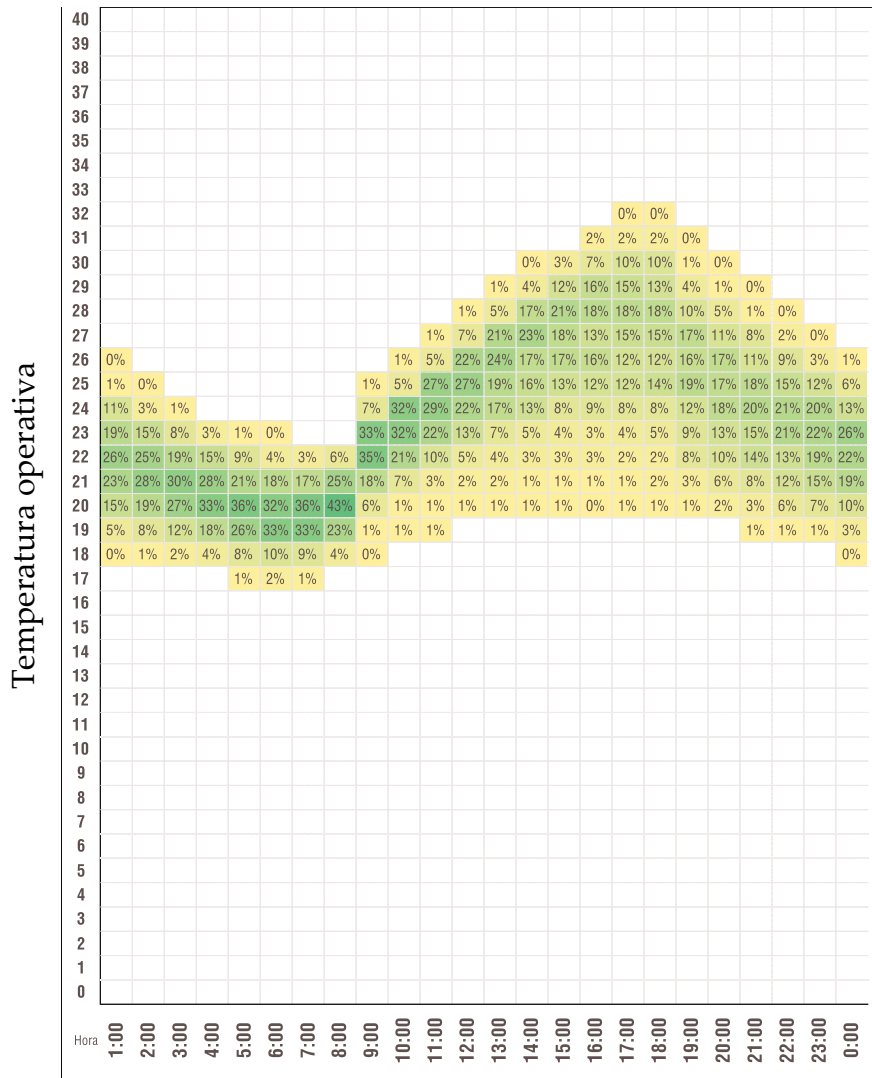


ASHRAE 55

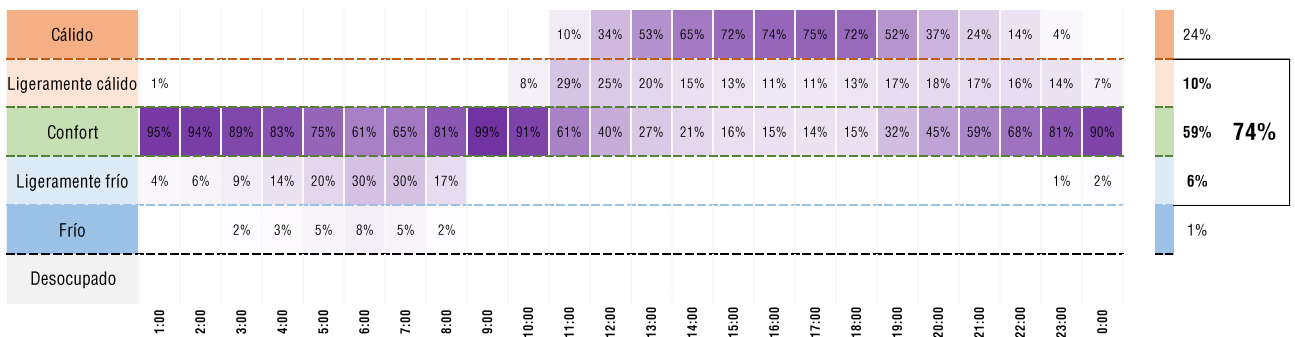


Anexo B

○ Orientación 3=Este

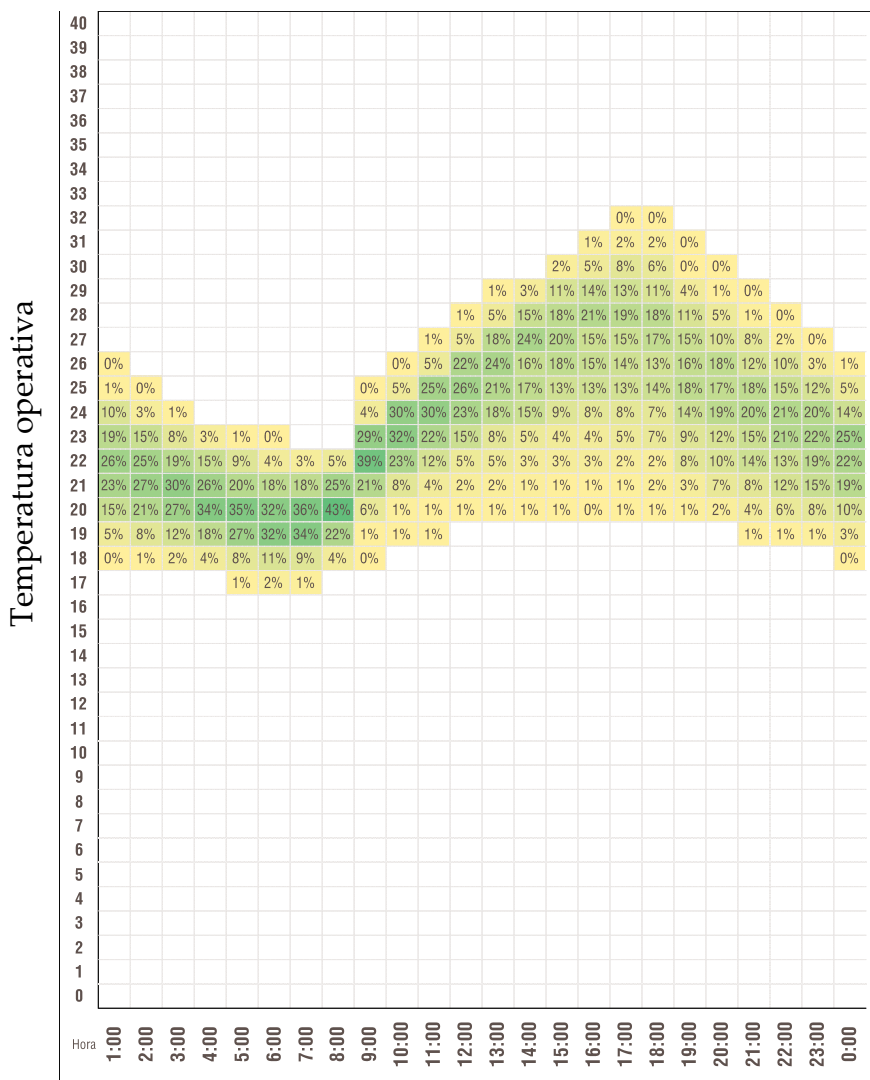


ASHRAE 55

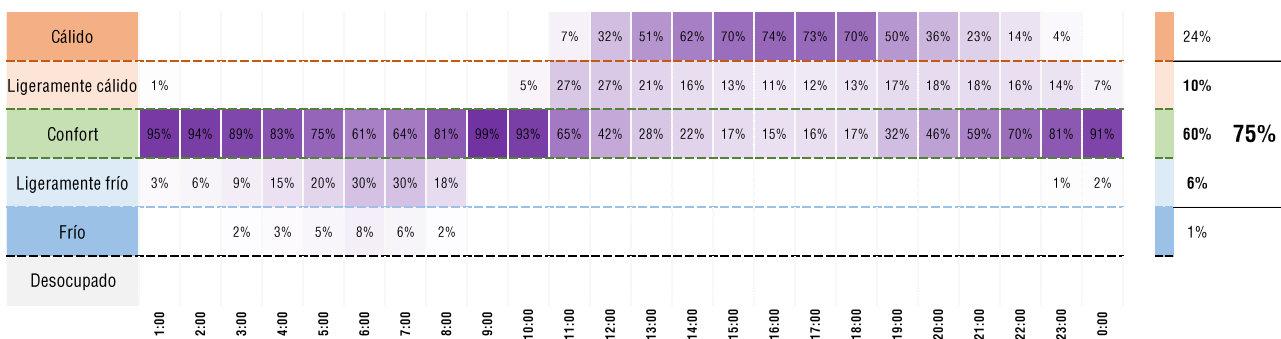


Anexo B

○ Orientación 4=Sureste

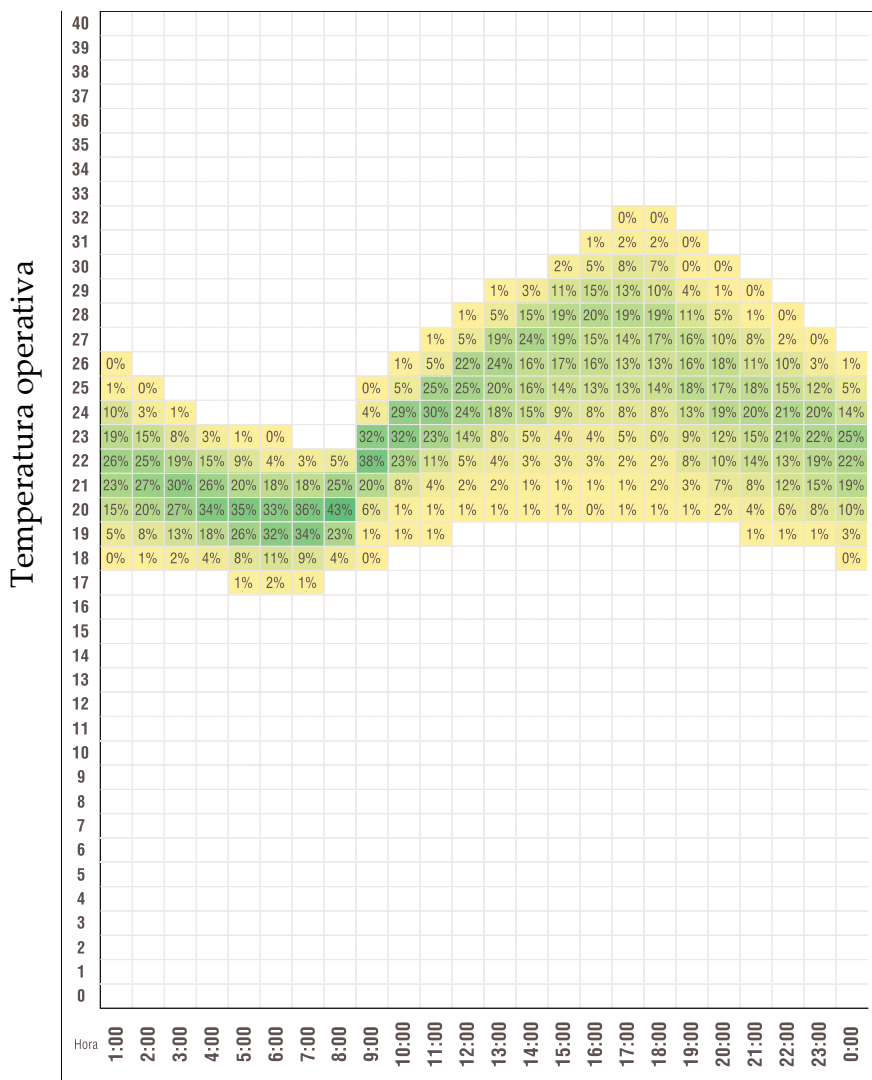


ASHRAE 55

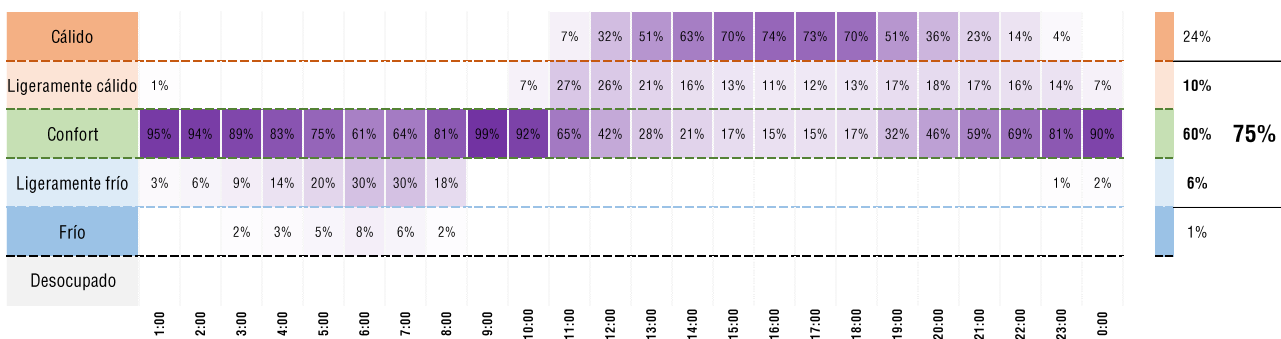


Anexo B

o Orientación 5= Sur



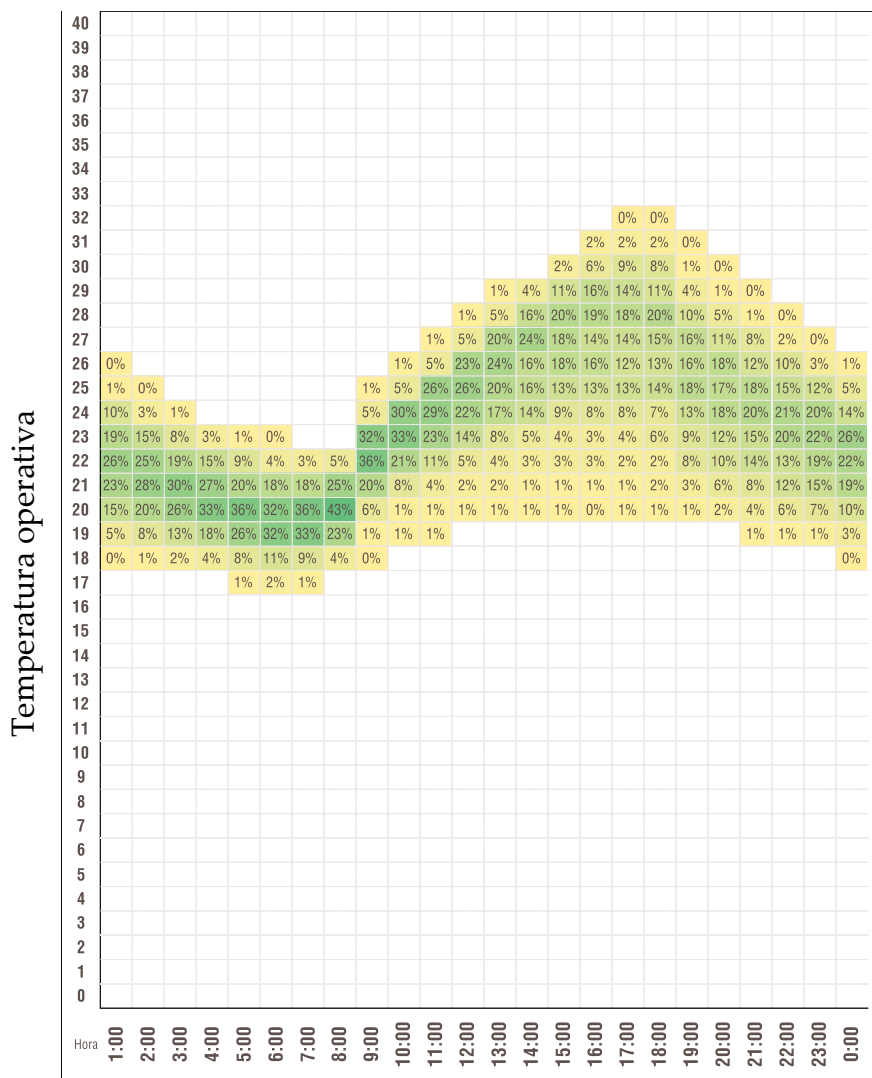
ASHRAE 55



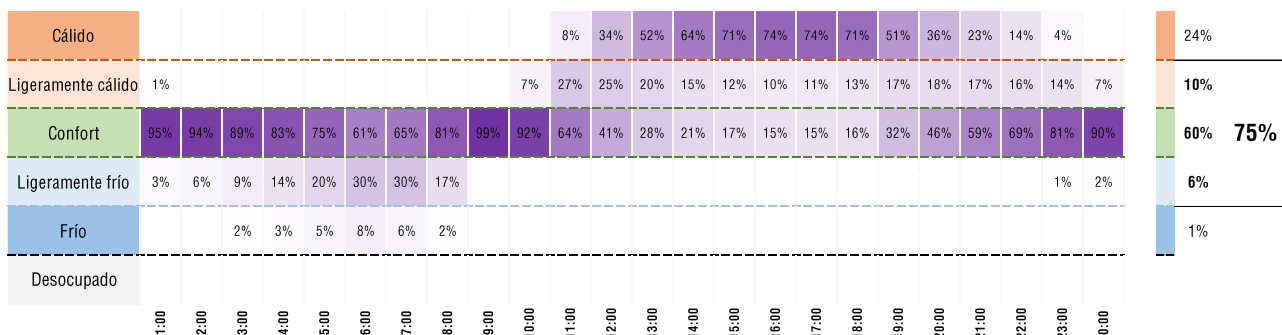
Anexo B

- Resultados evaluación de confort térmico D3

○ Orientación 1= Norte

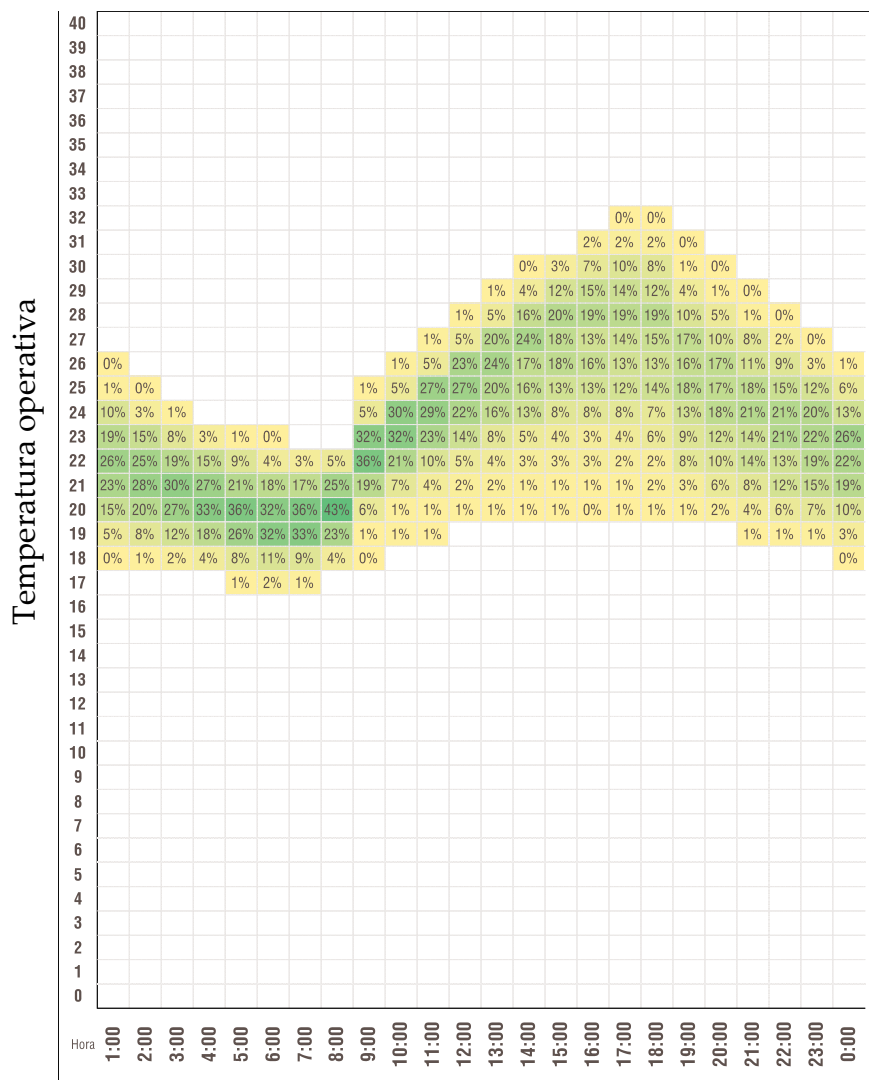


ASHRAE 55

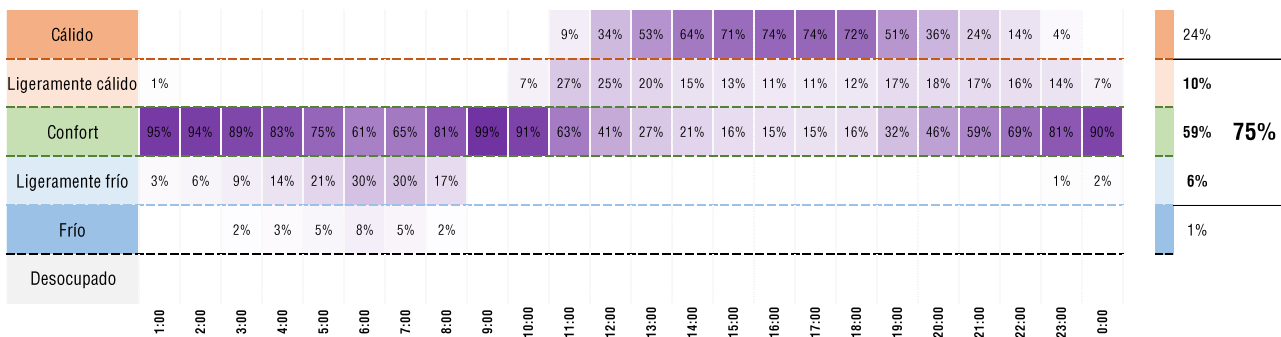


Anexo B

○ Orientación 2=Noreste

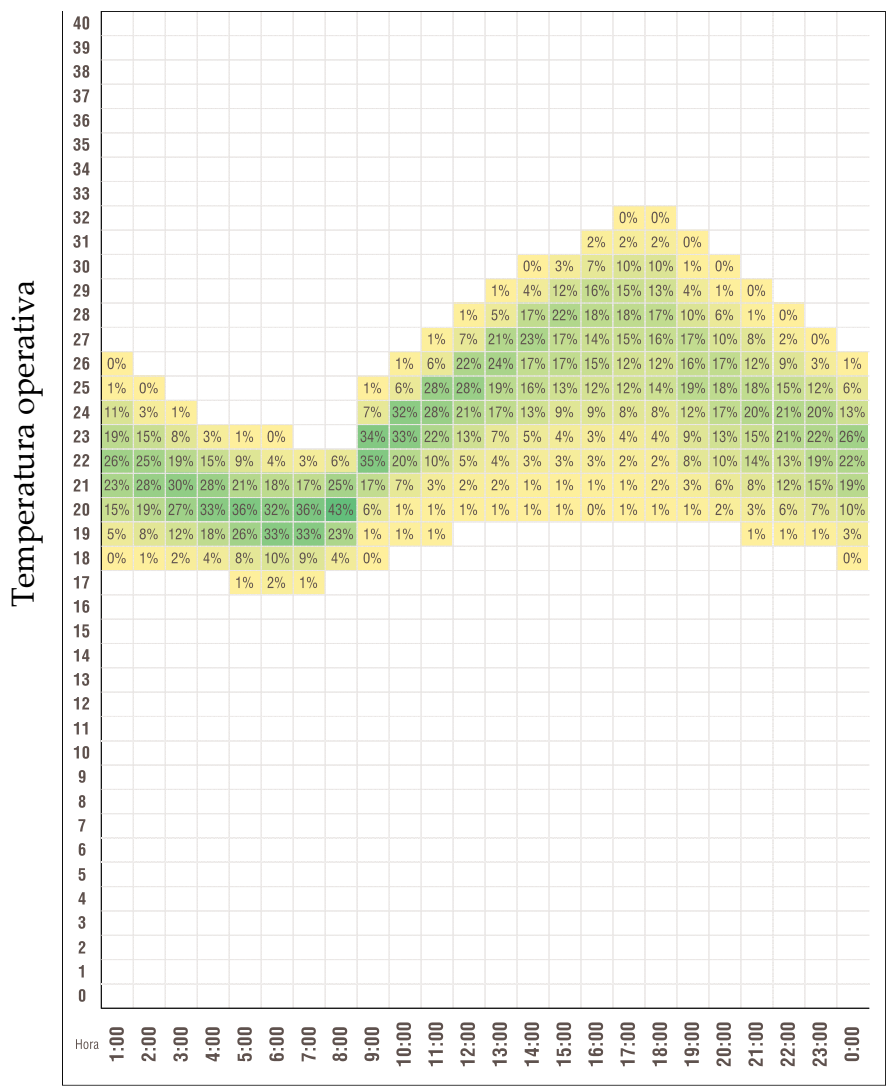


ASHRAE 55

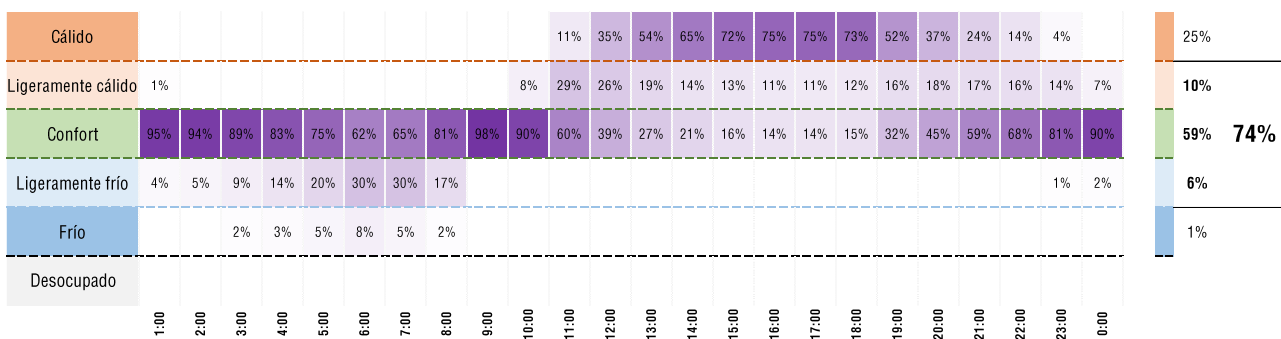


Anexo B

○ Orientación 3=Este

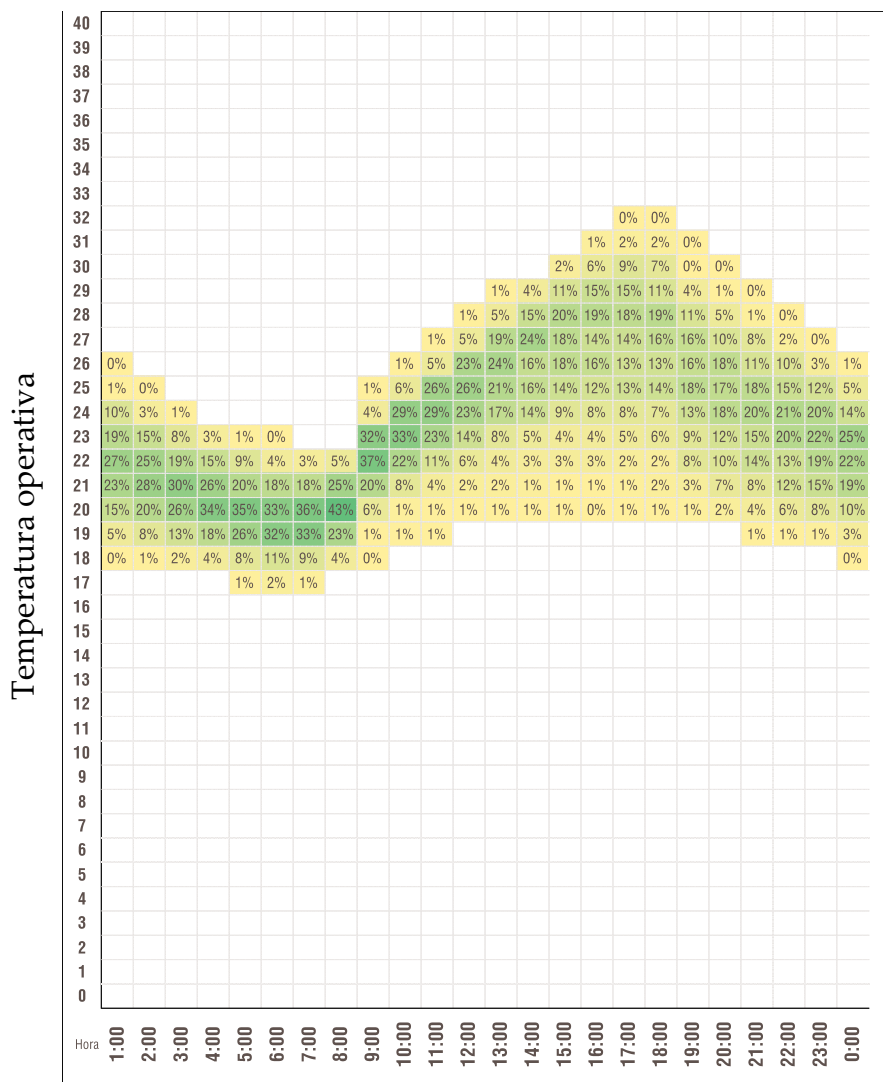


ASHRAE 55

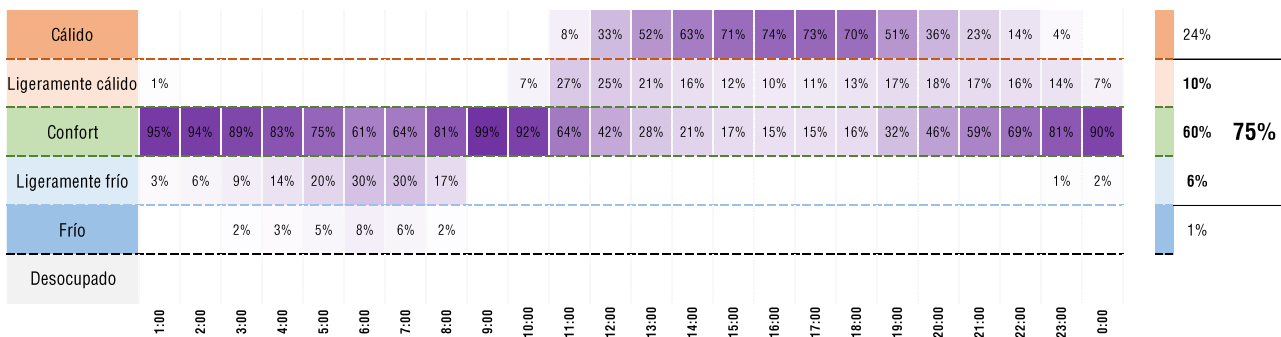


Anexo B

○ Orientación 4=Sureste

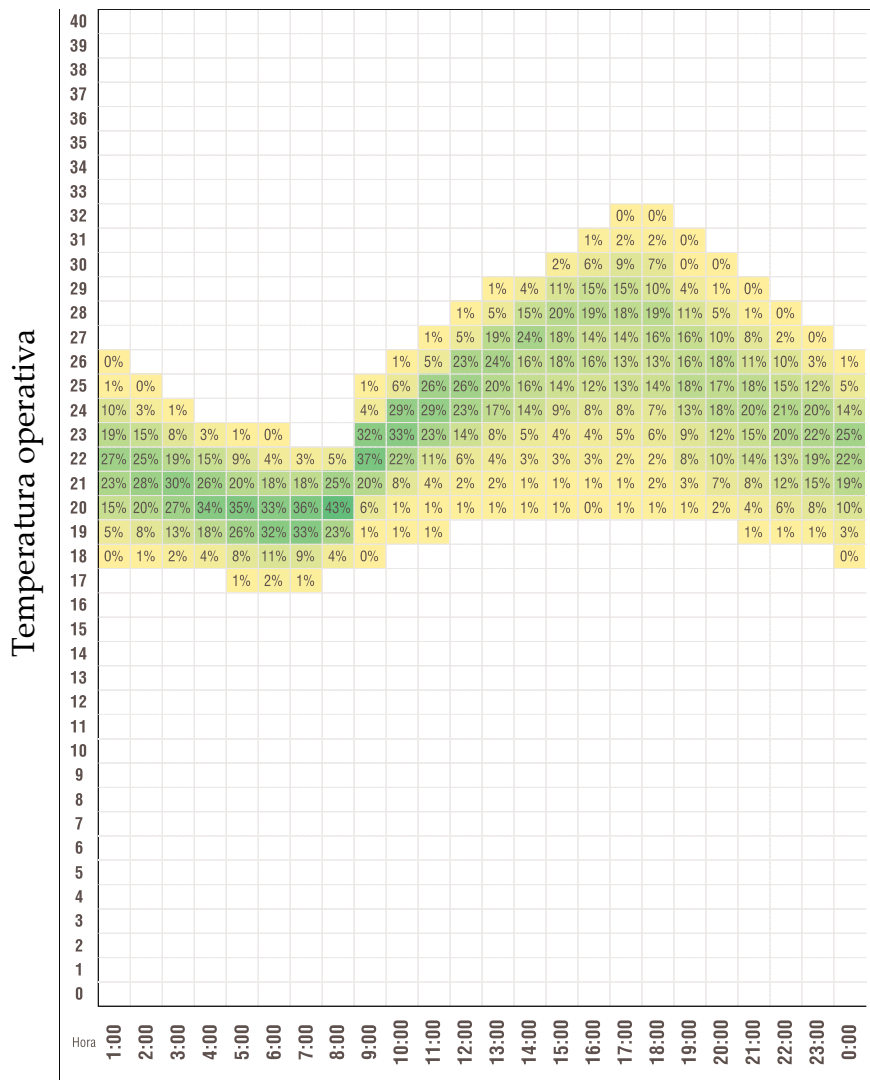


ASHRAE 55

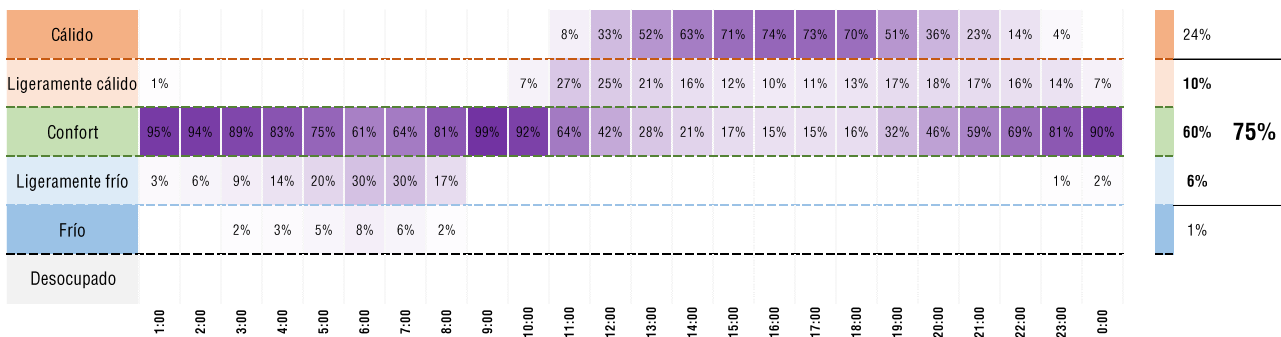


Anexo B

○ Orientación 5= Sur



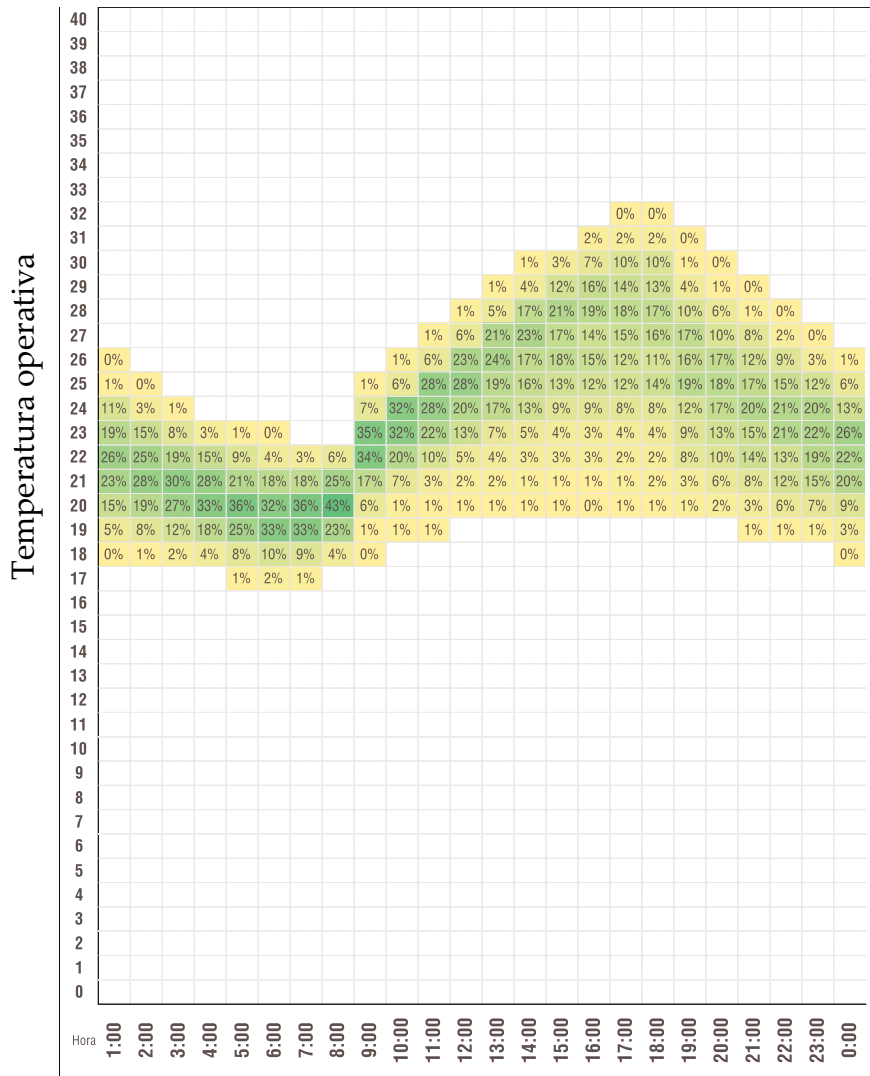
ASHRAE 55



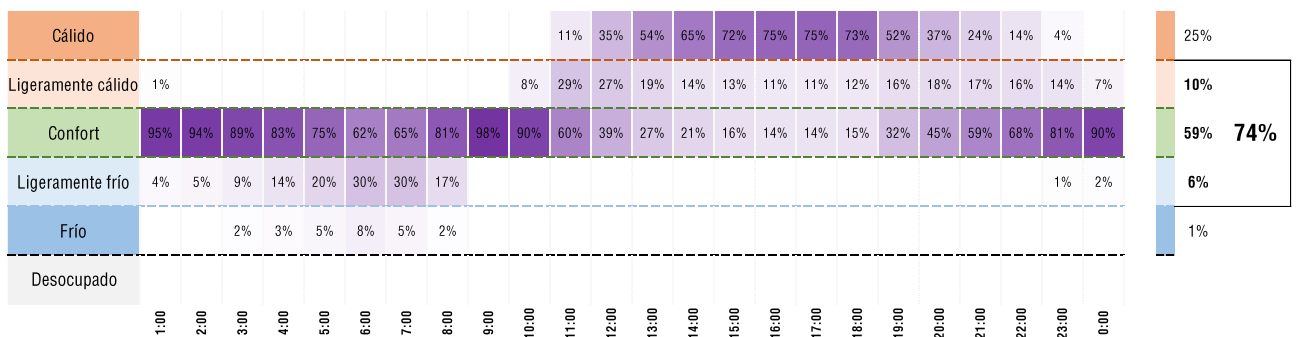
Anexo B

- Resultados evaluación de confort térmico D4

- Orientación 1= Norte

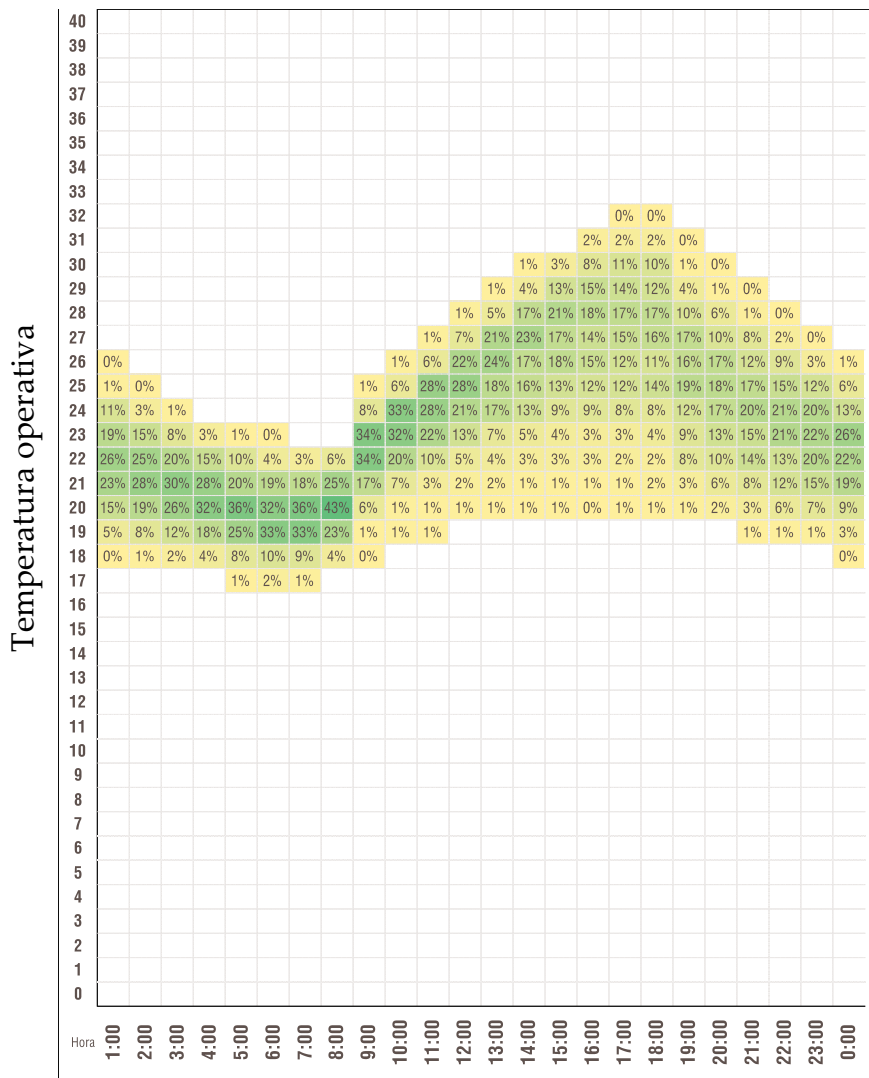


ASHRAE 55

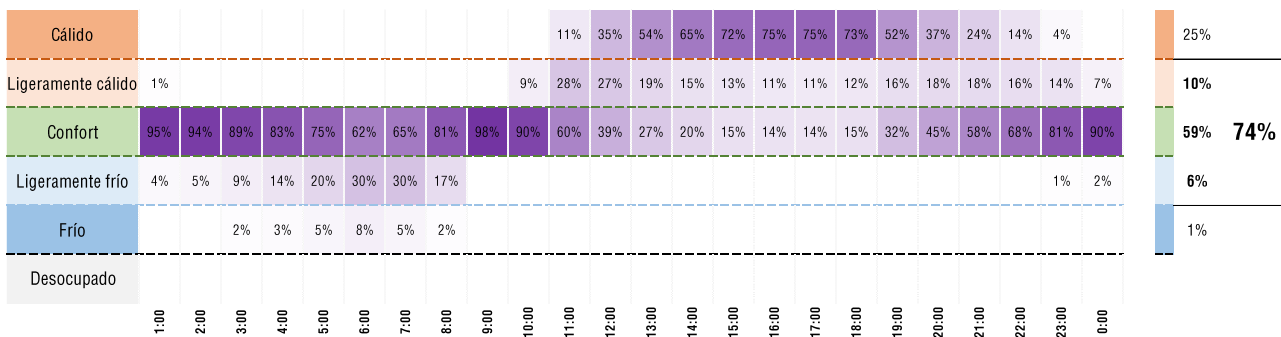


Anexo B

o Orientación 2=Noreste

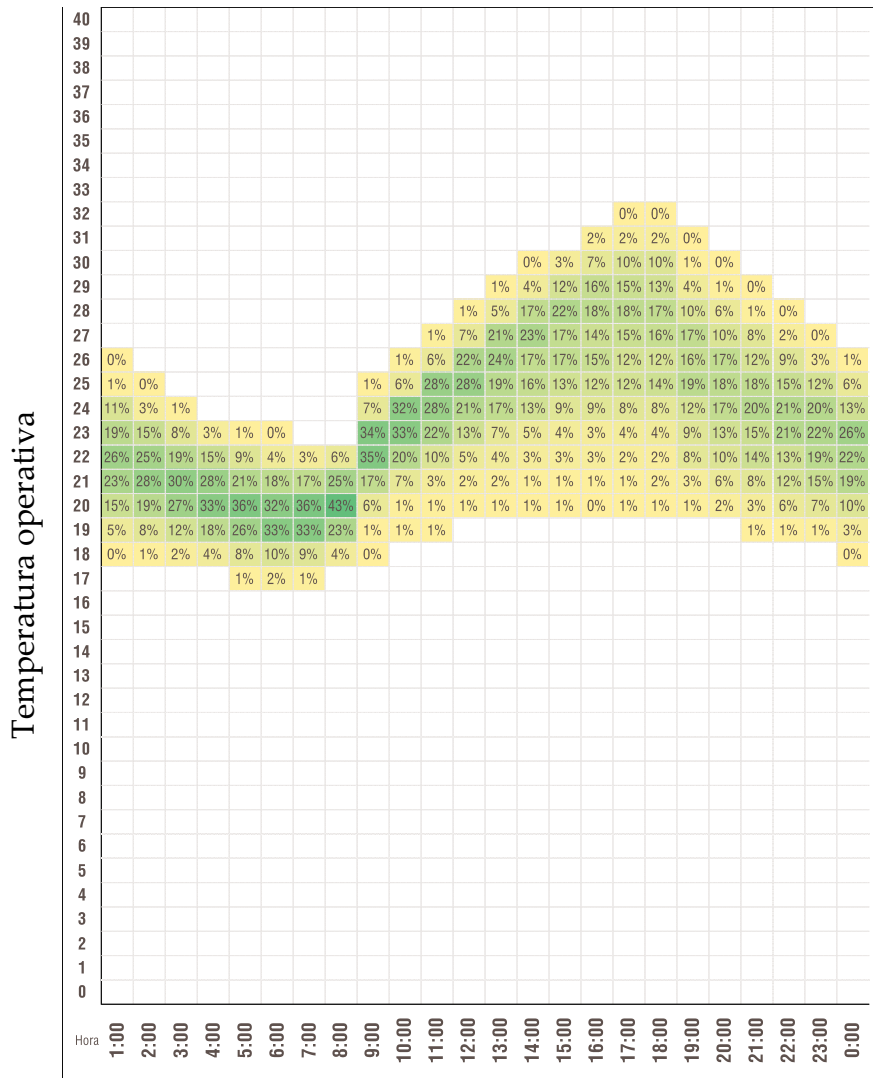


ASHRAE 55

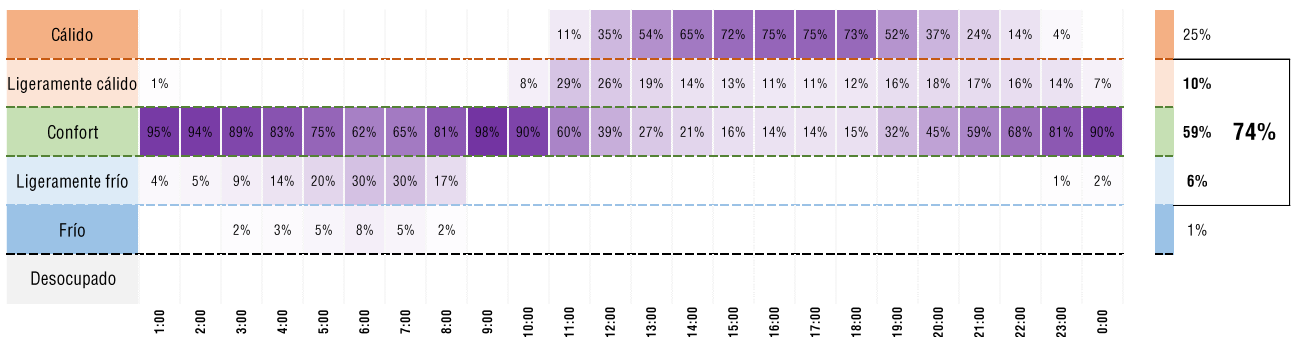


Anexo B

○ Orientación 3=Este

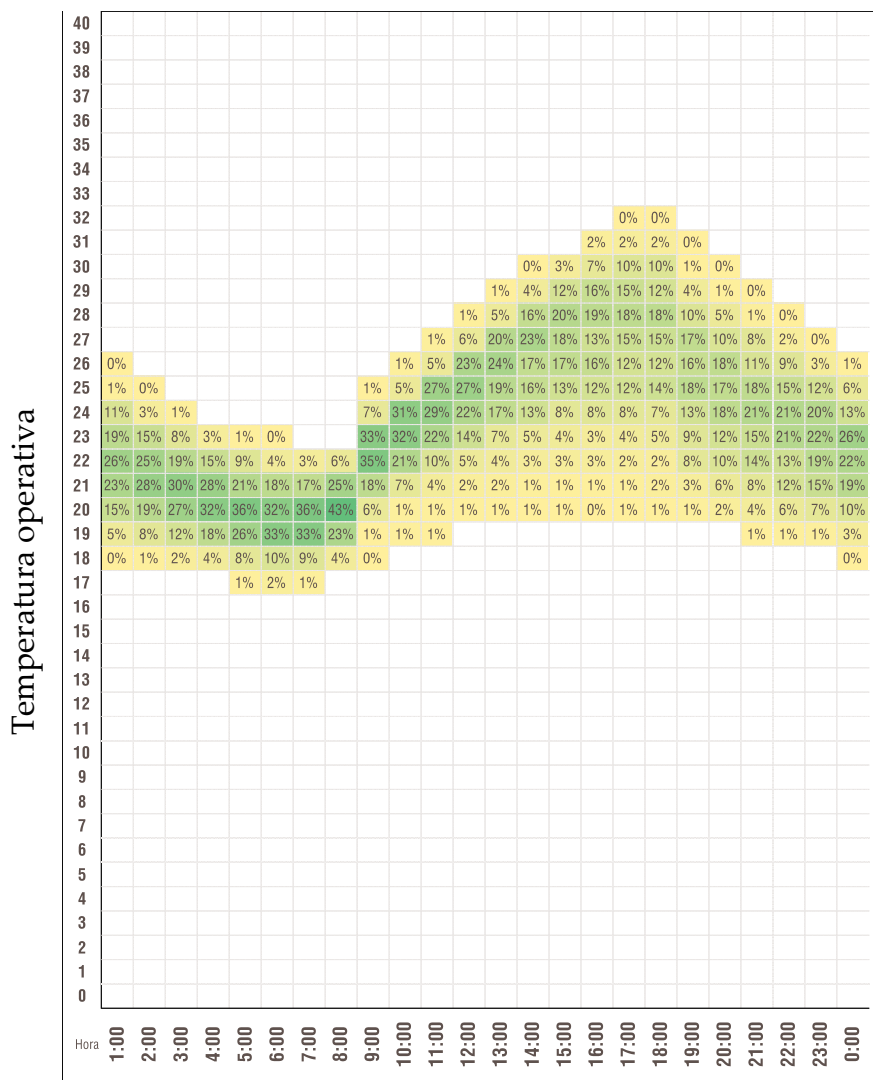


ASHRAE 55

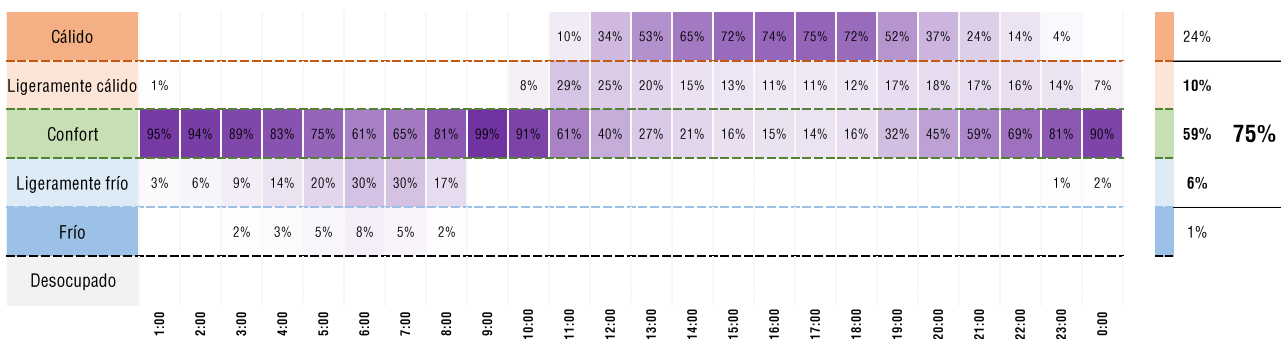


Anexo B

○ Orientación 4=Sureste

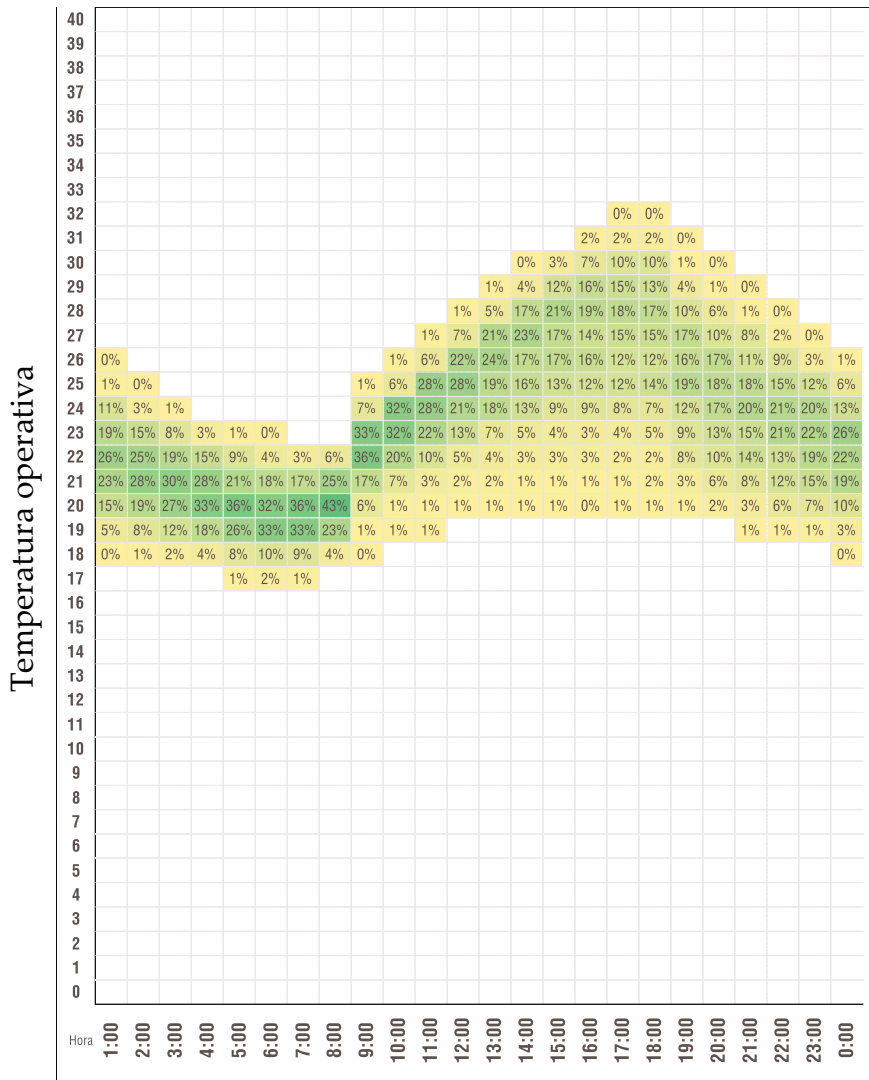


ASHRAE 55

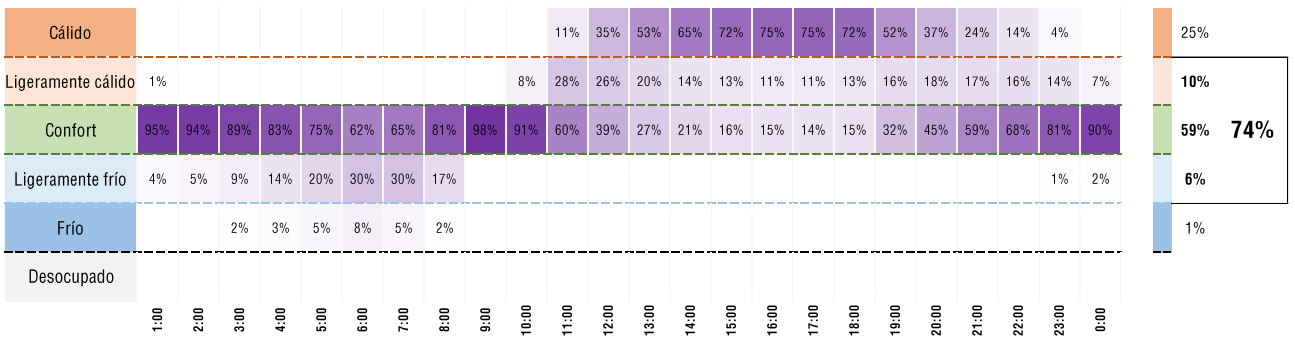


Anexo B

○ Orientación 5= Sur



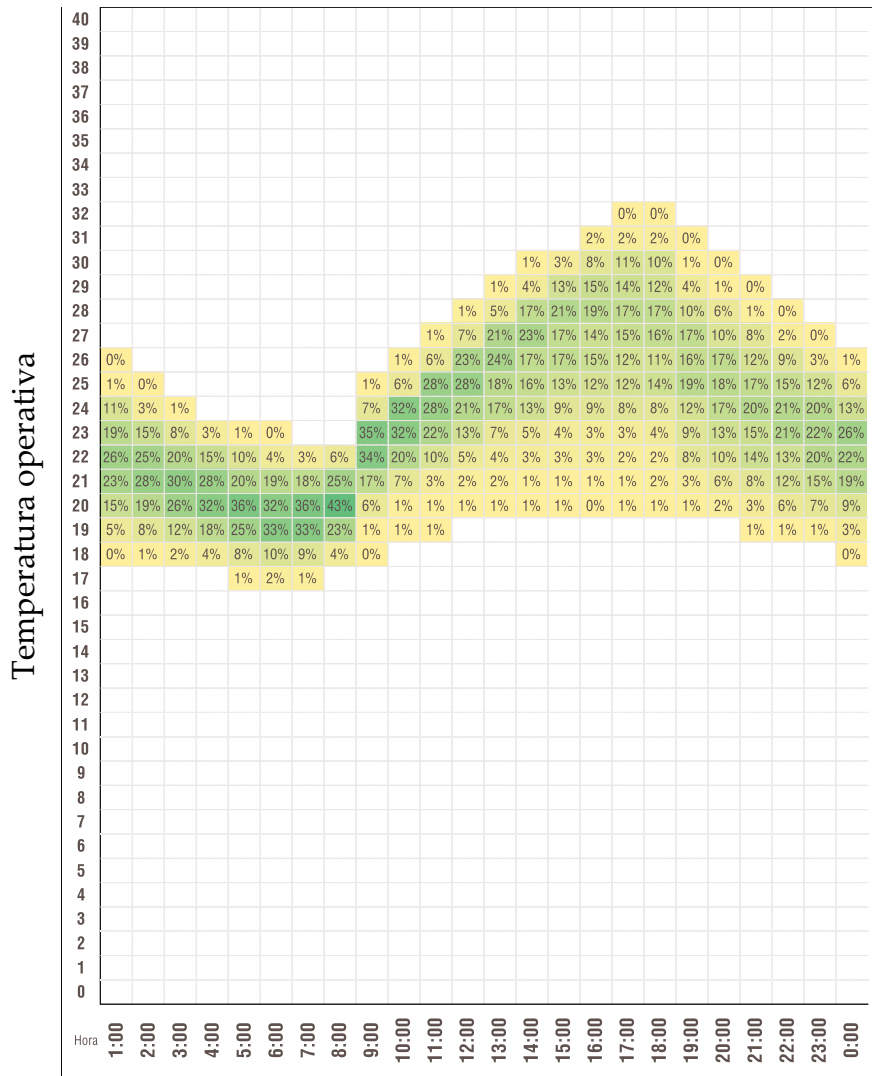
ASHRAE 55



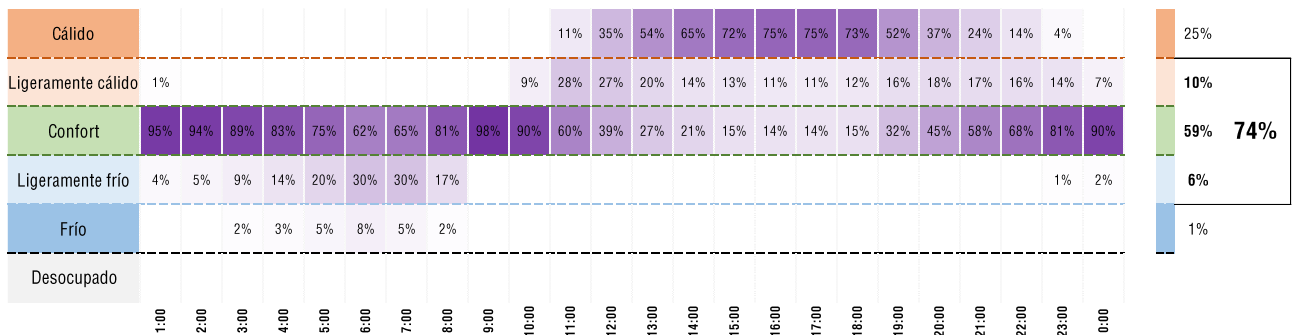
Anexo B

- Resultados evaluación de confort térmico D5

- Orientación 1= Norte

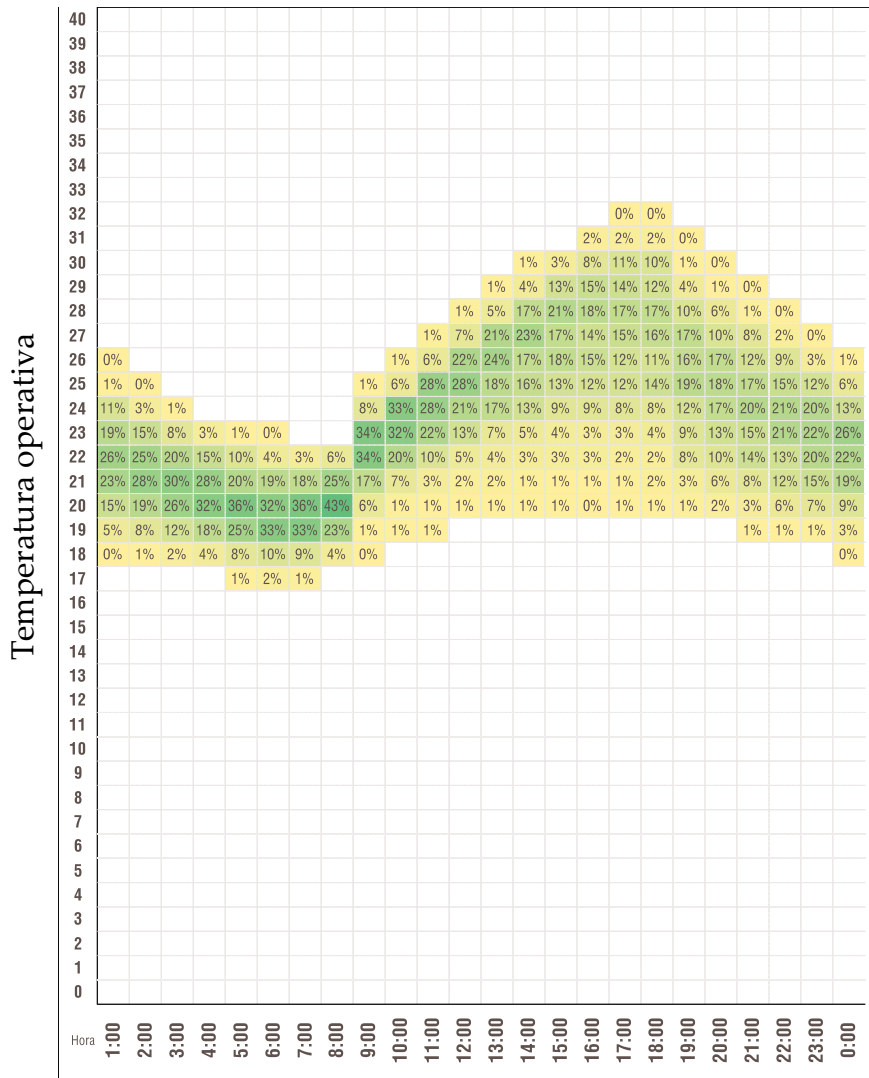


ASHRAE 55

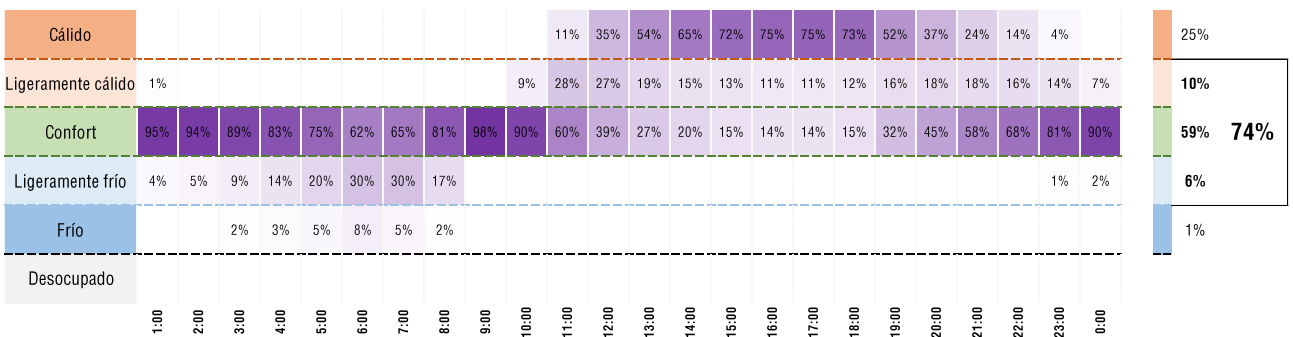


Anexo B

○ Orientación 2=Noreste

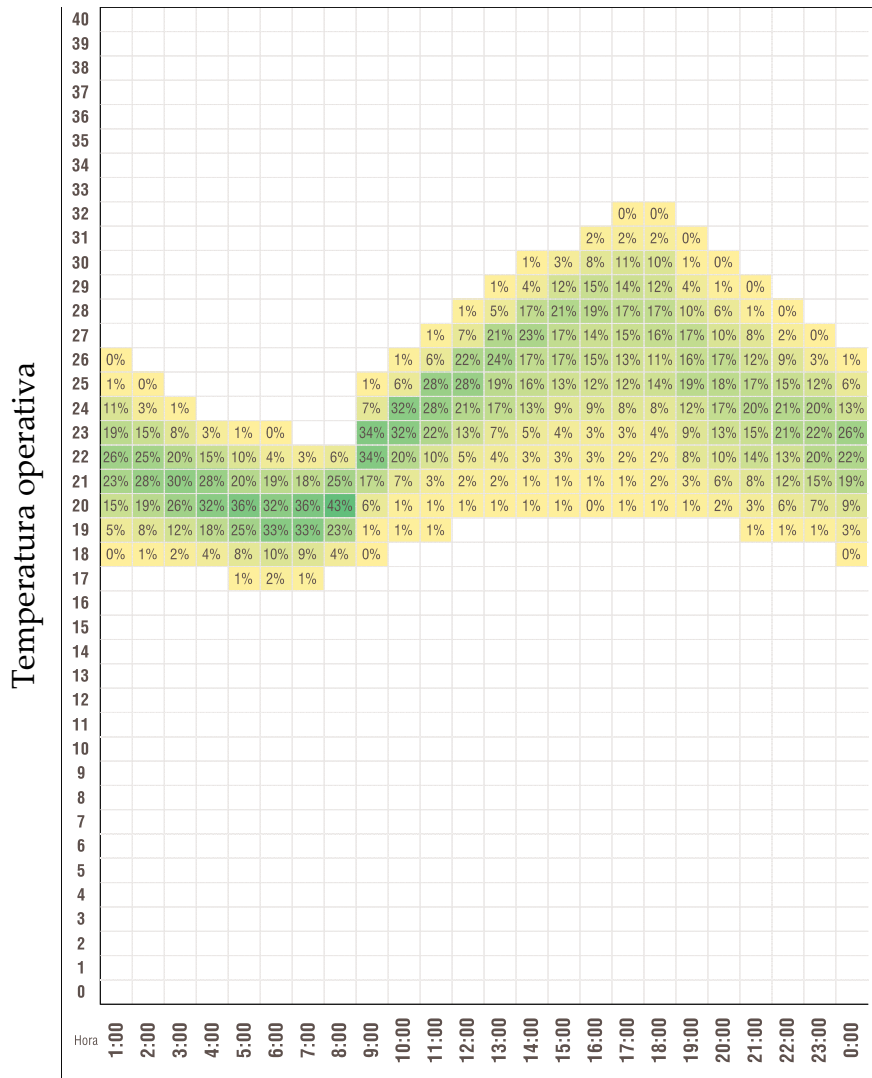


ASHRAE 55

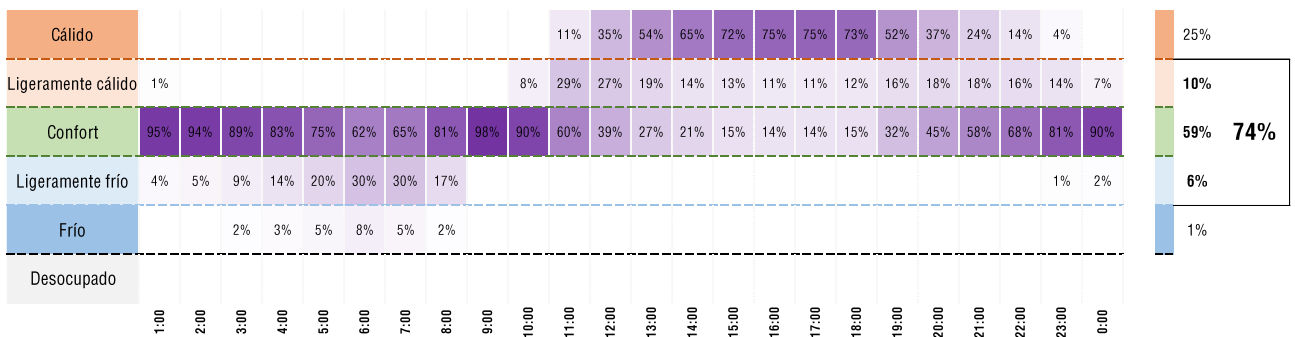


Anexo B

○ Orientación 3=Este

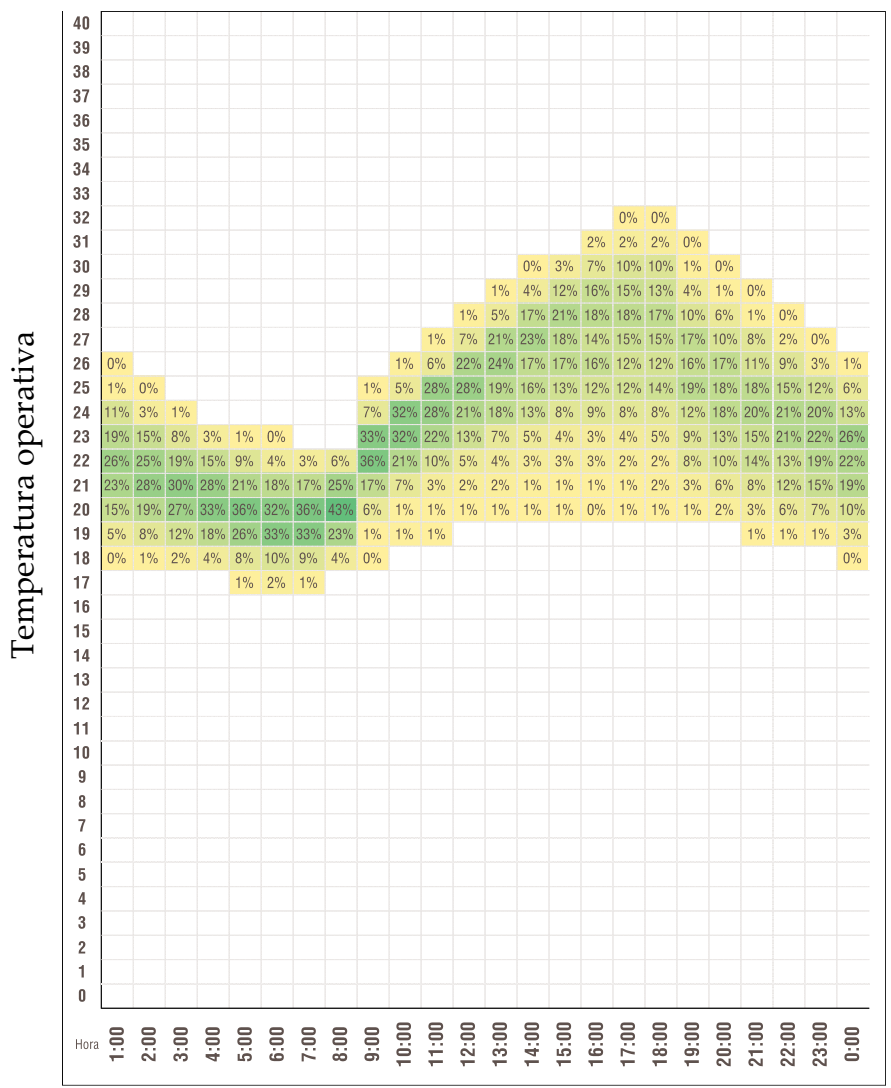


ASHRAE 55

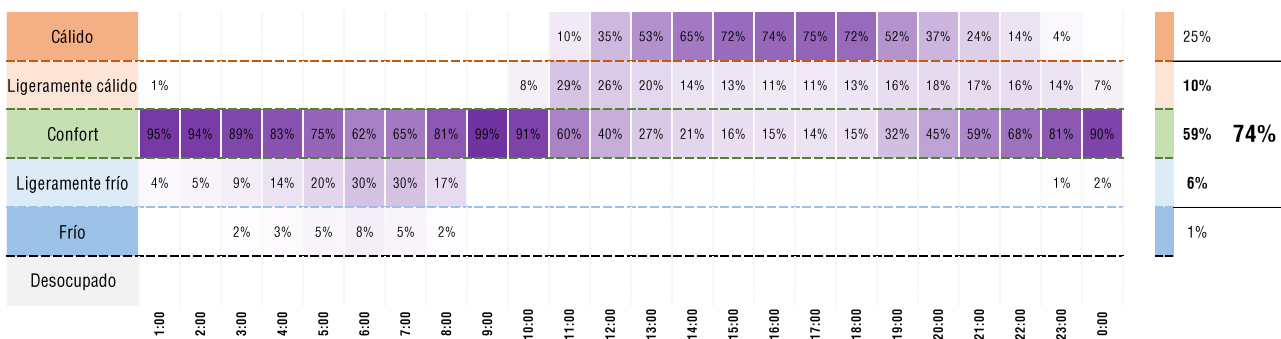


Anexo B

○ Orientación 4=Sureste

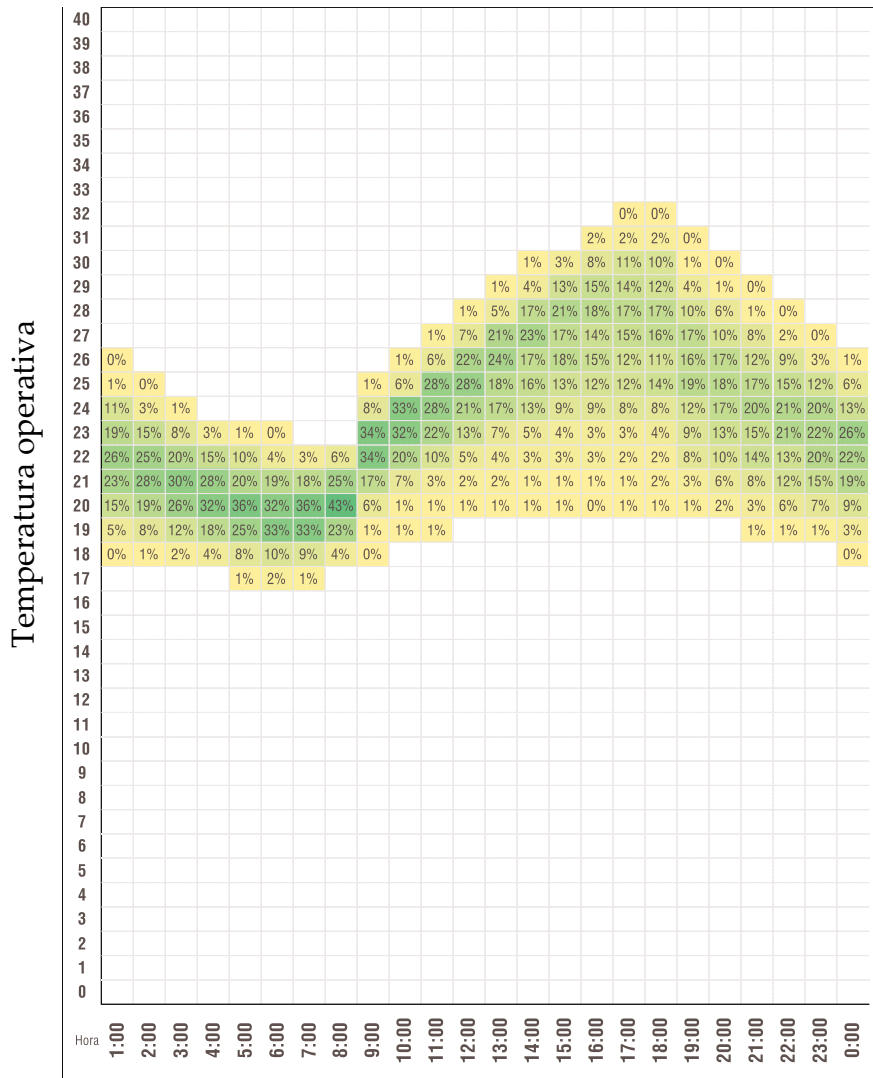


ASHRAE 55



Anexo B

○ Orientación 5= Sur



ASHRAE 55

