



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO DE SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UNA VIVIENDA DE QUITO CON GANANCIAS INTERNAS USANDO SIMULACIÓN ENERGÉTICA

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

JÁCOME LLERENA FRANCISCO JOSÉ

francisco.jacome@epn.edu.ec

DIRECTOR: Dr. ORDÓÑEZ MALLA FREDDY

freddy.ordonez@epn.edu.ec

Quito, agosto 2018

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Francisco José Jácome Llerena, bajo mi supervisión.

Dr. Freddy Ordóñez

DIRECTOR DEL PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, Francisco José Jácome Llerena, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente

Francisco José Jácome Llerena

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a toda mi familia que ha nutrido mi vida, destaco a mi madre Lorena, a mi padre José, quienes siempre han sido un gran ejemplo y me han ayudado infinita y desinteresadamente en cada paso que he dado en mi vida.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por la vida.

Presento mi especial agradecimiento al Dr. Freddy Ordóñez, tutor de este trabajo, por su invaluable e imprescindible guía, consejo y confianza.

Agradezco también a la Escuela Politécnica Nacional, a sus profesores, autoridades, trabajadores y estudiantes por el apoyo entregado, pero, sobre todo, por haberme distinguido y honrado con su historia.

Gracias a mis padres, Lorena y José, por darme la vida y forjarme como persona, a mis abuelos, Elvita, Pepito y Renée, por nutrir mi vida con sus historias, experiencias y consejos, a mis hermanos Tomás, Paola y Ana, por siempre confiar en mí.

Por último, agradezco a mis amigos y futuros colegas, y a Sami, quienes siempre han sido un gran apoyo durante esta etapa.

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
Pregunta de investigación.....	2
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO TÉRMICO EN EDIFICIOS.....	4
1.1.1. CLIMA.....	4
1.1.2. ORIENTACIÓN Y FORMA.....	6
1.1.3. FENESTRACIÓN.....	7
1.1.4. INERCIA TÉRMICA E AISLAMIENTO.....	8
1.1.5. INFILTRACIONES.....	9
1.1.6. SOMBRAS E INSOLACIÓN.....	10
1.1.7. GANANCIAS INTERNAS.....	11
1.2. SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS.....	12
1.2.1. PROGRAMAS Y MODELOS DISPONIBLES.....	12
1.2.2. ANÁLISIS PARAMÉTRICO.....	13
2. METODOLOGÍA.....	14
2.1. FUNCIÓN OBJETIVO.....	14

2.2. PARÁMETROS DE SIMULACIÓN	16
2.2.1. CONSIDERACIONES Y ALGORITMOS	16
2.2.2. CONDICIONES DE BORDE DE LA ENVOLVENTE.....	19
2.2.3. PARÁMETROS A ESTUDIAR	20
2.3. ENTORNO DE SIMULACIÓN	24
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	26
3.1. EVALUACIÓN DEL DISCONFORT.....	26
3.2. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE CADA PARÁMETRO	29
3.2.1. INFLUENCIA DEL MATERIAL DE LAS PAREDES.....	29
3.2.2. INFLUENCIA DEL PORCENTAJE DE ACRISTALAMIENTO (WWR).....	30
3.2.3. INFLUENCIA DE INFILTRACIONES.....	33
3.2.4. INFLUENCIA DE LA ORIENTACIÓN	34
3.2.5. INFLUENCIA DEL TIPO DE VENTANA.....	36
3.3. EVALUACIÓN DE SENSIBILIDAD.....	37
3.4. EVALUACIÓN DE LAS VIVIENDAS CON TECHO DE ZINC.....	39
3.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	42
3.5.1. CONDICIONES DE BORDE.....	42
3.5.2. MATERIAL Y ESPESOR DE LAS PAREDES.....	44
3.5.3. PORCENTAJE DE ACRISTALAMIENTO.....	46
3.5.4. INFILTRACIONES.....	49
3.5.5. ORIENTACIÓN.....	50
3.5.6. COMPORTAMIENTO DE LAS VIVIENDAS DE TECHO DE ZINC	52
3.5.7. RESUMEN.....	53
4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	56
4.1. CONCLUSIONES	56
4.2. TRABAJOS FUTUROS.....	58
REFERENCIAS	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Expresiones utilizadas para definir la inercia térmica.	8
Tabla 2.1. Horarios y valores de las ganancias internas debido a la ocupación y tasas metabólicas según el tipo de actividad.	18
Tabla 2.2. Horarios y valores de las cargas internas debido a iluminación y ganancias internas.	18
Tabla 2.3. Horarios de los modelos de infiltraciones.	19
Tabla 2.4. Parámetros para la simulación.	20
Tabla 2.5. Propiedades del vidrio utilizado en la simulación.	21
Tabla 2.6. Propiedades de los materiales de construcción.	24
Tabla 2.7. Principales librerías de Python utilizadas para el procesamiento de datos.	25
Tabla 3.1. Valores del caso de estudio base.	42
Tabla 3.2. Valores de los parámetros del caso mejor y peor de las configuraciones con techo de zinc.	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Radiación global promedio anual	5
Figura 1.2. Comportamiento de la masa térmica.....	9
Figura 1.3. Sombras en una superficie externa.....	11
Figura 2.1. Rangos de temperatura aceptable	15
Figura 2.2. Rango de temperatura de confort adaptativo con un 90% de aceptación para Quito.	15
Figura 2.3. Condiciones de borde de la envolvente, casos y configuraciones estudiadas.	19
Figura 2.4. Árbol de simulaciones realizadas.....	20
Figura 2.5. Porcentajes de acristalamiento (WWR) en las construcciones con una sola ventana.....	22
Figura 2.6. Porcentaje de acristalamiento (WWR) en las construcciones de dos ventanas.	22
Figura 2.7. Orientaciones de la fachada principal.	23
Figura 2.8. Descripción del marco operación de jEPlus [64].....	24
Figura 3.1. (a) Disconfort vs. Desviación estándar de la temperatura operativa anual, (b) Disconfort vs. Temperatura operativa media anual [°C].....	27
Figura 3.2. Resultados de disconfort de acuerdo a cada condición de borde (TA: Techo adiabático, TE: techo expuesto, PA: pared adiabática, PE: pared expuesta. 1-2: número de ventanas acristaladas).	28
Figura 3.3. Diagramas de caja de (a) la desviación estándar y (b) temperatura operativa media, segregados por el tipo de configuración.....	28
Figura 3.4. Diagramas de caja de disconfort con respecto del material de las paredes... ..	30
Figura 3.5. Diagrama de caja del disconfort con respecto al porcentaje de acristalamiento para las configuraciones de una sola ventana.	31
Figura 3.6. Diagrama de caja del disconfort con respecto al porcentaje de acristalamiento para las configuraciones de dos ventanas.....	32
Figura 3.7. Gráfica de dispersión de los resultados de las simulaciones de ventanas extras.	32
Figura 3.8. Diagrama de caja del disconfort con respecto a las infiltraciones.....	34
Figura 3.9. Diagrama de caja del disconfort con respecto a la orientación de la fachada para las configuraciones de una sola ventana.	34

Figura 3.10. Diagrama de caja del disconfort con respecto a la orientación de la fachada para las configuraciones de dos ventanas.....	35
Figura 3.11. Orientaciones óptimas para los casos de una y dos ventanas respectivamente.	35
Figura 3.12. Diagrama de caja del disconfort con respecto al tipo de ventana.	36
Figura 3.13. Sensibilidad global de cada parámetro evaluado.	37
Figura 3.14. Sensibilidad de cada parámetro de acuerdo a cada configuración de vivienda.	37
Figura 3.15. Diagrama de caja de disconfort con respecto del WWR, para los casos de techo y paredes adiabáticas.....	38
Figura 3.16. Sensibilidad de cada parámetro de acuerdo a cada configuración de vivienda, descartando los casos únicos de las configuraciones de 2 ventanas (WWR = 30%, 40%).	39
Figura 3.17. (a) Disconfort vs. Desviación estándar de la temperatura operativa anual, (b) Disconfort vs. Temperatura operativa media anual [°C] para los casos con techos de zinc y los de techo de concreto.	40
Figura 3.18. (a) Disconfort vs. Desviación estándar de la temperatura operativa anual, (b) Disconfort vs. Temperatura operativa media anual [°C] para los casos con techos de zinc, disgregados de acuerdo a su condición de borde.....	41
Figura 3.19. Sensibilidad global de cada parámetro evaluado en las viviendas de techo de zinc.....	41
Figura 3.20. Gráficas de temperatura según la condición de borde durante la semana más fría y más caliente del año, para las mejores condiciones (promedio de disconfort anual = 35%).....	43
Figura 3.21. Gráficas de temperatura según la condición de borde durante la semana más fría y más caliente del año, para las peores condiciones (promedio de disconfort anual = 67%).....	43
Figura 3.22. Gráficas de temperatura según el material de las paredes, durante la semana más fría y más caliente del año, para las mejores condiciones (promedio de disconfort anual = 22%)	45
Figura 3.23. Gráficas de temperatura según el material de las paredes, durante la semana más fría y más caliente del año, para las peores condiciones (promedio de disconfort anual = 58%)	45
Figura 3.24. Gráficas de temperatura según el WWR, durante la semana más fría y más caliente del año, para las mejores condiciones (promedio de disconfort anual = 20%)....	46

Figura 3.25. Gráficas de temperatura según el WWR, durante la semana más fría y más caliente del año, para las peores condiciones (promedio de discomfort anual = 48%).	47
Figura 3.26. Diagrama de caja del discomfort con respecto al acristalamiento separado según el material de construcción.	48
Figura 3.27. Gráficas de temperatura según las infiltraciones, durante la semana más fría y más caliente del año, para las mejores condiciones (promedio de discomfort anual = 20%).	49
Figura 3.28. Gráficas de temperatura según las infiltraciones, durante la semana más fría y más caliente del año, para las peores condiciones (promedio de discomfort anual = 60%).	50
Figura 3.29. Gráficas de temperatura según la orientación de la fachada, durante la semana más fría y más caliente del año, para las mejores condiciones (promedio de discomfort anual = 19%).	51
Figura 3.30. Gráficas de temperatura operativa según las orientaciones E y SE, para las mejores condiciones (promedio de discomfort anual = 18%).	52
Figura 3.31. Gráficas de temperatura de los casos con techo de zinc, durante la semana más fría y más caliente del año, para el mejor y peor caso.	53

RESUMEN

Las condiciones térmicas de las viviendas afectan a la salud y desempeño de las personas. Al hablar de condiciones de vida, es común hablar sobre el déficit cualitativo de la vivienda. En el caso de Ecuador, 45% de la población vive con este déficit en sus viviendas. Esto se debe a la carencia de guías constructivas con criterios energéticos en fases de diseño de edificios. El presente trabajo busca establecer los principales criterios para mejorar las condiciones de confort térmico en las viviendas de Quito. Para esto, se realizó un análisis de la influencia de los principales parámetros por medio de un estudio de sensibilidad. De acuerdo a esto, cinco parámetros fueron estudiados (materiales de fabricación de las paredes, porcentaje de superficie de ventana sobre la superficie de la pared o WWR, tasa de infiltración o renovación del aire, orientación de la fachada y tipo de vidrio) bajo tres diferentes condiciones de frontera (techo expuesto o adiabático, paredes expuestas o adiabáticas y número de paredes con ventanas). Adicionalmente, se utilizó modelos de ventilación natural y de ganancias internas dentro de la vivienda. Se realizó un total de 17.280 simulaciones energéticas de una construcción genérica con el fin de representar los diferentes tipos de construcciones de Quito. Los resultados muestran que la condición del techo es la condición más influyente en el comportamiento térmico de las viviendas. Así también, la utilización de aislamiento en las paredes tiene efectos positivos sobre el confort térmico. Por el contrario, el número de paredes con ventana resultó la condición de borde menos influyente. Sin embargo, estas condiciones deben estar acompañadas de las combinaciones de parámetros más óptimas. Así, los parámetros de mayor relevancia fueron: el material de las paredes, el WWR y la tasa de renovación de aire. Estos fueron los que presentaron mayor sensibilidad a lo largo del análisis. Por último, un caso adicional con techo de zinc fue estudiado. Para éste, se determinaron altos niveles de incomodidad térmica bajo cualquier combinación de los parámetros. Con los resultados obtenidos, se realizaron recomendaciones a ser implementadas en las fases de diseño con criterios energéticos pasivos de construcciones residenciales, con el objetivo de mejorar el comportamiento térmico de las mismas.

Palabras clave: Confort térmico, parámetros constructivos, análisis de sensibilidad, criterios energéticos pasivos

ABSTRACT

Thermal conditions affect people's health and performance. Qualitative housing deficit is often used to talk about life quality. Regarding Ecuador, 45% of population lives within this housing deficit. This is due to the lack of constructive guidelines about energetic criteria in early building design. This work aims to establish the basic criteria to improve thermal comfort on dwellings of Quito. In order to accomplish this goal, a sensitivity analysis was conducted to understand the influence of the principal constructive parameters. Five parameters were studied (infiltration rate, glass type, orientation, walls fabrics and WWR) under three different border conditions (adiabatic or exposed roof, adiabatic or exposed walls and number of glazed walls). In order to represent different types of constructions, 17280 building energy simulations were carried out over a generic model of dwelling. Results show that the roof boundary condition is the most important parameter affecting the building thermal performance. Additionally, the use of wall isolation has positive effects on thermal comfort. On the other hand, the number of glazed walls resulted to be the least influential border condition. However, these conditions must be accompanied an appropriate combination of parameters. Thus, the most important parameters turned out to be walls fabrics, WWR, infiltration rate, orientation and glass type. Finally, the thermal behavior of zinc roof dwellings was analyzed. In this case, high thermal discomfort values were found under any parameters combination. With the obtained results, basic guidelines have been established to be implemented in early design phase of residential buildings so thermal comfort can be improved through energetic passive criteria.

Keywords: thermal comfort, constructive parameters, sensitivity analysis, energetic passive criteria.

ESTUDIO DE SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UNA VIVIENDA DE QUITO CON GANANCIAS INTERNAS USANDO SIMULACIÓN ENERGÉTICA

INTRODUCCIÓN

El sector residencial es el mayor consumidor energético en el mundo, representando más de la tercera parte del total de energía consumida (35%), y con igual importancia, es fuente de emisiones de dióxido de carbono [1]. Adicionalmente, el aumento de la población humana y de niveles de confort requeridos, junto con el aumento del tiempo que la población permanece dentro de los edificios, ha aumentado el consumo de energía del sector residencial a niveles iguales o mayores a los sectores de transporte e industria (hasta 40% del consumo de energía en países desarrollados) [2]. En el caso de Ecuador, el sector residencial es responsable del 30% del consumo eléctrico y 77% del consumo de gas licuado de petróleo (GLP), que representan el 15% y el 9% del total del consumo de energía final en Ecuador, respectivamente [3].

Por otro lado, los edificios tienen un gran impacto ambiental. El uso de sistemas activos de acondicionamiento con ciertos refrigerantes produce un desgaste en la capa de ozono cuando existen fugas [4]. Adicionalmente, las actividades relacionadas con edificios como operaciones de construcción y mantenimiento causan una emisión importante de gases de efecto invernadero (GEI) [5, 6].

Las condiciones térmicas pueden afectar la salud y el desempeño de las personas. Esta afección se da a través de algunos mecanismos. Cuando las condiciones térmicas no son óptimas, la incomodidad térmica genera distracciones. Condiciones muy frías, disminuyen la temperatura de las manos y con esto, se pierde la destreza y motricidad fina [7]. Condiciones muy calientes, por otro lado, generan estrés, fatiga e incluso dolor de cabeza [7, 8]. Estas son razones por las que tener condiciones de confort térmico es importante tanto para el desempeño en entornos de trabajo, como en entornos residenciales.

Cuando se habla de condiciones de vida, es común referirse al déficit cualitativo de vivienda¹. El déficit cualitativo precisa la cantidad de viviendas que presentan carencias en los atributos relacionados con las condiciones de vida y la calidad de vida de los ocupantes. De acuerdo con el Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI) [9], en Ecuador, el

¹ Déficit cualitativo de vivienda: Hace referencia a las viviendas particulares que presentan carencias habitacionales en los atributos referentes a la estructura, espacio y a la disponibilidad de servicios públicos domiciliarios y por tanto, requieren mejoramiento o ampliación de la unidad habitacional en la cual viven [68]

45% de la población vive en hogares carentes de servicios básicos o mal construidos. Esto da a notar que una gran cantidad de personas en Ecuador vive en condiciones térmicamente incómodas y hasta inhabitables. De acuerdo con Gallardo et al [10], la región andina presenta la mayor cantidad de horas de desconfort térmico en el interior de las viviendas. La principal causa de esto es que en Ecuador no existen lineamientos de construcción con criterios energéticos, es decir las construcciones de las regiones costa y sierra son similares y no consideran las diferencias del clima de cada región. En consecuencia, es necesario que exista una normativa o guía de construcción para disminuir el déficit de confort térmico en los hogares ecuatorianos.

Pregunta de investigación

¿Cuáles son los parámetros más importantes que influyen sobre el comportamiento térmico en las viviendas de la ciudad de Quito?

Objetivo general

Identificar los parámetros más relevantes que influyen sobre el confort térmico de viviendas residenciales de Quito por medio de simulación energética

Objetivos específicos

- Definir un modelo de simulación simplificado que represente las viviendas habitadas de Quito
- Establecer y evaluar la influencia de los principales parámetros constructivos sobre el comportamiento térmico de una vivienda residencial
- Establecer un orden de prioridad de los parámetros que influyen en el confort térmico de las construcciones residenciales de Quito.

1. MARCO TEÓRICO

Para solucionar los problemas antes mencionados como el alto consumo energético y el bajo confort térmico en el sector residencial, se han elaborado guías de diseño de edificaciones con bajos consumos energéticos, así como guías de aprovechamiento solar para confort térmico [4–6, 12]. Adicionalmente, se han desarrollado estudios en diferentes locaciones del mundo, incluyendo estudios sobre el uso energético de los sistemas de acondicionamiento (HVAC), como de ventilación natural en latitudes correspondientes a las de Estados Unidos de América y Europa [13, 14]. Los estudios de comportamiento energético en edificaciones se han desarrollado para múltiples usos de edificaciones, como por ejemplo en oficinas [14], escuelas [15], campus universitarios [17, 18] y por supuesto viviendas residenciales [18]. Así mismo, estos estudios analizan el uso de equipos activos de acondicionamiento de aire [13], como técnicas pasivas de acondicionamiento (ventilación natural) [12]. Desafortunadamente, estos estudios se han realizado en países de latitud alta, por lo tanto, poca investigación se ha realizado sobre el comportamiento térmico en regiones ecuatoriales y menos para casos de viviendas no acondicionadas.

En Ecuador se han hecho estudios de sensibilidad de los parámetros que afectan el confort térmico en hogares de Quito [20–22], así como estudios experimentales [22]. Sin embargo, estos estudios no han considerado la ocupación de las viviendas y las ganancias internas que estas conllevan como tasa metabólica, la ganancia producida por iluminación y equipos eléctricos, además, estos estudios no han considerado mecanismos de acondicionamiento natural. Por otro lado, se han realizado estudios considerando varias zonas térmicas, pero para climas cálidos. Miño et al. [23], realizó un estudio para una vivienda tipo, basada en las viviendas sociales, con cuatro zonas térmicas. El principal parámetro que Miño evalúa en su estudio son los materiales de construcción. Adicionalmente, Beltrán y Castillo [17], estudiaron el aprovechamiento de ventilación natural en climas cálidos. Esto se analizó en edificios de las universidades de Guayaquil.

El presente trabajo desarrolla un estudio de sensibilidad para determinar los parámetros de mayor influencia en el confort térmico para un hogar de Quito. De esta manera, la identificación de estos parámetros permitirá establecer guías o recomendaciones a ser implementadas en la etapa de diseño con el fin de mejorar el comportamiento térmico de las viviendas.

1.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO TÉRMICO EN EDIFICIOS

Los seres humanos tienen emociones y comportamientos, experimentan dolor, satisfacción, confort e incomodidad. Todas estas características de las personas, hacen que el confort térmico de los ambientes o edificaciones donde se encuentran, puedan afectar su salud y desempeño [8]. De igual manera, como se menciona anteriormente, las condiciones térmicas internas de un edificio, son un factor decisivo cuando se trata de mantener elevados los niveles de productividad [6]. Por consiguiente, es importante conocer los factores que influyen a que una persona se encuentre en un ambiente confortable.

De acuerdo a la norma ASHRAE 55 [24], se define el confort térmico como “la condición de la mente en la cual expresa satisfacción en el ambiente”. Esta norma sugiere que los principales factores para el confort térmico de una persona son: tasa metabólica, aislamiento de ropa, la temperatura del aire en el interior, temperatura radiante, velocidad del viento y humedad. Sin embargo, el diseño de una edificación no puede controlar todos estos parámetros. Por esta razón, los parámetros a considerar en este estudio sólo se ven relacionados con los aspectos constructivos de una edificación. Ching & Shapiro [5], definen varios parámetros como: infiltraciones, materiales de las paredes, materiales del techo, ventanas, orientación, entre otros. Otros autores como Clarke [25], consideran más importante el recorrido de los flujos de energía en la construcción, caracterizados por la conducción en estado transitorio, la convección en las superficies, la radiación, sombras e insolaciones, flujos de aire, ganancias internas y uso de sistemas de acondicionamiento de aire (HVAC). Sin embargo, en este trabajo, sólo se consideran los parámetros dentro de diseño pasivo, es decir, sin ventilación mecánica, calefacción ni aire acondicionado.

A continuación, se describen los parámetros más importantes dentro de las perspectivas de diseño pasivo de edificaciones.

1.1.1. CLIMA

El diseño de los edificios debe ser siempre apropiado con el clima de una región específica. Ecuador, geográficamente, se encuentra en una región de clima tropical. Sin embargo, la presencia de la Cordillera de los Andes, genera microclimas asociados a cada región del Ecuador. Los factores que influyen el clima en cada región, de acuerdo con Pourrut [26], son:

- Factores astronómicos: radiación solar;

- Factores geográficos: latitud, longitud, topología; y,
- Factores meteorológicos: masa de aire local, precipitaciones.

Quito presenta altos niveles de radiación solar, como se muestra en la Figura 1.1. Esto se debe a la cercanía de Quito con la línea Ecuatorial. Las zonas ecuatoriales reciben más radiación solar que zonas de mayor latitud (aproximadamente ocho veces más que en los polos) [26]. A pesar esto, y debido a su altitud (2.812 m.s.n.m), Quito posee un clima templado.

El cañón del Guayllabamba, al norte de la provincia de Pichincha, actúa como regulador del clima ecuatorial, dando lugar a un sistema conectivo y generador de condensación y precipitaciones. En Pichincha, este es un fenómeno frecuente durante la estación lluviosa de octubre y mayo [27]. Por otro lado, los vientos de la cuenca amazónica provocan precipitaciones casi todo el año, en especial los meses de diciembre y enero.

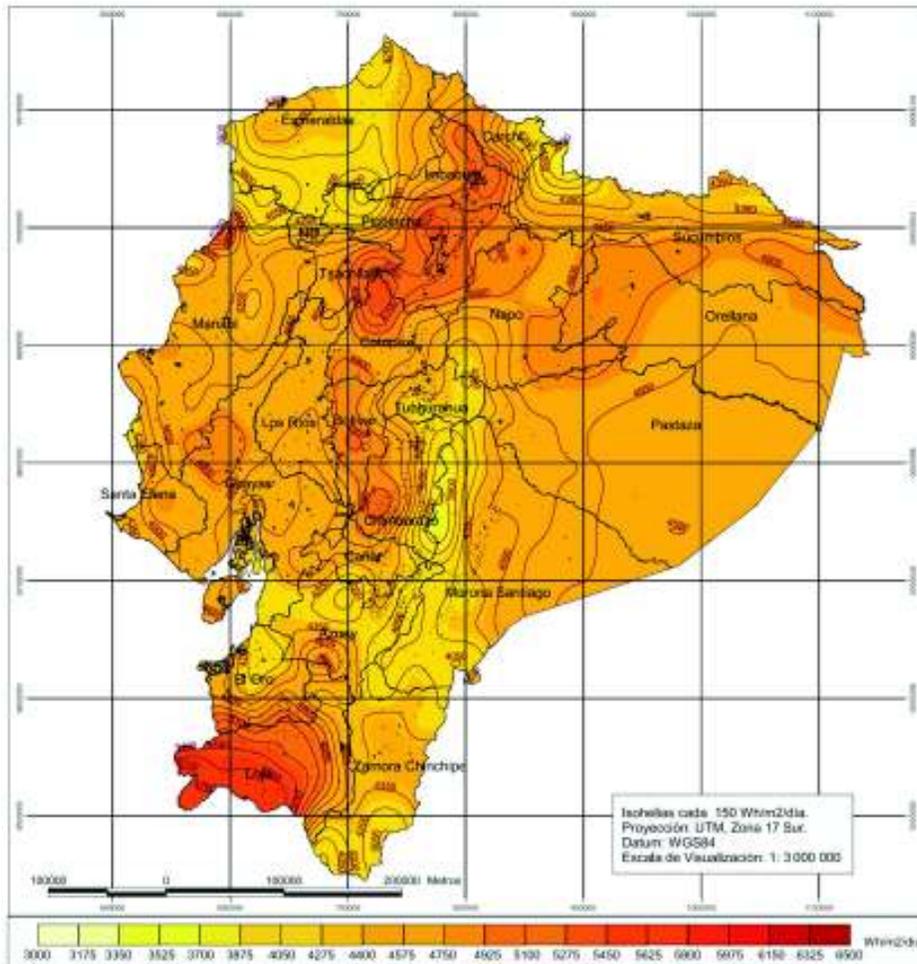


Figura 1.1. Radiación global promedio anual.
(Fuente: [28])

Vásquez-Aza [29], realizó un estudio de la influencia de las variables meteorológicas sobre el comportamiento térmico de las viviendas en Urcuquí. En este trabajo, el autor concluyó que las variables más importantes sobre el comportamiento térmico son la temperatura ambiente y la humedad relativa. Sin embargo, las condiciones meteorológicas de Quito son diferentes.

1.1.2. ORIENTACIÓN Y FORMA

La orientación de un edificio influye especialmente las ganancias por radiación solar. Esto se debe a los ángulos de incidencia que tiene sobre las superficies, en especial, aquellas superficies que tienen materiales transparentes como ventanas [6]. Una correcta orientación de una construcción permite capturar más ganancias de energía térmica en el invierno, y, por el contrario, permite disminuir las ganancias de radiación solar durante el verano. Estas técnicas son comunes en países del hemisferio norte donde la mejor orientación es hacia el sur. La orientación también puede afectar la cantidad de aire que fluya debido a las diferencias de presiones del viento [5]. La mejor forma de optimizar la orientación de un edificio, durante la etapa de diseño, es por medio de simulación computacional.

En general, la pérdida de calor viene dada por la ecuación (1), si se considera que es una transferencia de calor unidireccional (donde el flujo de calor es perpendicular a la superficie) y en estado estable [30], donde, históricamente se trabajaba para reducir el coeficiente global de transferencia de calor para reducir la pérdida de calor, pero no se tomaba en cuenta la superficie de la envolvente de la edificación². Esto indica que la superficie de una edificación debe ser lo más pequeña posible [5].

$$q_{perdido} = U A (T_{int} - T_{ext}) \quad (1)$$

Donde:

$q_{perdido}$ = calor perdido por la edificación

U = coeficiente global de transferencia de calor

A = área de la envolvente del edificio

T_{int} = temperatura del interior de la edificación

T_{ext} = temperatura del ambiente

² La envolvente comprende las paredes y techo una construcción [5]

Un término importante al hablar de la forma de la construcción es el factor de forma, que se define como la relación entre la superficie de la envolvente y el volumen del edificio. Este factor deber ser lo más pequeño posible, por lo que las formas sugeridas son cuadrado, rectángulo, círculo, elipse [7]. Sin embargo, estas formas tienen limitaciones arquitectónicas y operativas para los edificios. Otros autores [4, 30] analizaron otro tipo de aprovechamiento de la forma como las sombras que genera (*Self-shading*), lo cual, para climas calientes bloquea las ganancias solares por las ventanas.

De acuerdo con B. Givoni [32], en viviendas ubicadas en climas templados, el factor de forma no es relevante. Esto se corrobora con lo analizado en el trabajo de Cárdenas & Fernández [21], en donde se evalúa el factor de forma en edificaciones residenciales de Quito mediante simulación energética. En este estudio, concluyeron que la forma geométrica y el factor de forma de la vivienda no tienen un impacto significativo sobre las condiciones de confort de espacios interiores en construcciones de Ecuador. Por último, a pesar de estudios previos sugieren ciertas orientaciones [21], no se ha demostrado la influencia de la orientación en regiones ecuatoriales, por ende, tampoco han sido definidas las orientaciones óptimas para estas zonas, en el caso de que existiese alguna, por lo que el presente trabajo hace hincapié en este tema.

1.1.3. FENESTRACIÓN

El término fenestración es usado para todas las aperturas en una pared o techo capaces de transmitir luz. Por ejemplo, ventanas, domos y triforios [4]. Las principales funciones de las ventanas son: iluminación, ganancia de calor por radiación solar y ventilación natural. Sin embargo, las ventanas contribuyen significativamente a las pérdidas de energía y se atribuye de forma importante al discomfort [5]. Las ventanas tienen por lo general resistencias térmicas menores a las paredes y techo por lo que produce mayores pérdidas de calor por conducción. Por otro lado, permiten obtener mayores ganancias por radiación, lo que hace que sean uno de los elementos constructivos más sensibles para evaluar.

Para evaluar este parámetro, una variable comúnmente usada es la relación de ventana y paredes (ver sección 2.2.3.2) o WWR (por sus siglas en inglés *Window to Wall Ratio*). Los diseñadores se esfuerzan con la selección de un WWR apropiado, en especial con objetivos no energéticos, como vistas, estética, y preferencias ocupacionales [18]. Aplicada de manera adecuada la fenestración puede ser beneficiosa para la iluminación y ganancia y disipación intencional de calor [5].

1.1.4. INERCIA TÉRMICA E AISLAMIENTO

La inercia térmica (también conocido como masa térmica) se refiere a los materiales constructivos de la envolvente de la edificación, que tienen la capacidad de absorber y retener energía térmica [5]. Sin embargo, no existe una expresión globalmente aceptada para definir la inercia térmica de los materiales, por esto, en la Tabla 1.1, se muestran las expresiones utilizadas en estudios previos para definir la inercia térmica. Estas definiciones varían según el autor y el caso de estudio.

Tabla 1.1. Expresiones utilizadas para definir la inercia térmica.

Expresión	Fórmula	Unidades	Definición
Capacidad térmica volumétrica	$C = \rho c$	$\left[\frac{J}{m^3 K} \right]$	Mide la capacidad de un material para almacenar energía
Efusividad térmica	$b = \sqrt{k\rho c}$	$\left[\frac{Ws^{1/2}}{m^2 K} \right]$	Influencia la capacidad de intercambiar energía térmica con los alrededores
Capacidad diurna de calor	$dhc = \sqrt{\frac{2\pi k\rho c}{Z}}$	$\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$	Mide la cantidad de calor almacenada durante la primera parte de un ciclo de 24 horas, y devuelta al espacio durante la segunda mitad del ciclo
Difusividad térmica	$\alpha = \frac{k}{\rho c}$	$\left[\frac{m^2}{s} \right]$	Mide la capacidad de un material para conducir energía térmica relativo a su habilidad de almacenar energía térmica.

Fuente: [30, 34, 35]

Balcomb [34], introdujo el concepto de *capacidad diurna de calor* (dhc, por sus siglas en inglés *Diurnal Heat Capacity*), lo cual define como: “la cantidad de calor almacenada durante la primera parte de un ciclo de 24 horas, y devuelta al espacio durante la segunda mitad del ciclo”. Esto lo define por medio de la ecuación 2.

$$dhc = \sqrt{\frac{2\pi k\rho c}{Z}} \quad (2)$$

Donde:

k = conductividad térmica [W/m²K]

ρ = densidad [kg/m³]

c = calor específico [J/kg K]

Z = tiempo del ciclo (24 horas)

Por otro lado, S. Goulart [33], utilizó otro concepto como es el de efusividad térmica, que se expresa por medio de la ecuación (3). De acuerdo con un estudio realizado por la

Universidad Técnica de Eindhoven (Países Bajos) [35], la efusividad térmica influye la habilidad de un material para intercambiar energía térmica con sus alrededores.

$$b = \sqrt{k\rho c} \quad (3)$$

De acuerdo a algunos autores [34, 37], se recomienda el uso de materiales de alta inercia térmica para la construcción de techos, cuando éstos están expuestos al ambiente. Caso contrario, recomiendan el uso de materiales aislantes o barreras radiantes en los techos. En la región ecuatorial, esto es importante puesto que el techo recibe más radiación durante el día que el resto de superficies en una construcción. Por lo tanto, el uso de bajas inercias térmicas puede sobre calentar las condiciones interiores (en climas cálidos como la costa), o a su vez, puede sobre enfriar las condiciones térmicas de la vivienda (en climas predominantemente fríos como la región andina).

En el caso de climas fríos, la inercia térmica ayuda a tener una acumulación de calor durante el día, y una emisión lenta durante la noche, como muestra la Figura 1.2. De igual forma, en los climas cálidos, una alta inercia térmica puede evitar sobre calentamiento en horas nocturnas, cuando es acompañada de ventilación natural [33].

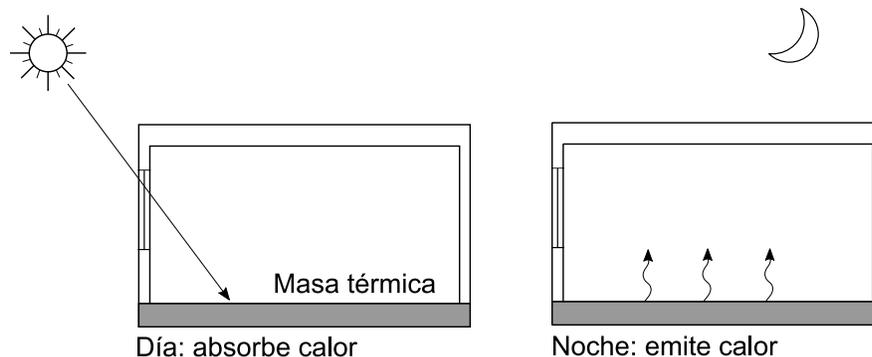


Figura 1.2. Comportamiento de la masa térmica.
(Fuente: [5])

El efecto del aislamiento, por otro lado, es reducir las ganancias y pérdidas de calor. Es decir, cuanto mayor sea el aislamiento, menor es la transferencia de calor por conducción debido a diferencia de temperatura entre el exterior e interior [4].

1.1.5. INFILTRACIONES

Infiltraciones son las filtraciones o ingresos de aire hacia el interior de un volumen de control. Por lo general, existen dos formas de contribución del flujo de masa de aire sobre el balance de energía de una habitación: el flujo de aire que proviene desde afuera, y los flujos debido al movimiento de aire entre las diferentes zonas de un edificio [33]. Las infiltraciones se atribuyen al inevitable movimiento del aire a través de grietas o aberturas alrededor de las paredes, ventanas y puertas. Así también, se atribuye al ingreso de aire

debido a aperturas intencionales de ventanas y puertas para ventilación natural [25]. Por otro lado, el movimiento del aire entre dos zonas se da por la diferencia de presiones resultado de la diferencia de temperaturas y densidad entre dos zonas adjuntas.

Ciertos autores [4], consideran a las infiltraciones como pérdidas o ganancias internas. Por lo general, en el tratamiento de infiltraciones, se considera los cambios de aire por hora o ACH (por sus siglas en inglés *Air Changes per Hour*). Algunos autores utilizan ACH de 0,7 [37], o de 1 [18], los cuales son valores comunes para estudios paramétricos de edificios. En el caso de laboratorios de experimentación, la ASHRAE 62.1-2010 establece que los requerimientos de infiltraciones son de aproximadamente 1,2 ACH [38]. Esto a su vez, se debe a que suponen edificios de alta eficiencia energética, que por definición tienen envolventes de alto desempeño y cargas internas reducidas. Por otra parte, cuando se utiliza técnicas de ventilación natural, los valores de ACH son de mayores. En casas con ventanas abiertas, la tasa de cambio de aire mínima medida se encuentra entre 2,5 y 4 ACH, incluso ante condiciones calmadas [39].

La ventilación natural tiene un rol importante en las edificaciones, ya que, usada correctamente puede contribuir a mejorar la calidad del aire en el interior del edificio (siempre y cuando la concentración de contaminantes en el exterior sea menor que la interna). También contribuye al confort térmico, lo que en consecuencia ayuda a la reducción de energía en edificios acondicionados [40].

1.1.6. SOMBRAS E INSOLACIÓN

Las sombras e insolaciones son los parámetros que controlan la magnitud y punto de aplicación de la energía solar [25]. Las sombras generadas por elementos externos, como edificios adjuntos, limita el ingreso de radiación directa (DNI), como muestra la Figura 1.3, permitiendo que solo la componente difusa de radiación penetre, aportando a las ganancias de calor en el edificio [4]. De acuerdo con V. Bradshaw [4], esto puede reducir la ganancia de calor solar hasta valores superiores al 80%.

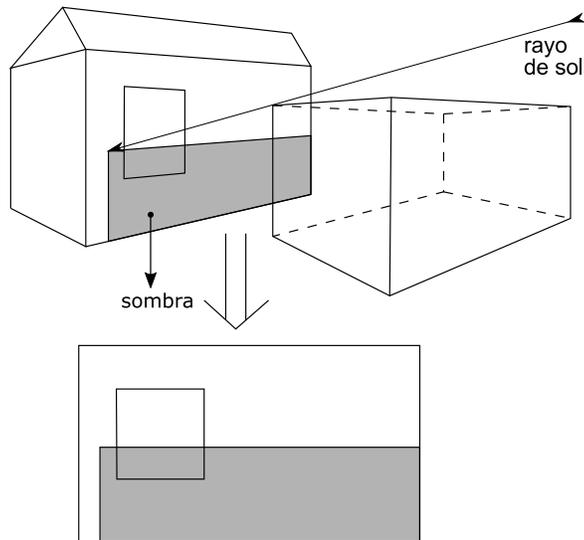


Figura 1.3. Sombras en una superficie externa.
(Fuente: [25])

Las alturas de las sombras pueden ser estimadas conociendo los dos ángulos que definen la posición del sol como la altura solar y el azimut solar. Adicionalmente, se debe conocer la altura y distancia del edificio o edificios ajunto(s) [4].

1.1.7. GANANCIAS INTERNAS

Las ganancias internas son el calor sensible y latente generado dentro del espacio interno que incrementa la temperatura y humedad dentro de dicho espacio. Estas incluyen las siguientes fuentes: personas, de la iluminación y cualquier otro tipo de equipo [41].

1.1.7.1. Ocupación

Cada persona, emite aproximadamente la misma cantidad de energía térmica que un bombillo incandescente (entre 100 y 350 W) [4]. La cantidad exacta de energía depende del sexo, edad, y nivel de actividad. En consecuencia, la cantidad total de energía térmica generada por los ocupantes en el interior de un edificio se determina por medio del número de personas, el nivel de actividad de cada una y el tiempo de la ocupación [42].

1.1.7.2. Iluminación

La energía eléctrica utilizada en lámparas o bombillas es finalmente liberada en forma de energía térmica. El momento en que se enciende una luz, la luminaria absorbe parte del calor emitido por la lámpara. Parte de este calor se transmite a la construcción.

La energía radiante emitida se transforma en una ganancia de energía térmica del espacio, después de haber sido absorbido por las superficies de la habitación [41].

1.1.7.3. Equipos eléctricos y varios

Cargadores de equipos que permanecen conectados son una fuente creciente en el consumo energético en edificios. Todos los elementos portadores de corriente, como las resistencias eléctricas, generan energía térmica [30]. Equipos como televisiones, cada vez más grandes, computadoras, consolas de juegos, refrigeradores, contribuyen al crecimiento de cargas eléctricas [43].

1.2. SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS

Las simulaciones computacionales en la etapa de diseño de edificios para el análisis de su eficiencia energética en edificios son comunes, puesto que resulta muy costoso realizar estudios experimentales en este campo. Estudios experimentales implicarían construcción de edificaciones y sistemas de acondicionamiento para cada caso que se desee estudiar. Es por esto que, gremios como el Instituto Americano de Arquitectos (AIA, por sus siglas en inglés *American Institute of Architects*), promueven el uso de simulación energética en las etapas de diseño y modelamiento del desempeño térmico y energético [44]. Así, es necesario usar un método de optimización con simulación energética para encontrar la combinación más apropiada de parámetros de diseño para una locación específica [45]. Entre las aplicaciones más comunes de la simulación energética de edificios, de acuerdo a Hong, Chou y Bong [46], se encuentran:

- Cálculo de cargas de calefacción o enfriamiento: requerido para selección de sistemas de acondicionamiento HVAC³.
- Análisis de desempeño energético: se usa para estimar la demanda desde la parte de carga de un edificio.
- Cumplimiento de regulaciones de edificios: simulaciones energéticas se pueden usar para diseñar edificios de acuerdo a los requerimientos y normas locales.

1.2.1. PROGRAMAS Y MODELOS DISPONIBLES

Estos se pueden agrupar en dos: herramientas de diseño (DT, *Design Tools*) y programas de simulación detallada (DSP – *Detailed Simulation Programs*). DSPs incorporan varias técnicas y métodos matemáticos como diferencias finitas, elementos finitos, CFD, entre otros [46]. A continuación, se describen los principales modelos y métodos.

Los primeros métodos para simulación energética de edificios (BES) se originaron alrededor de 1960. Entre los primeros se encuentran BLAST (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*) y DOE-2, que fueron impulsados por el gobierno de Estados

³ HVAC, por sus siglas en inglés *Heat Ventilation Air Conditioning*

Unidos. La principal diferencia entre estos dos métodos es el método de cálculo de cargas. DOE-2 utiliza una aproximación del factor de ponderación del cuarto, mientras que BLAST utiliza un aproximación de balance de energía [47].

En 1996, el departamento de energía de Estados Unidos, desarrolla *EnergyPlus*, un programa de simulación que une las características de los dos modelos antes mencionados [47]. En programas de simulación secuencial como DOE-2 y BLAST, las zonas del edificio, sistemas de manejo de aire y equipos de planta central, se simulan secuencialmente sin realimentación de una a la otra [48]. *EnergyPlus* puede manejar simulaciones integradas, es decir, las tres partes principales (zonas, sistemas y planta), se simulan simultáneamente.

Existen otros programas y modelos de simulación energética con otros enfoques y aproximaciones. TRNSYS es usado principalmente para sistemas de energía térmica. En este, cada componente, como bomba de calor, colector solar, etc. es representado por una subrutina diferente [46]. En cuanto se refiere a flujos de aire interzona y ventilación existen modelos como COMIS (*Conjunction of Multizone Infiltration Specialist*) [46], que los maneja *EnergyPlus*, y programas especializados como ESP-r [49]. D.B. Crawley et al. [49] realiza una comparación del desempeño y capacidades de veinte programas diferentes.

1.2.2. ANÁLISIS PARAMÉTRICO

El desafío ahora es diseñar edificios sostenibles que cumplan con los requerimientos operacionales de los usuarios u ocupantes. Los estudios paramétricos son métodos bastante útiles cuando se trata de explorar alternativas de diseño y establecer dependencias entre las variables de diseño, en especial cuando no existe algún método global de optimización. Para ello, es importante el modelamiento y simulación computacional. La función objetivo del estudio es el confort térmico de la zona. Los modelos computacionales asumen condiciones dinámicas y se basan en métodos numéricos para obtener soluciones aproximadas de modelos con la complejidad del mundo real [50].

2. METODOLOGÍA

Algunas metodologías han sido desarrolladas e implementadas para estudios paramétricos. Entre ellas se encuentran técnicas estadísticas, técnicas de Montecarlo, técnicas estocásticas y técnicas de muestreo [51, 52]. Sin embargo, estas técnicas son especialmente útiles cuando el poder computacional es bajo, o la cantidad de combinaciones o simulaciones es alta. En este trabajo, se utiliza un análisis conceptualmente más simple, puesto que, la combinación de todos los parámetros si es posible y no existen mayores limitantes computacionales.

La metodología se basa en el marco de trabajo desarrollado para simulación energética paramétrica realizada por H. Samuelson et al. [18]. Siendo así, los pasos a seguir son:

1. Selección de objetivos;
2. Selección de los parámetros de diseño y valores de entrada;
3. Definir los datos climáticos con los que se trabaja;
4. Selección del entorno de simulación y de procesamiento de datos;
5. Evaluación de objetivos;
6. Análisis de sensibilidad; y,
7. Utilizar los resultados para identificar las consideraciones importantes en el diseño.

2.1. FUNCIÓN OBJETIVO

El presente estudio se centra en encontrar las mejores condiciones constructivas para el confort térmico para un hogar en Quito. Estas condiciones se definen utilizando el modelo de confort adaptativo definido en la ASHRAE 55. De acuerdo a esto, “el confort adaptativo es un modelo que relaciona las temperaturas de diseño de interiores o los rangos de temperatura aceptables con los parámetros meteorológicos o climatológicos al aire libre” [24].

El modelo de confort adaptativo se aplica para edificios que no cuentan con ningún sistema de acondicionamiento mecánico. El acondicionamiento puede darse por medio de la operación de ventanas, para permitir ventilación natural. Adicionalmente, las actividades de los ocupantes son mínimas o casi sedentarias, con tasas metabólicas muy bajas. Este método se aplica solo para espacios donde los ocupantes pueden adaptar libremente su ropa de acuerdo con las condiciones térmicas de interiores como de exteriores [24]. Por lo tanto, no es de interés estimar los valores de aislamiento de la ropa de los ocupantes. Por último, este modelo se aplica cuando la temperatura exterior predominante se encuentra entre 10 °C y 33,5 °C.

En la Figura 2.1 se muestran los rangos de temperatura aceptable para espacios acondicionado naturalmente. Según R. De Dear y G. Brager [53], la temperatura de confort, se define por medio de la ecuación (4). En la Figura 2.1, se presentan los rangos de temperatura que varían según la aceptabilidad requerida en las condiciones interiores; el ancho de banda es de 5 °C y 7 °C para una aceptabilidad de 80% y 90% respectivamente. Chen et al [54] indican que el 90% de aceptabilidad es el modelo más apropiado para realizar estudios de optimización de viviendas acondicionadas naturalmente. Aplicando esto para las condiciones de Quito, se nota que el rango de los límites de temperatura de confort no varía significativamente, como se muestra en la Figura 2.2. Por esta razón, los límites inferior y superior de temperatura operativa se toman como valores constantes, correspondientes a los valores de 19,6 °C y 24,6 °C.

$$T_{conf} = 0,31 T_{amb} + 17,8 \quad (4)$$

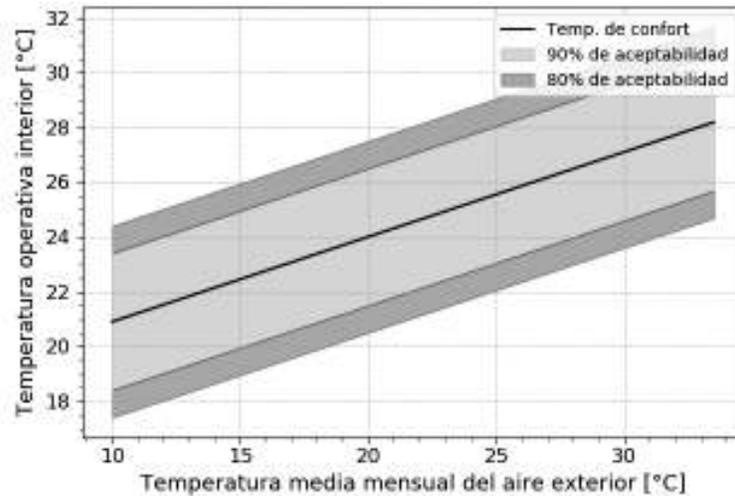


Figura 2.1. Rangos de temperatura aceptable.
(Fuente: [24])



Figura 2.2. Rango de temperatura de confort adaptativo con un 90% de aceptación para Quito.

Por medio de este rango de confort definido, se define la función objetivo del estudio como *discomfort* anual, el cual se expresa por medio de la ecuación (5). El *discomfort* a su vez, se da de dos formas. Cuando la temperatura operativa se encuentra por debajo del límite inferior de temperatura, se considera que las condiciones de *discomfort* de la vivienda son por sobre enfriamiento. Por otro lado, si la temperatura operativa del interior de la vivienda se encuentra por encima del límite superior del rango de confort, se dice que se tiene *discomfort* por sobre calentamiento. Como se menciona en las secciones anteriores, ninguno de los dos tipos de incomodidad térmica es favorable para el desempeño de las personas en el interior de una edificación.

$$discomfort = \frac{\text{horas del año fuera del rango de confort}}{\text{horas totales de ocupación de la vivienda}} \times 100 \quad (5)$$

Después de determinar la función objetivo, se lleva a cabo el estudio de sensibilidad. La sensibilidad de cada uno de los parámetros se estima por medio del índice definido en la ecuación (6) [18].

$$IS_p = \frac{\bar{d}_{max} - \bar{d}_{min}}{\bar{d}_{max}} \quad (6)$$

Donde:

IS_p = Índice de sensibilidad del parámetro p .

\bar{d}_{max} = Mediana de *discomfort* asociado a los valores de un parámetro p que producen máximo *discomfort* [18].

\bar{d}_{min} = Mediana de *discomfort* asociado a los valores de un parámetro p que producen mínimo *discomfort* [18].

2.2. PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

2.2.1. CONSIDERACIONES Y ALGORITMOS

En ciudades como Quito, el clima predominante es frío, con variaciones de temperatura moderadas durante el día (hasta 25°C), y valores bajos durante la noche (hasta 8°C). Como el rango de temperaturas durante el año no es extremo, la mayor parte de la población no utiliza ningún tipo de sistema mecánico de acondicionamiento del ambiente. Por lo tanto, el único tipo de acondicionamiento existente se puede dar por medio de ventilación natural. Los modelos de construcciones estudiadas son únicamente de edificios de uso residencial.

Para simulaciones energéticas, cuando la cantidad de combinaciones o simulaciones es alta, un análisis detallado de todos los tipos de vivienda resulta impráctico [54]. En su lugar,

un modelo genérico idealizado de vivienda se generó para el estudio. Se escogió una vivienda representativa de 36 m² de superficie y 2,5 m de altura [20, 21]. Debido a que es un área relativamente pequeña, la vivienda se puede modelar como una sola zona térmica [21]. Esta vivienda, puede representar una casa aislada (sin construcciones adjuntas), así como un apartamento integrado en un edificio. La diferencia entre estas representaciones consiste en las diferentes condiciones de frontera utilizadas.

Como se menciona en la sección anterior, el modelo de confort adaptativo requiere de varias consideraciones adicionales como son las siguientes:

- El acondicionamiento se da por medio de ventilación natural y los ocupantes pueden operar las ventanas a voluntad.
- La actividad de los ocupantes es muy baja, en la Tabla 2.1, se muestra las tasas metabólicas empleadas. Estas corresponden a actividades como dormir (72 W/m²), mantenerse sentado o en pie (108 W/m²), con caminatas muy suaves (126 W/m²). Estos valores se tomaron del manual de entradas y salidas de EnergyPlus [42].
- Se considera que las personas también son libres en la utilización de ropa, por lo que en el modelo no se incluye valores de aislamiento de ropa.
- Los materiales están limitados a los más comúnmente utilizados en la ciudad de Quito. Estos se hallan en el anuario de edificaciones realizado por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) [55]. De acuerdo a este, los materiales más comunes son ladrillo y bloque.
- Se utiliza un Año Típico Meteorológico (TMY3) para los datos climáticos de las simulaciones, tomado de IWECC 840710 (*International Weather for Energy Calculations*) [56].

Las ganancias internas se han considerado de tres fuentes: de la ocupación, la iluminación y equipos varios. La ocupación se ha estimado considerando la cantidad promedio de personas en un hogar, de acuerdo con la Encuesta Nacional del Ingresos y gastos (ENIGHUR) 2011-2012 [57]. El promedio de personas por hogar en Ecuador es de 3,8 personas, es decir alrededor de 0,1 personas por m². Sin embargo, no todos los ocupantes se encuentran en los mismos horarios, salvo por las horas de descanso en la noche. Por esta razón, se ha tomado el horario mostrado en la Tabla 2.1, de un estudio de Miño-Rodríguez et al. [36].

Tabla 2.1. Horarios y valores de las ganancias internas debido a la ocupación y tasas metabólicas según el tipo de actividad.

Ocupación [personas]		Actividad [W/persona]		
Hora	Valor	Hora	Valor	Actividad
00h00-06h00	4	00h00-06h00	72	Dormir
06h00-08h00	1	06h00-08h00	126	Caminata suave
08h00-17h00	1	08h00-17h00	126	Caminata suave
17h00-22h00	4	17h00-22h00	108	Mantenerse sentado
22h00-24h00	4	22h00-24h00	72	Dormir

Fuente: [36, 42]

La iluminación se ha estimado asumiendo 4 focos fluorescentes compactos de 45W, de manera que se puede expresar en total de potencia como 5 W/m², que se distribuye de acuerdo al horario que se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Horarios y valores de las cargas internas debido a iluminación y ganancias internas.

Iluminación 5 [W/m ²]		Equipos 14,5 [w/m ²]	
Hora	Valor [%]	Hora	Valor [%]
00h00-06h00	0	00h00-06h00	10
06h00-08h00	25	06h00-08h00	25
08h00-17h00	0	08h00-17h00	50
17h00-22h00	100	17h00-22h00	100
22h00-24h00	50	22h00-24h00	10

Fuente: [36]

Como se mencionó anteriormente, la ventilación natural sí es tomada en cuenta en este estudio. Se han tomado dos modelos de renovación de aire. El primero es el de Cambio de Aire por hora (ACH), el cual es un parámetro que se estudiará más a detalle en las siguientes secciones. También se consideró un modelo de ventilación natural, el mismo que está relacionado con la apertura de las ventanas durante el día. Los horarios de los modelos utilizados se indican en la Tabla 2.3. En el modelo de ventilación natural, el flujo de aire es una función de la velocidad del viento y el efecto de apilamiento térmico (traducido de *thermal stack effect*), junto con el porcentaje de apertura de las ventanas. Cabe mencionar también que, dentro del horario establecido, las ventanas solo se abren si la vivienda alcanza una temperatura mayor a la del límite inferior de confort (sin necesidad que la temperatura externa sea mayor a este límite). Este límite inferior pretende evitar el sobre enfriamiento del espacio, dando como resultado una carga de calentamiento [42].

Tabla 2.3. Horarios de los modelos de infiltraciones.

Ventilación Natural		ACH	
Hora	Valor[%]	Hora	Valor
00h00-08h00	0	00h00-08h00	1
08h00-17h00	30	08h00-14h00	0
17h00-24h00	0	17h00-24h00	1

Fuente: Propia.

2.2.2. CONDICIONES DE BORDE DE LA ENVOLVENTE

En el presente estudio se consideran casos donde se supone la existencia o inexistencia de otras construcciones adjuntas o adosadas. En el caso de que dichas edificaciones se encuentren sobre un piso intermedio, se asume que la condición de borde del techo es adiabática, sin exposición al viento ni al sol. Caso contrario, se considera la exposición del viento y sol. De la misma manera, se estudia el caso en que no solo el techo se encuentra sin exposición a los factores externos, sino también ciertas paredes. En este caso se ha considerado adiabáticas las dos paredes con el mismo vértice, como muestra la Figura 2.3. De esta manera se simula construcciones esquineras que tiene dos lados expuestos. Por último, se considera dos condiciones de ubicación en las ventanas, en el primer caso, solo existe una ventana, y en el segundo existen dos ventanas. Con todas estas consideraciones, se proponen ocho tipos de vivienda, en las cuales se estudiarán cinco parámetros que se considera pueden ser modificables por el diseñador o constructor de la vivienda.

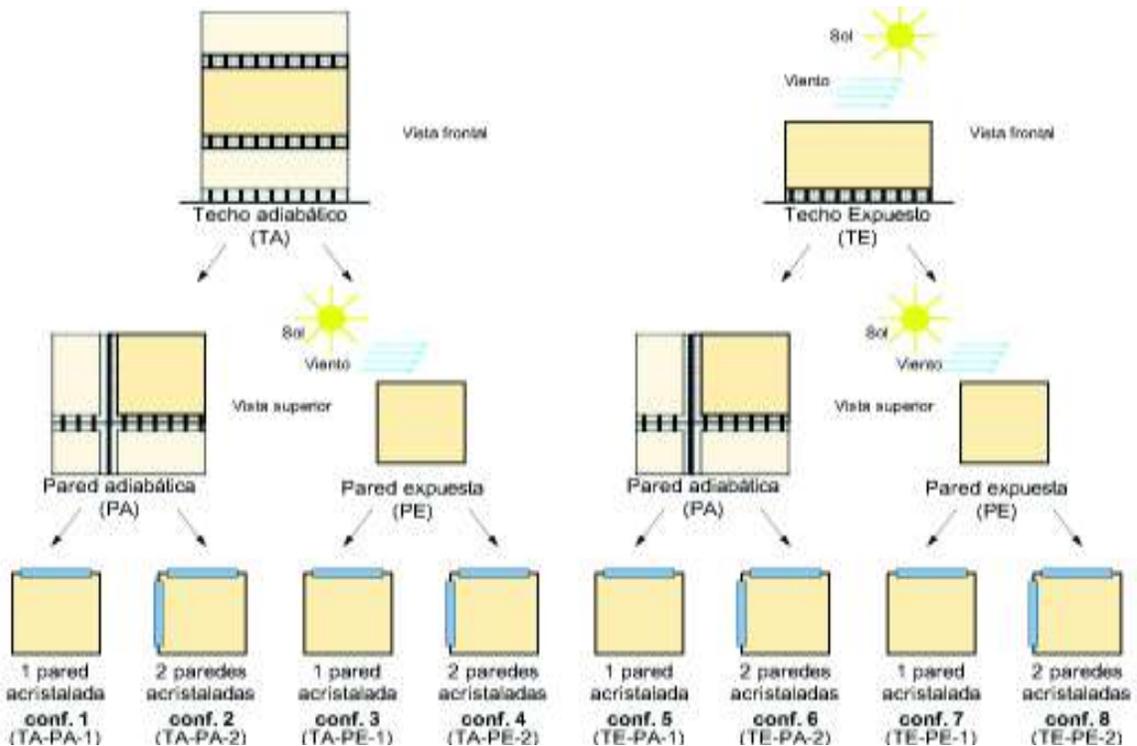


Figura 2.3. Condiciones de borde de la envolvente, casos y configuraciones estudiadas.

2.2.3. PARÁMETROS A ESTUDIAR

Los parámetros que se consideran más importantes que influyen en el confort térmico de una vivienda se presentan en la Tabla 2.4. La combinación de estos parámetros y condiciones dan como resultado un total de 17.280 simulaciones, las cuales se organizaron de acuerdo al árbol de simulaciones mostrado en la Figura 2.4.

Tabla 2.4. Parámetros para la simulación.

Parámetro	Valores
Porcentaje de ventanas (WWR)	5% - 10% - 15% - 20% - 30% - 40%
Orientación de la fachada	0° (N) - 45° (NE) - 90° (E) - 135° (SE) - 180° (S) - 225° (SO) - 270° (O) - 315° (NO)
Tipo de ventana	Simple - Doble
Infiltraciones (ACH)	0,3 – 1,0 – 2,0
Material del piso	Concreto (17cm)
Material del techo	Concreto (17cm) – Zinc (0,06cm) para el caso de techo expuesto
Material de paredes	Bloque (10cm - 15cm - 20cm)
	Ladrillo (10cm - 15cm - 20cm)

Fuente: Propia.

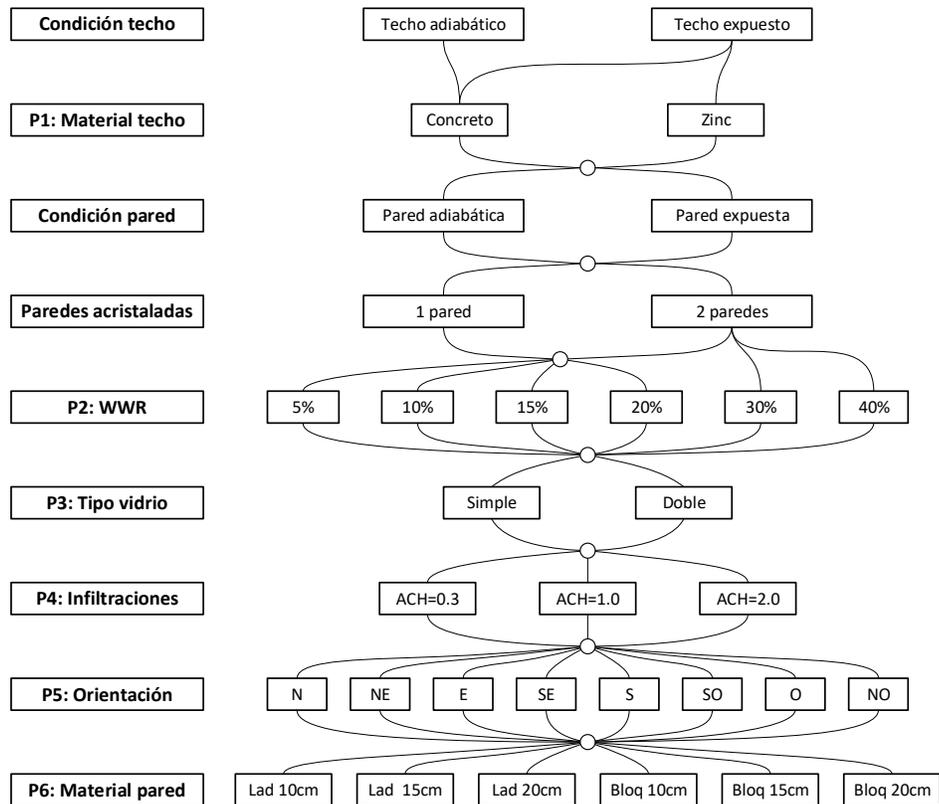


Figura 2.4. Árbol de simulaciones realizadas.

2.2.3.1. Tipo de ventana

Se ha tomado vidrio comercial, cuyas propiedades se muestran en la Tabla 2.5. Los tipos de vidrios considerados dentro de este estudio son simple y doble. El tipo doble consiste en una ventana con dos vidrios, separados por una capa de aire de 6 mm de espesor. Esta práctica se la realiza con el fin de aumentar la resistencia térmica de la ventana y así reducir las pérdidas de conducción que se da en las ventanas.

Tabla 2.5. Propiedades del vidrio utilizado en la simulación.

PROPIEDAD	VALOR
Espesor	0,006 [m]
Transmitancia solar a incidencia normal	0,775
Reflectancia solar frontal a incidencia normal	0,071
Reflectancia solar trasera a incidencia normal	0,071
Transmitancia visible a incidencia normal	0,881
Reflectancia visible frontal a incidencia normal	0,080
Reflectancia visible trasera a incidencia normal	0,080
Transmitancia infrarroja a incidencia normal	0,000
Emisividad hemisférica infrarroja del lado frontal	0,840
Emisividad hemisférica infrarroja del lado trasero	0,840
Conductividad	0,900 [W/m*K]

Fuente: [20]

2.2.3.2. Porcentaje de ventanas (WWR)

El porcentaje de acristalamiento, o WWR, es la relación entre la superficie que ocupa el vidrio de las paredes sobre la superficie de todas las paredes.

Se considera que solo las paredes expuestas poseen ventanas. Por esta razón, como el modelo solo considera configuraciones con una y dos paredes acristaladas, en consecuencia, el porcentaje máximo que se puede tener es 20%, en el caso de una pared y 40%, en el caso de dos paredes, lo que se ilustra mejor en las figuras 2.5 y 2.6. En la Tabla 2.4, se indica el porcentaje de acristalamiento que se toma dentro del estudio.

En las figuras 2.5 y 2.6, se muestran los modelos de las viviendas de acuerdo al número de ventanas. Nótese que, para los casos del 5% al 20%, los porcentajes de acristalamiento se repiten. Si se tomase el mismo porcentaje para ambos casos, se observa que las ventanas no tienen las mismas dimensiones, sin embargo, el total de área que ocupan es la misma.

$$WWR = \frac{A_{ventana}}{A_{paredes}} = \frac{a \times (L - 0,2) \times h_{(WWR)}}{L \times H \times 4} \quad (7)$$

$$h_{(WWR)} = \frac{WWR \times L \times H \times 4}{a \times (L - 0,2)} \quad (8)$$

Donde:

L = Longitud de las paredes = 6m.

H = Altura de la construcción = 2,5m.

a = Número de ventanas de la configuración.

$h_{(WWR)}$ = altura de la ventana (función del WWR).

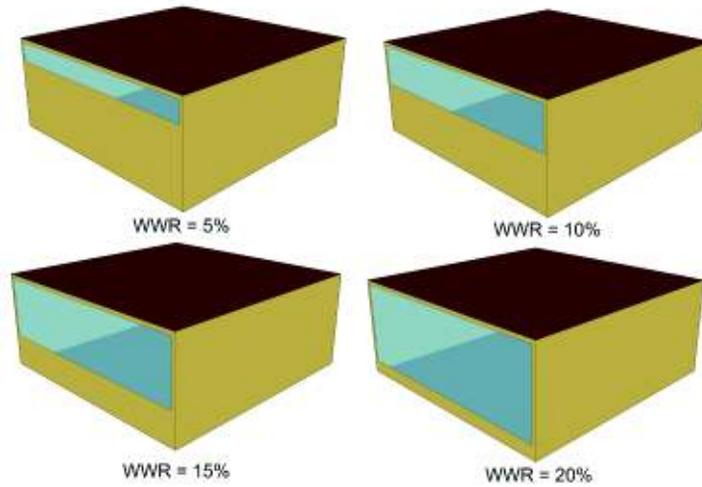


Figura 2.5. Porcentajes de acristalamiento (WWR) en las construcciones con una sola ventana.

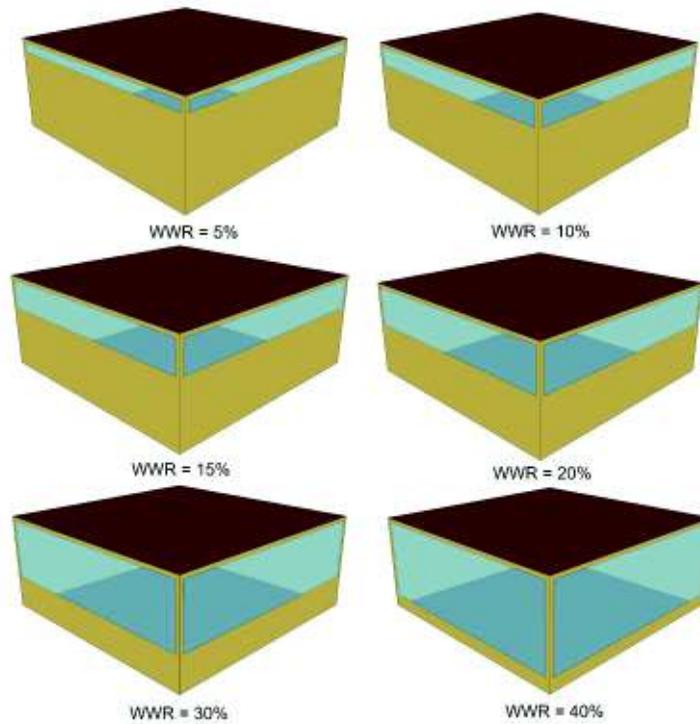


Figura 2.6. Porcentaje de acristalamiento (WWR) en las construcciones de dos ventanas.

2.2.3.3. Orientación de la fachada principal

Se considera que la fachada principal es la que cuenta con ventana, a esta es a la que se cambia de orientación. Esto se observa de mejor manera en la Figura 2.7. La primera posición viene a ser a 0° , con la fachada apuntando hacia el Norte. De esta manera, la rotación de 45° viene a ser una orientación hacia el Noreste, la de 90° hacia el Este, y así sucesivamente.

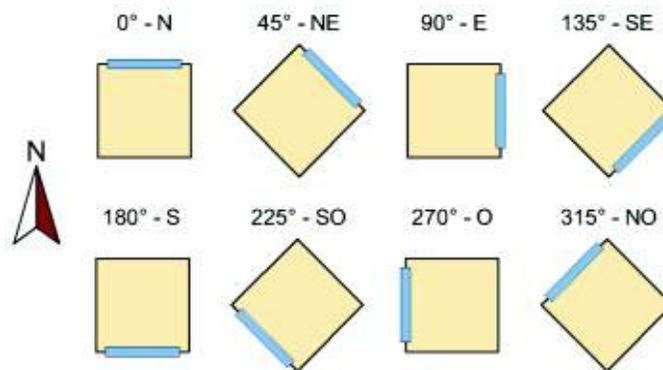


Figura 2.7. Orientaciones de la fachada principal.

2.2.3.4. Infiltraciones

En el caso de las infiltraciones, el valor mínimo tomado es de 0,3 ACH. Esto se debe a que tener una casa completamente hermética no es viable. Adicionalmente, la calidad del aire en el interior de la vivienda se expresa como el nivel de ventilación requerida, por lo que una casa “hermética” con cero infiltraciones sería inhabitable. De esta forma, el valor de infiltraciones mínimo, que se basa en criterios de salud y confort, según lo establecido por algunos autores, es de 0,3 ACH [58,41]. Por otro lado, el valor máximo considerado es de 2 ACH, que implicaría, grandes deficiencias en la construcción o la existencia de ventanas abiertas en la vivienda [39].

2.2.3.5. Materiales de construcción

Como se menciona anteriormente, se tomaron los materiales más utilizados en Quito, de acuerdo al Anuario de edificaciones realizado por INEC [55]. Estos son bloque y ladrillo para las paredes, y para el techo y piso, se tomó una losa de hormigón de 17 cm de espesor. En la Tabla 2.6, se muestran las propiedades térmicas de los materiales del techo, piso y paredes de la edificación. El zinc es un material usado ampliamente en hogares de bajos recursos, y así como en los programas de vivienda social realizados por el gobierno. Cabe destacar también que los casos de techo de zinc solo se los evalúa con la condición de techo expuesto.

Tabla 2.6. Propiedades de los materiales de construcción.

Material	Conductividad [W/m*K]	Calor específico [J/kg*K]	Densidad [kg/m³]
Bloque	1,40	920	800
Ladrillo	0,89	720	1.920
Hormigón	1,13	1.000	2.000
Zinc	116	389	7.140

Fuente: [59]

En el presente trabajo, se utiliza el término de masa térmica para expresar el efecto combinado del material de construcción y el espesor de las paredes.

2.3. ENTORNO DE SIMULACIÓN

El programa utilizado para las simulaciones energéticas es EnergyPlus, que es un motor de cálculo ampliamente usado por varios autores para análisis paramétricos [19, 30, 36, 60–62]. Sin embargo, para este estudio, se han utilizado más herramientas que permiten la utilización más amigable a comparación de *EnergyPlus*. Por estas razones, el entorno de simulación se dividió en tres partes. En la primera parte, se genera un archivo plantilla. Este se realiza por medio del Plug-in de *Open Studio* para *SketchUp*. *Open Studio* es un software libre que soporta la simulación energética en edificios con *EnergyPlus* como motor de cálculo y *SketchUp* para la creación de la geometría y asignación de algoritmos básicos [63].

En la segunda parte, se realizó la parametrización. Para ésta se utilizó *jEPlus*, que es un software, basado en JAVA, desarrollado por Zang & Korolija [64]. Este programa permite generar varios archivos de entrada de *EnergyPlus* (IDF), a partir un archivo plantilla y el árbol de parámetros. Luego, simula cada uno de los archivos IDF en *EnergyPlus* y recoge los resultados en un archivo separado por comas (CSV), como muestra la Figura 2.8.

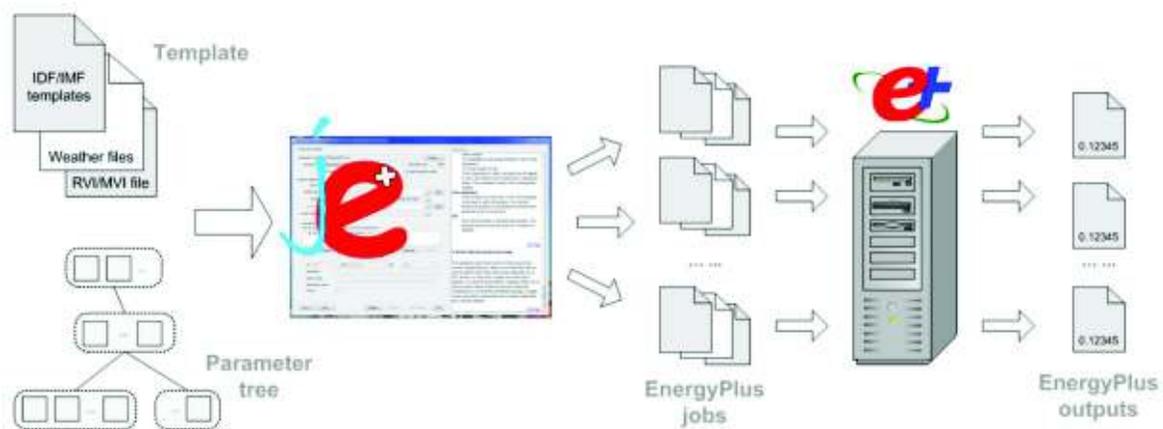


Figura 2.8. Descripción del marco operación de jEPlus [64]

Por último, el archivo CSV que arroja jEPlus contiene el nombre y los resultados de cada una de las simulaciones. Como las simulaciones se realizaron de manera horaria, el resultado de cada simulación arroja 8760 datos de temperatura operativa. Para cada simulación, se calcula el discomfort, así como los principales valores estadísticos como la desviación estándar, la media y mediana de cada una de las simulaciones. Para esto, se utiliza *Python* 3.6. Dentro del mismo, se utilizan las siguientes librerías:

Tabla 2.7. Principales librerías de Python utilizadas para el procesamiento de datos.

Librería de Python	Función
Pandas	Permite leer y manipular archivos de texto, como es el caso de los archivos CSV.
Numpy	Es el paquete fundamental para computación científica de Python. Contiene funciones estadísticas, matemáticas y algebraicas.
Cudatoolkit	Arquitectura de procesamiento paralelo que aprovecha la unidad de procesamiento gráfico o GPU.

Fuentes: [65, 66]

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. EVALUACIÓN DEL DISCONFORT

Dentro del estudio, se realizaron todas las combinaciones de parámetros y condiciones de borde posibles. El tiempo aproximado de cálculo de las 17280 simulaciones fue de 24 h. El procesamiento de los datos se lo realizó utilizando Python con una arquitectura CUDA [66]. En este capítulo se presentan los resultados obtenidos, así como las tendencias e importancia de cada uno de los parámetros bajo cada una de las condiciones de borde.

En la Figura 3.1, se muestra el disconfort anual en función de la temperatura operativa media anual y de la desviación estándar de dicha temperatura. En la figura se aprecia que una gran cantidad de casos (más del 54%) tienen una temperatura operativa media dentro del rango de confort, sin embargo, los valores de desviación estándar de los mismos son altos, lo que indica una alta oscilación de la temperatura durante el día. Esto hace que, en general, los resultados muestren que una gran cantidad de casos presentan altos niveles de incomodidad térmica. De hecho, si se toma un límite de disconfort del 30%, solo 1386 simulaciones caerían dentro de este rango, es decir solo el 8% de configuraciones. Esto corrobora los resultados obtenidos por Gallardo et al [10], quienes indican que para la región andina, la carencia de normativas o guías constructivas tiene como resultado un gran número de viviendas con bajo confort térmico. Por otro lado, en la figura se muestra una segregación por las condiciones de borde mediante colores. Se puede apreciar que, las configuraciones de techo y paredes adiabáticas alcanzan las mejores condiciones de confort (bajo el 30% de disconfort). También se observa que solo los casos de techo adiabático alcanzan estos niveles de confort, lo que indica la importancia de aislamiento, en especial en el techo. Sin embargo, es importante notar que la aplicación de solamente esta estrategia no garantiza el confort térmico, sino que, debe siempre estar acompañada de estrategias con los otros parámetros. Cabe destacar que solo los resultados de techo de hormigón son presentados en esta sección, los resultados de los modelos con techos de zinc se discutirán más adelante, en la sección 3.4, debido a que estos presentan un comportamiento térmico diferente.

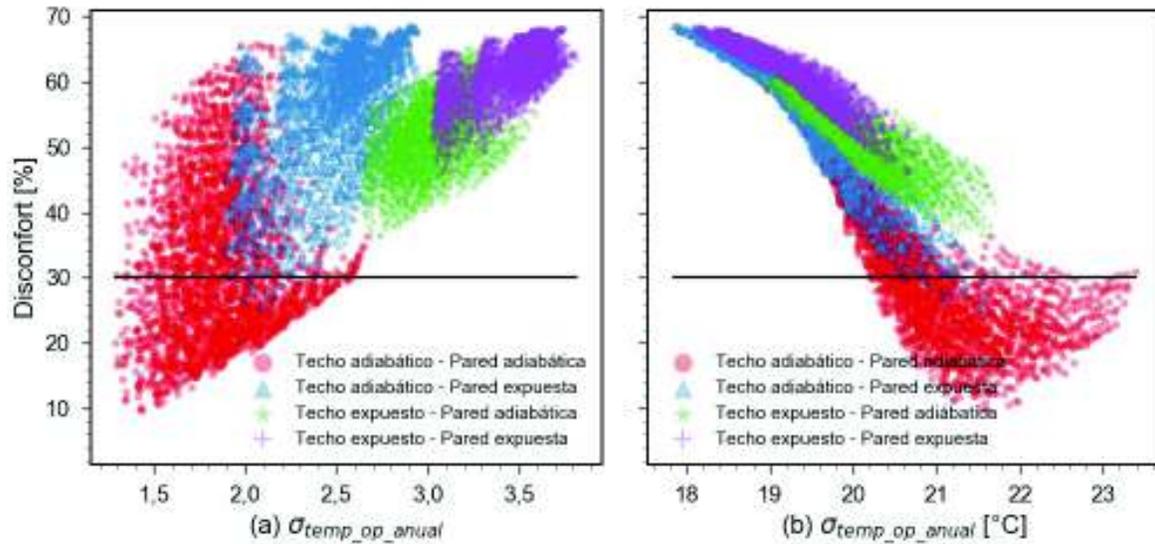


Figura 3.1. (a) Discomfort vs. Desviación estándar de la temperatura operativa anual, (b) Discomfort vs. Temperatura operativa media anual [°C].

A fin de tener una mayor comprensión, se efectúa un análisis estadístico para determinar tendencias del discomfort por sobre enfriamiento y sobre calentamiento, para cada condición de borde, así como para cada parámetro. En la Figura 3.2, se observa que las condiciones térmicas del ambiente interior de las viviendas de Quito es en general frío, puesto que, el porcentaje de incomodidad por sobre enfriamiento es superior a la de sobre calentamiento. En esta figura también se observa que, es más importante la condición de borde de la envolvente (ver Figura 2.3) que la cantidad de ventanas. Por ejemplo, se observa que, las configuraciones de techo y paredes adiabáticas con uno y dos vidrios (TA-PA-1 y TA-PA-2) se encuentran juntas, de manera similar las configuraciones TA-PE-1 con las TA-PE-2, las TE-PA-1 con las TE-PA-2, y por último las TE-PE-1 con las TE-PE-2. Por esta razón, los resultados de las secciones siguientes se presentarán únicamente tomando en cuenta la disgregación de la condición de borde de la envolvente, mas no todas las configuraciones mostradas en la Figura 2.3. La segregación de viviendas de una y dos ventanas se toma en cuenta exclusivamente para el análisis de los parámetros donde se considera que esta segregación es importante, como sucede al evaluar orientación y porcentaje del acristalamiento.

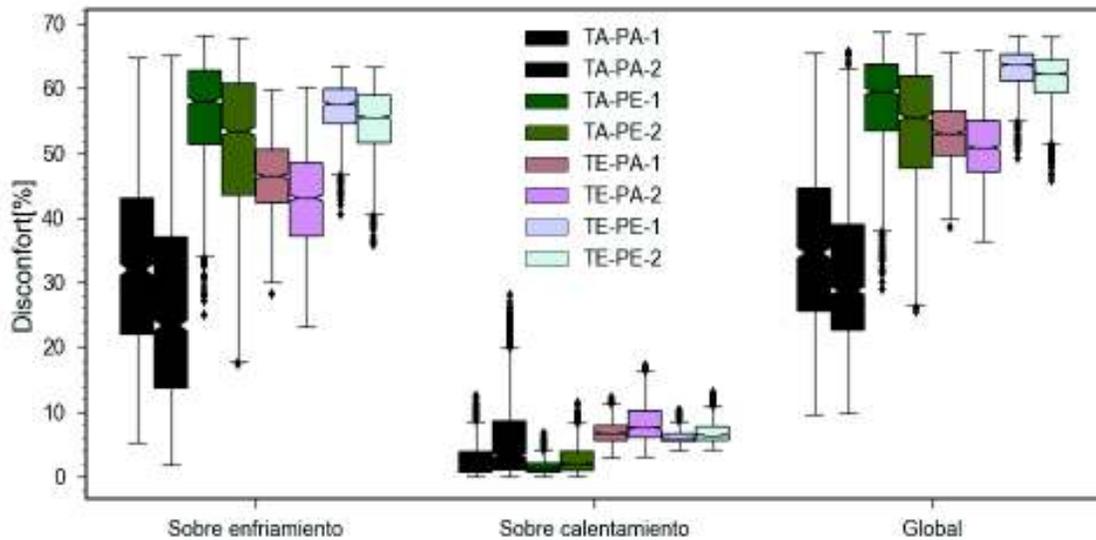


Figura 3.2. Resultados de disconfort de acuerdo a cada condición de borde (TA: Techo adiabático, TE: techo expuesto, PA: pared adiabática, PE: pared expuesta. 1-2: número de ventanas acristaladas).

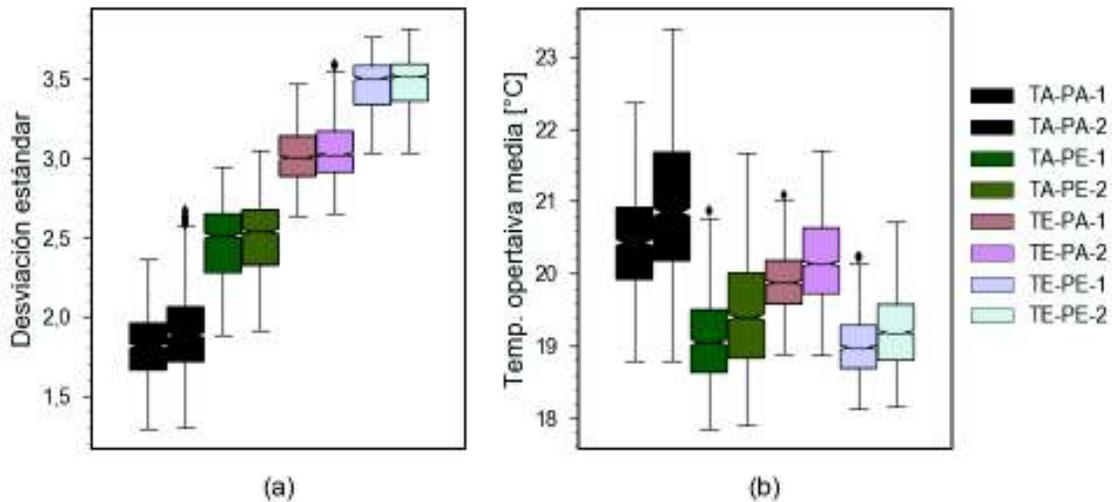


Figura 3.3. Diagramas de caja de (a) la desviación estándar y (b) temperatura operativa media, segregados por el tipo de configuración.

En la Figura 3.3, se observa como los casos con techo expuesto tienen una temperatura operativa baja en comparación a los casos con techo adiabático. Sin embargo, también se aprecia que, en estos casos, la desviación estándar es más alta, lo que indica que la oscilación de temperatura diaria es mayor. Por lo tanto, estas condiciones ocasionan que la incomodidad térmica sea mayor tanto por sobre enfriamiento como por sobre calentamiento. Esto se debe a que, estando en la zona ecuatorial, el techo es la superficie que más radiación recibe durante el día. Esto hace que la temperatura operativa sea alta durante el día, dando como resultado la sensación térmica de sobre calentamiento. Sin embargo, bajo condiciones de baja radiación solar o en las noches, los techos expuestos

generan una importante pérdida de calor, lo que hace que la incomodidad térmica se dé por sobre enfriamiento. Un comportamiento similar puede ser observado en el caso de las paredes expuestas, en contraste con las paredes adiabáticas. Con la diferencia de que, cuando se evalúa las paredes, es importante tomar en cuenta la orientación de las paredes expuestas con ventanas. La orientación se analiza en la sección 3.2.4.

Es interesante contrastar los casos TA-PE y TE-PA, puesto que ambos presentan una superficie aislada similar (36 m² y 30 m² respectivamente), pero la ubicación de este aislamiento es diferente. Para estos dos casos, se observa que las temperaturas operativas de las viviendas que tienen techos adiabáticos son menores a las de los techos expuestos, cosa que no sucede al comparar los casos TA-PA y TE-PE. Por otro lado, también se observa que la media de discomfort de los TA-PE es mayor a la de los TE-PA, lo que también se contrapone a la tendencia de siempre tener mejores condiciones en los techos adiabáticos. Esto se debe a que los casos TE-PA tienen una mayor ganancia energética por medio del techo lo que hace que sean menos fríos que los casos TA-PE (los cuales únicamente dependen de las ganancias de las paredes), a pesar de tener oscilaciones mayores diarias, lo que se comprobará más adelante, en la sección 3.5.1.

3.2. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE CADA PARÁMETRO

A continuación, se muestran los resultados de cada parámetro, de acuerdo a cada una de sus condiciones de frontera. Los resultados de discomfort se presentan acompañados del tipo de incomodidad térmica que se registra. Es decir, si el discomfort se da por sobre calentamiento (*Overheating*), o por sobre enfriamiento (*Overcooling*), de manera de entender cómo se dan las influencias de cada uno de los parámetros. En otras palabras, si el cambio de los parámetros tiende a enfriar o a calentar la vivienda o ambas.

3.2.1. INFLUENCIA DEL MATERIAL DE LAS PAREDES.

En la Figura 3.4. se muestran los diagramas de caja de los materiales y espesores de paredes en función del discomfort. Sin tomar en cuenta el tipo de material, se observa que el aumento de espesores siempre tiende a disminuir el discomfort, principalmente el discomfort causado por sobre enfriamiento. Esto se debe a que el espesor disminuye la transferencia de calor por conducción al aumentar la resistencia térmica. Esto evita perder calor. Por otra parte, se observa un mejor comportamiento del ladrillo que del bloque. Esto se debe a que el ladrillo goza de mejores propiedades térmicas, lo que le permite tener una mayor inercia térmica. Dicho de otro modo, las propiedades térmicas del ladrillo le permiten

absorber una mayor cantidad de calor durante el día y liberarlo durante la noche, lo que hace que estabilice la temperatura operativa interior.

También se observa que las diferencias entre el comportamiento de un material son más significativas de acuerdo a la condición de borde. Por ejemplo, si se toma el caso del ladrillo con techo y paredes adiabáticas, se nota que, entre el caso de 10 cm y 20 cm de espesor existe una diferencia de discomfort de alrededor de 12%. Al contrario, si se observa el ladrillo bajo condiciones de techo expuesto y pared expuesta, se nota que entre los mismos casos (de 10 cm a 20 cm), existe una diferencia del discomfort de aproximadamente 6%.

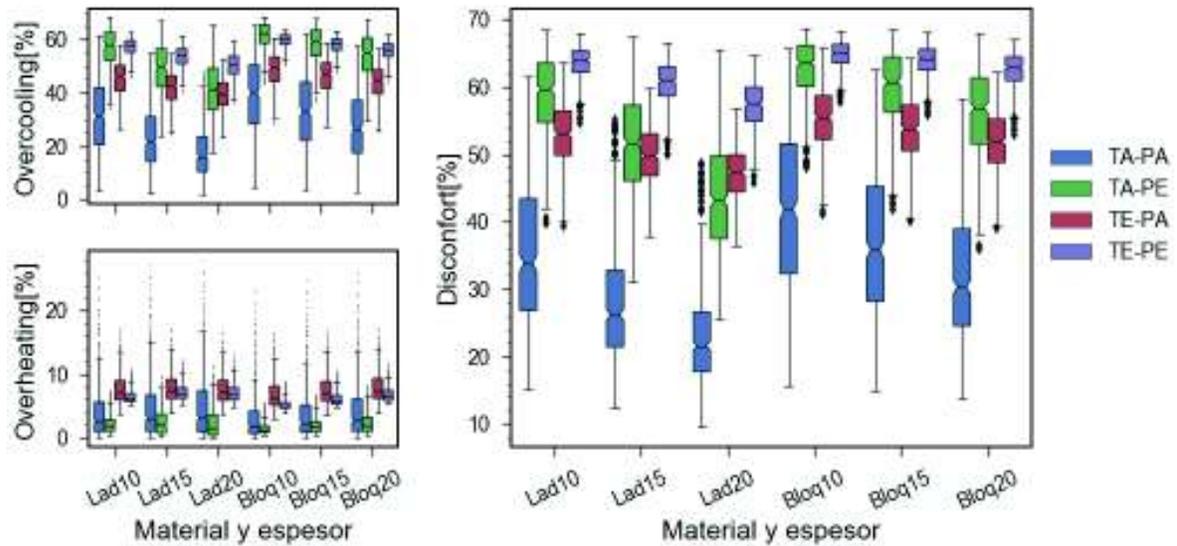


Figura 3.4. Diagramas de caja de discomfort con respecto del material de las paredes.

Por lo regular, como se menciona en la sección anterior, los casos de techo expuesto y pared adiabática presentan mejores condiciones de confort que los de techo adiabático y pared expuesta, sin embargo, se observa que, en el caso de ladrillo de 20 cm de espesor, sucede lo contrario. Este caso se revisa más a fondo en la sección 3.5.1.

Finalmente, hay que mencionar que, las propiedades del bloque pueden cambiar significativamente debido a los agujeros de su interior (núcleos). La conductividad térmica aumenta con el aumento de los espacios huecos, debido a la convección que se da dentro de estos [67]. Este fenómeno no ha sido tomado en cuenta dentro de este estudio.

3.2.2. INFLUENCIA DEL PORCENTAJE DE ACRISTALAMIENTO (WWR)

En las figuras siguientes se presenta los diagramas de caja del porcentaje de acristalamiento. Se ha separado en dos figuras de manera que los resultados de los casos de una sola ventana (Figura 3.5) no interfieran con los de dos ventanas (Figura 3.6) y viceversa. Se puede apreciar entonces que, por lo regular el discomfort disminuye con el

aumento del porcentaje de acristalamiento. Se aprecia también que los casos con techos y paredes adiabáticas son más sensibles a los cambios del WWR, puesto que pequeños incrementos del WWR tienen un importante impacto en la reducción del discomfort. Por el contrario, los casos con techos expuesto son menos sensibles a los cambios de WWR. Por último, al comparar los casos con una ventana y dos ventanas, no se observa diferencias significativas en cuanto a su comportamiento, mientras se mantengan los mismos porcentajes de acristalamiento.

Como se mencionó antes, el aumento del porcentaje de acristalamiento puede contribuir al confort de las viviendas. Sin embargo, mucho acristalamiento genera más ganancias solares, lo que puede provocar sobre calentamiento. Las ventanas, así mismo, tienen una importante pérdida de calor durante horas frías y la noche debido a su baja resistencia térmica. Adicionalmente, en las viviendas, el aumento de acristalamiento resta masa térmica, lo que resulta en un aumento de la oscilación de temperatura operativa diaria, y por tanto un aumento del discomfort térmico. Finalmente, se observa que los rangos de discomfort que cubren los casos de techos adiabáticos son más amplios (diagrama de caja es más largo), a pesar de tener una media de discomfort más baja. Esto puede deberse a que son más sensibles a la orientación de la fachada.

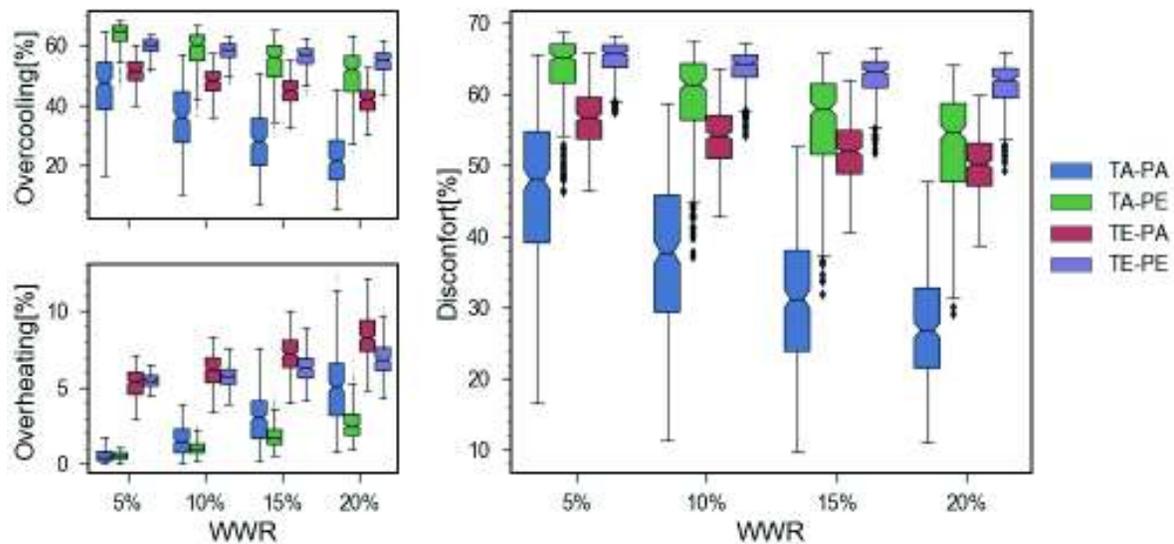


Figura 3.5. Diagrama de caja del discomfort con respecto al porcentaje de acristalamiento para las configuraciones de una sola ventana.

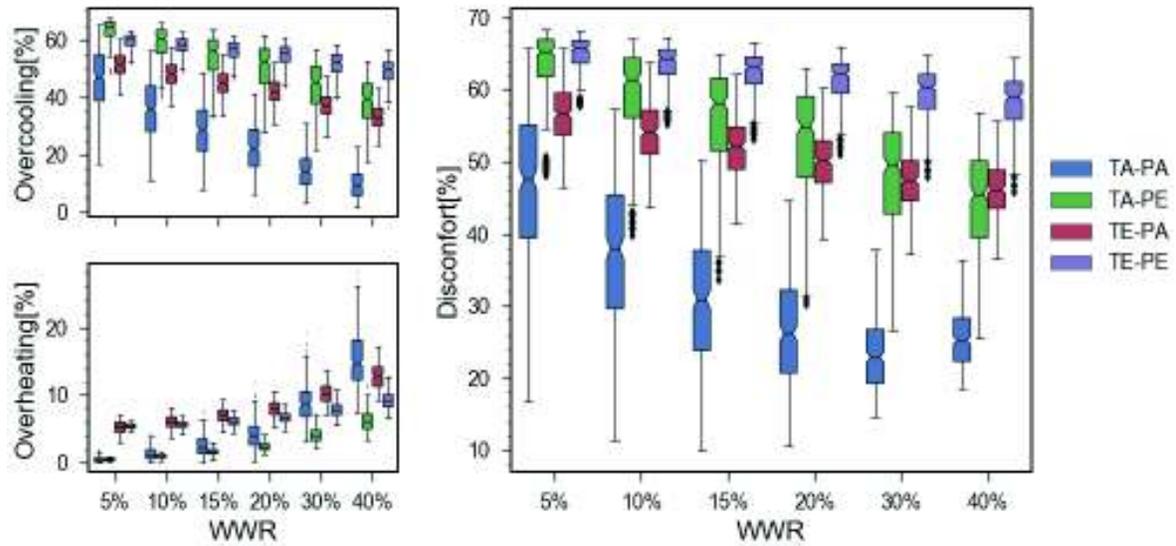


Figura 3.6. Diagrama de caja del discomfort con respecto al porcentaje de acristalamiento para las configuraciones de dos ventanas.

Para verificar lo expresado anteriormente, se llevó a cabo simulaciones adicionales variando el porcentaje de acristalamiento para casos específicos. Se tomó un caso de dos paredes acristaladas opuestas, y un caso de cuatro paredes acristaladas para tener un espectro más amplio de WWR. De esta forma, se logró variar el WWR hasta el 80%, para buscar valores apropiados para estos casos específicos. Así, la vivienda tomada es una vivienda con techo adiabático, paredes adiabáticas, paredes de ladrillo de 20 cm de espesor, infiltraciones de 0,3 ACH y vidrios simples. Estas condiciones se tomaron porque son las que presentan mayor sensibilidad. Siendo el techo adiabático, esto hace que las ganancias internas estén dadas principalmente a través de las ventanas. En la Figura 3.7 se muestran los resultados de estas simulaciones adicionales.

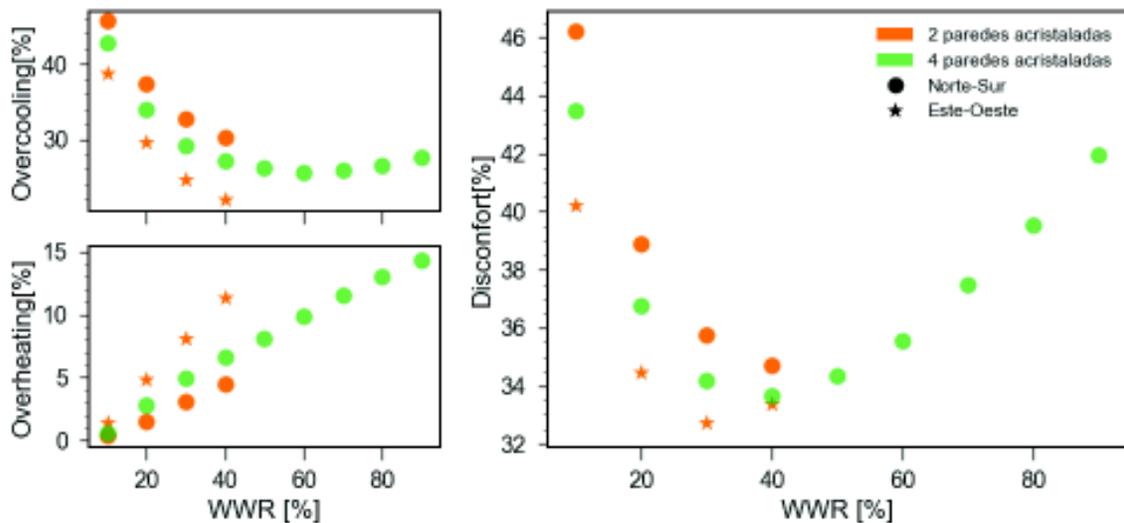


Figura 3.7. Gráfica de dispersión de los resultados de las simulaciones de ventanas extras.

En esta figura, se nota que el sobre calentamiento aumenta y el sobre enfriamiento disminuye con el aumento de WWR. En este caso, la orientación de la fachada cambia el comportamiento térmico de la vivienda. Por un lado, se tiene que las orientaciones Este-Oeste (en los casos de dos paredes acristaladas) tienen más ganancias durante el día por la radiación solar, y por lo tanto, el sobre enfriamiento es menor y el sobre calentamiento es mayor. Por ello, aparece un punto de mínimo desconfort cuando $WWR=30\%$. Este punto no aparece en las orientaciones Norte-Sur, porque las ganancias solares son menores. Por otro lado, en el caso de las cuatro paredes acristaladas, se observa un comportamiento intermedio entre los casos Norte-Sur y Este-Oeste de los casos con dos paredes acristaladas, llegando a un punto mínimo cuando $WWR=40\%$. Cabe notar que el último caso expuesto de cuatro paredes acristaladas, puede llegar a no ser real para un ambiente residencial, sin embargo, ayuda a una mejor comprensión del comportamiento térmico de las viviendas bajo diferentes porcentajes de acristalamiento.

Debido a la importancia del acristalamiento para aumentar las ganancias térmicas en el interior de las viviendas, es importante que ésta se relacione con la capacidad de esta vivienda para absorber el calor y retenerlo. De manera que se pueda estabilizar fácilmente la temperatura operativa diaria. También es posible que los valores más apropiados de WWR que se discutieron en la Figura 3.7, cambien de acuerdo con el espesor de las paredes. Esto se estudiará más adelante en la sección 3.5.3.

3.2.3. INFLUENCIA DE INFILTRACIONES

Como el clima de Quito es predominantemente frío, este parámetro tiene un importante efecto sobre el sobre enfriamiento de las viviendas. Como ya se esperaba, los resultados (Figura 3.8) indican que al aumento de infiltraciones es directamente proporcional al aumento del desconfort térmico, y esto se repite para todas las condiciones de borde. En cualquiera de los casos, la recomendación para las viviendas es el de reducir la tasa de infiltraciones, en especial durante la noche, que es donde mayor pérdida de calor existe. Esto también implica el mejoramiento de las técnicas constructivas que son responsables de la mayor parte de infiltraciones.

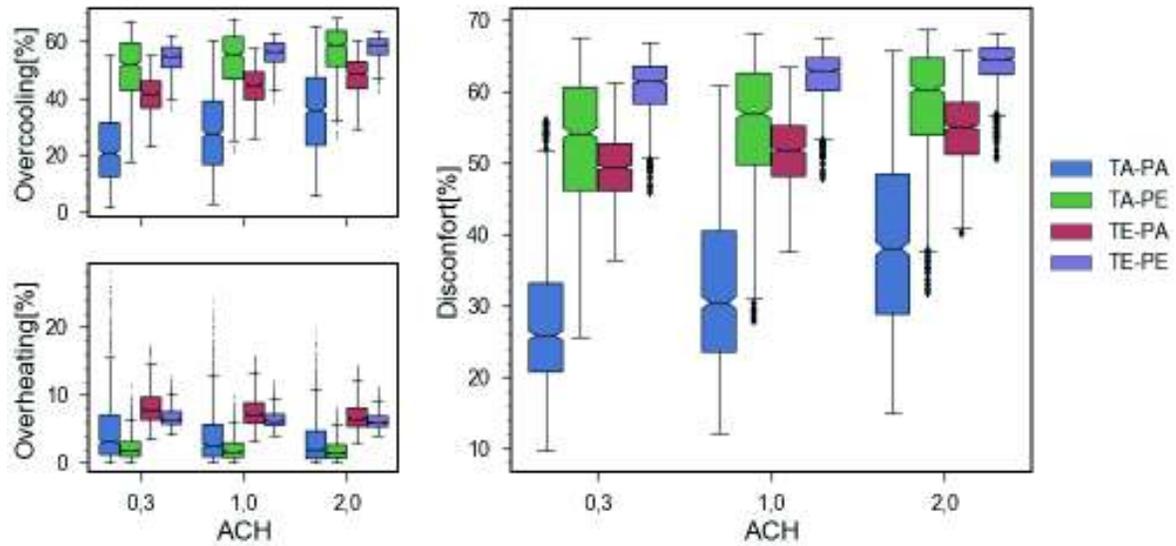


Figura 3.8. Diagrama de caja del discomfort con respecto a las infiltraciones.

Cabe destacar que este parámetro no ha sido tomado en consideración durante el día, dado que, en el transcurso del día se tomaron modelos de ventilación natural, donde los ocupantes tenían la libertad de manipular las ventanas para evitar sobre calentamiento.

3.2.4. INFLUENCIA DE LA ORIENTACIÓN

Debido a que existen casos con una sola ventana y dos ventanas, se espera observar un comportamiento diferente en las orientaciones. Por esta razón, se muestran a continuación la Figura 3.9 y Figura 3.10, con los diagramas de caja en los casos de una y dos ventanas respectivamente.

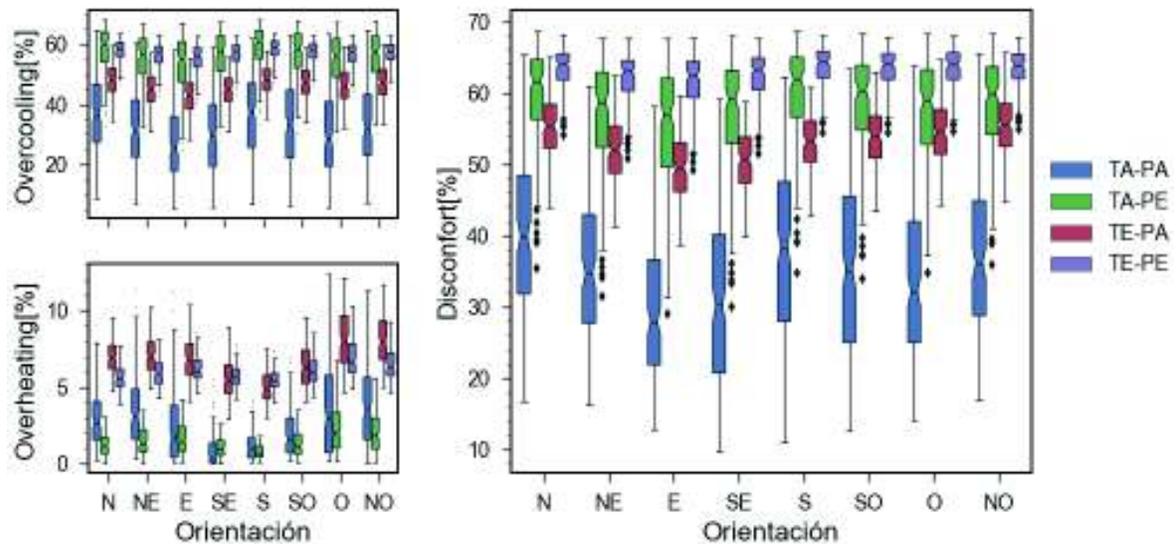


Figura 3.9. Diagrama de caja del discomfort con respecto a la orientación de la fachada para las configuraciones de una sola ventana.

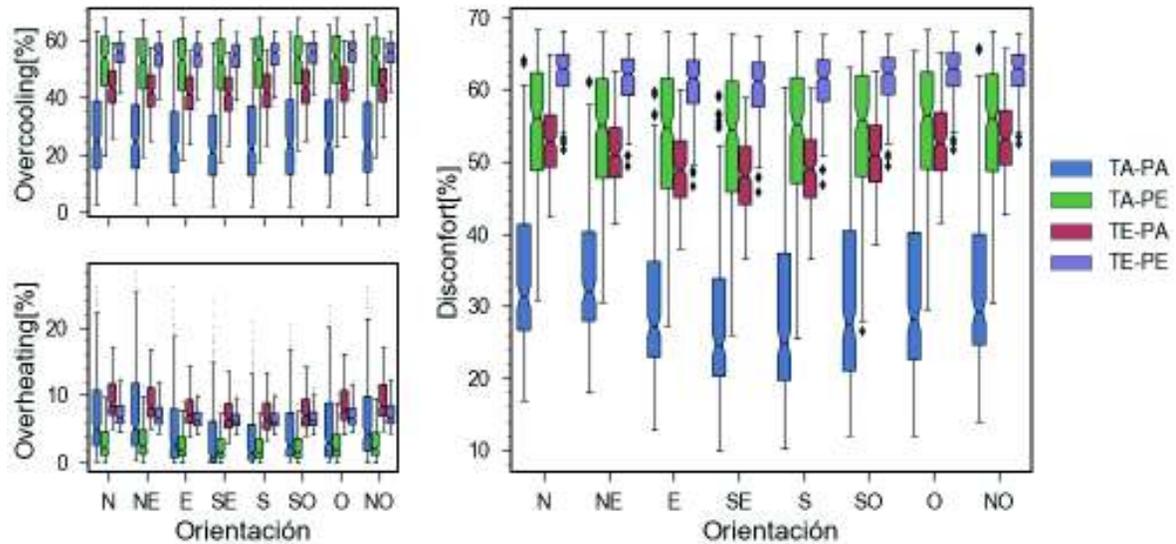


Figura 3.10. Diagrama de caja del discomfort con respecto a la orientación de la fachada para las configuraciones de dos ventanas.

En regiones ecuatoriales, la trayectoria del sol tiene un ángulo de elevación cercano a 90° , por lo que no resulta beneficioso tomar una orientación Norte o Sur. Por ésta misma razón, se nota un comportamiento similar entre las orientaciones Norte-Sur, como entre las Este-Oeste. Seguidamente, se observa que las mejores orientaciones Este-Oeste tiene mejor comportamiento que sus contrapartes Norte-Sur. Esto se debe a que éstas tienen más ganancias en sus fachadas.

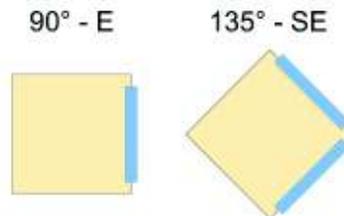


Figura 3.11. Orientaciones óptimas para los casos de una y dos ventanas respectivamente.

Al comparar las orientaciones Este y Oeste, se nota que las orientaciones E son ligeramente mejores que las Oeste, con una diferencia de apenas 4%. Esto se debe a que, en Quito los periodos de nubosidad y precipitaciones se concentran en las tardes. Esto significa que, en los meses regularmente fríos, las viviendas con orientación Este tendrán más radiación incidente durante las horas en las que el calentamiento es necesario (en la mañana), lo que disminuye el discomfort por sobre enfriamiento. Por otro lado, los casos orientados hacia el Oeste, durante temporadas más cálidas (de junio a agosto), se calientan durante la mañana por medio de las paredes, y, durante la tarde pueden ganar aún más calor por la radiación solar. Como resultado, estos casos se sobre calientan más que los de orientación Este. Por último, cabe notar que, al contrastar, los casos de una

ventana y dos ventanas, se observa que los comportamientos son similares, con la excepción de que los casos de dos ventanas se encuentran desplazados 45° hacia el sur. No obstante, en la Figura 3.11 se aprecia que si, por ejemplo, se toma los casos E y SE, para las configuraciones (tipologías) de una y dos ventanas respectivamente, a pesar de que su fachada principal está en orientaciones diferentes, la dirección de sus ventanas es esencialmente la misma.

Por último, si bien se había dicho que los casos Norte y Sur, tienen comportamientos similares. Esto se debe a que, estando en la zona ecuatorial, el sol se inclina 23° hacia el Norte durante el solsticio de verano, y, 23° hacia el Sur durante el solsticio de invierno (con respecto al hemisferio Norte). Sin embargo, se observa más desconfort por sobre calentamiento en los casos Norte que en los casos Sur. Esto se debe a que la temporada más cálida del año (junio, julio y agosto), coincide con el solsticio de verano (por lo que existe más radiación directa en las fachadas orientadas al Norte). Y, por el contrario, la temporada más fría del año (diciembre, enero), coincide con el solsticio de invierno.

3.2.5. INFLUENCIA DEL TIPO DE VENTANA

Si bien es cierto, el uso de vidrios dobles, es altamente recomendado para mejorar el comportamiento térmico de construcciones en regiones de alta latitud, esto es porque en estas regiones es importante reducir las pérdidas de calor, o a su vez la carga de acondicionamiento. A pesar de esto, en el caso de Ecuador, las máximas temperaturas que se alcanzan son relativamente moderadas (aproximadamente 8 °C la más baja y 25 °C la más alta), y se dan por un período de tiempo corto durante el día. Por esta razón, el uso de vidrios dobles no parece ser ventajoso, como se indica en la Figura 3.12.

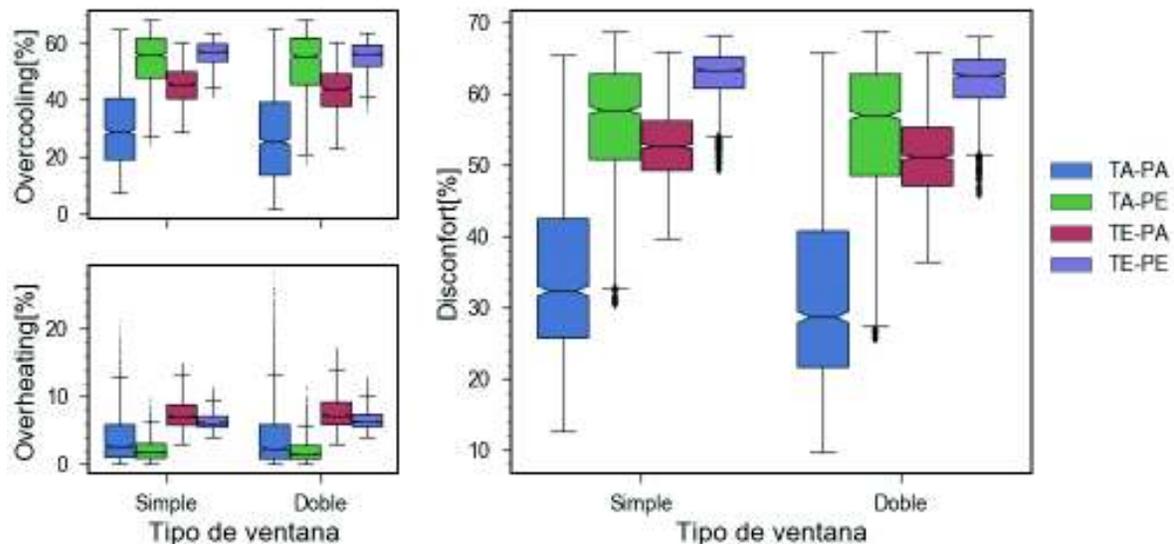


Figura 3.12. Diagrama de caja del desconfort con respecto al tipo de ventana.

Una pequeña ventaja de los vidrios dobles con respecto de los simples se observa, sin embargo, incluso con el mejoramiento de la resistencia térmica que se logra con los vidrios dobles, la diferencia de temperatura es tan pequeña, que la reducción de pérdidas por conducción es insignificante. En conclusión, el uso de vidrios dobles, no se considera ventajoso para las condiciones climáticas de Quito.

3.3. EVALUACIÓN DE SENSIBILIDAD

Con el objetivo de tener una mejor apreciación de la influencia de cada uno de los parámetros, se llevó a cabo un estudio de sensibilidad. Los resultados indican el orden de sensibilidad de los parámetros es: el porcentaje de acristalamiento (WWR), el material y espesor de las paredes, la cantidad de infiltración, la orientación de la fachada y el tipo de vidrio. Los resultados se muestran en la Figura 3.13.

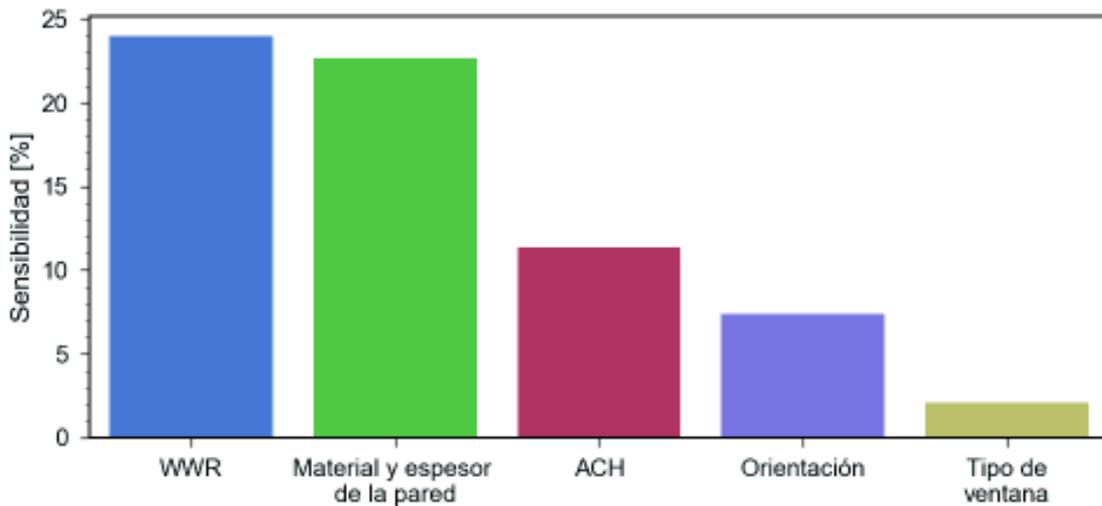


Figura 3.13. Sensibilidad global de cada parámetro evaluado.

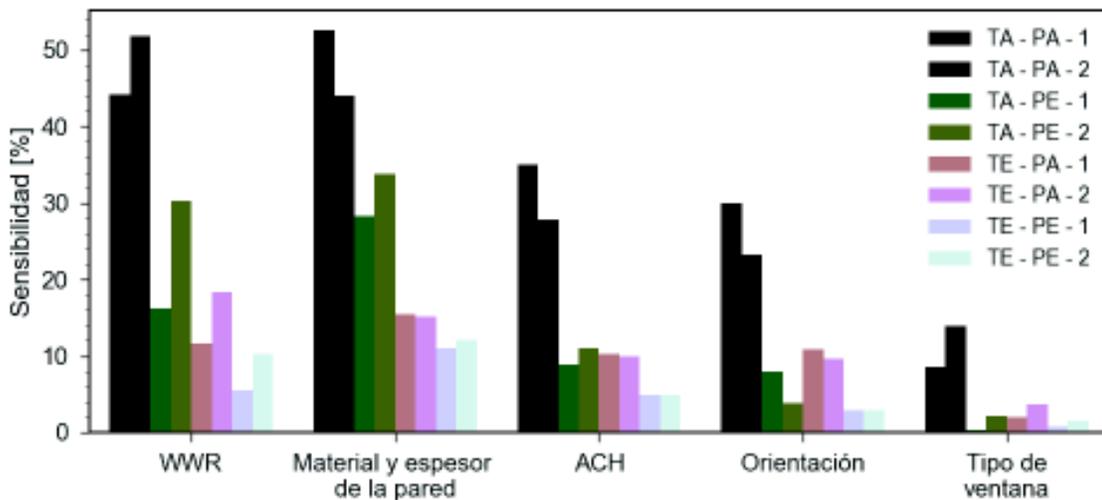


Figura 3.14. Sensibilidad de cada parámetro de acuerdo a cada configuración de vivienda.

Es importante conocer así mismo la influencia de cada parámetro bajo las condiciones de borde aplicadas. En la Figura 3.14, se observa que los parámetros bajo condiciones de techo adiabático son más sensibles que el resto, llegando a valores de hasta 40% y 50%. Como se mencionó anteriormente, el techo tiene un papel más importante por el hecho de estar ubicados en la zona ecuatorial, siendo éste el que recibe mayor radiación y, por el contrario, en condiciones de baja radiación presenta mayores pérdidas energéticas. En cuanto a los casos de techos adiabáticos, al eliminar la interacción con el entorno, hace que el comportamiento térmico del interior de la vivienda dependa más del resto de parámetros. Siendo este el caso, el porcentaje de acristalamiento tiene un importante papel en las ganancias térmicas, y, la inercia térmica (o espesor de pared) para aprovechar esas ganancias térmicas. A diferencia de las configuraciones de techo expuesto, debido a sus altas tasas de pérdida y ganancia de energía térmica durante el día.

Se puede apreciar que la sensibilidad del porcentaje de acristalamiento siempre es mayor en los casos con dos ventanas, independiente de la condición de borde. Esto se debe a que el caso de dos ventanas cubre un espectro más amplio que el caso de una ventana. Sin embargo, si este no fuera el caso, presentarían sensibilidades similares. En la Figura 3.15, se presenta el discomfort con respecto del porcentaje de acristalamiento de los casos con techos y paredes adiabáticas. Se presentan estos casos, porque bajo estas condiciones siempre se observa mayor sensibilidad. Aquí se puede observar lo mencionado anteriormente, al examinar solo los porcentajes que se repiten en ambos casos, se observa que el comportamiento es similar, dando como consecuencia sensibilidades similares.

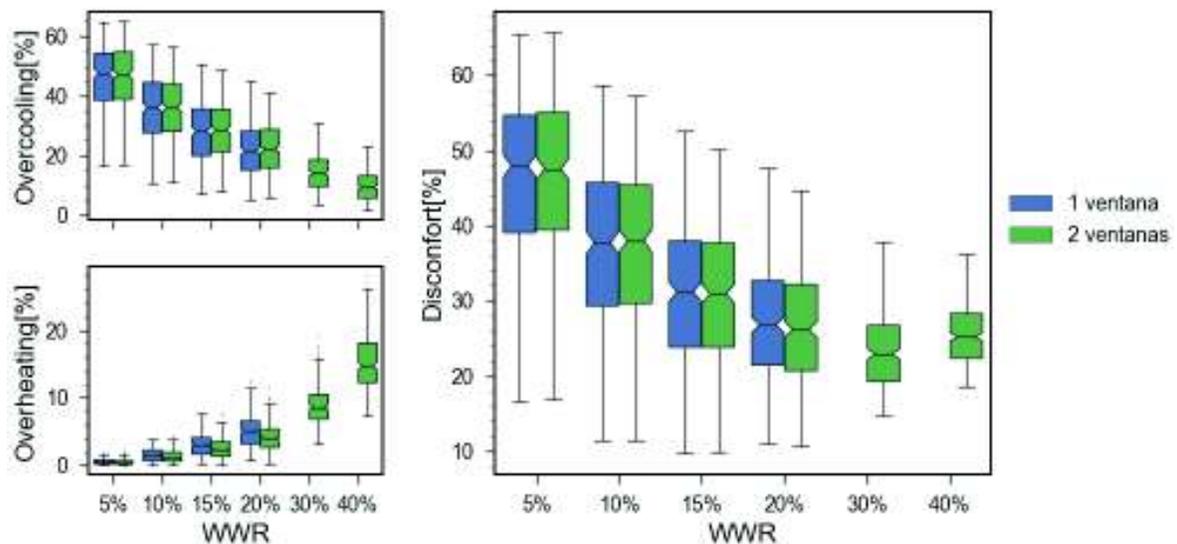


Figura 3.15. Diagrama de caja de discomfort con respecto del WWR, para los casos de techo y paredes adiabáticas.

De esta forma, si no se toman en cuenta los casos de 30% y 40%, se obtiene una sensibilidad menor por parte del acristalamiento. En consecuencia, se obtiene que la posición de las ventanas no es influyente, mientras se tenga los mismos porcentajes de acristalamiento. Adicionalmente, en la Figura 3.16, se muestran los resultados de la sensibilidad con la misma segregación de la Figura 3.14, pero con la particularidad de que en esta, se han removido los casos que son únicos de las configuraciones de dos ventanas (los casos de acristalamiento igual a 30% y 40%). Aquí, se observa también que no solo el acristalamiento cambia de sensibilidad, sino que los valores de sensibilidad del resto de parámetros se igualan con el mismo número de ventanas (por ejemplo, la sensibilidad de TA-PA-1 es similar a la de TA-PA-2). Siendo así, se concluye que la posición de las ventanas (o número de paredes acristaladas) no es un factor determinante. Sin embargo, resulta más favorable tener dos ventanas que una, pero solo con el propósito de tener mayor porcentaje de acristalamiento (superior al 20%).

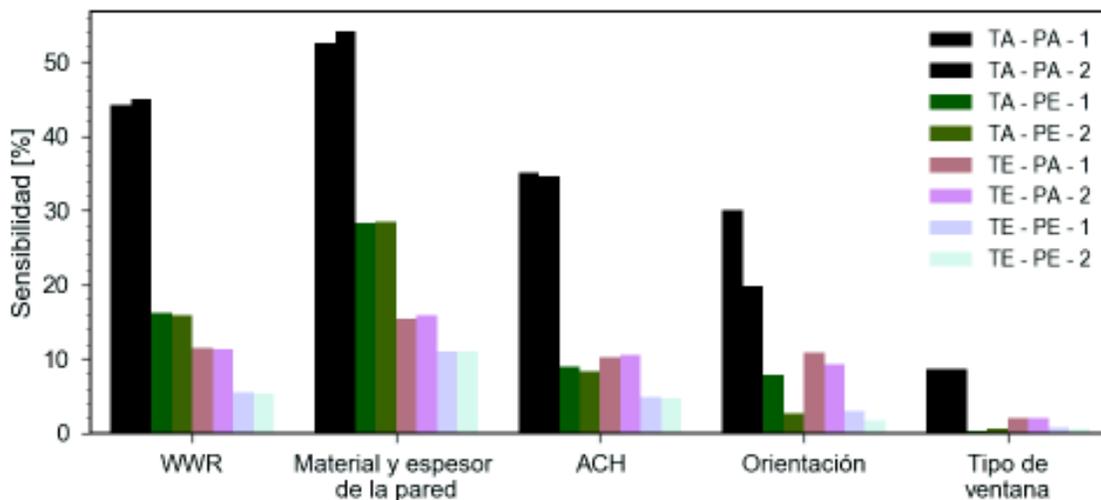


Figura 3.16. Sensibilidad de cada parámetro de acuerdo a cada configuración de vivienda, descartando los casos únicos de las configuraciones de 2 ventanas (WWR = 30%, 40%).

3.4. EVALUACIÓN DE LAS VIVIENDAS CON TECHO DE ZINC

Los casos de viviendas con techo de zinc, han sido separados puesto que vienen a ser casos especiales de los techos expuestos. En Ecuador existe una gran cantidad de estos casos en viviendas de bajos recursos, incluyendo en los programas de vivienda social realizados por el Gobierno. Además, es una práctica utilizada a lo largo de todo el país, que no tiene ningún criterio energético para su construcción, ignorando las particularidades de cada microclima [10]. La ventaja de este material es que es barato y fácil de instalar, sin embargo, su desempeño térmico es pobre debido a su alta conductividad térmica y poca capacidad de retener el calor. Adicionalmente, como se menciona anteriormente, la labor del techo en las viviendas ecuatoriales tiene un papel muy importante para las condiciones

de confort de los ocupantes. Por estas razones, las viviendas con techo de zinc, presentan altos niveles de disconfort térmico. Durante el día, la temperatura operativa puede alcanzar valores altos, por la radiación solar incidente, mientras que, en la noche, o bajo condiciones de baja radiación, la temperatura operativa se encontrará cerca de la temperatura ambiente.

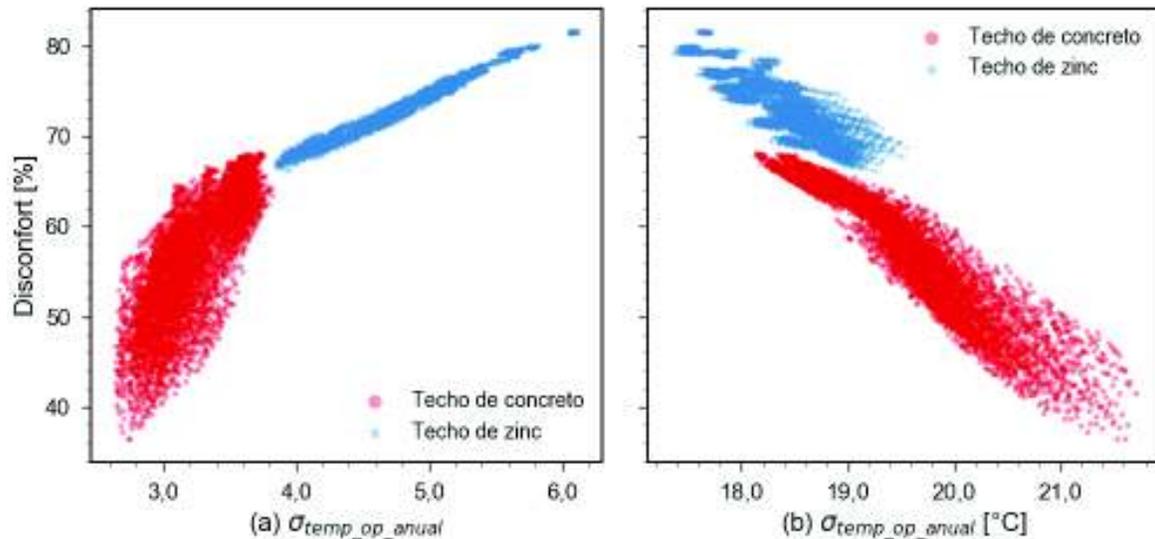


Figura 3.17. (a) Disconfort vs. Desviación estándar de la temperatura operativa anual, (b) Disconfort vs. Temperatura operativa media anual [°C] para los casos con techos de zinc y los de techo de concreto.

En este caso, se tomaron los mismo parámetros y condiciones de borde, exceptuando la condición del techo, puesto que todos son de techo expuesto. En la Figura 3.17, se examina el comportamiento de las viviendas con techo de zinc, en contraste con las viviendas de techo de concreto con techo expuesto. Aquí se puede apreciar una desviación estándar mucho más alta por parte de los techos de zinc, acompañada de un nivel de disconfort más elevado (por sobre el 66%). Esto es debido a la baja inercia térmica del zinc, así como su alta conductividad. Esto genera una oscilación diaria mucho más alta que cuando se tiene un techo de concreto, el mismo que tiene buenas propiedades térmicas.

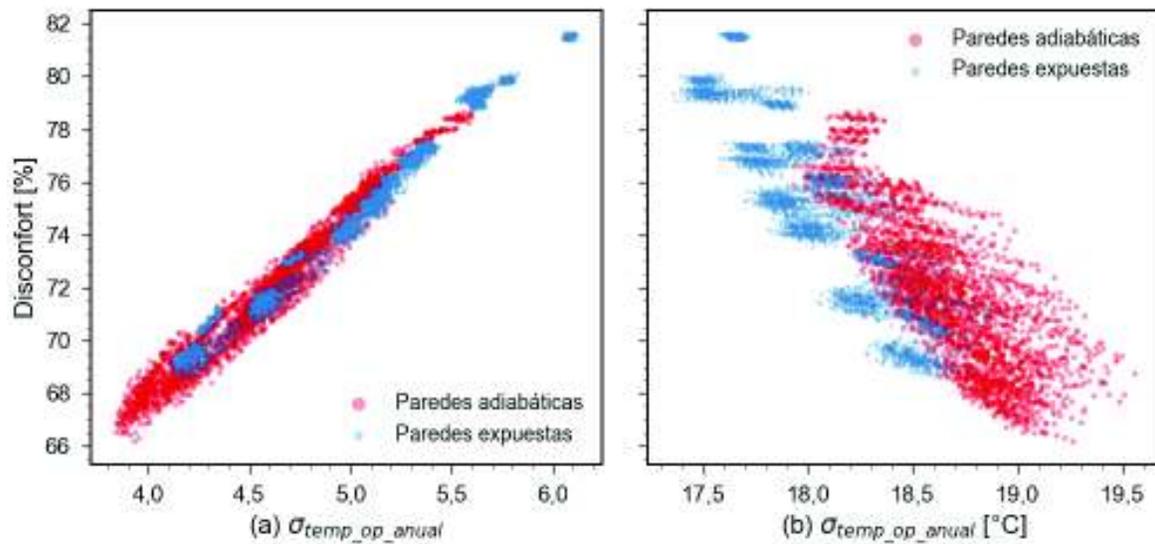


Figura 3.18. (a) Disconfort vs. Desviación estándar de la temperatura operativa anual, (b) Disconfort vs. Temperatura operativa media anual [°C] para los casos con techos de zinc, disgregados de acuerdo a su condición de borde.

Los resultados a su vez reflejan que es poco lo que se puede hacer para mejorar las condiciones de confort de este tipo de vivienda. Ciertamente, estas viviendas tendrán un mal desempeño sin importar el resto de sus parámetros o condiciones de borde, como se muestra en la Figura 3.18, las configuraciones de paredes expuestas como las de paredes adiabáticas muestran comportamientos similares.

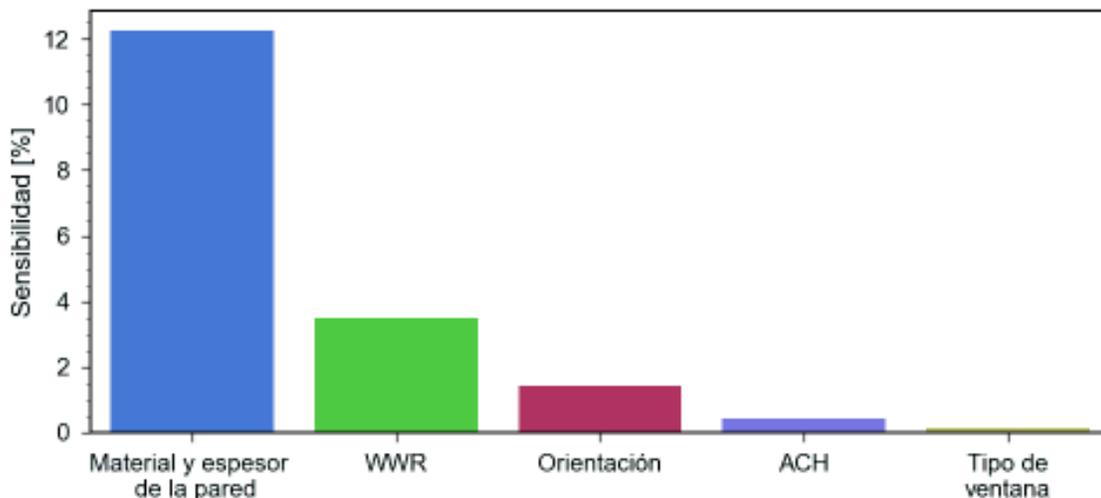


Figura 3.19. Sensibilidad global de cada parámetro evaluado en las viviendas de techo de zinc.

Esto también es evidente en la Figura 3.19, donde se revela que, en general los valores de sensibilidad son bajos. El valor más alto pertenece al material y espesor de las paredes. En estos casos, la alta inercia térmica permite almacenar calor para las horas frías. A pesar de esto, por la noche el techo ocasiona una rápida pérdida de esta energía acumulada. El

resto de parámetros no presentan una sensibilidad apreciable sobre el comportamiento térmico de la vivienda.

3.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A pesar de que se establecieron las principales tendencias de los principales parámetros sobre el confort térmico, se necesita un análisis más profundo de ciertos parámetros, debido a que no siempre se cumplen las tendencias. Por ejemplo, se había dicho que tener alto acristalamiento es beneficioso, pero existen casos de alto acristalamiento que tienen mayor discomfort que los casos de bajo acristalamiento. Esto se puede deber a varios motivos, como mala orientación, baja inercia térmica, etc. En este capítulo se estudiarán más detenidamente este tipo de casos para tener un mejor entendimiento del problema. Para ello se tomarán los parámetros más sensibles, descartando los de menos peso. De esta forma, se tomará dos casos base, uno que represente las mejores condiciones (basado en lo expuesto anteriormente), y otro que represente las peores condiciones. A partir de estos casos, se variará solo el parámetro o condición estudiada. Estos se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Valores del caso de estudio base

Parámetro	Condiciones deseadas	Condiciones no deseadas
WWR	20%	5%
Material y espesor	Ladrillo de 20 cm	Bloque de 10 cm
Infiltraciones	0,3 ACH	2,0 ACH
Orientación	E	N
Tipo de vidrio	Simple	Simple

Fuente: Propia

En las secciones siguientes se muestra un análisis de los resultados obtenidos por medio de gráficas de temperatura operativa para los casos con las condiciones más y menos deseadas para la semana más fría del año y la semana más caliente del año. De esta manera, se puedan explorar los comportamientos en sobre enfriamiento y sobre calentamiento. Estos casos, a su vez, servirán para la comprobación de los resultados obtenidos en el capítulo anterior.

3.5.1. CONDICIONES DE BORDE

En esta sección se comprueba las tendencias y comportamientos de las viviendas bajo las condiciones de borde estudiadas. A continuación, se muestran las temperaturas operativas de las mejores y peores condiciones bajo las cuatro condiciones de borde tomadas (figuras 3.20 y 3.21). Se comprueba lo mencionado en el capítulo anterior, que los techos adiabáticos presentan las temperaturas operativas más estables, y que, por el contrario,

los techos expuestos, tienen mayores variaciones durante el día (mayor desviación estándar). Así mismo se aprecia que estas oscilaciones de temperatura hacen que la condición de techo expuesto ocasione mayor sobre calentamiento (en la semana más caliente), así como mayor sobre enfriamiento (en la semana más fría).

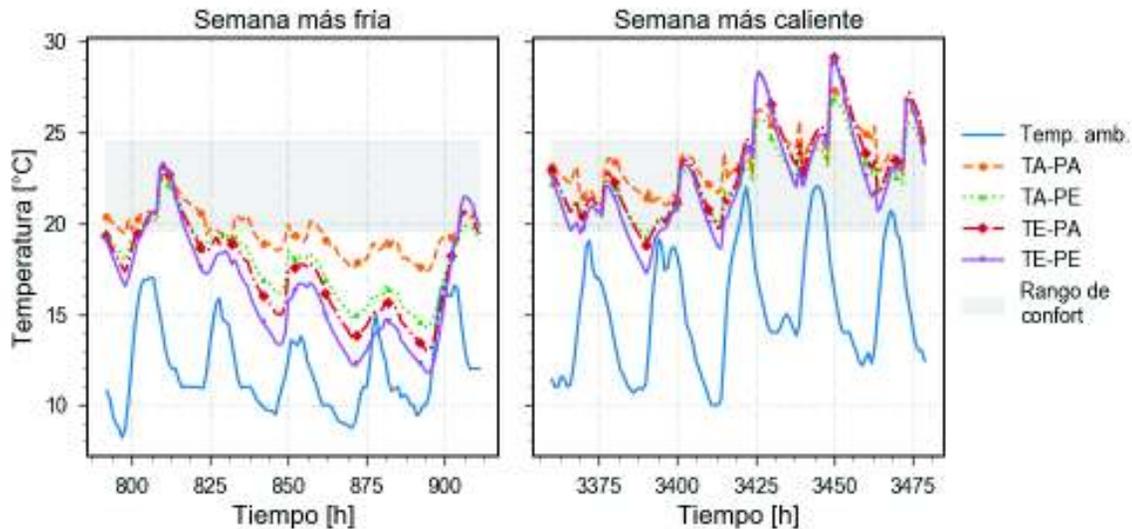


Figura 3.20. Gráficas de temperatura según la condición de borde durante la semana más fría y más caliente del año, para las mejores condiciones (promedio de discomfort anual = 35%).

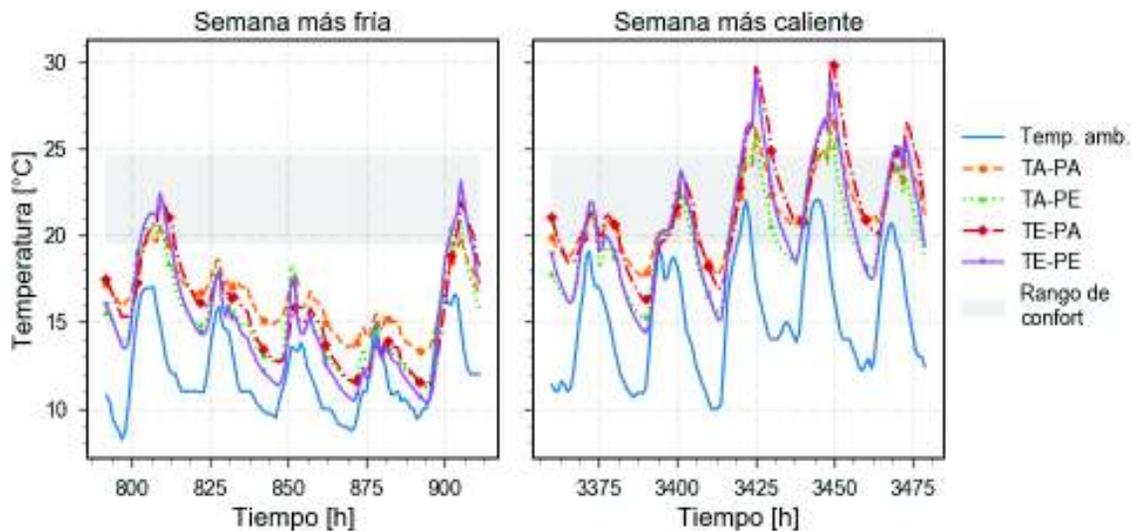


Figura 3.21. Gráficas de temperatura según la condición de borde durante la semana más fría y más caliente del año, para las peores condiciones (promedio de discomfort anual = 67%).

Se había mencionado también que las condiciones intermedias (TA-PE y TE-PA) presentan comportamientos interesantes por su similitud en la superficie aislada. Al examinar los casos con mejores condiciones (Figura 3.20), se observa que los casos con techo aislado son mejores tanto en la semana fría como en la semana caliente. Esto se debe a su alta inercia térmica que ayuda a retener el calor ganado por las paredes. También se observa

que los casos TE-PA tienden a oscilar más durante el día debido a las altas tasas de pérdidas por el techo. Sin embargo, al examinar las condiciones menos favorables (Figura 3.21), se observa que en temporadas frías, los techos expuestos de concreto con paredes adiabáticas pueden ser más beneficiosos que los techos adiabáticos con paredes expuestas. Esto se debe a que estos casos tienen menor masa térmica y mayores pérdidas por infiltraciones. Por lo tanto, los casos TE-PA resultan favorables cuando se tienen una baja masa térmica porque permiten calentar más a la casa en condiciones frías. En estas mismas condiciones, los casos TA-PE, resultan menos favorables puesto que las ganancias se dan solo por las paredes y éstas no pueden retener la energía ganada. Por otro lado, los casos TA-PE resultan más favorables ante una alta masa térmica y un WWR intermedio (tal como se muestra en la Figura 3.4). De esta forma, se comprueba lo mencionado en la sección 3.1 y 3.2.1, donde se observa que en general las configuraciones TE-PA son mejores que las TA-PE excepto en el caso de ladrillo de 20 cm (debido a su mayor potencial de acumular energía térmica). Así, se explica por qué los casos de TE-PA tienen una media de desconfort menor a pesar de tener una desviación estándar menor.

3.5.2. MATERIAL Y ESPESOR DE LAS PAREDES

Como se analizó en las secciones anteriores, los parámetros las condiciones de borde con paredes y techo aislado, son las que presentan mayor sensibilidad. Por esta razón, los siguientes resultados se presentarán bajo esa condición.

A continuación, se expone las gráficas de temperatura operativa para la semana más fría y más caliente del año (Figura 3.22 y Figura 3.23). Se ha omitido mostrar las simulaciones con espesor de 15 cm, debido a que su comportamiento es intermedio a los de 10 cm y 20 cm, y con ello, se pueda apreciar mejor el efecto de la masa térmica sobre la vivienda. En términos generales, se comprueba lo mencionado en la sección 3.2.1, dado que, se evidencia claramente como el caso del ladrillo de 20 cm presenta una curva con mayor estabilidad que el resto. De manera contraria, el bloque de 10 cm presenta las mayores oscilaciones diarias. Como resultado, las viviendas de bloque presentan mayor desconfort por sobre calentamiento, así como por sobre enfriamiento.

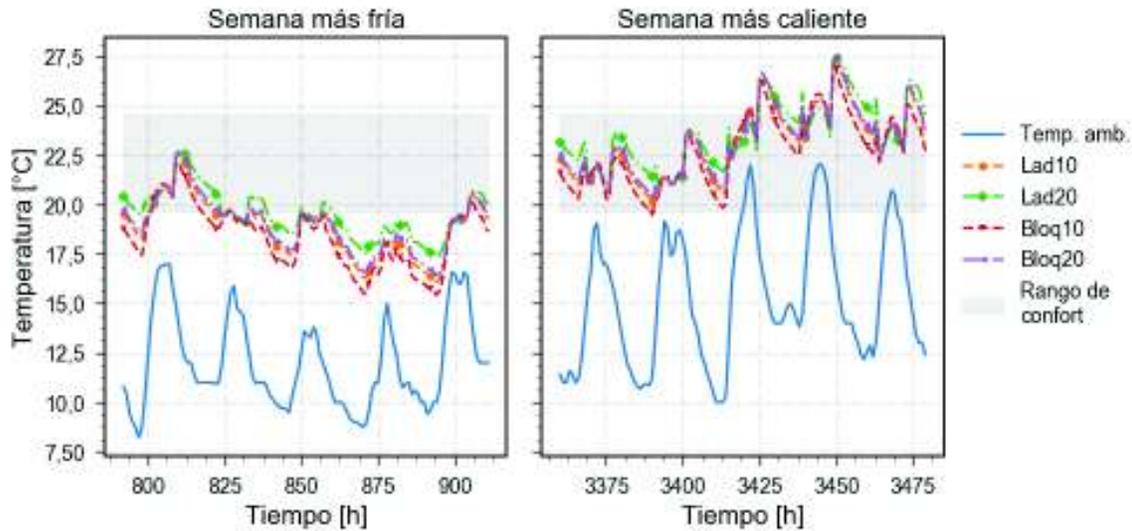


Figura 3.22. Gráficas de temperatura según el material de las paredes, durante la semana más fría y más caliente del año, para las mejores condiciones (promedio de disconfort anual = 22%)

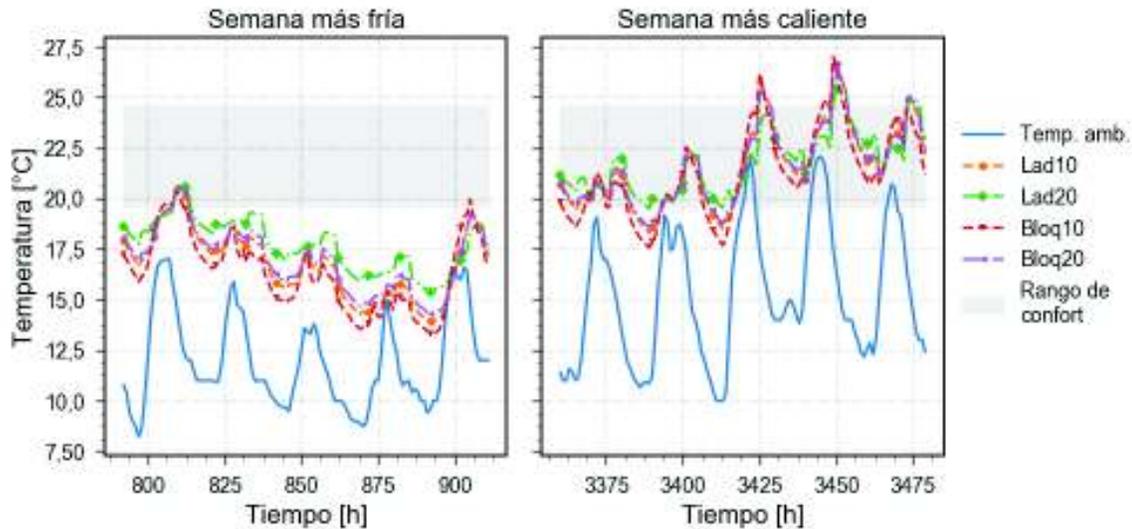


Figura 3.23. Gráficas de temperatura según el material de las paredes, durante la semana más fría y más caliente del año, para las peores condiciones (promedio de disconfort anual = 58%)

Al comparar los casos con condiciones más deseadas y menos deseadas, se observa a su vez que una alta masa térmica es todavía más deseable cuando el resto de parámetros no son los ideales. En la Figura 3.23, se observa una mayor separación del caso de ladrillo de 20 cm, con respecto al resto de materiales, que en la Figura 3.22. Adicionalmente, en la Figura 3.23, se observa que en la semana más caliente, el caso de ladrillo de 20 cm se sobre calienta menos que el resto de casos, (por su alta capacidad de retener energía). Esto tiene sentido debido a que el material de las paredes es uno de los parámetros de mayor importancia, de manera que, incluso si el resto de parámetros no son los deseados, puede llegar a tener buenas condiciones de confort. La otra razón por que es beneficioso

es el acompañamiento de la ventilación natural. Si se observa la semana más caliente, se observa que el mejor comportamiento se da con mayor inercia térmica. La relación y beneficios de la inercia térmica y la ventilación natural en condiciones de climas cálidos fue estudiada ampliamente en estudios previos [33].

3.5.3. PORCENTAJE DE ACRISTALAMIENTO

Como los resultados de los casos con una ventana y los de dos ventanas no difieren tanto, se ha tomado los de dos ventanas para cubrir un rango de valores más amplio (de 5% a 40%). Se presentan las temperaturas operativas para cada WWR durante la semana más fría y más caliente del año. Al igual que en los análisis anteriores, se ha tomado los casos con las condiciones más deseables (Figura 3.24), así como aquellos con las condiciones menos deseables (Figura 3.25).

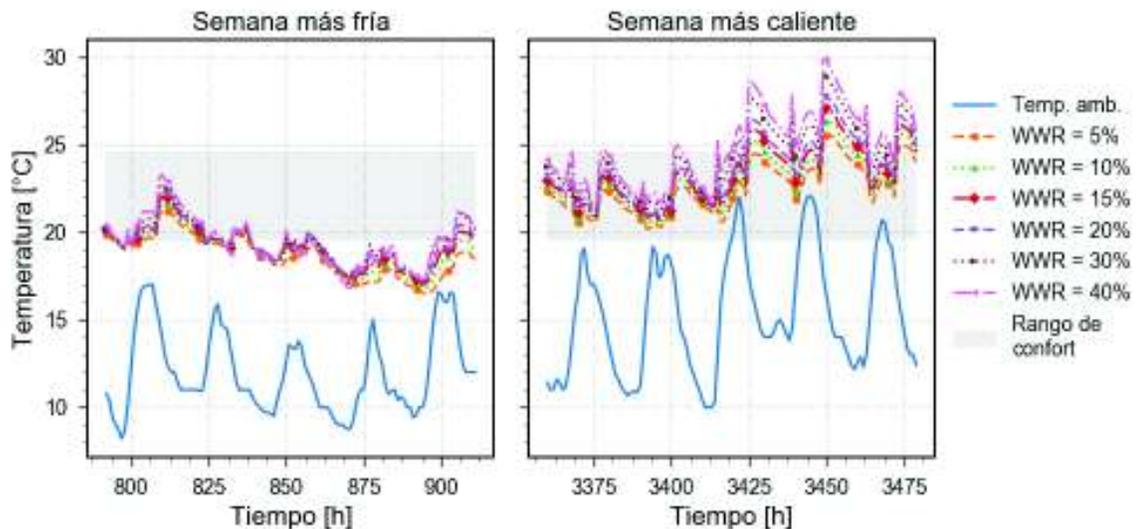


Figura 3.24. Gráficas de temperatura según el WWR, durante la semana más fría y más caliente del año, para las mejores condiciones (promedio de desconfort anual = 20%).

El caso mostrado en la Figura 3.24, es bastante particular, pero ayuda a la comprensión del problema. Éste es un caso de alta masa térmica, y condiciones de borde adiabáticas, por ello tiene pocas pérdidas. Sin embargo, al observar ésta gráfica en la semana más fría del año, se aprecia que todas las curvas de temperatura operativa presentan comportamientos similares. Esto se debe a que esta semana del año, es la semana de menor radiación directa. Es evidente entonces, que las ganancias por medio de las ventanas se dan predominantemente mediante de radiación directa, por lo tanto, las ganancias en este caso se dan únicamente a través de radiación difusa, que es relativamente constante durante el día. Dicho de otra forma, este caso tiene bajos niveles de pérdidas energéticas, pero así mismo, ante bajos niveles de radiación solar directa, las ganancias energéticas son bajas. Por esta razón, la importancia, así como la sensibilidad

del porcentaje de acristalamiento decae considerablemente. Por otra parte, si se observa este mismo caso, pero en la semana más caliente, la influencia de la radiación directa es todavía más evidente. Como se puede ver en la Figura 3.24, durante la semana caliente, donde sí existe radiación directa, el comportamiento térmico es diferente para cada uno de los porcentajes de acristalamiento. Afortunadamente, Quito cuenta con alta radiación directa durante la mayor parte del año, razón por la cual, el alto porcentaje de acristalamiento puede ser provechoso.

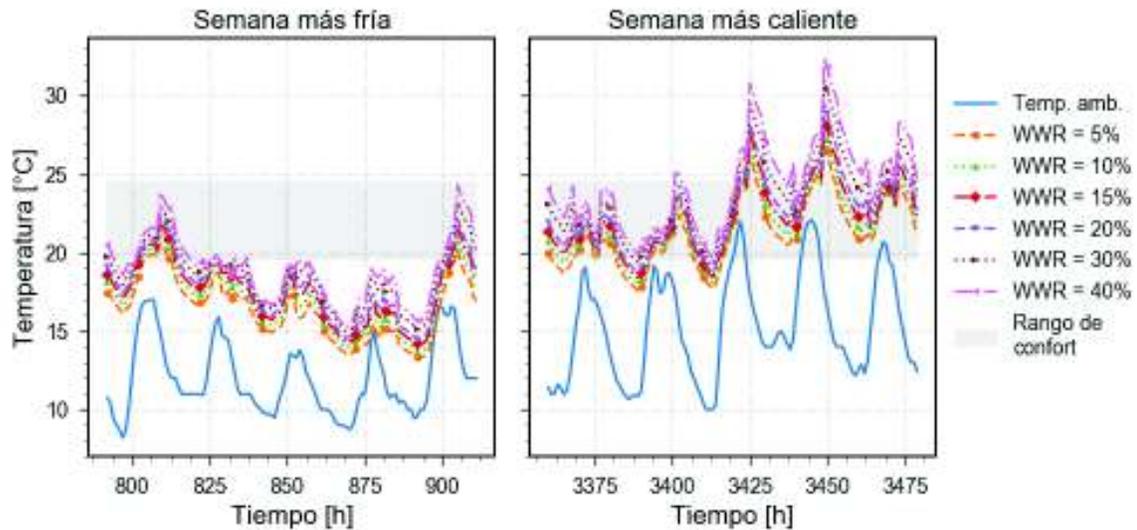


Figura 3.25. Gráficas de temperatura según el WWR, durante la semana más fría y más caliente del año, para las peores condiciones (promedio de desconfort anual = 48%).

A diferencia de lo discutido en la Figura 3.24, en la Figura 3.25 sí que se aprecia diferentes comportamientos para cada WWR durante la semana más fría. Esto se debe básicamente a que el caso tomado en la Figura 3.25 posee las condiciones menos ventajosas. Es decir, es un caso de baja masa térmica y alta tasa de infiltración. Mientras en el caso anterior (Figura 3.24), se observaba poca pérdida, pero así mismo poca ganancia, lo que hacía que las curvas sean semejantes. En este caso, al tener menos masa térmica, la acumulación de energía es mucho menor, y tanto las ganancias como las pérdidas con mayores. Es por ello que también, se observa que éstas curvas presentan oscilaciones más grandes que las del caso anterior.

Como se mencionó anteriormente, el aumento de WWR, puede llegar a disminuir la masa térmica, y, por tanto, reducir su capacidad de estabilizar la temperatura interior de la vivienda. Esto se puede observar al comparar los casos de 5% y 40% de WWR. El caso con menor WWR (5%), tiene más masa que el de mayor acristalamiento (40%), esto hace que la curva del caso de 5% sea más estable que el de 40%, mientras que éste, presenta

una curva con mayores oscilaciones. Cabe destacar, que esto se cumple para este caso de estudio en particular, otro tipo de construcción puede tener una alta masa en el interior.

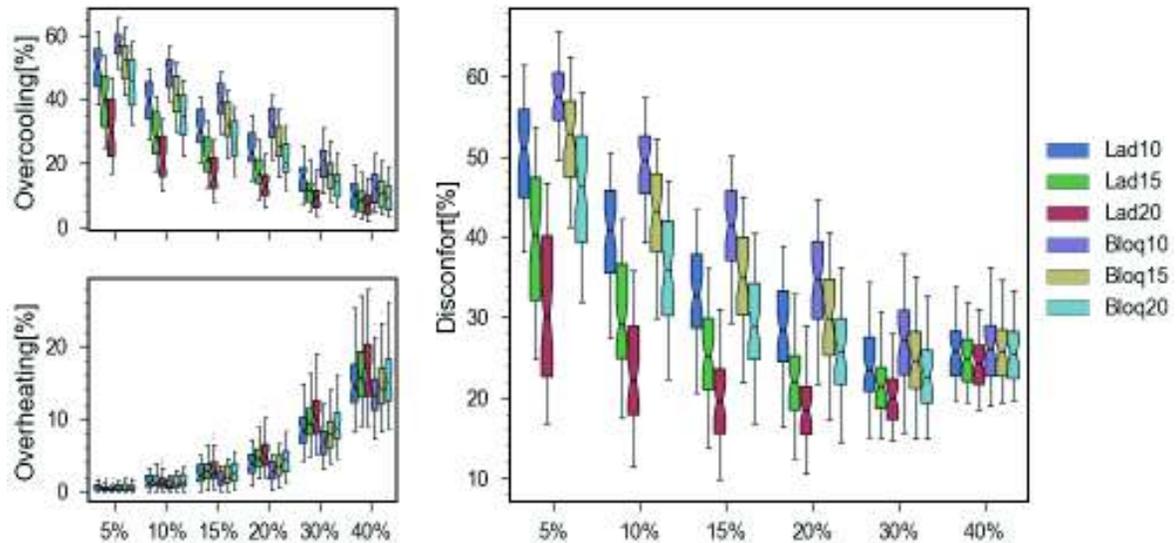


Figura 3.26. Diagrama de caja del discomfort con respecto al acristalamiento separado según el material de construcción.

Anteriormente se había revisado la existencia de valores más apropiados de acristalamiento, sin embargo, esto solo se revisó en un caso en particular. Las ganancias energéticas que proporciona el porcentaje de acristalamiento, como se observó en esta sección, deben ser aprovechadas durante el día. Es por eso que, se ha ampliado el estudio en particular del WWR relacionándolo con el material de las paredes. En la Figura 3.26, se puede apreciar el discomfort con respecto a estos parámetros para las configuraciones de techo y paredes adiabáticas. Se puede distinguir entonces que las simulaciones con mejores materiales de construcción alcanzan valores de discomfort menores con menor acristalamiento. Por ejemplo, si se compara el ladrillo de 20 cm con el bloque de 10 cm, se observa que el punto de mínimo discomfort en el caso de ladrillo se encuentra entre el 15% y 20% de WWR, mientras que, si se toma el caso de bloque, se observa que el punto de menor discomfort se encuentra entre el 30% y 40%.

El fenómeno explicado anteriormente también se lo puede apreciar en las figuras 3.2 y 3.3, se nota que los casos con WWR = 40%, son los que manifiestan mayor discomfort por sobre calentamiento. Adicionalmente, este caso presenta más oscilación diaria y mayor desviación estándar (2.15, para las condiciones deseables), frente a los casos de menor porcentaje de aislamiento, como es el de WWR = 5% (1.51, pasa las condiciones deseables). Esto corrobora que demasiado acristalamiento puede no resultar tan provechoso en viviendas de Quito, donde la radiación directa tiene un impacto alto sobre el confort térmico. Por último, se observa en la Figura 3.25, en donde se tienen un caso de

baja masa térmica, que el 40% de acristalamiento resulta ligeramente más provechoso durante las semanas frías.

3.5.4. INFILTRACIONES

Se observa como la presencia de discomfort en las infiltraciones es altamente influenciado por el clima de Quito que es predominantemente frío. Además, de acuerdo con Vásquez-Aza [29], la temperatura ambiente, es la variable meteorológica de más alta influencia sobre el comportamiento térmico de las viviendas en zonas ecuatoriales. Por ello, se observa que el aumento de las infiltraciones siempre tiende a disminuir la temperatura operativa de las viviendas simuladas.

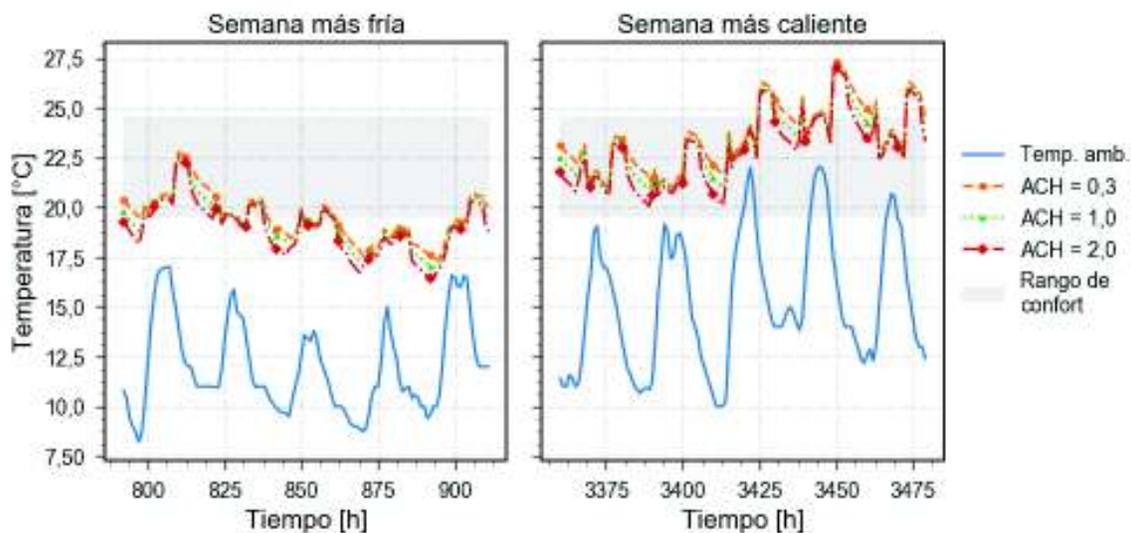


Figura 3.27. Gráficas de temperatura según las infiltraciones, durante la semana más fría y más caliente del año, para las mejores condiciones (promedio de discomfort anual = 20%).

Esto es más evidente durante las horas de la noche, donde se observa las mayores caídas de temperatura. Por el contrario, durante la mañana, esto es despreciable, debido a que, durante el día actúa la ventilación natural, como se definió en la metodología (Sección 2.2.1). Por este motivo, se observa que los picos de temperatura del día (las temperaturas más altas de cada día), coinciden en todos los casos, mientras que los mínimos de temperaturas, no, en cambio, estos difieren (el caso de mayor infiltración alcanza temperaturas más bajas que los de menor infiltración).

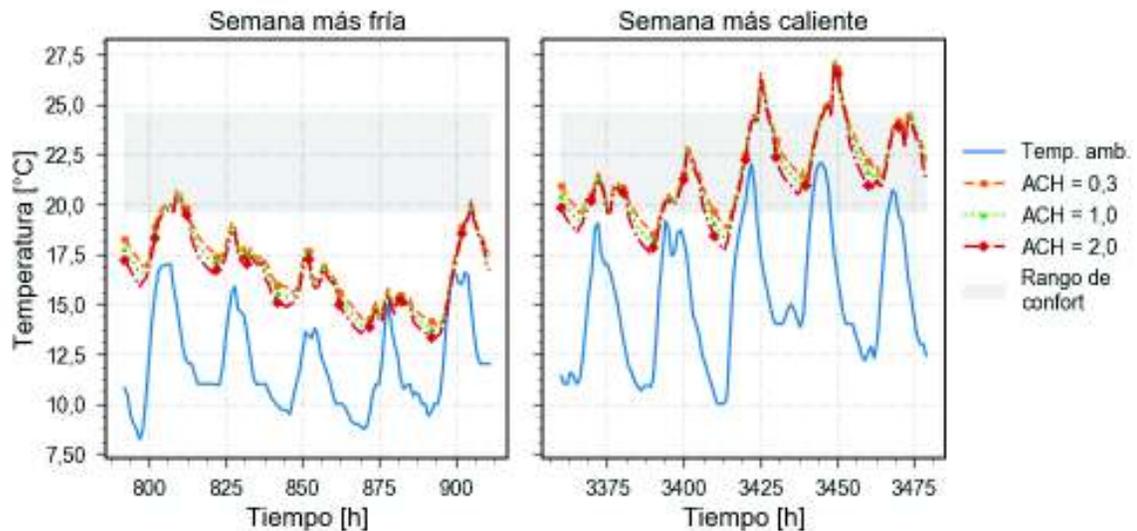


Figura 3.28. Gráficas de temperatura según las infiltraciones, durante la semana más fría y más caliente del año, para las peores condiciones (promedio de disconfort anual = 60%).

En el estudio de Castro [20], se mantuvo la misma tasa de infiltración durante todo el día y no se tomó en cuenta la ocupación ni ventilación natural. Por ello, en estas gráficas de infiltraciones, no se observa este comportamiento. En este estudio, el aumento de infiltraciones produce disminución de la temperatura operativa, pero durante todo el día. En consecuencia, la ocupación tiene una influencia importante cuando se habla de la renovación del aire en una vivienda no acondicionada. Esto es importante porque la aplicación de la norma de confort adaptativo requiere el acondicionamiento natural, cosa que no fue considerada dentro del estudio de Castro [20]. Finalmente, se hace indudable la relevancia del modelo de ventilación natural utilizado.

3.5.5. ORIENTACIÓN

En la Figura 3.29, se muestra el comportamiento de la vivienda que presentan las condiciones más deseables, bajo las orientaciones estudiadas. Se han obviado las orientaciones intermedias (NE, SE, SO, NO), puesto que estas llegan a ser interpolaciones de los 4 puntos cardinales principales (N, S, S, O), y para mejorar la visualización de las curvas de temperatura.

Se había mencionado en la sección 3.2.4, que las orientaciones Este y Oeste presentan un comportamiento similar, así como los casos Sur y Norte. A pesar de ello, al observar el comportamiento de cada orientación durante la semana más fría, se observa que el comportamiento de todas las orientaciones es similar. Es aquí entonces, donde se observa la correspondencia con el estudio del porcentaje de acristalamiento. Así como el WWR, la orientación de la fachada acristalada, es altamente dependiente de la radiación solar directa. Es por eso que se observa el mismo comportamiento en todas las orientaciones.

Por otra parte, si se toma la semana caliente, semana durante la cual, existe importante presencia de radiación solar directa, se nota que sí existen comportamientos diferentes. En primer lugar, el comportamiento de la vivienda en orientaciones Este y Oeste, es la misma. En cambio, el comportamiento de las orientaciones Norte y Sur no. Esto se debe a que, durante ésta semana, se da el solsticio de verano. Por lo tanto, la orientación norte de la fachada tiene mayor potencial de ganar energía en esta semana, pero esto no resulta necesariamente ventajoso. Como se puede apreciar, la curva de orientación Norte presenta mayor desconfort por sobre calentamiento que el resto de orientaciones.

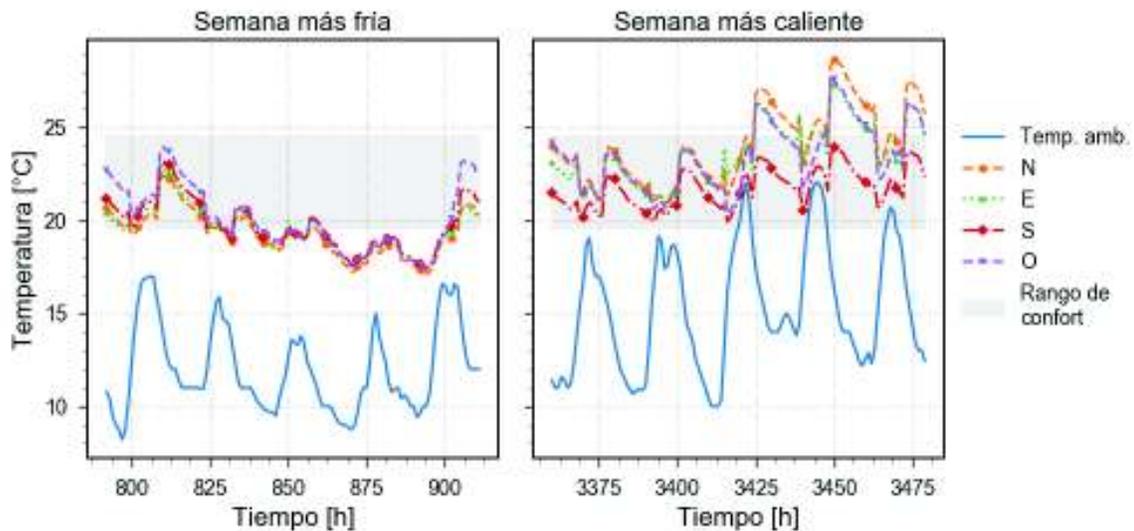


Figura 3.29. Gráficas de temperatura según la orientación de la fachada, durante la semana más fría y más caliente del año, para las mejores condiciones (promedio de desconfort anual = 19%)

También se mencionó que la orientación Este, en el caso de una sola ventana es similar al caso con orientación Sur-Este con dos ventanas. Esto se comprueba a continuación, en la Figura 3.30 se muestran dos simulaciones con las condiciones más favorables con las orientaciones E para el caso de una ventana y SE para el caso de dos ventanas. También ayuda a explicar por qué los valores más apropiados para las configuraciones de dos ventanas se dan en el SE mientras que, en configuraciones con una, los valores más apropiados se encontraban en el E.

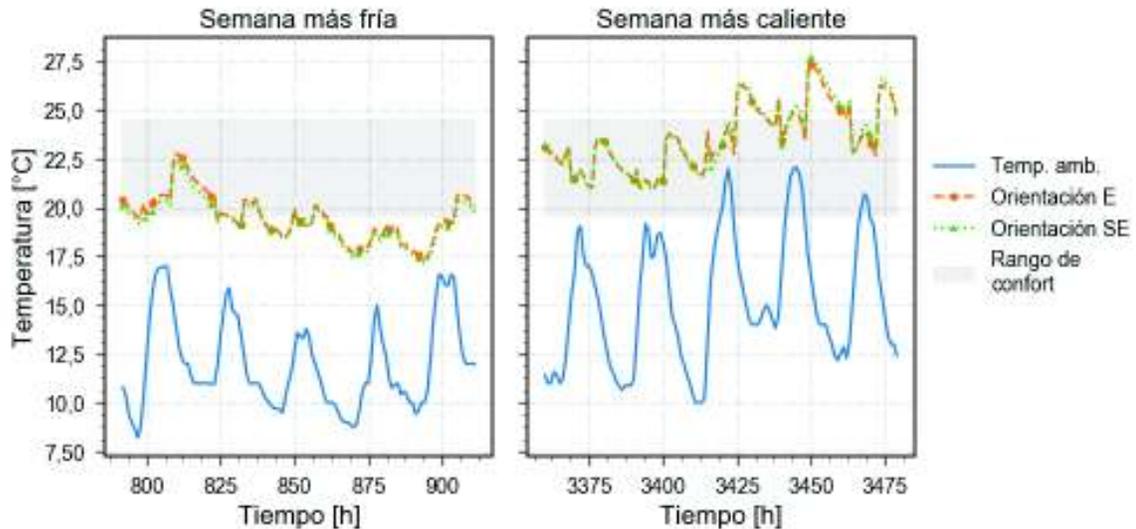


Figura 3.30. Gráficas de temperatura operativa según las orientaciones E y SE, para las mejores condiciones (promedio de disconfort anual = 18%)

Se comprueba también que, el número de paredes acristaladas no es un componente de alto impacto sobre el comportamiento térmico de las viviendas. A pesar de esto, existen excepciones, pero solo son aquellas que pueden alcanzar porcentajes de acristalamiento más altos que los casos de una sola pared acristalada. O a su vez, existen excepciones donde la presencia de dos ventanas es más favorable pero únicamente porque una ventana está mejor orientada que la otra.

3.5.6. COMPORTAMIENTO DE LAS VIVIENDAS DE TECHO DE ZINC

En este caso, no se estudia ninguna condición o parámetro en particular, puesto que la sensibilidad de parámetros es menos relevante que los casos estudiados anteriormente. En su lugar, se comprueba esta afirmación, puesto que al analizar los casos con mayor disconfort y con menor disconfort, no presentan una gran diferencia. En ambas circunstancias, la oscilación diaria es importante. De hecho, se puede notar que el mejor caso no difiere mucho de peor caso. Incluso, sus valores de disconfort no difieren mucho, con una diferencia de apenas 15% (de 61%, el de mejor comportamiento, a 81% el de peor comportamiento).

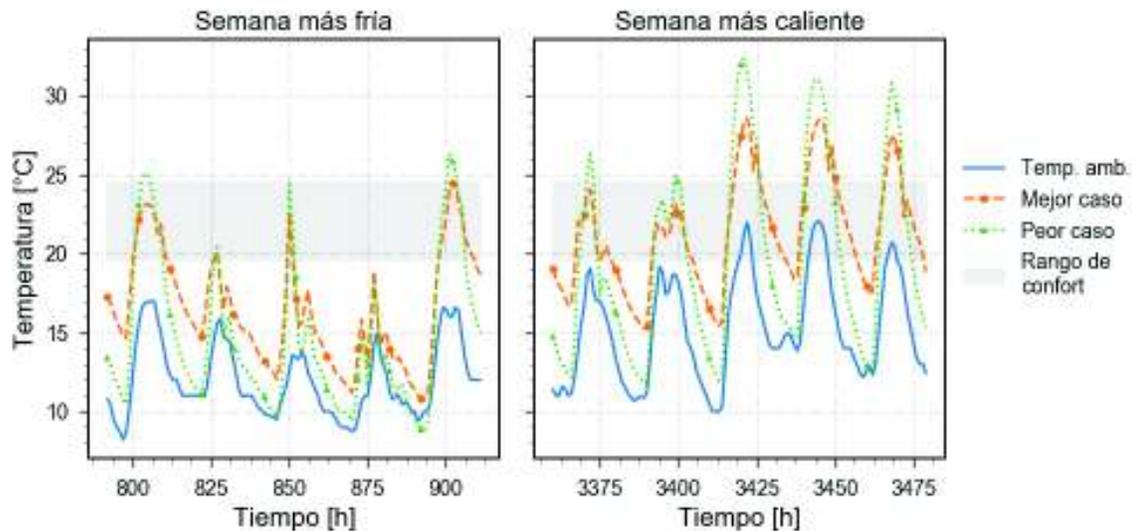


Figura 3.31. Gráficas de temperatura de los casos con techo de zinc, durante la semana más fría y más caliente del año, para el mejor y peor caso.

Por último, se nota que, al comparar el caso de mayor desconfort, con el de menor desconfort, no se observa mayor diferencia. En ambos casos la oscilación diaria es alta. Así también, los dos presentan desconfort por sobre calentamiento y sobre enfriamiento.

Tabla 3.2. Valores de los parámetros del caso mejor y peor de las configuraciones con techo de zinc

Parámetro	Condiciones mejor caso	Condiciones peor caso
WWR	20%	5%
Material y espesor	Ladrillo de 20 cm	Bloque de 10 cm
Infiltraciones	0,3	0,3
Orientación	O	O
Tipo de vidrio	Doble	Doble
Desconfort	66%	82%

Fuente: propia.

3.5.7. RESUMEN

En el capítulo anterior se establecieron las tendencias principales de cada parámetro sobre el desconfort. Las tendencias encontradas demuestran que se puede llegar a tener buenas condiciones de confort sin la necesidad de utilizar sistemas de acondicionamiento mecánico para las viviendas de Quito. A continuación, se presenta en resumen las principales tendencias identificadas:

- En primera instancia, se determinó que para una correcta aplicación del modelo del confort adaptativo, descrito en la norma ASHRAE [53], es necesaria la consideración de ocupación humana. Esto no fue considerado en estudios previos realizados en ésta línea de investigación [20, 21]. La ocupación humana incluye las ganancias internas debido a los equipos que se utiliza, así como de la iluminación

y las tasas metabólicas de los ocupantes. La ocupación a su vez, permite utilizar modelos de acondicionamiento o ventilación natural. Todas estas consideraciones permiten un análisis más preciso y de mayor confiabilidad.

- Con respecto a las condiciones de borde, las configuraciones de techo adiabático son las que presentan las mejores condiciones térmicas. Por esta razón, se infiere que la implementación de materiales aislantes en los techos es importante para reducir el malestar térmico. A pesar de esto, se debe tener en cuenta que estas mismas configuraciones pueden alcanzar discomfort superior al 70% debido a su alta sensibilidad, por lo que es importante que esta condición de borde se encuentre acompañada de las combinaciones de parámetros más apropiadas, descritas en los siguientes puntos.
- Como se discutió anteriormente, el número de ventanas no resultó ser una condición relevante, puesto que se observaron comportamientos similares de las tipologías con una sola ventana con las de dos ventanas. Se concluye entonces que la posición y número de ventanas es la condición de frontera menos relevante, al compararse con la importancia que presentaron las condiciones de borde con superficies aisladas.
- Alta inercia térmica es favorable para la acumulación de calor durante el día, y la liberación de dicha acumulación por la noche. Por lo tanto, se recomienda el uso de ladrillo de espesor de 20 cm.
- Existe un valor más conveniente de WWR alrededor de 20% y 40%, sin embargo, éste cambia de acuerdo a la condición de frontera o la masa térmica. Siendo así, se notó que a mayor inercia térmica y mayor espesor de las paredes, los valores más adecuados de WWR son menores a comparación con las viviendas de menor inercia térmica y menor espesor de las paredes, lo cuales requieren de valores más altos de WWR. Adicionalmente, porcentajes muy bajos de WWR no permiten ganancias energéticas durante el día, y por tanto ocasionan sobre enfriamiento. Por el contrario, demasiado acristalamiento puede generar un exceso de calentamiento durante el día.
- Se recomienda tener buenas prácticas constructivas que permitan la reducción de infiltraciones dentro de las viviendas. Además, se recomienda evitar las orientaciones de fachadas hacia el Norte o Sur, y preferir las orientaciones Este u Oeste. Finalmente, no se recomienda el uso de vidrios dobles, puesto que no aportan al mejoramiento del comportamiento térmico de las viviendas de Quito.

En comparación con trabajos previos, se corroboró la importancia de una gran cantidad de parámetros. Sin embargo, mientras que en trabajos previos se observó que el orden de sensibilidad de los parámetros cambiaba de acuerdo a las condiciones de borde, en este trabajo, se determinó que el orden de sensibilidad de los parámetros permanece igual. En todos los casos evaluados el parámetro de mayor relevancia es el material de las paredes, seguido por el WWR e infiltraciones. A diferencia del trabajo de Castro [20], donde las configuraciones sometidas a condiciones de borde diferentes, presentaron parámetros con sensibilidades diferentes. En efecto, bajo techo expuesto, los parámetros más relevantes fueron el material de fabricación, seguido por las infiltraciones y posición de ventanas, mientras que, bajo techo adiabático, fueron la posición de ventanas, seguido por WWR e infiltraciones. Esto se debe que los casos de Castro, no se tomaron en cuenta la ocupación ni el acondicionamiento natural. Esto es obvio cuando se observa en las curvas de renovación de aire, puesto que, como se explicó en la sección 3.5.4, la ventilación natural iguala las condiciones térmicas de la vivienda durante el día (al estudiar infiltraciones), por lo que los índices de sensibilidad de la infiltración encontrados en este trabajo tienen valores menores a los del trabajo de Castro (8% frente a 21% en el trabajo de Castro). Otra cosa notable al comparar estos trabajos es la relevancia de los materiales de construcción de las paredes. En este trabajo, se observó mayor relevancia de este parámetro (23% frente a 18%) debido a que, la masa térmica, acompañada de ventilación natural, proporciona mejores comportamientos térmicos, como lo demuestra Goulart [33].

Por otra parte, otros comportamientos fueron comprobados en éste trabajo. Los valores de sensibilidad del porcentaje de ventana presentaron valores similares a trabajos previos (alrededor del 20%). Así mismo, al igual que trabajos anteriores [20, 21, 36], a pesar de que el orden de relevancia no es el mismo, los parámetros de mayor relevancia se mantienen y comprueban que son los mismos determinados en este trabajo.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

4.1. CONCLUSIONES

Se realizó un modelo simplificado de una vivienda genérica de cuatro personas, de manera que se pueda representar a una gran cantidad de tipos de viviendas de Quito. Este modelo consideró los materiales más comunes en construcciones, así como un modelo de la ocupación, dentro del cual se tomó en cuenta consumos estándar de iluminación y equipos varios. Adicionalmente, se tomó en cuenta el acondicionamiento natural de la vivienda. Por último, esta vivienda se analizó bajo las condiciones meteorológicas de un año típico (TMY) de Quito.

La influencia de los principales parámetros constructivos sobre el comportamiento térmico de construcciones de Quito fue estudiada en este trabajo. Para ello se desarrolló un análisis de sensibilidad de los siguientes parámetros: materiales y espesor de las paredes, relación de ventana a pared (WWR), tasa de infiltraciones o renovación de aire, orientación de la fachada y tipo de ventana (vidrio simple y vidrio doble). Esos parámetros fueron evaluados dentro de tres condiciones de frontera: techo (expuesto y adiabático), paredes (expuestas y adiabáticas), y paredes acristaladas (una y dos), dando como resultado ocho configuraciones o tipologías de vivienda.

Los resultados muestran que, bajo condiciones de frontera adiabáticas, los parámetros presentan mayor sensibilidad, mientras que los de condiciones expuestas, presentan menores sensibilidades en los parámetros evaluados. Se concluye que esto se debe a una menor interacción con el medio ambiente, lo que hace que (en el caso de edificaciones adiabáticas), el comportamiento térmico dependa más de las características constructivas. Por esta misma razón, las viviendas con condiciones expuestas presentan menor sensibilidad en sus parámetros constructivos. Adicionalmente, las construcciones de envolvente adiabáticas (techo y dos paredes adiabáticas) logran alcanzar rangos de discomfort que nunca son alcanzados por los de envolvente expuesta (discomfort menores al 40%). Esto sugiere la implementación de materiales y mecanismos de aislamiento dentro de las construcciones de Quito, en especial en el techo. Sin embargo, esta acción debe ser acompañada de la combinación de otros parámetros, dado que, así como las condiciones adiabáticas son ventajosas, también pueden llegar a tener discomfort iguales a las viviendas expuestas si el resto de parámetros son ignorados. Por último, dentro de las condiciones de frontera, la condición menos relevante fue la disposición de las ventanas (o número de paredes acristaladas), puesto que la comparación entre estos dos arroja resultados similares.

Con respecto al análisis de sensibilidad, el material de fabricación de la envolvente fue el parámetro más sensible, con un índice de sensibilidad de 23%. Mejores propiedades de los materiales, así como mayores espesores pueden mejorar las condiciones de confort, por medio del aprovechamiento de ganancias térmicas durante el día (inercia térmica). Para el caso de Quito, se recomienda la utilización de ladrillo sobre el bloque. El siguiente parámetro más sensible es el porcentaje de ventana (WWR), con un valor de 22%. Los valores más adecuados se encuentran entre 20% y 40%, sin embargo, esto depende de la inercia térmica de la vivienda, puesto que, con mayor inercia, se pueden tener valores adecuados más bajos. Así mismo, los valores más apropiados de WWR dependen de la orientación de la fachada fenestrada. El tercer parámetro más relevante es la tasa de renovación de aire, con un valor de 11%. Debido a la gran dependencia del clima de Quito sobre el comportamiento térmico, bajas tasas de infiltración (en especial en las noches), pueden mejorar las condiciones de confort de la vivienda. Por consiguiente, se recomienda promover buenas prácticas de construcción. En cuanto a la orientación, presenta una sensibilidad de 7%. Este parámetro posee menor relevancia que el resto, sin embargo, se observó que los mejores comportamientos de las viviendas se dieron con orientaciones Este y Oeste, mientras que la orientación menos recomendada es la Norte. Por último, con una sensibilidad del 1%, no presenta relevancia alguna, por lo que no se recomienda el uso de ventanas de vidrio dobles para mejorar el confort de las viviendas de Quito.

El caso adicional de viviendas con techo de zinc fue estudiado, por ser una práctica común en hogares de bajos ingresos. Estos casos siempre presentan altos niveles de incomodidad térmica (disconfort superior al 66%), sin importar la combinación de parámetros. En efecto, los índices de sensibilidad del material de la envolvente, WWR e infiltraciones son 12%, 4% y 1% respectivamente. Por lo tanto, las políticas de construcción deben desalentar el uso de zinc en los techos.

Se determinó dentro del modelo de vivienda genérica, que es importante la consideración de la ocupación, las ganancias internas y el acondicionamiento natural. Esto es porque básicamente, la consideración de estas variables permite un mejor uso de los modelos de confort adaptativo, como se describió en este trabajo. En consecuencia, se mejora la asimilación de la metodología dentro del estudio. Por lo tanto, el cálculo de la relevancia de los parámetros fue diferente a trabajos previos, puesto que bajo todas las condiciones de frontera estudiadas, las tendencias se mantuvieron. A pesar de esto, la relevancia de los parámetros si se mantuvieron puesto que los valores de sensibilidad de los dos parámetros principales (construcción de las paredes y WWR), sí presentan valores

similares. Los resultados de este trabajo son coherentes con los resultados obtenidos en trabajos previos.

Se espera que el trabajo sirva como punto de referencia para futuras guías de diseño de edificaciones residenciales con criterios de acondicionamiento pasivo.

4.2. TRABAJOS FUTUROS

Este trabajo abre las puertas para investigaciones futuras, en especial relacionadas con el uso de aislamiento en las envolventes de las viviendas expuestas. Dentro de este sentido, se deben buscar los materiales más idóneos para aislar, de acuerdo a las circunstancias y disponibilidad del mercado en Ecuador.

Se analizó que los porcentajes de ventana son ventajosos, pero solo ante la presencia de radiación solar directa. Sin embargo, ante la presencia de contextos urbanos (existencia de construcciones generadoras de sombra), los resultados pueden ser totalmente diferentes. Por ejemplo, es diferente el comportamiento de una vivienda en el centro histórico que en el norte de la ciudad debido a que los edificios del centro histórico están más juntos pero las construcciones son menos altas en comparación al norte de la ciudad. Bajo este argumento, puede darse que los edificios del centro histórico estén expuestos a más sombras que los del norte de la ciudad, lo que cambiaría su comportamiento térmico, en especial las variables más dependientes de la radiación solar directa (como el WWR). Por esta razón se recomienda un estudio profundo de los parámetros, pero con la inclusión de los diferentes contextos urbanos que existen en Quito

Por último, se recomienda estudiar a profundidad el comportamiento del bloque, puesto que puede resultar sensible de acuerdo a la constitución del material y la geometría de las cavidades interiores.

REFERENCIAS

- [1] IEA, *Transition to Sustainable Buildings*. IEA, 2013.
- [2] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, y C. Pout, “A review on buildings energy consumption information”, *Energy Build.*, vol. 40, núm. 3, pp. 394–398, 2008.
- [3] MICSE, *Balance Energético Nacional 2016*. 2016.
- [4] V. Bradshaw, *The Building Environment : Active and Passive Control Systems*. .
- [5] F. D. K. Ching y I. M. Shapiro, *Green Building Illustrated*. 2014.
- [6] M. Bauer, P. Mösle, y M. Schwarz, “Green Building - Guidebook for Sustainable Architecture”, en *Perceived Use defines the Concept Whether*, Springer, 2010, p. 208.
- [7] Dejan Mumovic và y M. Santamouris, *Sustainable building design & Engineering*. 2009.
- [8] K. C. Parsons, *Human Thermal Environments. The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance*. 2002.
- [9] MINISTERIO DE DESARROLLO URBANO Y VIVIENDA, “PROGRAMA NACIONAL DE VIVIENDA SOCIAL DATOS GENERALES”, 2015.
- [10] A. Gallardo, G. Villacreses, M. Almaguer, A. Lobato-Cordero, y M. Cordovez, *Estimating the indoor thermal comfort deficit in the social housing built in Ecuador by integrating Building Information Modelling and Geographical Information Systems*. 2017.
- [11] J. D. Balcomb, *Passive Solar Buildings*. 1992.
- [12] V. Costanzo y M. Donn, “Thermal and visual comfort assessment of natural ventilated office buildings in Europe and North America”, *Energy Build.*, vol. 140, pp. 210–223, abr. 2017.
- [13] M. Zinzi y E. Carnielo, “Impact of urban temperatures on energy performance and thermal comfort in residential buildings. The case of Rome, Italy”, *Energy Build.*, mayo 2017.
- [14] L. T. Wong, K. W. Mui, y P. S. Hui, “A multivariate-logistic model for acceptance of indoor environmental quality (IEQ) in offices”, *Build. Environ.*, vol. 43, núm. 1, pp. 1–6, ene. 2008.

- [15] D. Zanni, A. Righi, T. D. Mora, F. Peron, y P. Romagnoni, “The Energy Improvement of School Buildings: Analysis and Proposals for Action”, *Energy Procedia*, vol. 82, pp. 526–532, dic. 2015.
- [16] Y. Allab, M. Pellegrino, X. Guo, E. Nefzaoui, y A. Kindinis, “Energy and comfort assessment in educational building: Case study in a French university campus”, *Energy Build.*, vol. 143, pp. 202–219, mayo 2017.
- [17] R. D. Beltrán Correa y J. P. Castillo Estévez, “Optimización energética para el aprovechamiento de ventilación natural en edificaciones en climas cálidos de Ecuador /”, EPN, 2015.
- [18] H. Samuelson, S. Claussnitzer, A. Goyal, Y. Chen, y A. Romo-Castillo, “Parametric energy simulation in early design: High-rise residential buildings in urban contexts”, *Build. Environ.*, vol. 101, pp. 19–31, 2016.
- [19] C. L. Ramírez Ramírez y J. R. Salinas Villacís, “Estudio de la relevancia de los parámetros que influyen en el comportamiento energético de un edificio residencial de la ciudad de Quito utilizando modelamiento en matlab.”, Quito, 2016., 2016.
- [20] P. R. Castro Da Silva, “Estudio de sensibilidad de las características constructivas para edificios residenciales en Quito mediante simulación.”, mayo 2017.
- [21] E. J. Cárdenas Ramos y D. E. Fernández Jiménez, “Estudio de la influencia del factor de forma sobre la temperatura operativa de edificaciones en la ciudad de Quito, mediante simulación en EnergyPlus”, dic. 2017.
- [22] J. E. Muñoz Carrillo y I. A. Prado Pozo, “Estudio experimental del comportamiento térmico de una vivienda en Quito situada en el barrio La Vicentina”, ene. 2018.
- [23] I. Miño, A. Lobato, y J. Labus, “Simulaciones energéticas como herramienta para evaluación térmica de las viviendas sociales del Ecuador: Caso Yachay”, *Investig. Sosten. Energías Renov. y Efic. Energética*, núm. 2012, pp. 1–8, 2013.
- [24] S. Liaison *et al.*, “Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy”, *ASHRAE*, vol. 2004, 2004.
- [25] J.A Clarke, *Energy Simulation in Building Design*. Woburn, 2001.
- [26] P. Pourrut, “Los climas del Ecuador : fundamentos explicativos”, 1983.
- [27] Ilustre Municipio del Distrito metropolitano de Quito, “ATLAS AMBIENTAL DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO”, 2008.

- [28] CONELEC y CIE, “ATLAS SOLAR DEL ECUADOR”, 2008.
- [29] F. D. Vásquez Aza, “Estudio del impacto de las variables meteorológicas en el comportamiento térmico de una edificación bajo las condiciones meteorológicas de Urcuquí”, sep. 2016.
- [30] T. L. Bergman y F. P. Incropera, *Fundamentals of heat and mass transfer*. Wiley, 2011.
- [31] X. Wang, H. Altan, y J. Kang, “Parametric study on the performance of green residential buildings in China”, *Front. Archit. Res.*, vol. 4, núm. 1, pp. 56–67, 2015.
- [32] B. Givoni, “Comfort , climate analysis and building design guidelines”, *Energy Build.*, vol. 18, pp. 11–23, 1992.
- [33] S. V. G. Goulart, “Thermal Inertia and Natural Ventilation – Optimisation of thermal storage as a cooling technique for residential buildings in Southern Brazil”, 2004.
- [34] Balcomb J.D., “Heat storage and distribution inside passive-solar buildings”, mayo 1983.
- [35] Eindhoven University of Technology, “Impact of thermal diffusivity and thermal effusivity”, *Course B.*, pp. 1–16, 2015.
- [36] I. Mino-Rodriguez, G. Gaona, A. Lobato, C. Naranjo-Mendoza, y J. Labus, “Implementation of GIS methodology and passive strategies to improve the quality of social housing in the Andean region of Ecuador”, *World Sustain. Build. 14*, vol. 3, pp. 148–156, 2014.
- [37] S. Attia, E. Gratia, A. De Herde, y J. L. M. Hensen, “Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design”, *Energy Build.*, vol. 49, pp. 2–15, 2012.
- [38] AIRCUIITY, “Laboratory Ventilation ACH Rates Standards and Guidelines Lab Ventilation ACH Rates Standards and Guidelines”, 2012.
- [39] M. V Swami y S. Chandra, “Procedures for Calculating Natural Ventilation Airflow Rates in Buildings”, 1987.
- [40] C. Ghiaus y F. Allard, *Natural Ventilation in the Urban Environment*. Earthscan, 2005.
- [41] R. E. Moffatt, *CIBSE-Environmental Design*, vol. 25, núm. 4. 1983.
- [42] EnergyPlus, “Input Output Reference”, *Bigladder Softw.*, núm. c, p. 2109, 2015.

- [43] F. D. K. K. Ching y I. M. Shapiro, *Green Building Illustrated*. 2014.
- [44] AIA, “An Architect’s Guide to Integrating Energy Modeling in the Design Process”, pp. 1–86, 2012.
- [45] S. Stevanović, “Optimization of passive solar design strategies: A review”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 25, pp. 177–196, sep. 2013.
- [46] T. Hong, S. . Chou, y T. . Bong, “Building simulation: an overview of developments and information sources”, *Build. Environ.*, vol. 35, núm. 4, pp. 347–361, 2000.
- [47] D. B. Crawley *et al.*, “Beyond BLAST and DOE-2: EnergyPlus, a New-Generation Energy Simulation Program”.
- [48] U.S. Department of Energy y EnergyPlus, *Engineering Reference*, núm. c. 2016.
- [49] D. B. Crawley, J. W. Hand, M. Kummert, y B. T. Griffith, “Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs”, *Build. Environ.*, vol. 43, núm. 4, pp. 661–673, 2008.
- [50] J. L. M. Hensen y R. Lamberts, *Building Performance Simulation for Design and Operation*. 2011.
- [51] K. J. Lomas y H. Eppel, “Sensitivity analysis techniques for building thermal simulation programs”, *Energy Build.*, vol. 19, núm. 1, pp. 21–44, 1992.
- [52] N. Artmann, H. Manz, y P. Heiselberg, “Parametric study on the dynamic heat storage capacity of building elements”, *28th AIVC Conf. Build.*, pp. 1–6, 2007.
- [53] R. J. De Dear y G. S. Brager, “Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55”, *Energy Build.*, vol. 34, núm. 6, pp. 549–561, 2002.
- [54] X. Chen, H. Yang, y Y. Wang, “Parametric study of passive design strategies for high-rise residential buildings in hot and humid climates: miscellaneous impact factors”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 69, núm. Enero 2016, pp. 442–460, 2017.
- [55] INEC, “Anuario de Estadística de Edificaciones”. pp. 1–168, 2014.
- [56] EnergyPlus, “Weather Data by Region”. [En línea]. Disponible en: https://energyplus.net/weather-region/south_america_wmo_region_3/ECU. [Consultado: 12-jun-2018].
- [57] INEC, “Principales Resultados: Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos (ENIGHUR)

- 2011-2012”, 2013.
- [58] CEN (European Committee for Standardization), “DS/EN 15251: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics”, *Geneva Int. Stand. Organ.*, p. 54, 2007.
- [59] I. E. S. Limited, “Apache-Table: User Guide”, *IES Virtual Environment*, vol. 1, núm. VE2014, pp. 3–48, 2014.
- [60] C. Hachem, A. Athienitis, y P. Fazio, “Parametric investigation of geometric form effects on solar potential of housing units”, *Sol. Energy*, vol. 85, núm. 9, pp. 1864–1877, 2011.
- [61] A. C. R. Moreno, I. S. de Moraes, y R. G. de Souza, “Thermal Performance of Social Housing— A Study Based on Brazilian Regulations”, *Energy Procedia*, vol. 111, pp. 111–120, mar. 2017.
- [62] I. Miño-Rodríguez, C. Naranjo-Mendoza, y I. Korolija, “Thermal Assessment of Low-Cost Rural Housing—A Case Study in the Ecuadorian Andes”, *Buildings*, vol. 6, núm. 3, p. 36, 2016.
- [63] “OpenStudio | OpenStudio”. [En línea]. Disponible en: <https://www.openstudio.net/>. [Consultado: 05-jun-2018].
- [64] Y. Zhang y I. Korolija, “Performing complex parametric simulations with jEPlus”, *SET2010-9th Int. Conf. Sustain. Energy Technol.*, núm. August 2010, pp. 22–27, 2010.
- [65] W. McKinney, *Python for Data Analysis [datasci][pandas][python]*. 2012.
- [66] NVIDIA UK, “CUDA Parallel Computing | What is CUDA?” [En línea]. Disponible en: <http://www.nvidia.co.uk/object/cuda-parallel-computing-uk.html>. [Consultado: 26-may-2018].
- [67] S. J. Ortega Cárdenas, “Determinación de la conductividad térmica del bloque de hormigón utilizado en la construcción ecuatoriana mediante simulación CFD”, sep. 2017.
- [68] SENPLADES, “FICHA METODOLÓGICA: Déficit cualitativo de vivienda”. 2013.