



Calibración de la simulación térmico-energético de un edificio basado en parámetros micro climáticos.

Modalidad: Proyecto de Investigación

Oscar Dario Diaz Peña  
CC. 91.538.630

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER**  
**Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías**  
**Ingeniería Electromecánica**  
**Bucaramanga 14-07-2022**



Calibración de la simulación térmico-energético de un edificio basado en parámetros  
micro climáticos.

Modalidad: Proyecto de Investigación

Oscar Dario Diaz Peña  
CC. 91.538.630

**Trabajo de Grado para optar al título de**  
Ingeniero Electromecánico

**DIRECTOR**

Ph(c) Msc. Ing. Javier Ascanio

**CODIRECTOR**

Karen Tatiana Jaimes Quintero

Grupo de investigación en sistemas de energía automatización y control (GISEAC)

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER**  
**Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías**  
**Ingeniería Electromecánica**  
**Bucaramanga 14-07-2022**

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE  
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,  
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 1.0

Nota de Aceptación

Aprobado en el ACTA 33 - 3  
OCTUBRE 2022 del comité de  
proyectos de grado de  
Ingeniería Electromecánica  
articulado por ciclos  
propedéuticos con la  
Tecnología en Operación y  
Mantenimiento Electromecánico



---

Firma del Evaluador



**JAVIER ASCARIO VILLABONA**  
PhD. Eficiencia Energética  
MSc. Eficiencia Energética y energías renovables  
Ing. Electromecánico

---

Firma del Director

## **DEDICATORIA**

Este proyecto está dedicado a Dios por ser mi guía, a mis padres y mi esposa que siempre me apoyan y me aman. Espero que este trabajo y título por conseguir sea una de las razones por la que se encuentren orgullosos de mí.

**OSCAR.**

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco a Dios por darme la oportunidad de llegar hasta este punto de mi carrera y guiarme hacia el mejor camino. Seguidamente a mi esposa por ser un apoyo incondicional durante todo este proceso.

Agradezco a mis profesores por todo el conocimiento que me han ofrecido para poder llegar hasta esta etapa.

Agradezco al ingeniero Javier Ascanio por su atención y apoyo académico durante el desarrollo de este proyecto, aportando de su conocimiento. Gracias por sus consejos y sugerencias en pro de la investigación.

## TABLA DE CONTENIDO

<b><u>RESUMEN EJECUTIVO .....</u></b>	<b><u>13</u></b>
<b><u>INTRODUCCIÓN .....</u></b>	<b><u>14</u></b>
<b><u>1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN .....</u></b>	<b><u>16</u></b>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	16
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	18
1.3. OBJETIVOS .....	18
1.3.1. OBJETIVO GENERAL .....	18
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
1.4. ESTADO DEL ARTE.....	19
<b><u>2. MARCO REFERENCIAL.....</u></b>	<b><u>22</u></b>
2.1. BUILDING ENERGY PERFORMANCE SIMULATION (BEPS) .....	22
2.2. CALIBRACIÓN.....	23
2.3. PROCESO DE CALIBRACIÓN .....	24
2.3.1. CALIBRACIÓN MANUAL .....	24
2.3.2. CALIBRACIÓN AUTOMATIZADA .....	25
2.4. ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE .....	25
2.5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	26
<b><u>3. DISEÑO DE LA INVESTIGACION .....</u></b>	<b><u>27</u></b>
<b><u>4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO.....</u></b>	<b><u>29</u></b>

<b>4.1.</b>	<b>CARACTERIZACIÓN Y RECOPIACIÓN DE LOS DATOS DE ENTRADA .....</b>	<b>29</b>
4.1.1.	UBICACIÓN .....	29
4.1.2.	GEOMETRÍA Y DIMENSIONES DE LA VIVIENDA.....	30
4.1.3.	ORIENTACIÓN .....	32
4.1.4.	ENVOLVENTE .....	32
4.1.5.	DATOS DEL MONITOREO REALIZADO CON LOS TERMOHIGRÓMETROS EN LA VIVIENDA DE ESTUDIO .....	35
4.1.6.	RESULTADOS DE LA ADQUISICIÓN DE DATOS .....	38
<b>4.2.</b>	<b>ELABORACIÓN DEL MODELO DE VIVIENDA EN EL SOFTWARE DESINGBUILDER</b>	<b>40</b>
<b>4.3.</b>	<b>INGRESO DE DATOS EN EL SOFTWARE .....</b>	<b>45</b>
4.3.1.	PLANTILLA ACTIVIDAD .....	46
4.3.2.	PLANTILLA CERRAMIENTOS.....	49
4.3.3.	ABERTURAS DE LAS VENTANAS .....	52
4.3.4.	ADYACENCIA ENTRE ZONAS TÉRMICAS .....	52
4.3.5.	PUENTES TÉRMICOS .....	53
4.3.6.	HORARIO DE OCUPACIÓN DE LAS CARGAS TÉRMICAS INTERNAS (COMPUTADOR, MISCELÁNEOS EQUIPOS).....	54
<b>4.4.</b>	<b>COMPARACIÓN DE LOS MODELOS (ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD).....</b>	<b>55</b>
<b>5.</b>	<b><u>RESULTADOS.....</u></b>	<b><u>58</u></b>
<b>5.1.</b>	<b>MODELADO.....</b>	<b>58</b>
<b>5.2.</b>	<b>SIMULACIÓN .....</b>	<b>59</b>
<b>5.3.</b>	<b>ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: MÉTODO DE DISPERSIÓN .....</b>	<b>63</b>
<b>5.4.</b>	<b>CALIBRACIÓN DEL MODELO .....</b>	<b>79</b>
<b>6.</b>	<b><u>CONCLUSIONES.....</u></b>	<b><u>83</u></b>

<b><u>7.</u></b>	<b><u>RECOMENDACIONES .....</u></b>	<b><u>85</u></b>
<b><u>8.</u></b>	<b><u>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</u></b>	<b><u>86</u></b>
<b><u>9.</u></b>	<b><u>ANEXOS .....</u></b>	<b><u>93</u></b>
<b>ANEXO 1.....</b>		<b>93</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Metodología de validación por sensibilidad de datos .....	27
Figura 2. Ubicación geográfica de la vivienda caso de estudio. ....	30
Figura 3. Plano en vista 3D de la vivienda caso de estudio. ....	31
Figura 4. Planos de distribución de la vivienda .....	31
Figura 5. Georreferenciación de la vivienda. ....	32
Figura 6. Representación de los materiales en capas que conforman el muro portante exterior .....	33
Figura 7. Representación de los materiales en capas que conforman el muro partición.....	34
Figura 8. Ubicación de los sensores en la primera y segunda planta en la vivienda .....	37
Figura 9. Ubicación de los sensores en la parte externa de la vivienda.....	37
Figura 10. Evolución de la temperatura durante el día más caluroso entre el periodo de monitoreo. ....	38
Figura 11. Humedad Relativa durante el día 14 de mayo (día más caluroso).....	39
Figura 12. Evolución de la temperatura el 29 de mayo (día menos caluroso).....	39
Figura 13. Evolución de la humedad relativa del 29 de mayo (día menos caluroso) .....	40
Figura 14. Interfaz de inicio de Design Builder .....	41
Figura 15. Cargar el archivo de los datos climatológicos medidos en el estudio de monitoreo con termohigrómetros a DesignBuilder .....	42
Figura 16. Creación de bloques de la primera planta del modelo en DesignBuilder. .....	43
Figura 17. Creación de los muros exteriores de la primera planta en DesignBuilder. .....	44

Figura 18. Creación muros interiores de la primera planta en DesignBuilder.....	45
Figura 19. Descripción de las opciones de la pestaña actividad en DesignBuilder. .....	46
Figura 20. Plantilla de ocupación seleccionada-programación predeterminada en DesignBuilder. ....	47
Figura 21. Detalle de la etiqueta metabolismo en DesignBuilder. ....	47
Figura 22. Detalle del control ambiental en Design Builder. ....	48
Figura 23. Detalle de asignación de computadores en Design Builder. ....	49
Figura 24. Descripción de los misceláneos en Design Builder. ....	49
Figura 25. Opciones de etiqueta para la plantilla cerramiento en Desing Builder.	50
Figura 26. Descripción de las opciones seleccionadas en cerramientos en Desing Builder. ....	50
Figura 27. Etiqueta de estanqueidad del aire. ....	51
Figura 28. Plantilla de grietas en Design Builder.....	51
Figura 29. Plantilla acristalamiento.....	52
Figura 30. Detalle de los bloques adyacentes en condición adiabática.....	53
Figura 31. Descripción de puentes térmicos en DesignBuilder. ....	54
Figura 32. determinar el horario de programación de las cargas internas. ....	55
Figura 33. Modelo de la vivienda realizado en DesignBuilder. ....	58
Figura 34. Zonas de estudio y simulación de la vivienda .....	59
Figura 35. Resultados del análisis de temperatura y ganancias de calor en DesignBuilder .....	62
Figura 36. Gráfica de temperatura y radiación hora a hora mensual de la zona 1 modelo 17.....	81
Figura 37. Gráfica de temperatura y radiación hora a hora mensual de la zona 2 modelo 17.....	82

Figura 38. Gráfica de temperatura y radiación hora a hora mensual de la zona 3  
modelo 17..... 82

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Materiales del muro portante exterior caracterizados térmicamente. ....	33
Tabla 2. Materiales del muro de partición caracterizados térmicamente.....	35
Tabla 3. Distribución de los sensores en las diferentes partes de la vivienda.....	36
Tabla 4. Variables requeridas para el método de dispersión aplicado a cada modelo .....	60
Tabla 5. Resultados del modelo 1 en DesignBuilder .....	60
Tabla 6. Integración de los valores medidos y simulados de cada modelo de la zona 1 .....	63
Tabla 7. Resultados de las gráficas de dispersión .....	64
Tabla 8. Resultados de las gráficas de dispersión de la segunda zona. ....	68
Tabla 9. Resultados de las gráficas de dispersión de la zona 3.....	74
Tabla 10. Modelo 17 con las gráficas de dispersión.....	79

## RESUMEN EJECUTIVO

El desarrollo de modelos de simulación de rendimiento energético de edificios a menudo requiere mucho tiempo y esfuerzo para lograr un grado aceptable de precisión de predicción. Como tal, los modeladores de energía introducen varias simplificaciones y suposiciones que requieren un alto grado de alfabetización de modelos para evitar errores en las predicciones de energía (Shiel et al., 2018). En este trabajo se realiza 18 modelos de vivienda unifamiliar caso de estudio, mediante el programa DesignBuilder insertando los datos de entrada (geometría, dimensiones, materiales de construcción, ubicación, datos de temperaturas internas y externas medidos en tiempo real); seguidamente, se ingresan datos de las cargas térmicas internas de la vivienda según actividad, tipos de cerramientos, puentes térmicos presentes, adyacencia adiabática con viviendas aledañas, infiltraciones) los cuales se denominan como los parámetros influyentes y varían según cada modelo. Una vez modelado por medio del análisis de sensibilidad aplicando el método de dispersión se selecciona el modelo calibrado que mas se ajusta al modelo real. De los diagramas de dispersión se puede inferir que proporcionan una luz sobre la tendencia del modelo a predecir de más o de menos en todo el rango de valores simulados. En este caso se demostró que el modelo 17 coincide con el modelo real gracias a que las gráficas de temperatura medidas y simulada son similares.

**PALABRAS CLAVE.** Modelado, DesignBuilder, Cargas térmicas, Analisis de Sensibilidad, Calibración.

## INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha traído nuevos desafíos para que los edificios brinden condiciones térmicas interiores cómodas y seguras y reduzcan el consumo de energía para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Se informó que dieciocho millones de personas más estuvieron expuestas a olas de calor en 2017 que en 2016. De 2000 a 2017, hubo 1,4 días más de olas de calor cada año en comparación con 1986 a 2005 (Watts et al., 2018). Mientras tanto, los edificios representan el 20% del consumo mundial de energía, con un 40 % en economías desarrolladas como Estados Unidos (EIA, 2021).

La demanda mundial de energía aumentó un 0,9 % en 2019 con 120 millones de toneladas equivalentes de petróleo. En 2020, el 30% del CO<sub>2</sub> relacionado con la energía, Las emisiones fueron emitidas por edificios en todo el mundo (EIA, 2019). Por lo tanto, los tomadores de decisiones en todo el mundo buscan, hacen esfuerzos y desarrollan metodologías para reducir las emisiones de GEI de los edificios nuevos y la modernización de los edificios existentes.

Si bien aproximadamente el 2 % de las superficies comerciales globales son de nueva construcción y una cantidad similar se renueva cada año, la mayoría de las oportunidades para mejorar la eficiencia energética en las próximas décadas estarán en el parque de edificios actual (T. Yang et al., 2016). Por lo tanto, es importante estudiar el desempeño térmico de los edificios existentes, reducir el consumo de energía y mejorar sus condiciones térmicas interiores en los climas futuros proyectados. Building Energy Modeling (BEM) se usa comúnmente para

modelar los edificios existentes, evaluar su rendimiento en climas futuros y evaluar las medidas de mitigación durante las olas de calor (Hermelink et al., 2017).

Por lo tanto, este proyecto realiza la calibración de un modelo de vivienda unifamiliar caso de estudio por medio del análisis de sensibilidad con el método de dispersión. El trabajo se inicia con la recopilación y caracterización de los materiales de construcción de la edificación, esta información se extrae del proyecto realizado por el autor Ascanio (2021), donde monitorizo la vivienda de estudio durante el mes de mayo por 30 días con sensores (termohigrómetros) para obtener los valores de la temperatura exterior, interior e índice de calor en diferentes áreas. Seguido de esto, se introducen los datos de entrada en el programa DesignBuilder, con el fin de modelar la vivienda. Posteriormente se simula el primer modelo, donde el programa arroja datos como la temperatura del ambiente y demás parámetros; es importante mencionar que, solo se tendrá en cuenta la temperatura ambiental.

Finalmente se desarrollan 18 modelos a los cuales se les aplica el método de dispersión con los valores medidos y simulados, donde se selecciona el modelo que coincida con el modelo ideal.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los orígenes del modelado energético de edificios se remontan a la década de 1920 con el desarrollo del método del factor de respuesta para los cálculos del flujo de calor transitorio y análisis de la temperatura interior de las mismas (Royapoor & Roskilly, 2015). La disponibilidad de computadoras en los años 60 permite desarrollar modelos energéticos para los cálculos de carga de calefacción y refrigeración (Chakrabarty et al., 2021; Suh et al., 2019). Pero estas herramientas computacionales realizan cálculos matemáticos de manera mecánica. Es claro que para tener resultados que se acerquen a la realidad se requieren entradas de datos y modelos próximos a lo medido en campo que para este caso son los datos recolectados por los termohigrómetros.

La simulación adecuada del comportamiento higrotérmico de edificios es una fase importante en cuanto a la evaluación del confort térmico interior y la idoneidad de las estrategias de rehabilitación de edificaciones (Krayenhoff et al., 2020). Una simulación imprecisa puede conducir a conclusiones inadecuadas, lo que podría resultar en acciones inapropiadas y peligrosas para la preservación de los edificios (Hu et al., 2020; Ribeiro et al., 2021). Es por esto que se hace importante la calibración de la simulación de rendimiento energético de un edificio (BEPS), el cual, incluye una serie de ajustes y pasos de iteración generando un proceso complejo de realizar (Huerto-Cardenas et al., 2020).



Para obtener los datos de salida que permitan tomar decisiones aplicadas a las necesidades se tiene la penuria de validar el modelo de validación para realizar las modificaciones posteriores al modelo validado. Es así como se hace la pregunta, ¿Diseñar un modelo y calibrarlo con valores de temperaturas en software ayuda a la contribución de output que reflejan la realidad?

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

Uno de los errores habituales cuando se trabaja en la modelización es realizarlo con los datos predeterminados de las herramientas computacionales, pero esto genera datos matemáticamente válidos, pero no reales al punto donde se realiza el estudio.

Es así que para realizar una modelización en software que permita realizar análisis que se acercan a la realidad con porcentajes de valor absoluto con tendencia a cero, se requiere construir y calibrar el modelo para permitir la toma de decisiones acertadas con en el proceso de modelización. Por tanto, para la contribución de la segunda fase para el estudio del comportamiento del confort térmico en una vivienda monitorizada en la ciudad de Bucaramanga se requiere de la construcción del modelo y calibrarlo aplicando la metodología de calibración para apropiada para este tipo de modelos y tener el punto de partida para la fase posterior del proyecto general que se lleva a cabo por el grupo de investigación GISEAC en su línea de sistemas energético y energías renovables.

## 1.3. OBJETIVOS

### 1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar el modelo de la simulación higrotérmica de una vivienda unifamiliar, por medio de la parametrización de datos medidos para obtener una modelización calibrada.

### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificación de las características constructivas, determinando los materiales de las envolventes de la edificación para generar los parámetros iniciales del modelo.
- Modelar la edificación en una herramienta computacional, aplicando los parámetros constructivos para realizar la calibración térmica del mismo.
- Calibrar el modelo generado, por medio de análisis de sensibilidad, para obtener el modelo más cercano a los datos monitorizados.

### **1.4. ESTADO DEL ARTE**

El trabajo realizado por Ilaria Ballarini, Juana De Luca, Argun y Vicente Corrado titulado “Transformación de un edificio de oficinas en un edificio de energía casi nula (nZEB): implicaciones para el confort térmico y visual y el rendimiento energético” Evalúan las implicaciones de un escenario de remodelación global en el confort térmico y visual de un edificio de oficinas existente. Las acciones de rehabilitación aplicadas para alcanzar el objetivo de nZEB consisten en una combinación de medidas de rehabilitación de la envolvente y los sistemas técnicos del edificio, tanto en climatización como en iluminación. Los cálculos de energía y confort se realizaron mediante simulación dinámica utilizando Energy Plus y DIVA, para las evaluaciones de desempeño térmico y visual, respectivamente (P. Tootkaboni et al., 2021).

En esta misma línea con el trabajo “Energy performance gap of a nearly Zero Energy Building (nZEB) in Denmark: the influence of occupancy modelling” los autores utilizan un modelo de simulación para analizar el efecto de tres perfiles de ocupación diferentes en el uso final de la energía: el 'Perfil de cumplimiento', definido sobre la base de las regulaciones, el 'Perfil estándar', construido sobre datos promedio obtenidos de encuestas, y el ' Perfil real ', personalizado en datos medidos del caso de construcción real. Se detectan diferencias significativas en los tres perfiles de ocupación diferentes, así como en los resultados obtenidos al aplicar los tres modelos de ocupación en la predicción del rendimiento.(Bruno et al., 2017)

En el trabajo adjunto en la revista científica Journal of Building Performance Simulation los autores Keivan Bamdad, Michael E. Cholette & John Bell, con el fin de mejorar el rendimiento de un método de optimización basado en modelos sustitutos para crear problemas de optimización, se desarrolla una nueva estrategia de muestreo activo que emplea un comité de modelos sustitutos. Esta estrategia selecciona nuevas muestras que se encuentran en las regiones del espacio de parámetros donde las predicciones del modelo sustituto son altamente inciertas y tienen un bajo uso de energía. Los resultados muestran que la nueva estrategia de muestreo mejora el rendimiento del método de optimización basado en modelos sustitutos.

Una comparación entre los métodos de optimización basados en modelos sustitutos y dos métodos de optimización basados en simulación muestra un mejor rendimiento de los métodos de optimización basados en modelos sustitutos que un método de optimización basado en simulación que utiliza el algoritmo PSO. Sin embargo, la optimización basada en la simulación utilizando Ant Colony Optimization encontró mejores resultados en términos de optimalidad en etapas

posteriores de la optimización. Sin embargo, el método propuesto mostró un mejor rendimiento en las primeras etapas de optimización, produciendo soluciones dentro del 1% de la mejor solución encontrada en el menor número de simulaciones.(Bamdad et al., 2020)

## 2. MARCO REFERENCIAL

Las simulaciones de energía de edificios (BES) se ven muy afectadas por las simplificaciones introducidas por las ecuaciones físicas y por la calidad de los datos de entrada. Determinar el efecto que los datos de entrada pueden tener en BES es una tarea compleja, ya que trata con una variedad de fenómenos físicos y estocásticos: condiciones climáticas, transferencia de calor térmico a través de estructuras de edificios, intercambio de calor radiactivo entre ventanas, paredes, radiación solar, comportamiento de ocupación, Rendimiento y control de sistemas HVAC y equipos eléctricos («Uncertainty in building simulation», 2018).

Por esta razón, el Análisis de Incertidumbre ha sido ampliamente adoptado en aplicaciones de simulación de edificios, brindando un marco metodológico para caracterizar las incertidumbres de entrada y evaluar la solidez y confiabilidad de las simulaciones. Este análisis se vuelve aún más crucial cuando la simulación de edificios tradicionales se amplía a escenarios urbanos, ya que muchas propiedades que son bien conocidas en una escala de un solo edificio se vuelven imprecisas cuando se consideran distritos o ciudades. Por lo tanto, el análisis de incertidumbre parece ser una técnica prometedora para evaluar la confiabilidad de las simulaciones de energía a nivel urbano (Risch et al., 2021).

### 2.1. Building Energy Performance Simulation (BEPS)

El uso de Building Energy Performance Simulation (BEPS) se ha vuelto cada vez más popular en la evaluación y evaluación del rendimiento energético de edificios tanto para nuevos como existentes. Las herramientas BEPS facilitan la previsión energética y el análisis del rendimiento energético con varios niveles de detalle.

Tales herramientas implementan un conjunto de relaciones físicas detalladas que emplean numerosos parámetros, cuyos detalles a menudo no están disponibles para los modeladores. Estos parámetros se establecen en valores predeterminados en función de la literatura previa, la experiencia previa o los estándares de la industria que introducen una brecha entre los datos medidos y predichos simulados. Por lo tanto, es crucial limitar el número de parámetros y asociar un rango a cada parámetro para reducir la probabilidad de interpretaciones incorrectas. Usando estos parámetros limitados, los modeladores podrían tener tiempo adicional para adquirir valores precisos de parámetros influyentes. Los modeladores podrían cuantificar aún más la incertidumbre del conjunto reducido de parámetros para generar confianza en los resultados de la simulación. (Salata et al., 2020).

## 2.2. Calibración

La calibración del modelo de construcción es el proceso de mejorar la precisión de la simulación BEM para reflejar el estado de construcción y las condiciones operativas reales (Samuelson et al., 2016). Los modelos energéticos de edificios calibrados se utilizan para realizar un seguimiento del rendimiento de los edificios durante las etapas de puesta en servicio y operación o para identificar y analizar oportunidades para mejorar el rendimiento energético de los edificios existentes durante la etapa de modernización (Coakley et al., 2018). El consumo de energía medido suele utilizarse en el proceso de calibración de energía para una escala de tiempo específica (horaria o mensual). Los modelos térmicos de edificios calibrados se utilizan para realizar un seguimiento de las condiciones térmicas de los edificios durante las etapas de puesta en marcha y operación para los estudios de evaluación de sobrecalentamiento (Ascione et al., 2017). El modelo térmico de construcción calibrado ayuda a estudiar la condición térmica de los edificios en climas futuros,

y/o a analizar diferentes medidas de mitigación para mejorar el confort térmico durante la etapa de modernización (Baba, 2019).

### **2.3. Proceso de calibración**

El uso de modelos calibrados para tal análisis da confianza en la estimación de los impactos del sobrecalentamiento. Por lo general, los datos de monitoreo de la temperatura del aire interior o/y la concentración de CO<sub>2</sub> se utilizan normalmente en el proceso de calibración térmica para una escala de tiempo específica (cada hora o sub hora). Aunque la calibración con una escala de tiempo corta (por hora o por hora) es más complicada y lleva más tiempo que con una escala grande (mensual o anual), puede proporcionar una mejor comprensión del fenómeno físico y producir buenos resultados con pocos errores (Risch et al., 2021).

Hay dos métodos de calibración comúnmente utilizados: 1) Calibración manual y 2) Calibración automatizada.

#### **2.3.1. Calibración manual**

La calibración manual se basa en el procedimiento de prueba y error o la recopilación de datos (procesos de auditoría de edificios) de todas las variables de entrada mediante la realización de mediciones de campo, monitoreo y examen físico para reducir el error entre los datos medidos y los resultados de la simulación. La calibración manual requiere altas habilidades y prácticas por parte de un usuario que principalmente ajusta las variables de entrada en función de su experiencia o



midiendo algunos parámetros, como la tasa de infiltración. Independientemente de las habilidades, este proceso suele tardar mucho tiempo en completarse debido a los repetidos procesos de prueba y error o como resultado de la recopilación de datos. Para comprender mejor el proceso de prueba y error, las variables de entrada se cambian una a la vez en cada ejecución de simulación. Para cada simulación, la salida debe compararse con el modelo original. Varios estudios en la literatura utilizaron el método de calibración manual (Chen et al., 2017).

### **2.3.2. Calibración Automatizada**

La calibración automatizada se basa en métodos matemáticos y estadísticos para minimizar la diferencia entre los datos medidos y simulados. Los procedimientos automatizados a menudo incluyen análisis de sensibilidad para reducir la cantidad de entradas a la herramienta de optimización y reducir el tiempo de cómputo.

Existen dos enfoques principales para la calibración automatizada basada en el método estadístico: 1) enfoque bayesiano y 2) algoritmos evolutivos. El análisis bayesiano es un método de inferencia estadística para calcular distribución de probabilidad posterior de las variables de entrada (Helton et al., 2018).

### **2.4. Análisis de incertidumbre**

La respuesta térmica del edificio y el consumo de energía dependen en gran medida de varios fenómenos, relacionados con las condiciones climáticas, las propiedades de los materiales de la envolvente, el uso de sistemas HVAC y equipos eléctricos, su rendimiento. Rara vez se garantiza el conocimiento perfecto de cada

## 2.5. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad (SA) es el método principal para determinar estos parámetros sensibles y ha sido ampliamente investigado en numerosos estudios y en varios sectores. SA ayuda a la identificación de los límites del sistema en términos de parámetros influyentes, la priorización de la recopilación de datos adicionales y la verificación y validación de un modelo. Al desarrollar un modelo BEPS, es importante que el modelador de energía tenga una sólida comprensión de todos los parámetros (influyentes y no influyentes) dentro del modelo. Numerosos estudios implementan SA para examinar las características del rendimiento térmico de los edificios para diversas aplicaciones, como el diseño y la modernización de edificios, la calibración del modelo energético y el impacto del cambio climático en los edificios. Se sigue un procedimiento idéntico cuando se implementa SA para diferentes aplicaciones; la diferencia fundamental en la formulación de SA radica en la definición de incertidumbre o distribución de probabilidad de los factores de entrada (G. Yang et al., 2018).

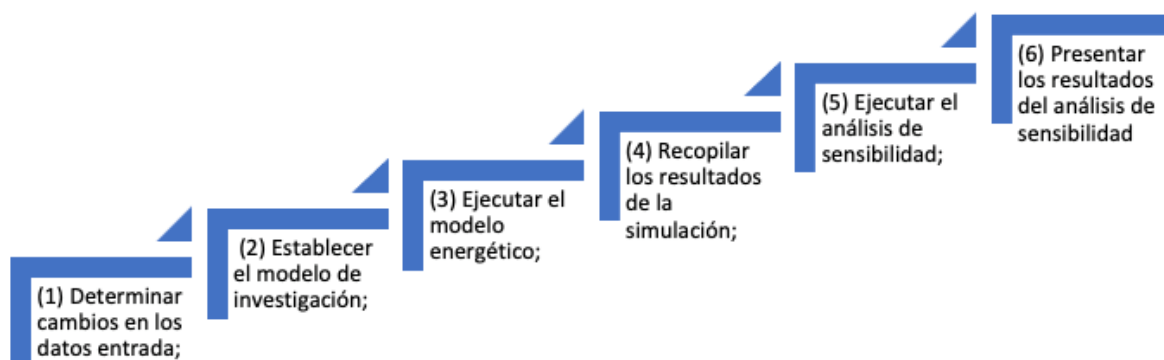
Ampliamente categorizado como SA local y global, el análisis de sensibilidad local (LSA) opera en un parámetro a la vez mientras mantiene los demás parámetros constantes en su valor de referencia.

### 3. DISEÑO DE LA INVESTIGACION

Para el cumplimiento de los objetivos se plantea una metodología de calibración de modelo por sensibilidad de datos. Se define como un análisis de sensibilidad: "Investigación sobre cómo atribuir la incertidumbre de los resultados del modelo (numéricos u otros) a diferentes fuentes de incertidumbre de los datos de entrada del modelo".

El análisis de sensibilidad juega un papel importante en la investigación energética de los edificios. Se puede utilizar para detectar variables clave que afectan el comportamiento térmico de los edificios, ya sea en modelos de simulación energética o bajo investigación observacional. El método de análisis de sensibilidad es el mismo en diferentes tipos de aplicaciones de simulación energética de edificios. En la Figura 1 se presentan dichos pasos a seguir en la aplicación (Tian & Wei, 2019)

Figura 1. Metodología de validación por sensibilidad de datos



Para el cumplimiento de esto se establecen las siguientes actividades planteadas desde la metodología y los objetivos a cumplir.

## **Fase 1. Caracterizar la edificación monitorizada,**

Actividad 1.1. identificación los materiales y longitudes para modelizar la edificación los parámetros estructurales reales.

Actividad 1.2. Caracterización de los materiales constructivo del edificio monitorizado.

Actividad 1.3. Definición y medición espacial de la edificación de estudio.

## **Fase 2. Modelar la edificación**

Actividad 2.1. Seleccionar de la herramienta de simulación

Actividad 2.2. Modelizar de la edificación

Actividad 2.3. Introducir los parámetros constructivos

## **Fase 3. Calibrar el modelo**

Actividad 3.1. Determinar las cargas térmicas internas

Actividad 3.2. Aplicar las cargas de determinadas en la edificación

Actividad 3.3. comparar los modelos calibrados.

Actividad 3.4. Seleccionar el modelo más cercano aplicando

## 4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

La vivienda caso de estudio es seleccionada en torno al proyecto realizado por el autor Ascanio (2021) en su trabajo de “Evaluación del comportamiento térmico de una vivienda convencional en clima cálido-seco con monitorización de termohigrómetros”, donde realiza la monitorización de variables principales como temperatura (T) y humedad relativa (HR), y otras s tales como el índice de calor (IC) y velocidad del aire (v) tanto en el interior como el exterior de la vivienda de estudio. Dentro de este estudio el autor especifica parámetros del objeto de estudio como la ubicación, geometría, dimensiones, y el sistema de construcción de la vivienda caracterizado previamente.

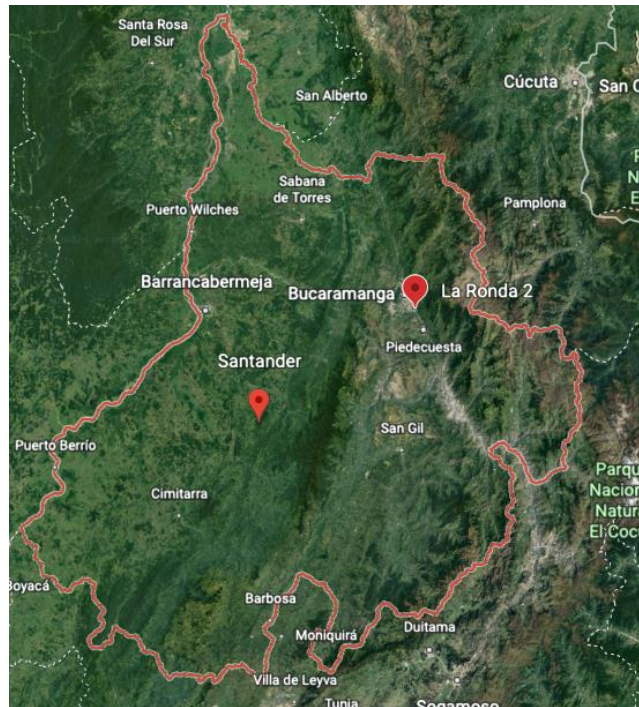
Por lo tanto, este trabajo inicia con identificar los valores de las variables necesarios para alimentar el software DesignBuilder que se encuentran en el trabajo base de Ascanio y que posteriormente se especifican los datos obtenidos del monitoreo de dicho trabajo y así concluir con la recopilación bibliográfica de esta etapa.

### 4.1. Caracterización y recopilación de los datos de entrada

#### 4.1.1. Ubicación

En primer lugar es importante definir la vivienda caso de estudio que será analizada. Para este trabajo, se selecciona una vivienda unifamiliar ubicada en el departamento de Santander en la ciudad de Bucaramanga perteneciente al conjunto de la ronda como se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Ubicación geográfica de la vivienda caso de estudio.

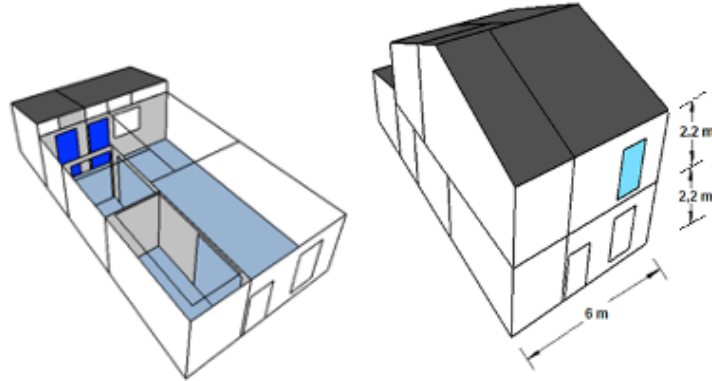


Fuente: (Google Earth, 2022)

#### **4.1.2. Geometría y dimensiones de la vivienda**

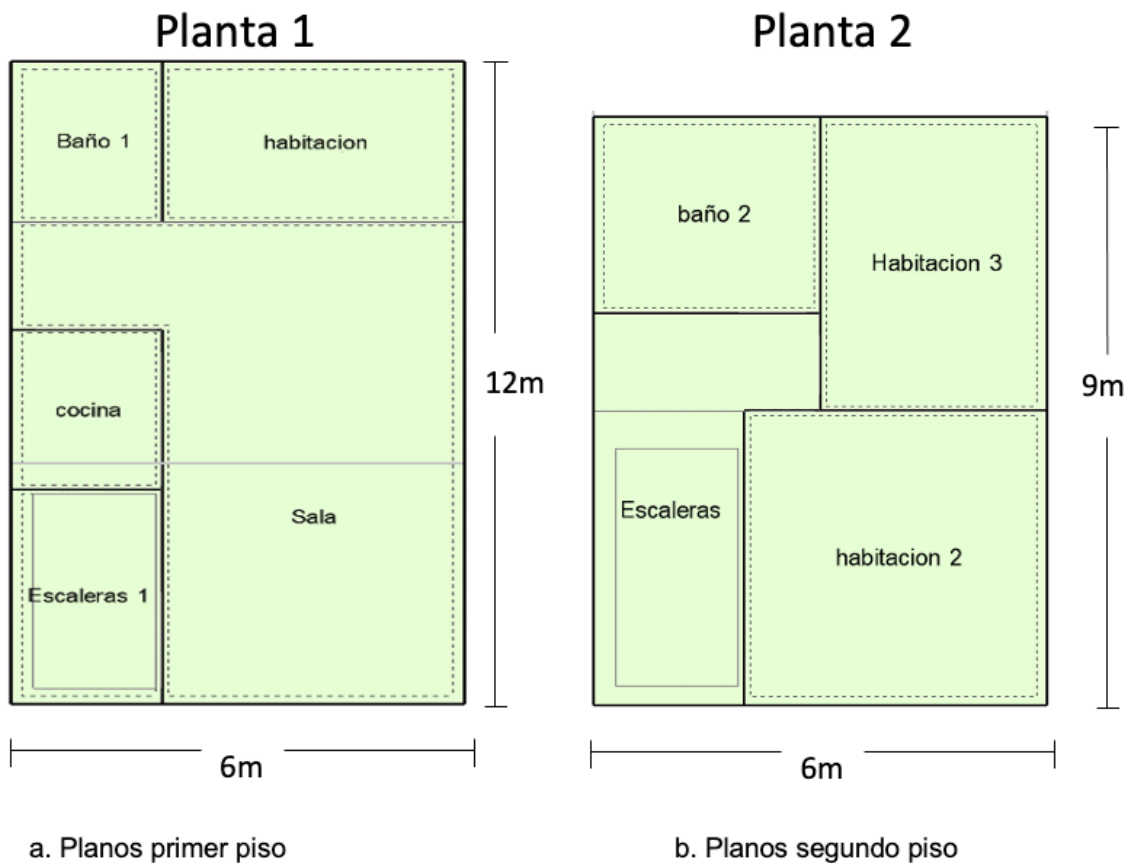
Esta casa cuenta con un total de 126 m<sup>2</sup> de área construida la cual está dividida en dos plantas donde cada una tiene una altura de 2,2 m presentadas en la Figura 3. La primera planta cuenta con 6 m de frente y 12 m de profundidad lo cual se muestra en la Figura 4a y se compone de una habitación principal con baño privado, cocina, sala comedor y unas escaleras internas que conllevan al segundo piso (ver Figura 4b) donde se encuentra la segunda y tercera habitación junto con un baño común, esta planta se distribuye en 6m de frente y 9m de profundidad.

Figura 3. Plano en vista 3D de la vivienda caso de estudio.



Fuente: (Ascanio, 2021)

Figura 4. Planos de distribución de la vivienda



Fuente: adaptada de (Ascanio, 2021)

#### 4.1.3. Orientación

La vivienda se encuentra ubicada a  $7^{\circ}03'32''$  del Norte y  $73^{\circ}04'54''$  W y 930m a nivel del mar como se evidencia en la Figura 5.

Figura 5. Georreferenciación de la vivienda.



#### 4.1.4. Envolverte

El sistema de construcción de la vivienda se conforma de la siguiente manera:

- Muro portante exterior
- Muro de partición
- Piso
- Cubierta
- Acristalamiento



#### 4.1.4.1 Muro portante exterior

El muro portante exterior hace referencia al soporte de la carga de la vivienda y está compuesto de numerosas capas diferentes materiales como se observa en la Figura 6 este muro cuenta con capas de concreto, acero y estuco.

Figura 6. Representación de los materiales en capas que conforman el muro portante exterior



Fuente: (Ascanio, 2021)

Es importante caracterizar los materiales utilizados en el muro portante exterior, es por esto que en la Tabla 1 se realiza la caracterización térmica.

Tabla 1. Materiales del muro portante exterior caracterizados térmicamente.

Concepto	Unidades de medida	Valor
Espesor	m	0,014
Coefficiente de transferencia de calor por convención	W/m <sup>2</sup> -k	2,152
Coefficiente de transferencia de calor por radiación	W/ m <sup>2</sup> -k	5,54
Resistencia superficial	m <sup>2</sup> -k/W	0,13

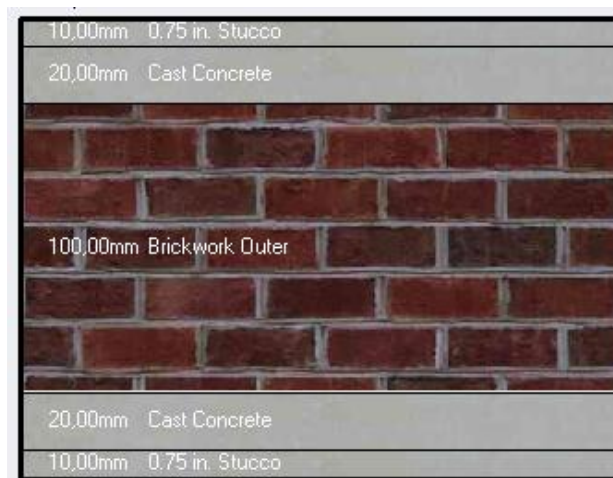
Concepto	Unidades de medida	Valor
Valor U de superficie a superficie	w/ m <sup>2</sup> -k	11,472
Absortancia térmica (emisividad)	-	0,9
Valor R	m <sup>2</sup> -K/w	0,347
Valor U	w/ m <sup>2</sup> -k	2,88

Fuente: adaptado de (Ascanio, 2021)

#### 4.1.4.2 Muro de partición

El muro de partición es el encargado de la distribución interna de los espacios de la vivienda, por lo que no realizan funciones como soportar cargas o de resistencia. Estos muros son conformados por capas de materiales de ladrillos de bloque, cemento y estuco. En la Figura 7 se describe el área de cada capa y el material que lo compone.

Figura 7. Representación de los materiales en capas que conforman el muro partición



Fuente: (Ascanio, 2021)

Una vez descrito los materiales que componen el muro de partición se realiza la caracterización térmica de dichos materiales en la Tabla 2.

Tabla 2. Materiales del muro de partición caracterizados térmicamente.

Concepto	Unidades de medida	Valor
Espesor	m	0,16
Coficiente de transferencia de calor por convención	W/m <sup>2</sup> -k	2,152
Coficiente de transferencia de calor por radiación	W/m <sup>2</sup> -k	5,54
Resistencia superficial	m <sup>2</sup> -k/W	0,13
Valor U de superficie a superficie	w/m <sup>2</sup> -k	5,909
Valor R	m <sup>2</sup> -K/w	0,429
Valor U	w/m <sup>2</sup> -k	2,33
Absortancia térmica (emisividad)	-	0,9

Fuente: adaptado de (Ascanio, 2021)

#### **4.1.5. Datos del monitoreo realizado con los termohigrómetros en la vivienda de estudio**

La adquisición de los datos de monitoreo se realizó por medio de ocho termohigrómetros, los cuales son instrumentos para medir variables como, la temperatura (T), la humedad relativa (HR), el Índice de Calor (IC) y la velocidad del aire (V) instalados tanto en la parte interna como en la externa de la vivienda caso de estudio.

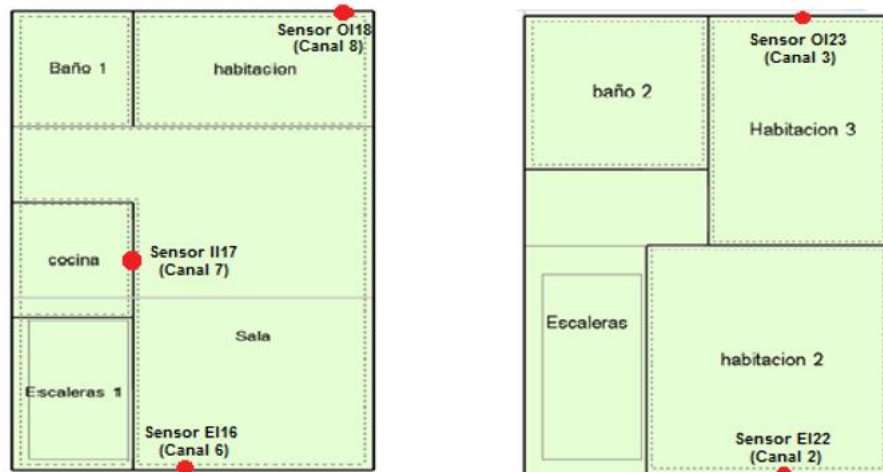
Estos 8 sensores son distribuidos por diferentes partes internas y externas tanto de la primera como la segunda planta de la casa como se observa en las Figura 8 y Figura 9 . Los autores codificaron cada sensor de tal manera que se identifique dentro de una ubicación específica y en orden de las coordenadas geográficas como se evidencia en la Tabla 3

Tabla 3. Distribución de los sensores en las diferentes partes de la vivienda.

Zona base de estudio / Ubicación Geográfica	Distribución de sensores	Ubicación	Período de toma de datos
Vivienda caso de estudio / 7°03'32" N 7°04'54" W	Canal 1 (EE21)	Zona oriental Muro externo – Planta 2 Cubierta: Teja de arcilla cocida y madera aislante (machimbre)	06/05/2021 - 06/06/2021
	Canal 2 (EI22)	Zona oriental Muro interno – Planta 2 Cubierta: Teja de arcilla cocida y madera aislante (machimbre)	06/05/2021 - 06/06/2021
	Canal 3 (OI23)	Zona occidental Muro interno – Planta 2 Cubierta: Teja de arcilla cocida y madera aislante (machimbre)	06/05/2021 - 06/06/2021
	Canal 4 (OE24)	Zona occidental Muro externo – Planta 2 Cubierta: Teja de arcilla cocida y madera aislante (machimbre)	06/05/2021 - 06/06/2021
	Canal 5 (EE15)	Zona oriental Muro externo – Planta 1 Cubierta: Plancha metálica de zinc	06/05/2021 - 06/06/2021
	Canal 6 (EI16)	Zona oriental Muro interno – Planta 1 Cubierta: Placa de concreto	06/05/2021 - 06/06/2021
	Canal 7 (II17)	Zona central (Intermedia de la vivienda) Muro interior – Planta 1 Cubierta: Placa de concreto	06/05/2021 - 06/06/2021
	Canal 8 (OI18)	Zona occidental Muro interno – Planta 1 Cubierta: Teja de arcilla cocida y madera aislante (machimbre)	06/05/2021 - 06/06/2021

Fuente: adaptado de (Ascanio, 2021)

Figura 8. Ubicación de los sensores en la primera y segunda planta en la vivienda

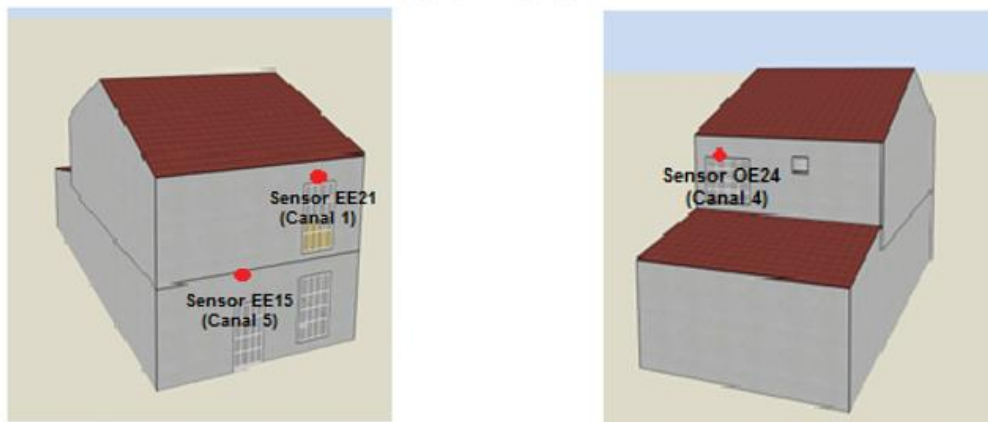


a. Distribución de los sensores en la primera planta de la vivienda

b. Distribución de los sensores en la segunda planta de la vivienda

Fuente: (Ascanio, 2021)

Figura 9. Ubicación de los sensores en la parte externa de la vivienda



a. Distribución de los sensores ubicados en la zona oriental exterior de la vivienda

b. Localización del sensor ubicado en la zona occidental exterior de la vivienda

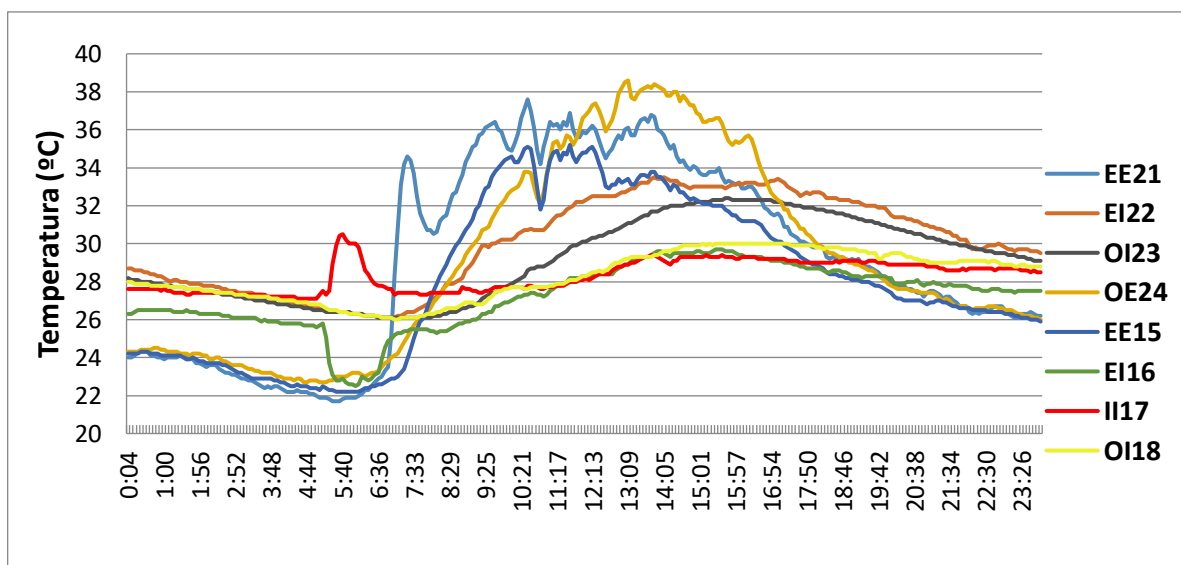
Fuente: (Ascanio, 2021)

#### 4.1.6. Resultados de la adquisición de datos

Con el sistema de monitoreo instalado, el autor realizó la monitorización desde el día 06/05/2021 a las 0 horas y finalizando el día 06/06/2021 a las 23:59 horas en un centro de control compuesto por el sistema de sensores y un computador con el software Datalogger el cual proporciona los datos almacenados en tiempo real. Los datos se almacenaron de manera automática para los ocho sensores y adquiriendo valores cada 5 minutos durante el día.

De este monitoreo se resaltan 2 días los cuales se caracterizan por ser tanto el día más caluroso como el menos caluroso. El 14 de mayo se considera el día más caluroso debido a que en los 6 sensores registra la temperatura más alta, en la Figura 10 se presenta una evolución de la variable temperatura durante este día y en la Figura 10 la evolución de la humedad durante este tiempo. Como se puede observar las líneas de colores representa cada medida de un sensor en específico.

Figura 10. Evolución de la temperatura durante el día más caluroso entre el periodo de monitoreo.



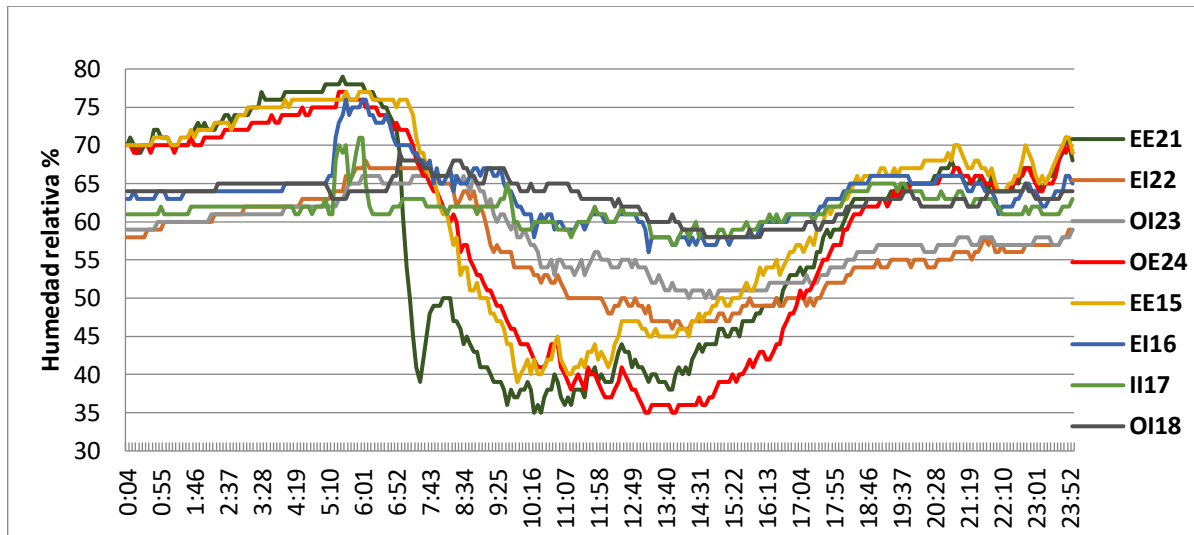
Fuente: (Ascanio, 2021)

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

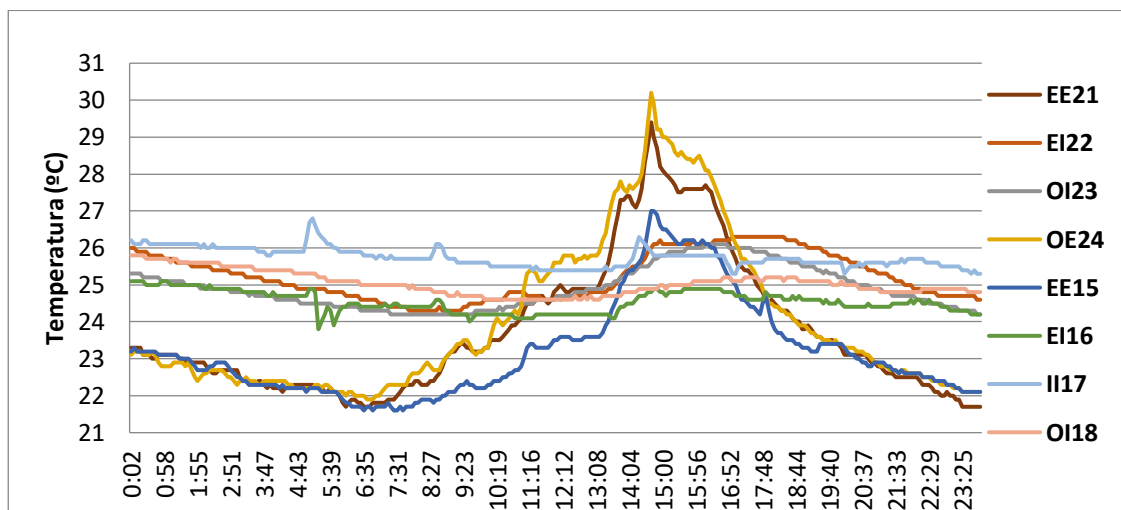
Figura 11. Humedad Relativa durante el día 14 de mayo (día más caluroso)



Fuente: (Ascanio, 2021)

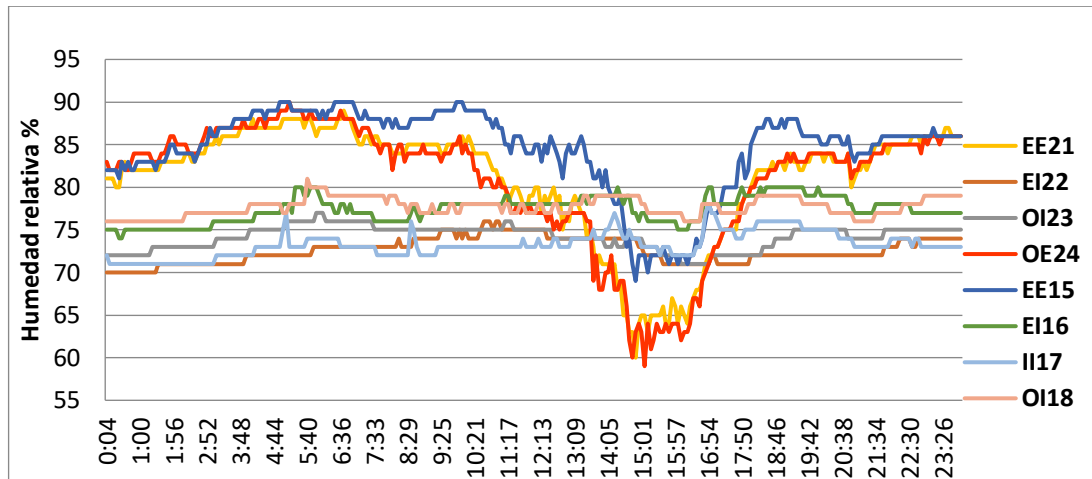
Para el día menos caluroso el cual se presentó el 29 de mayo, se presenta su evolución en la Figura 12 donde se observa que la mayoría de sensores no sobrepasan los 28 °C durante el día. En la Figura 13 se presenta la evolución de la humedad relativa durante este día registrando valores máximos hasta del 90%.

Figura 12. Evolución de la temperatura el 29 de mayo (día menos caluroso)



Fuente: (Ascanio, 2021)

Figura 13. Evolución de la humedad relativa del 29 de mayo (día menos caluroso)



Fuente: (Ascanio, 2021)

#### 4.2. Elaboración del modelo de vivienda en el software DesingBuilder

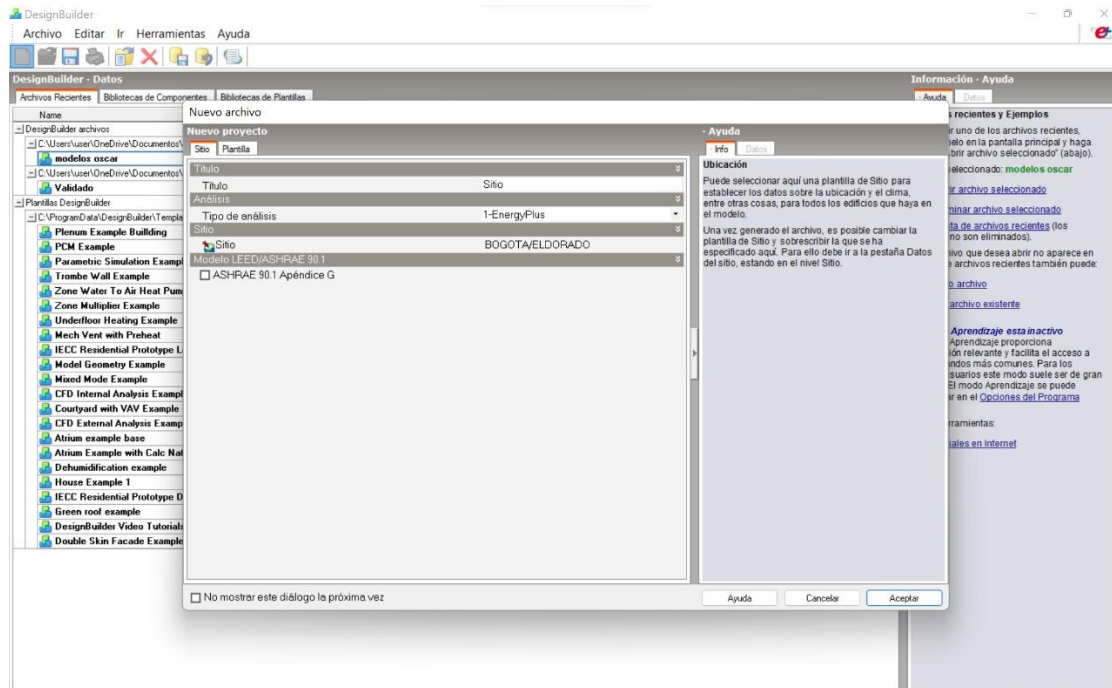
Una vez caracterizado la vivienda y definiendo sus dimensiones y geometría reales, los materiales de construcción y el sistema constructivo se diseña un modelo en 3D por medio del software Design Builder la vivienda caso de estudio con el objetivo de realizar la simulación adecuada.

La primera etapa para elaborar el modelo se desarrolla en la interfaz de inicio del programa visualizada en la Figura 14, donde se encuentran plantillas pre establecidas con las que cuenta el programa. Para este caso se crea un nuevo proyecto.

Para empezar, se hace necesario de ingresar información geográfica con el fin de asignar una ubicación exacta de donde se va a realizar el proyecto. Se le asigna un nombre para ser identificado y se establece en el menú el país y ciudad de locación. Para este caso sería proyecto la Ronda, Colombia, Bucaramanga.

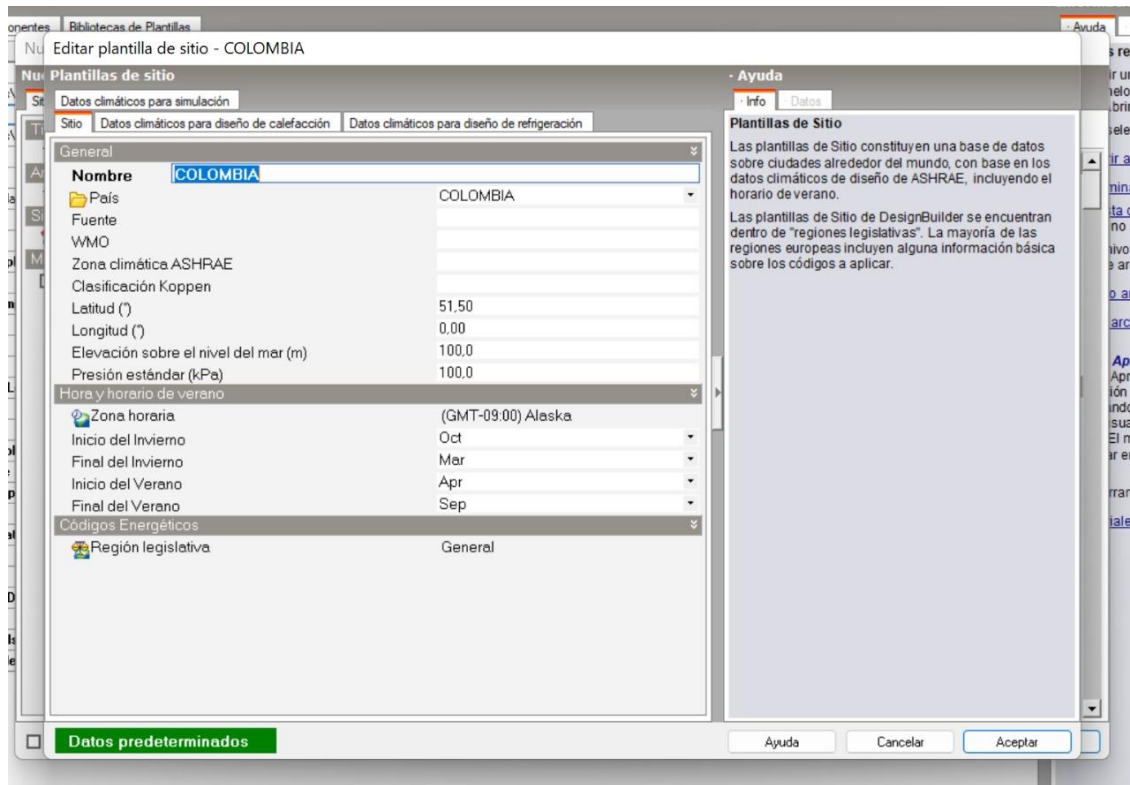


Figura 14. Interfaz de inicio de Design Builder



La información usada en la simulación, se obtuvo de la recopilación realizada anteriormente del proyecto realizado por el autor Ascanio (2021), esta información contiene las medidas de los parámetros de temperatura, humedad relativa, velocidad, dirección del viento, índice de calor como datos climáticos del sitio donde se encuentra la vivienda. Para asignar la localización se hace necesario pulsar en el icono (+), se crea la ciudad y se carga el archivo adquirido del estudio de los termohigrómetros como se muestra en la Figura 15.

Figura 15. Cargar el archivo de los datos climatológicos medidos en el estudio de monitoreo con termohigrómetros a DesignBuilder



Una vez importados los datos climatológicos se seleccionan los tipos de capas que se van a trabajar y visualizar en el modelo, esto se realiza con el objetivo de reducir el peso del archivo en el proceso de elaboración del modelo. Al finalizar esta etapa se observa un plano guía que facilita la construcción del modelo.

Principalmente se pretende diseñar las características de la vivienda real lo más exacto posible en el programa. Con el fin de validar el sistema de medición determinando el comportamiento energético de la vivienda, siendo lo más cercano a la realidad.


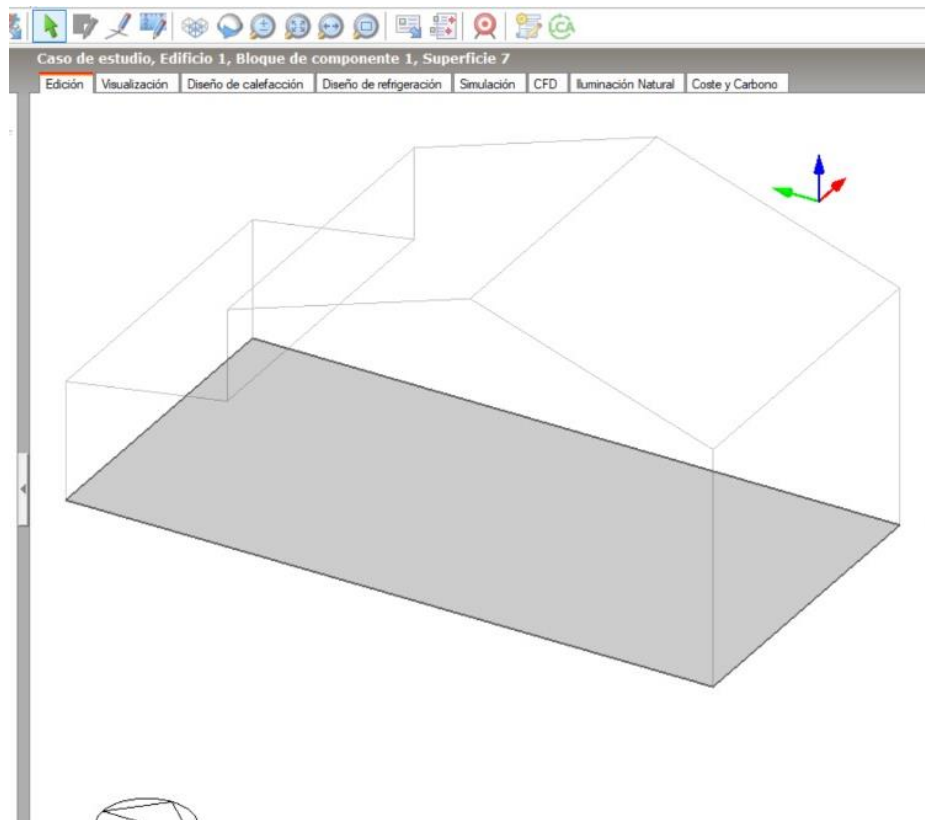
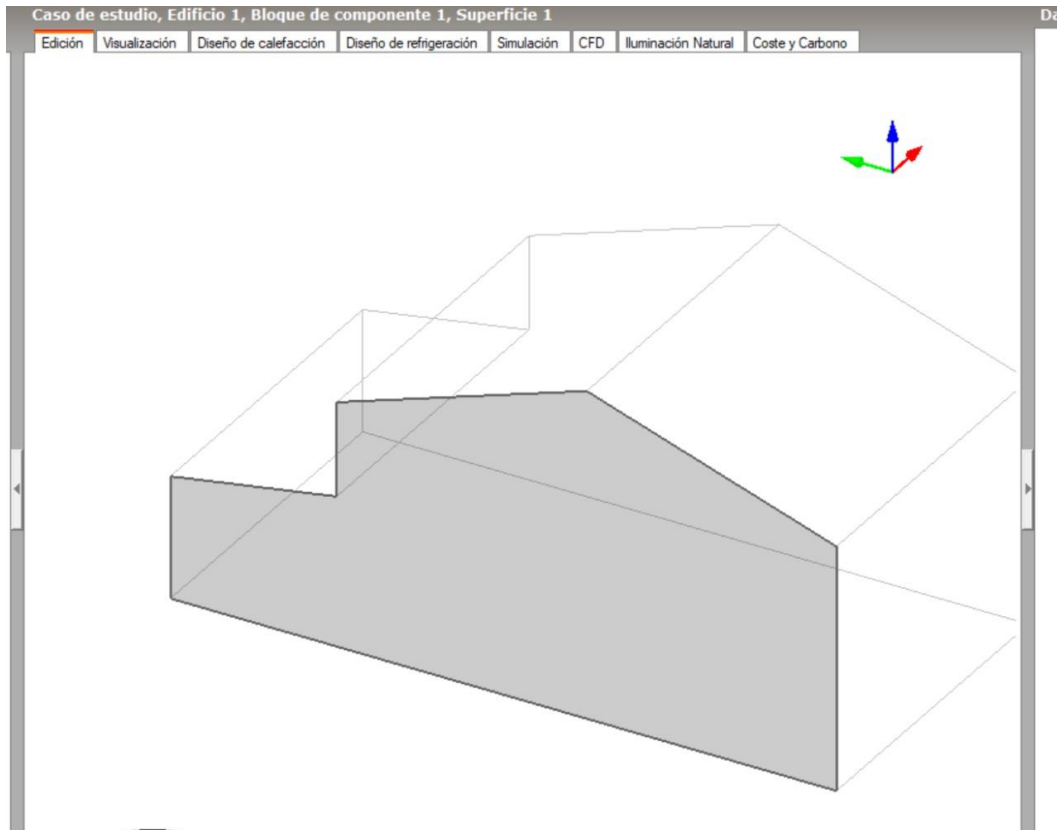
Para construir la primera planta, se hace necesario agregar un bloque el cual aparece en el icono  y a partir de esto aparece un menú en la barra izquierda, que permite la selección del tipo de bloque, definiendo tanto su grosor, altura y tipos de muros exteriores. Para este caso se utiliza el mostrado en la Figura 16.

Figura 16. Creación de bloques de la primera planta del modelo en DesignBuilder.



Una vez creada la planta, se seleccionan las caras externas hasta originar un contorno en el bloque, utilizado como cerramiento de muros exteriores del primer nivel (ver Figura 17).

Figura 17. Creación de los muros exteriores de la primera planta en DesignBuilder.



Quando se encuentre creado este piso, en la parte izquierda del del programa se visualiza un menú, allí se puede observar que cada bloque contiene una zona. Esto significa que a medida que se vaya avanzando en la creación de muros interiores, van apareciendo diferentes zonas como se observa en la

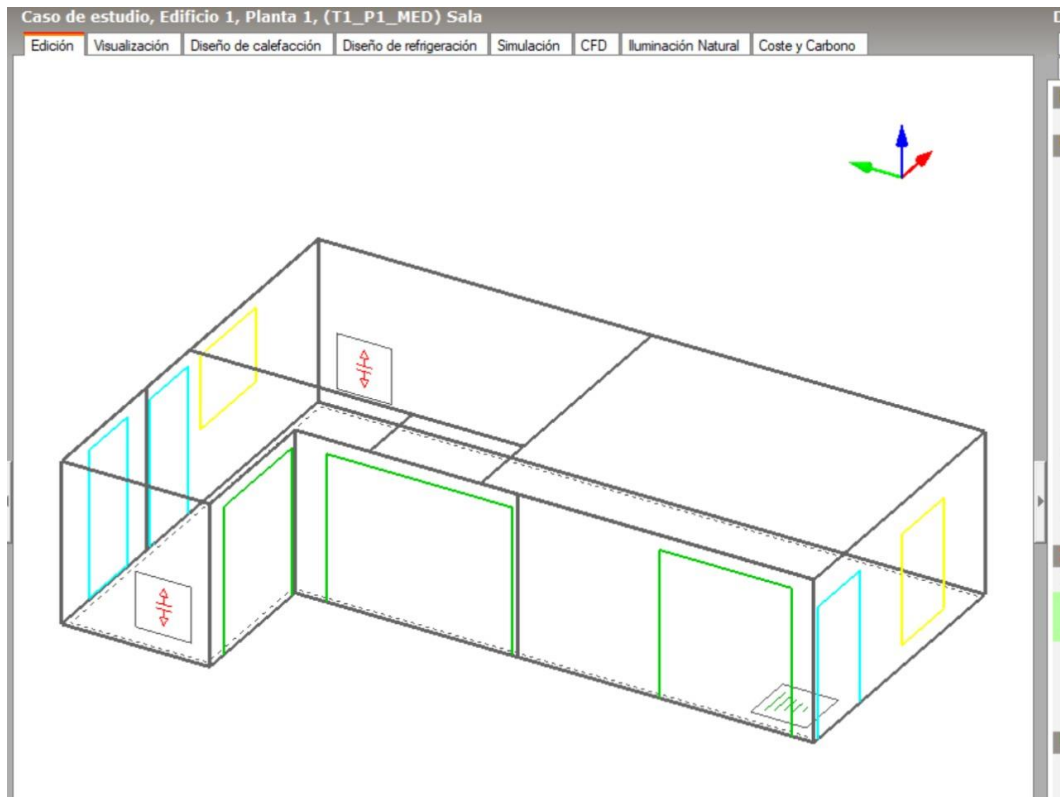
Figura 18. En el momento de desplegar en cada zona se construye cada una de las caras, es decir, cubierta y los diversos muros y suelo.

Figura 18. Creación muros interiores de la primera planta en DesignBuilder.

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:



Asimismo, se construye la segunda planta que será el segundo piso de la vivienda.

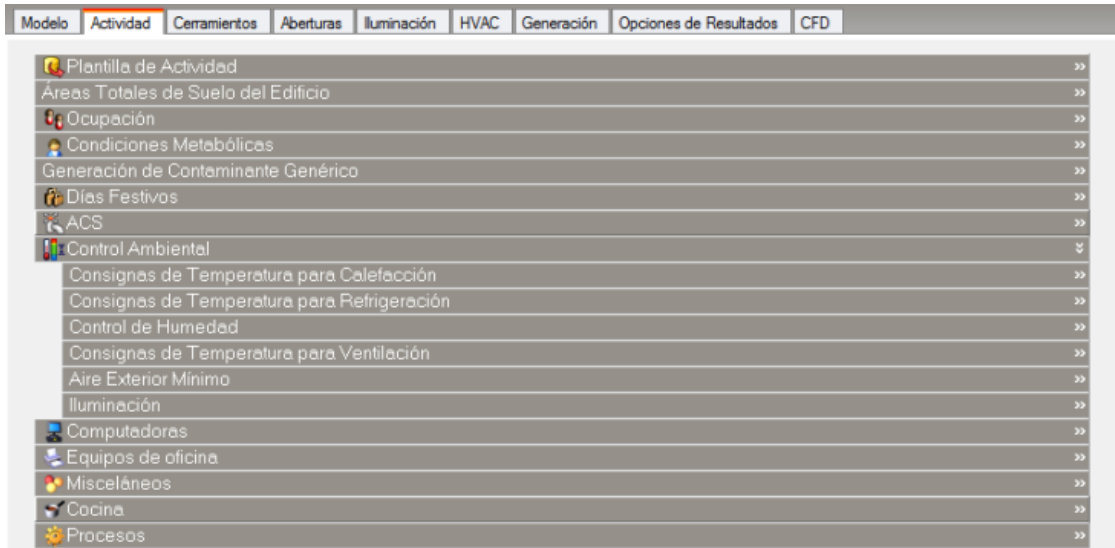
### 4.3. Ingreso de datos en el software

Una vez modelada la vivienda, se deben ingresar datos en Design Builder referentes a las siguientes etiquetas de cada plantilla:

#### 4.3.1. Plantilla ACTIVIDAD

Dentro de esta plantilla ACTIVIDAD se deben ingresar datos con respecto a las zonas y se encuentran las etiquetas vistas en la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida..**

Figura 19. Descripción de las opciones de la pestaña actividad en DesignBuilder.



#### 4.3.1.1 Ocupación

En la pestaña de actividad (se ingresan datos con respecto a las zonas), se encontrará el primer parámetro que será la densidad de ocupación, acá se define si la vivienda se encuentra ocupada y cuantas personas.  $m^2$  se encuentra. El programa viene con valores predeterminados. En este caso es de 0,0390 personas  $m^2$  ya que se genera este valor automáticamente después de definir la programación (ver Figura 20).

Figura 20. Plantilla de ocupación seleccionada-programación predeterminada en DesignBuilder.



#### 4.3.1.2 Condiciones metabólicas

Para la etiqueta de condiciones metabólicas se determina la cantidad de calor que se produce por persona en el interior de la vivienda. Este valor es predeterminado según la zona específica en el software. Se deben ingresar datos en vestimenta, en este caso se selecciona vestimenta genérica de verano y su factor es generado automáticamente por el programa la cual está basada en las tasas metabólicas descritas por la ASHRAE.

Figura 21. Detalle de la etiqueta metabolismo en DesignBuilder.



#### 4.3.1.3 Control ambiental

En esta etiqueta se ingresan los datos de temperatura que generan los equipos de calefacción, aire acondicionado y diferentes controles de humedad los cuales se

tendrán en cuenta en el análisis. A estas etiquetas se les asigna valores altos para que no interactúen como la refrigeración y calefacción (ver Figura 22).

Asimismo, se necesita ingresar el valor de la temperatura para la ventilación natural ya que el programa lo requiere para el análisis de control de acceso de aire exterior, por lo que se fija un valor de 24°C debido a que es un área totalmente residencial.

Figura 22. Detalle del control ambiental en Design Builder.



#### 4.3.1.4 Computadores

La etiqueta computadores es un dato que se debe definir ya que el uso de estos equipos generan ganancias internas de calor y se agrupa en un valor único, el cual se tiene en cuenta para el análisis. En la Figura 23 se observa la activación de la casilla donde funcionara de manera síncrona con la etiqueta de ocupación.



Figura 23. Detalle de asignación de computadores en Design Builder.



#### 4.3.1.5 Misceláneos

Las particiones (muros internos) generan zonas térmicas automáticamente, por lo que la etiqueta misceláneos puede ser activada o dejar sin activar. Este dato permite determinar la tasa de ganancias de calor internas generadas en los diferentes espacios.

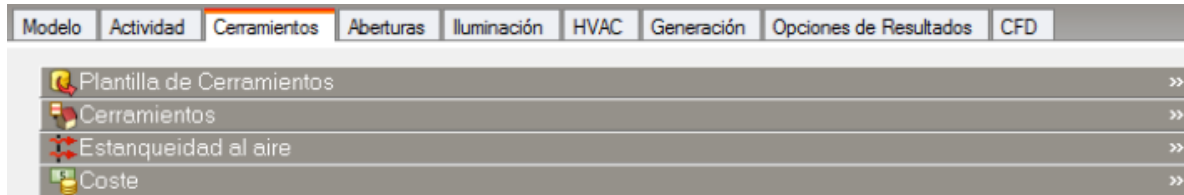
Figura 24. Descripción de los misceláneos en Design Builder.



#### 4.3.2. Plantilla CERRAMIENTOS

En la plantilla cerramientos se debe detallar el modelado de conducción de calor (en la se detallan las opciones de etiquetas para la plantilla cerramiento)

Figura 25. Opciones de etiqueta para la plantilla cerramiento en Desing Builder.



#### 4.3.2.1 Cerramiento

En la etiqueta de cerramiento se detalla el material de construcción utilizado en los muros y el suelo se definen en cada etiqueta del modelo. En la Figura 26 se observan las opciones seleccionadas para los diferentes cerramientos las cuales están basadas en los materiales descritos previamente en la recopilación del modelo real.

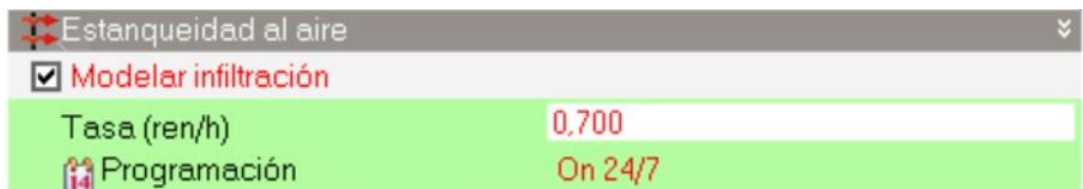
Figura 26. Descripción de las opciones seleccionadas en cerramientos en Desing Builder.



#### 4.3.2.2 Estanqueidad del aire

En esta etiqueta se determinan las posibilidades de infiltraciones de aire que no son permitidas intencionalmente, por ejemplo, se refiere al aire que ingresa por aberturas, grietas o aberturas generadas por fallas técnicas. El programa contiene una opción llamada modelar infiltración como se observa en la Figura 27, por lo que desarrolla plantillas de grietas que serán asumidas al momento de realizar la simulación.

Figura 27. Etiqueta de estanqueidad del aire.



- **Plantilla de grietas:** En esta plantilla de grietas predefinida se varían los coeficientes de Delta T y velocidad del viento. La hermeticidad se define mediante una escala de cinco puntos, en este caso se inicia seleccionando la opción *medio* como se muestra en la Figura 28.

Figura 28. Plantilla de grietas en Design Builder.



### 4.3.3. Aberturas de las ventanas

#### 4.3.3.1 Plantilla Acristalamiento

En la plantilla acristalamiento se realiza la identificación de cada vano de las diferentes zonas de la vivienda con la especificación de sus características. En esta sección se identifican los tipos de marco, divisores y geometría (ver

Figura 29).

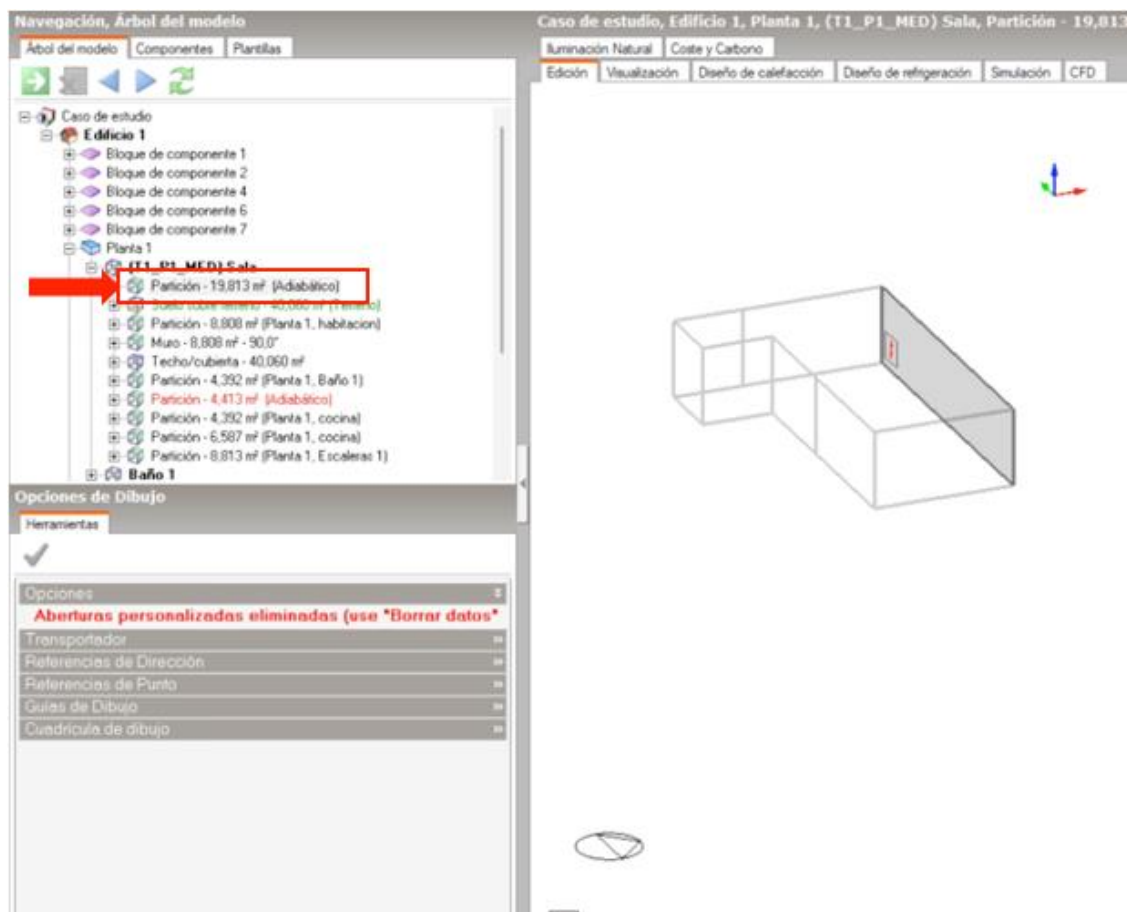
Figura 29. Plantilla acristalamiento



#### 4.3.4. Adyacencia entre zonas térmicas

La adyacencia se considera cuando dos zonas térmicas se encuentran una al lado de la otra y coinciden con cualquier elemento. Para este proyecto se define el modelo como una zona adyacente en condición adiabática como se observa en la Figura 30, lo que quiere decir que los cerramientos que se encuentran en contacto con él son adyacentes a otro lugar con condiciones térmicas muy parecidas, lo cual indica que no se presenta ningún intercambio térmico hacia el exterior.

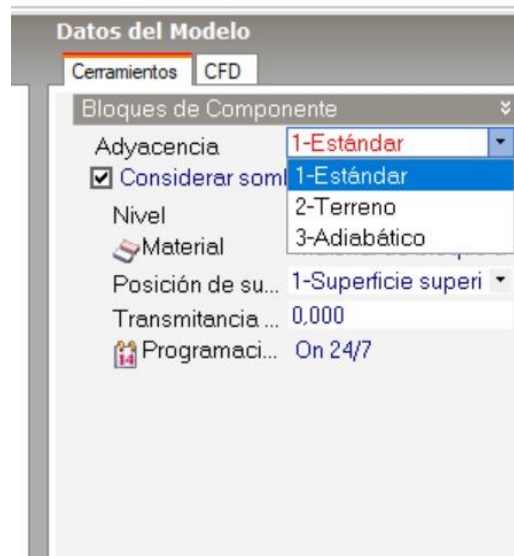
Figura 30. Detalle de los bloques adyacentes en condición adiabática.



#### 4.3.5. Puentes térmicos

Los sub-superficies se refieren a parte de los cerramientos donde cambia la composición, es decir, donde se varían las capas de materiales. Aquí es donde se modelan los puentes térmicos. Estos puentes térmicos se asocian con las juntas de diversos elementos constructivos del edificio, como la cubierta-muro, muro-suelo, entre otros. Los valores que trabaja DesignBuilder están basados en la National Calculation Methodology (NCM) del Reino Unido. Sus unidades de medidas se dan en Psi. Es posible aplicar un efecto de puente térmico a cada capa del cerramiento, para ello se debe seleccionar el bloque de componente “Estándar”, definir el material que representa las condiciones del puente térmico e indicar la posición de superficie como se muestra en la Figura 31.

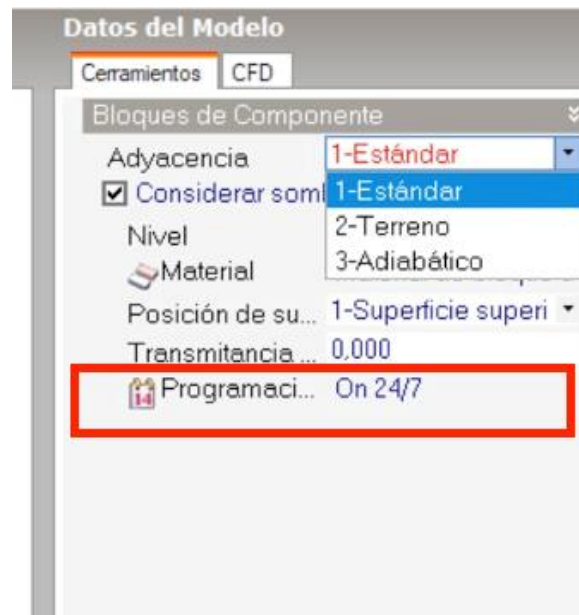
Figura 31. Descripción de puentes térmicos en DesignBuilder.



#### 4.3.6. Horario de Ocupación de las cargas térmicas internas (computador, misceláneos equipos)

La sincronización se modela de manera simplificada en horarios definidos con hora de inicio y finalización o con programaciones compactas. En este caso de modelo se programó “On 24/7” como se observa en la Figura 32.

Figura 32. determinar el horario de programación de las cargas internas.



#### 4.4. Comparación de los modelos (Análisis de sensibilidad)

El análisis de sensibilidad se puede aplicar para examinar las características del rendimiento térmico de los edificios para diversas aplicaciones, como el diseño y la modernización de edificios, la calibración del modelo energético y el impacto del cambio climático en los edificios (Tian, 2018). Este análisis se categoriza como local

y global, el análisis de sensibilidad local (LSA) opera en un parámetro a la vez mientras mantiene los demás parámetros constantes en su valor de referencia. LSA es particularmente útil cuando se formula un modelo BEPS utilizando recursos limitados debido a la capacidad de delinear el conjunto preciso de parámetros influyentes (Menberg et al., 2018). Esta técnica considera una probabilidad igual de ocurrencia para cada parámetro sin considerar el efecto del rango y la forma de la función de distribución de probabilidad (PDF), lo que socava cualquier correlación entre los parámetros de entrada (Kristensen & Petersen, 2019).

Los métodos LSA generalmente funcionan como una técnica de eliminación preliminar para reducir grandes conjuntos de parámetros a conjuntos más pequeños y manejables para el análisis de sensibilidad global (GSA). Heiselberg et al. (2019) usó el método de un parámetro a la vez y aplicó un "índice de sensibilidad" para omitir los parámetros menos influyentes antes de la aplicación de GSA. Los métodos que entran en esta categoría funcionan en un marco probabilístico por lo que se incorporan el efecto y el rango de un parámetro de entrada. Existen varios métodos bajo GSA, incluidos los métodos basados en la detección, los métodos de regresión y los métodos basados en la varianza. El método GSA más popular en BEPS es el método de regresión debido al costo computacional moderado y la relativa facilidad de implementación.

Por lo tanto, para este trabajo se utiliza el método GSA, donde se crean modelos variando los parámetros influyentes durante 30 días del mes de mayo. No todos los parámetros de construcción tienen la misma probabilidad de influir en el uso de energía del edificio. Por lo tanto, es crucial identificar estas características que influyen significativamente en los resultados del edificio. Por ende, es importante,



eliminar la información irrelevante y redundante y solo seleccionar el conjunto de características informativas requeridas.

Estos parámetros son seleccionados con respecto a los resultados que se quieren obtener, es decir, solo se tienen en cuenta aquellos relacionados con las cargas térmicas mencionados a continuación:

- **Etiqueta de equipos de oficina, Etiqueta de computadores (ordenador) y misceláneos:** en esta etiqueta se varia si se hace uso de equipos de oficina, computadores y misceláneos variando los valores por lo que en algunos modelos se activara esta casilla como caso contrario para otros modelos.
- **Plantilla de grietas:** esta plantilla se varia conforme el nivel de estanqueidad al aire que será empleado sólo para calcular la infiltración, y se define en la pestaña de datos de Cerramientos.
- **Adyacencia adiabática o no adiabáticas con viviendas aledañas:** esta opción de adyacencia con muros adiabáticos con otros elementos en contacto exterior será variado en la simulación de los modelos.
- **Programación de horario:** la programación se varía entre horario 24 horas 7 días de la semana y todos los días de 8 am a 6 pm.
- **Variación de puente térmicos:** se varían los puentes térmicos para los cerramientos en las ventanas.

**F-DC-125**

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE  
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,  
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO**

**VERSIÓN: 1.0**

**ELABORADO POR:**  
Oficina de Investigaciones

**REVISADO POR:**  
soporte al sistema integrado de gestión

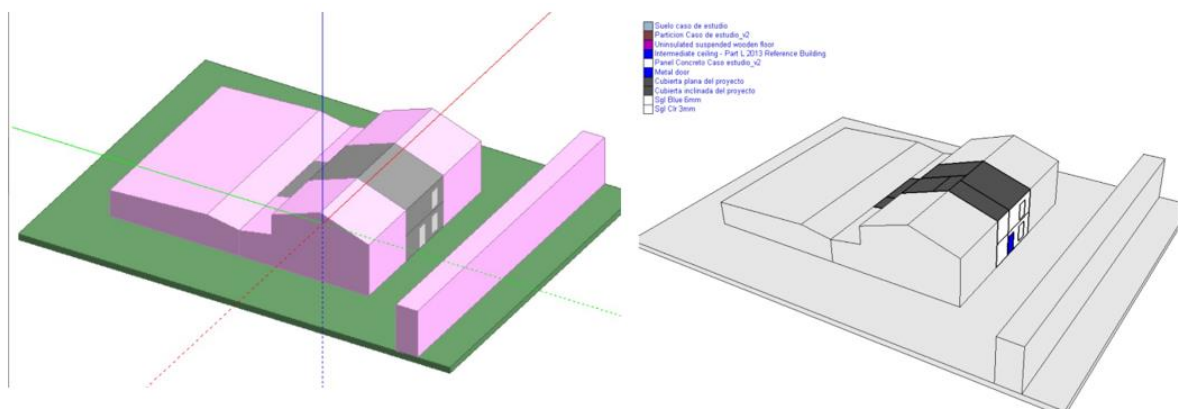
**APROBADO POR:** Asesor de planeación  
**FECHA APROBACION:**

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Modelado

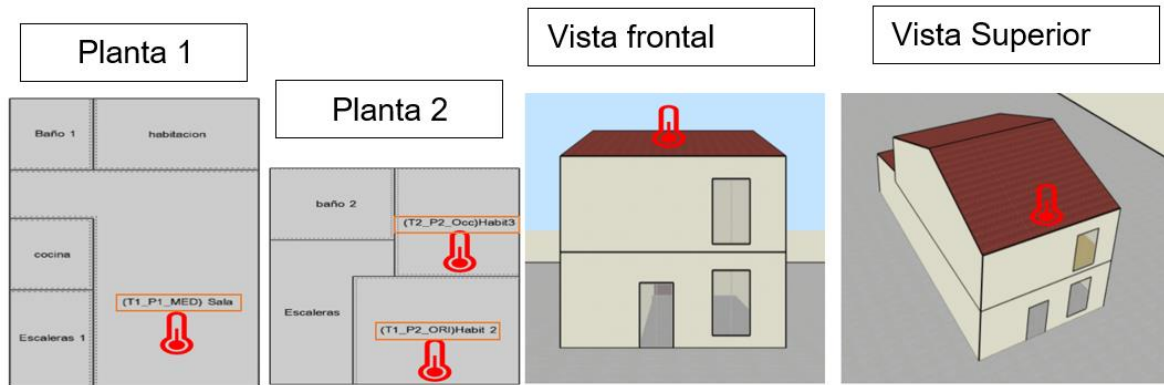
Una vez recopilado los datos de entrada del programa DesignBuilder sobre las características de la vivienda y agregado los datos climatológicos monitorizados en tiempo real por los termohigrómetros, los cuales son extraídos del proyecto base, se realiza el primer modelo de la vivienda caso de estudio (ver Figura 33).

Figura 33. Modelo de la vivienda realizado en DesignBuilder.



Como se observa en la Figura 34, se identifican las zonas de estudio con el símbolo de temperatura. La zona 1 hace referencia a la primera planta y el análisis se realiza en el área de la sala debido a que las demás temperaturas medidas en el mismo piso presentaban valores iguales. En la planta 2 se determinan dos zonas de estudio la zona 2 se ubica en la segunda habitación y asimismo, se designa como zona 3 la tercera habitación.

Figura 34. Zonas de estudio y simulación de la vivienda



Con las zonas de estudio seleccionadas, se desarrolla las simulaciones en tiempo en real con los datos climáticos suministrados por el proyecto anterior. Estas simulaciones se realizan por hora durante el mes de mayo contando 30 días.

## 5.2. Simulación

En esta sección se describe el desarrollo de 18 modelos a los cuales se les ha variado los parámetros influyentes en las cargas térmicas internas como equipos, computadores (ordenadores), misceláneos, plantilla de grietas, adyacencia adiabática o no adiabáticas con viviendas aledañas para algunos modelos, programación de horario variado y se insertaron puentes térmicos en las ventanas.

Posteriormente, se realiza el proceso de análisis simulando el modelo con cada parámetro de entrada insertado en el programa. Esto proporciona una resolución de cómo varía el comportamiento térmico de energía del edificio en función de cada parámetro de entrada examinado.

Estas simulaciones proporcionan datos paramétricos para realizar el método de dispersión y calibrar el modelo diseñado con el modelo real. Es importante mencionar que para cada zona se desarrollan análisis diferentes. En la Tabla 4 se presentan las variables registradas como el día que se está simulando, el año, el mes, la semana y la hora. Por otra parte, también se visualiza la temperatura exterior (T.EXT) y temperatura medida por el monitoreo con los termohigrómetros (T1\_M).

Tabla 4. Variables requeridas para el método de dispersión aplicado a cada modelo

Día	Año	Mes	Día	Hora	Semana	T. EXT	T1_M
1/05/2021	2021	1	1	1	1	23,2	25,5
1/05/2021	2021	1	1	2	1	22,5	25,4
1/05/2021	2021	1	1	3	1	21,9	25,2
1/05/2021	2021	1	1	4	1	21,7	25,1
1/05/2021	2021	1	1	5	1	21,6	25,0
1/05/2021	2021	1	1	6	1	21,1	25,1
1/05/2021	2021	1	1	7	1	21	25,2
1/05/2021	2021	1	1	8	1	21,3	25,0
1/05/2021	2021	1	1	9	1	30,2	26,0
1/05/2021	2021	1	1	10	1	28,6	26,4

Debido a que se realizó la variación de los parámetros influyentes en el análisis se desarrollaron 18 modelos (ver ANEXO 1.), donde cada modelo se varía el parámetro en las diferentes zonas. Los resultados de las simulaciones de los diferentes modelos se presentan en la Tabla 5. Este programa proporciona tanto tablas numéricas en formato de Excel con los resultados de las temperaturas y ganancias de calor como gráficas que se evidencian en la Figura 35, facilitando el uso y comprensión de la información generada.

Tabla 5. Resultados del modelo 1 en DesignBuilder

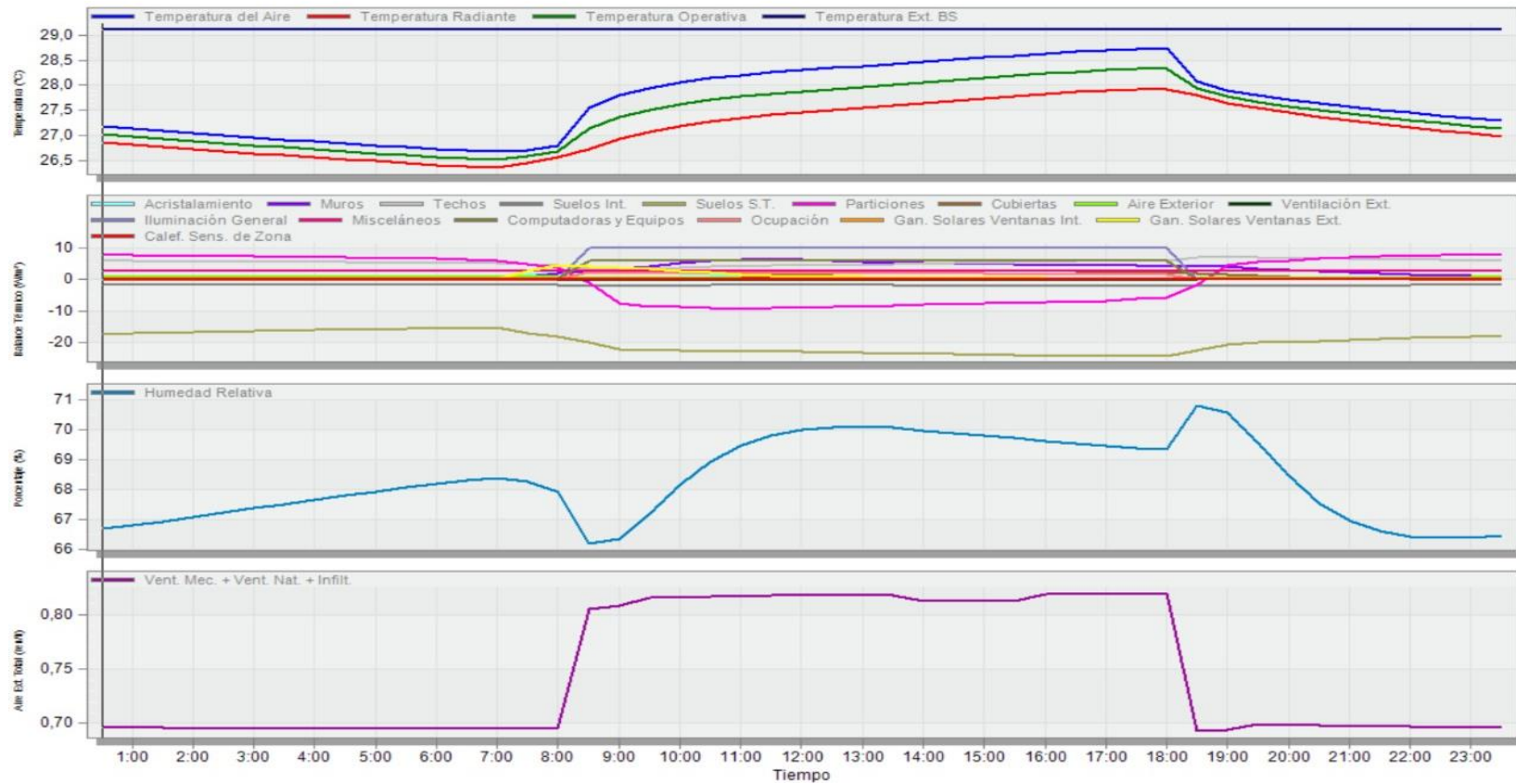
	Muros	Techos	Suelos S.T.	Particiones	Cubiertas	Vent. Nat. Int.	Vent. Mec. + Vent. Nat. + Infit.	Aire Exterior	Iluminación General	Misceláneos	Computadoras y Equipos	Ocupación	Gan. Solares Ventanas Int.	Gan. Solares Ventanas Ext.	Temperatura del Aire	Temperatura Radiante	Temperatura Operativa	Temperatura Ext. BS
	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	ren/h	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	°C	°C	°C	°C
1/05/2002 1:00	5,080252	6,924873	-20,37702	6,350759	0,0946712	0,1532523	0,1284324	-0,2005152	0	0	0	0	0	0	25,42588	25,23116	25,32852	22,9
1/05/2002 2:00	4,192194	6,770299	-19,03952	6,368469	6,82E-02	0,1374447	0,1290708	-0,2057602	0	0	0	0	0	0	25,20412	25,02369	25,11391	22,625
1/05/2002 3:00	3,278012	6,599277	-17,77388	6,307956	4,56E-02	0,1264607	0,128219	-0,1873084	0	0	0	0	0	0	24,99714	24,82426	24,9107	22,6
1/05/2002 4:00	2,455553	6,406419	-16,59685	6,187132	2,89E-02	0,1194723	0,1257301	-0,1435033	0	0	0	0	0	0	24,80728	24,63801	24,72264	22,9
1/05/2002 5:00	1,810187	6,185883	-15,54688	5,969386	1,71E-02	0,1238019	0,1199036	-8,94E-02	0	0	0	0	0	0	24,63859	24,47019	24,55439	23,375
1/05/2002 6:00	1,408038	5,924491	-14,66622	5,652972	1,21E-02	0,1247899	0,1182209	-3,03E-02	0	0	0	0	2,76E-04	5,19E-02	24,49491	24,32813	24,41152	24,1

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

Figura 35. Resultados del análisis de temperatura y ganancias de calor en DesignBuilder



ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

### 5.3. Análisis de sensibilidad: método de dispersión

En la Tabla 6, se realiza la integración de los valores medidos y simulados de cada modelo para cada zona. La tabla inicia con el día que se está analizando, seguido de la hora, la temperatura externa e interna de la zona medida y por ultimo el resultado de la Temperatura obtenida en los resultados de la simulación.

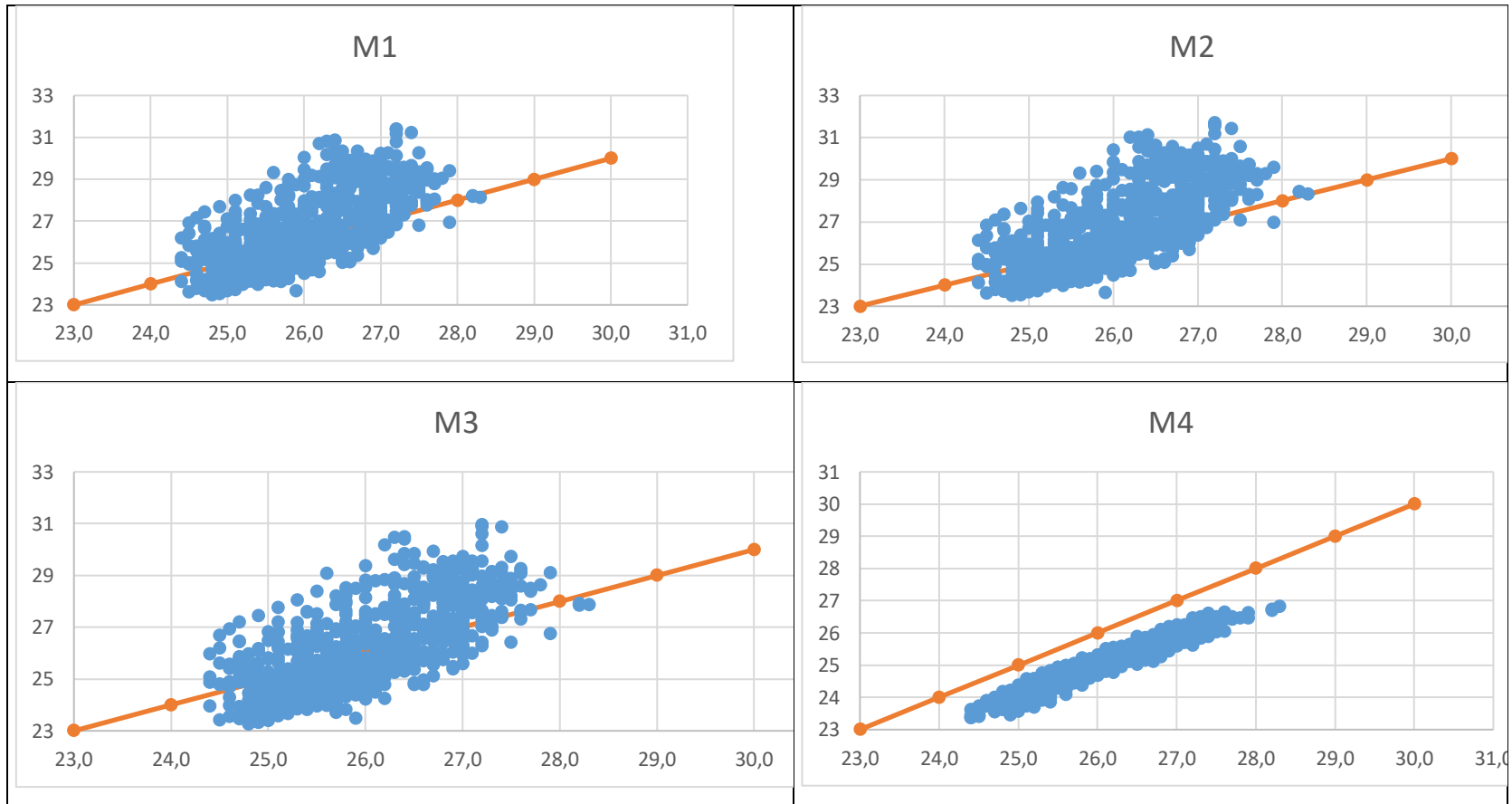
Tabla 6. Integración de los valores medidos y simulados de cada modelo de la zona 1

Día	Hor a	T. EXT	T1- M	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18
1/05/20 21	1	23,2	25,5	25,425 88	25,387 25	25,221 19	24,766 93	25,365 58	24,802 21	25,605 43	31,632 4	25,966 17	26,079 54	25,466 55	25,149 41	24,988 09	25,551 42	25,524 89	25,535 16	25,508 3	35,667 19
1/05/20 21	2	22,5	25,4	25,204 12	25,166 22	25,002 39	24,587 17	25,143 06	24,621 37	25,365 74	30,763 77	25,795 48	25,907 11	25,293 74	24,986 55	24,803 09	25,373 29	25,343 9	25,351 81	25,325 82	35,378 9
1/05/20 21	3	21,9	25,2	24,997 14	24,960 67	24,798 85	24,410 69	24,929 61	24,441 66	25,132 17	30,323 85	25,619 59	25,730 06	25,120 28	24,820 34	24,618 82	25,198 15	25,167 78	25,174 98	25,148 66	35,096 09
1/05/20 21	4	21,7	25,1	24,807 28	24,773 05	24,613 24	24,260 2	24,746 48	24,287 04	24,927 7	30,043 82	25,467 53	25,577 31	24,983 86	24,678 15	24,458 09	25,053 4	25,020 46	25,026 8	25,000 42	34,841 22
1/05/20 21	5	21,6	25,0	24,638 59	24,607 22	24,449 48	24,131 78	24,589 09	24,154 73	24,749 31	29,818 1	25,357 91	25,467 12	24,863 9	24,555 23	24,318 62	24,926 98	24,891 98	24,897 38	24,870 95	34,613 36
1/05/20 21	6	21,1	25,1	24,494 91	24,467 02	24,310 99	24,082 73	24,506 76	24,013 64	24,565 41	31,466 67	25,228 73	25,337 23	24,729 57	24,421 46	24,172 42	24,787 52	24,750 91	24,755 54	24,729 03	34,373 87
1/05/20 21	7	21	25,2	24,369 93	24,350 09	24,179 9	24,010 23	24,408 62	23,897 36	24,407 81	31,909 74	25,123 71	25,231 33	24,622 25	24,312 88	24,050 61	24,675 42	24,637 2	24,641 13	24,614 58	34,154 71
1/05/20 21	8	21,3	25,0	24,307 61	24,312 5	24,088 6	24,194 08	24,565 51	24,039 16	24,490 37	32,397 61	25,263 88	25,370 78	24,784 29	24,468 23	24,170 35	24,831 8	24,792 5	24,795 48	24,768 92	34,229 17
1/05/20 21	9	30,2	26,0	25,694 56	25,889 97	25,360 8	25,152 46	26,373 09	25,352 67	26,572 18	33,664 86	26,120 61	26,230 09	25,731 52	25,423 76	25,630 44	25,946 59	25,943 68	25,979 73	25,947 85	35,769 04
1/05/20 21	10	28,6	26,4	26,412 67	26,686 19	25,945 95	25,625 34	27,050 28	25,978 3	27,344 65	34,424 61	26,602 96	26,724 16	26,230 63	25,902 8	26,314 53	26,599 45	26,615 97	26,668 52	26,630 47	36,506 48

Una vez tabulado los datos de los 30 días, se realizan las gráficas de dispersión para cada modelo en la zona correspondiente con los datos de la tabla anterior. En la Tabla 7 se presenta el resultado de los 18 modelos de primera zona; en la Tabla 8 las gráficas para la segunda zona y finalmente en la Tabla 9 se observan las de la tercera zona.



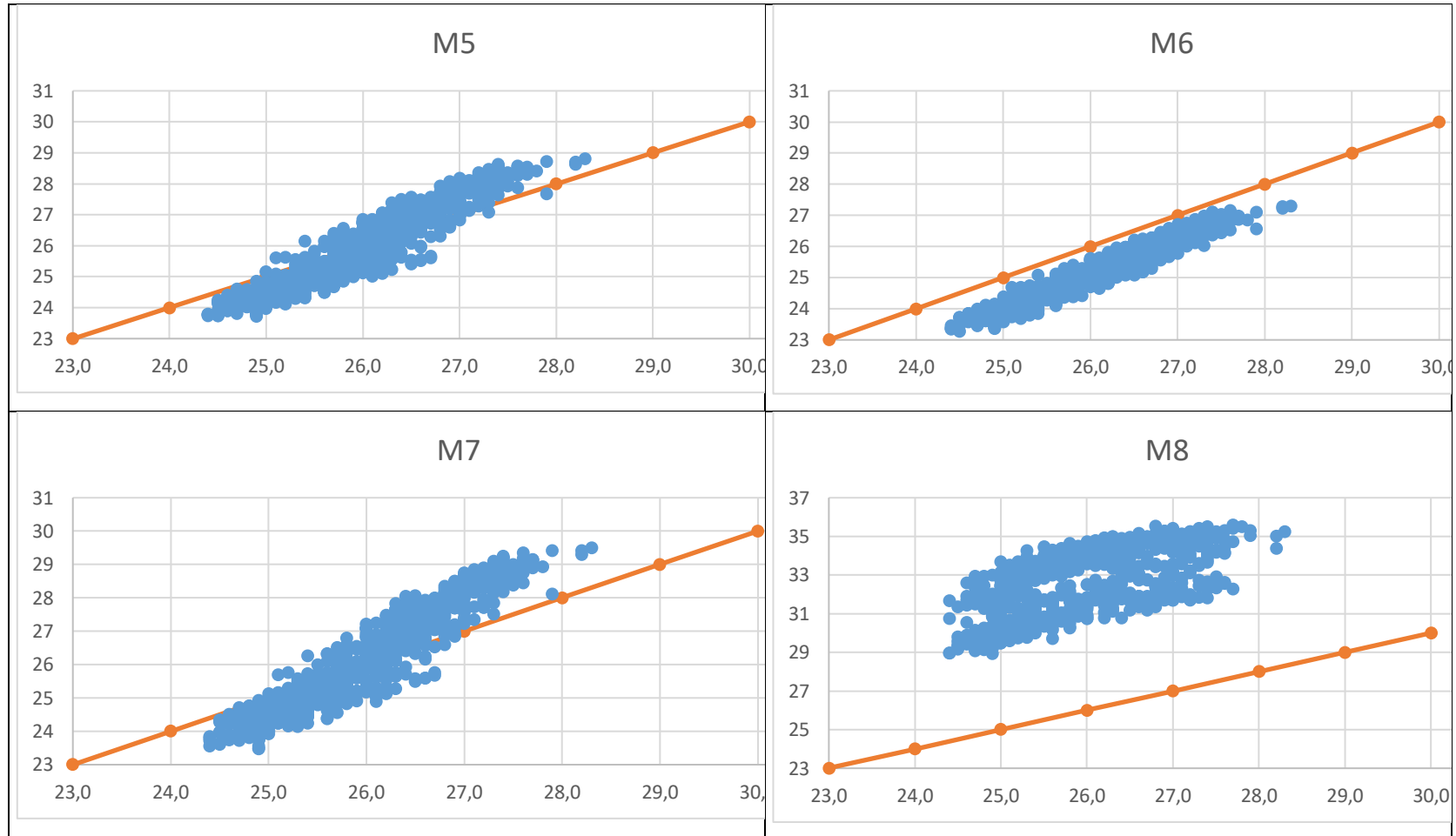
Tabla 7. Resultados de las gráficas de dispersión



ELABORADO POR:  
 Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
 soporte al sistema integrado de gestión

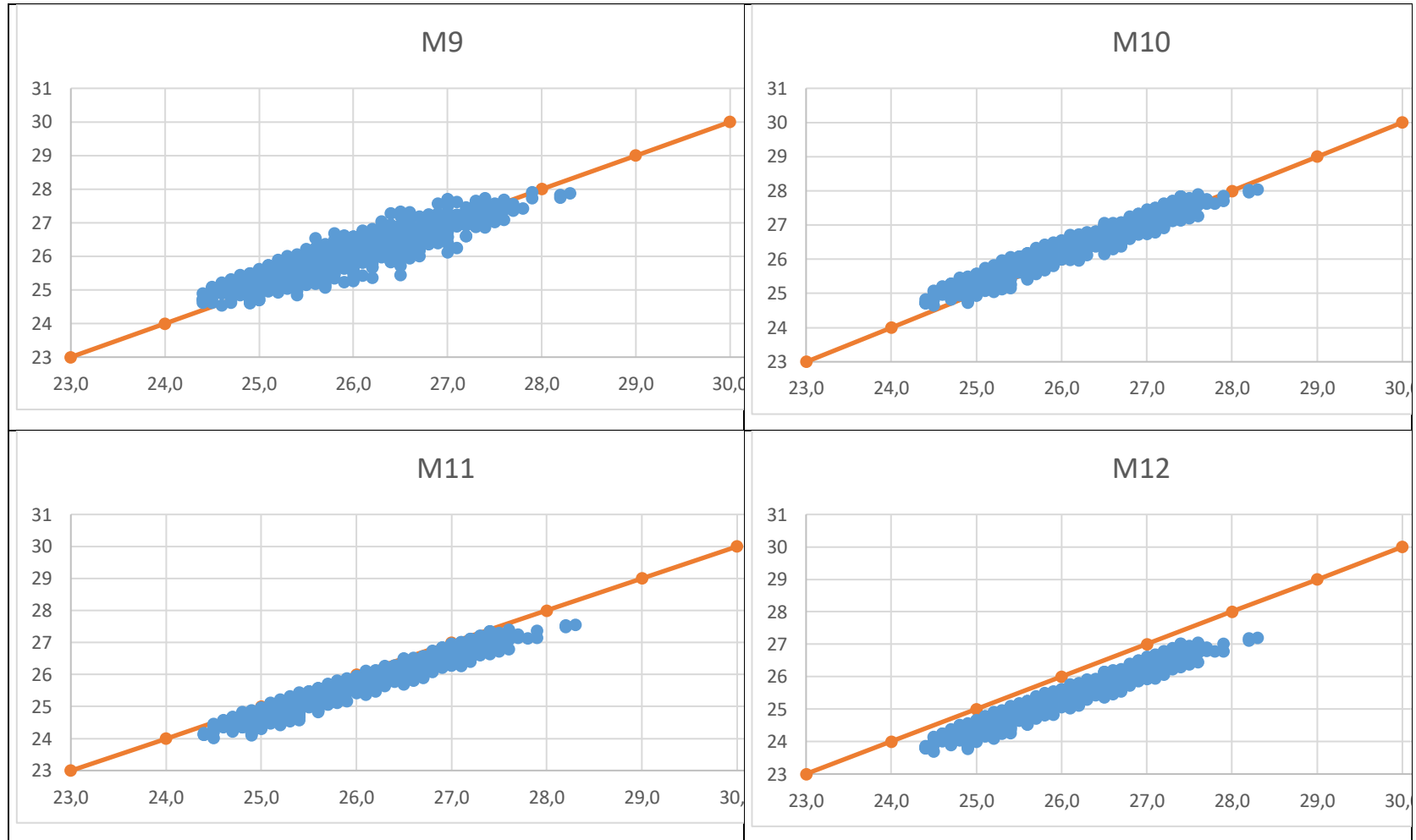
APROBADO POR: Asesor de planeación  
 FECHA APROBACION:



ELABORADO POR:  
 Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
 soporte al sistema integrado de gestión

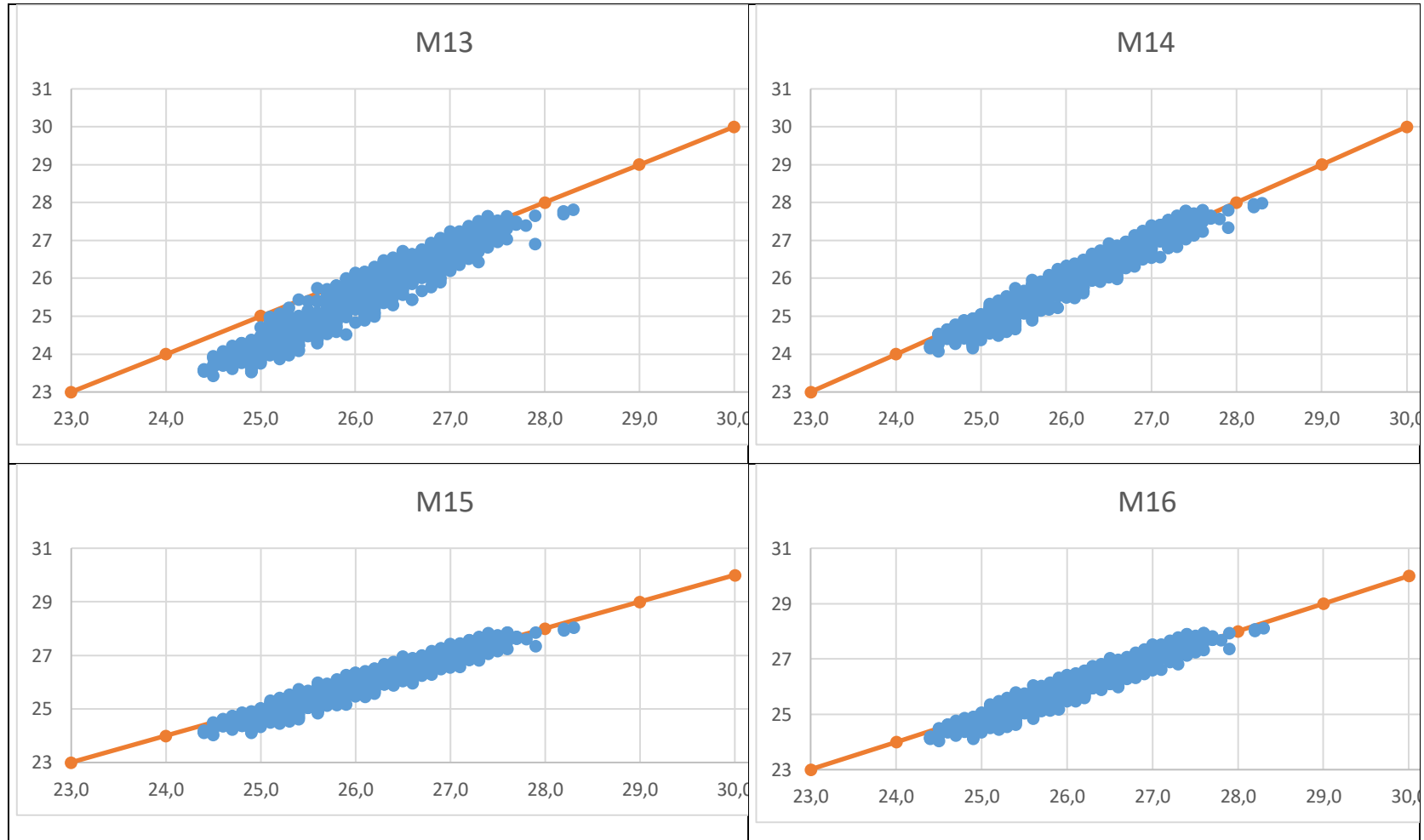
APROBADO POR: Asesor de planeación  
 FECHA APROBACION:



ELABORADO POR:  
 Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
 soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
 FECHA APROBACION:



ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

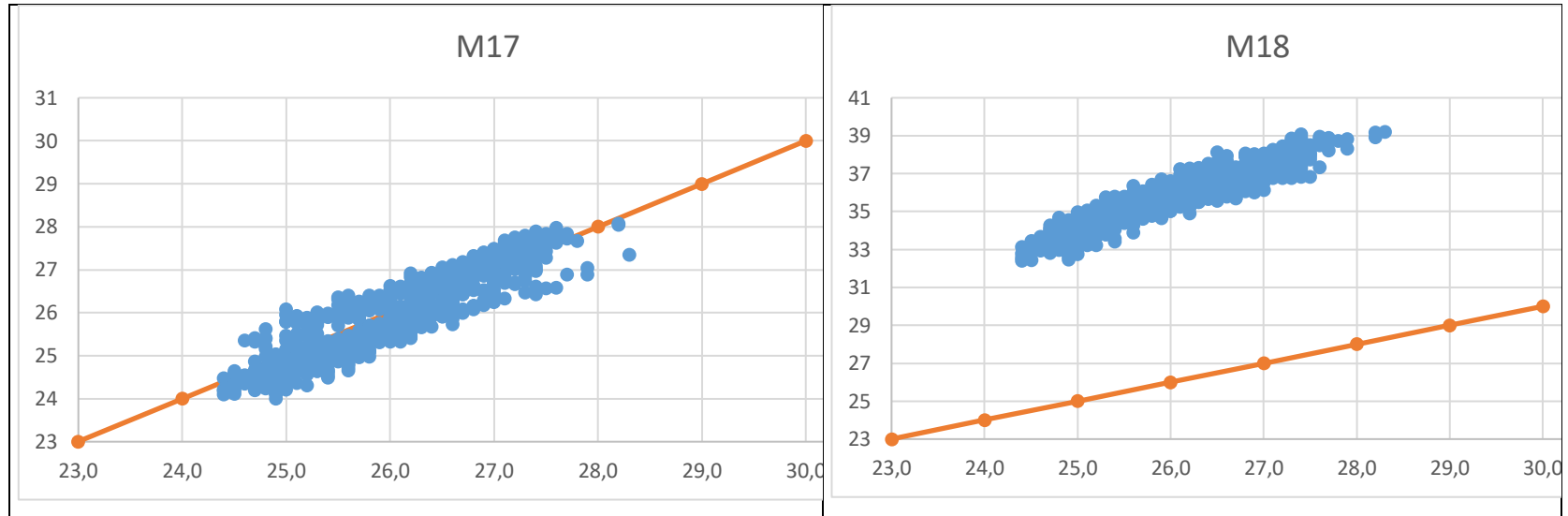
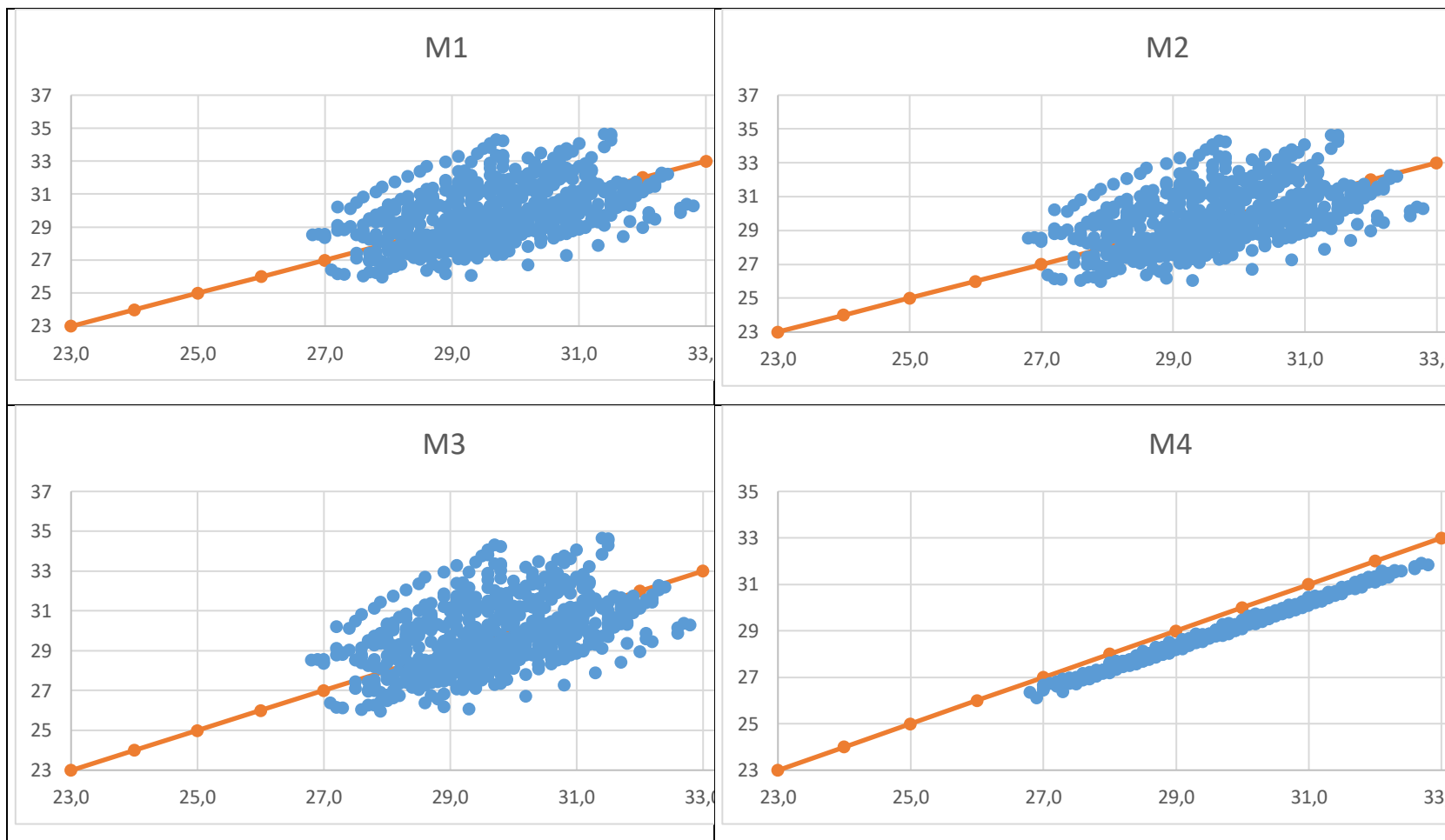


Tabla 8. Resultados de las gráficas de dispersión de la segunda zona.

ELABORADO POR:  
 Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
 soporte al sistema integrado de gestión

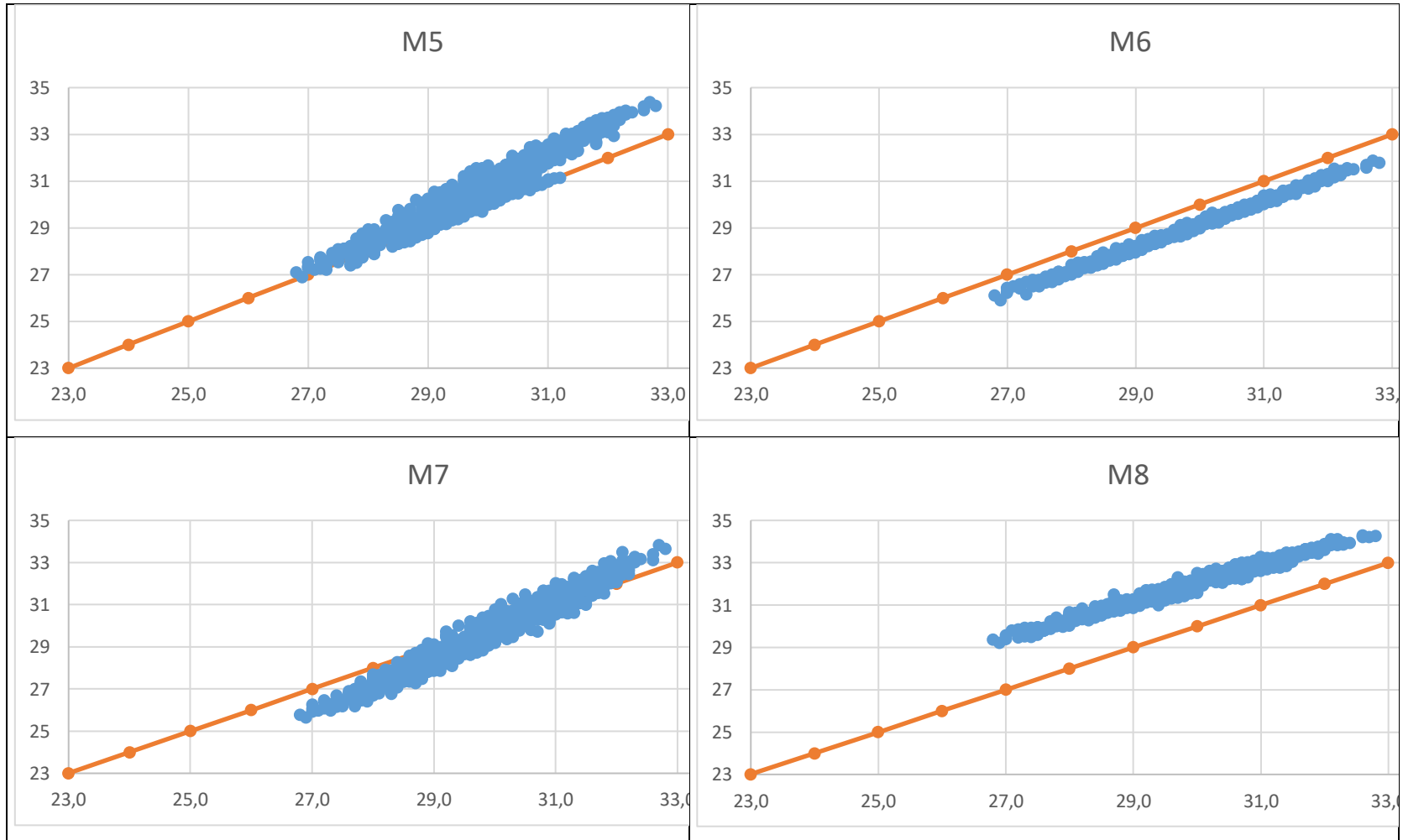
APROBADO POR: Asesor de planeación  
 FECHA APROBACION:



ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

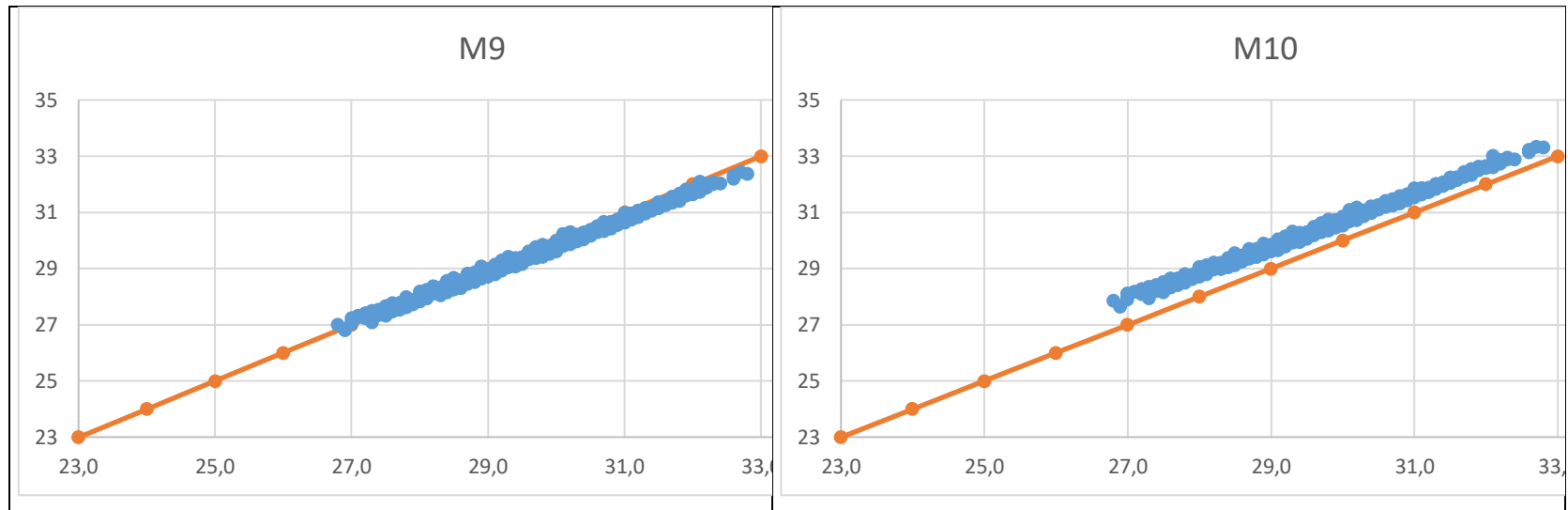
APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:



ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

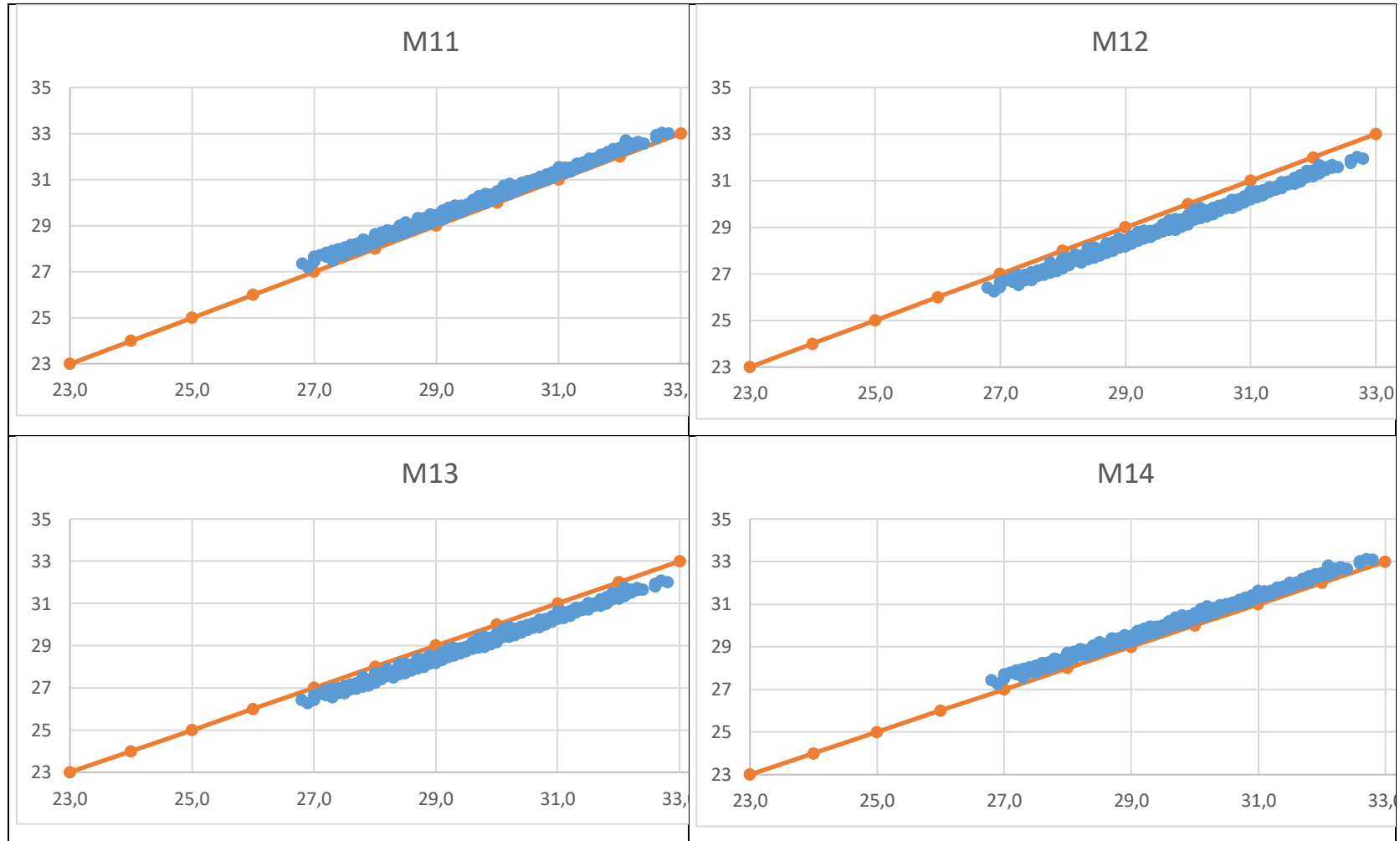


ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

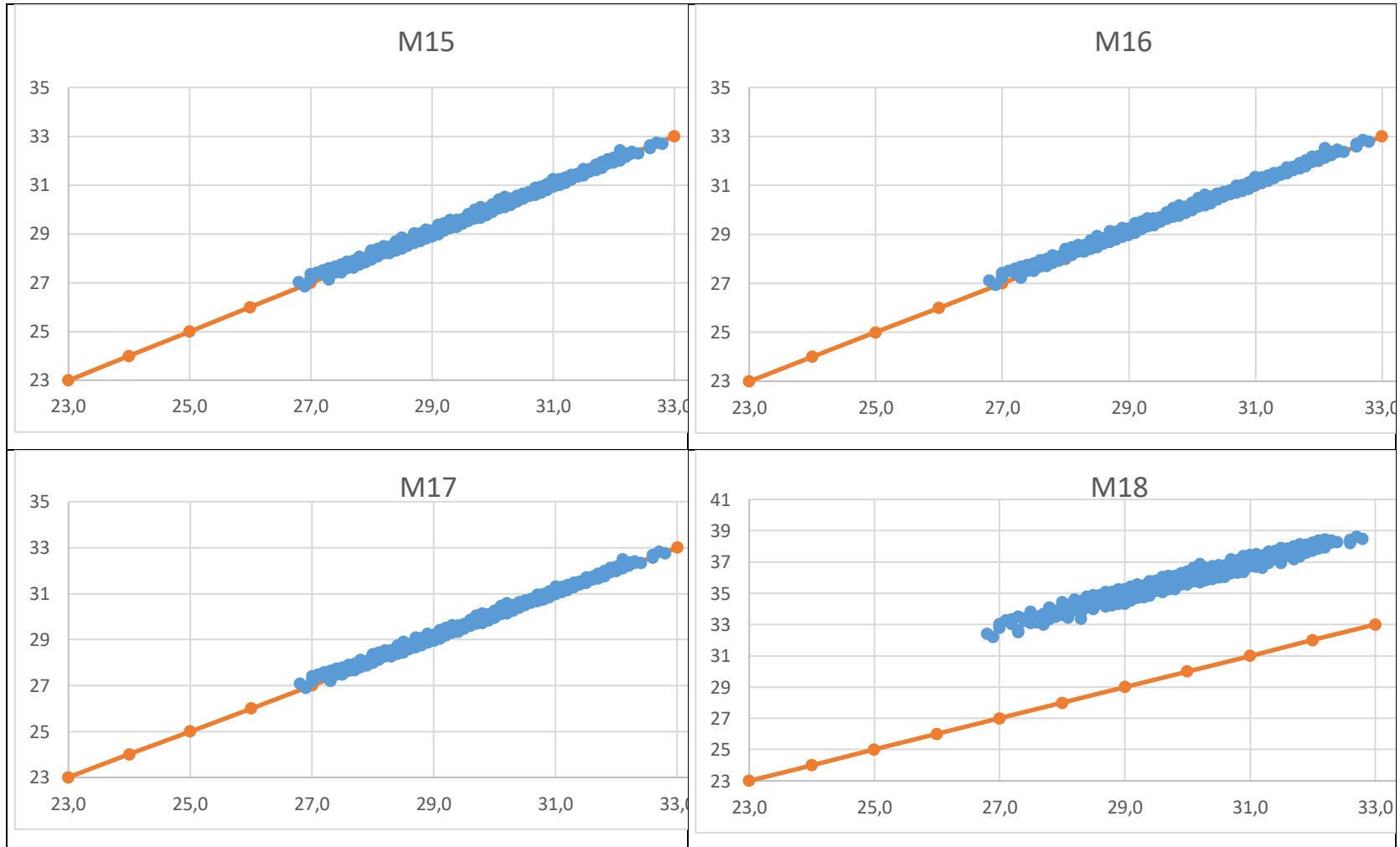




ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

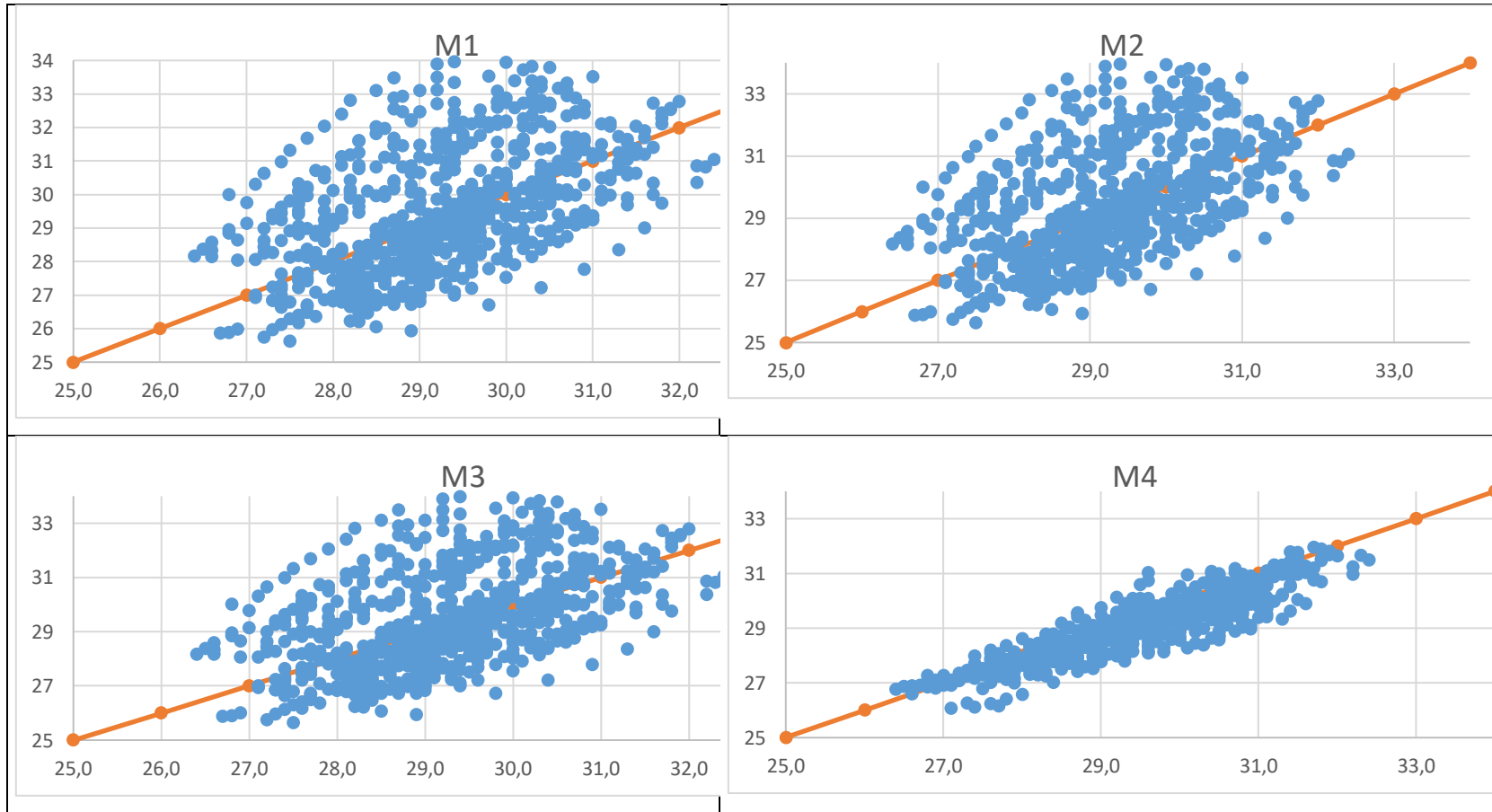


ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

Tabla 9. Resultados de las gráficas de dispersión de la zona 3.



ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

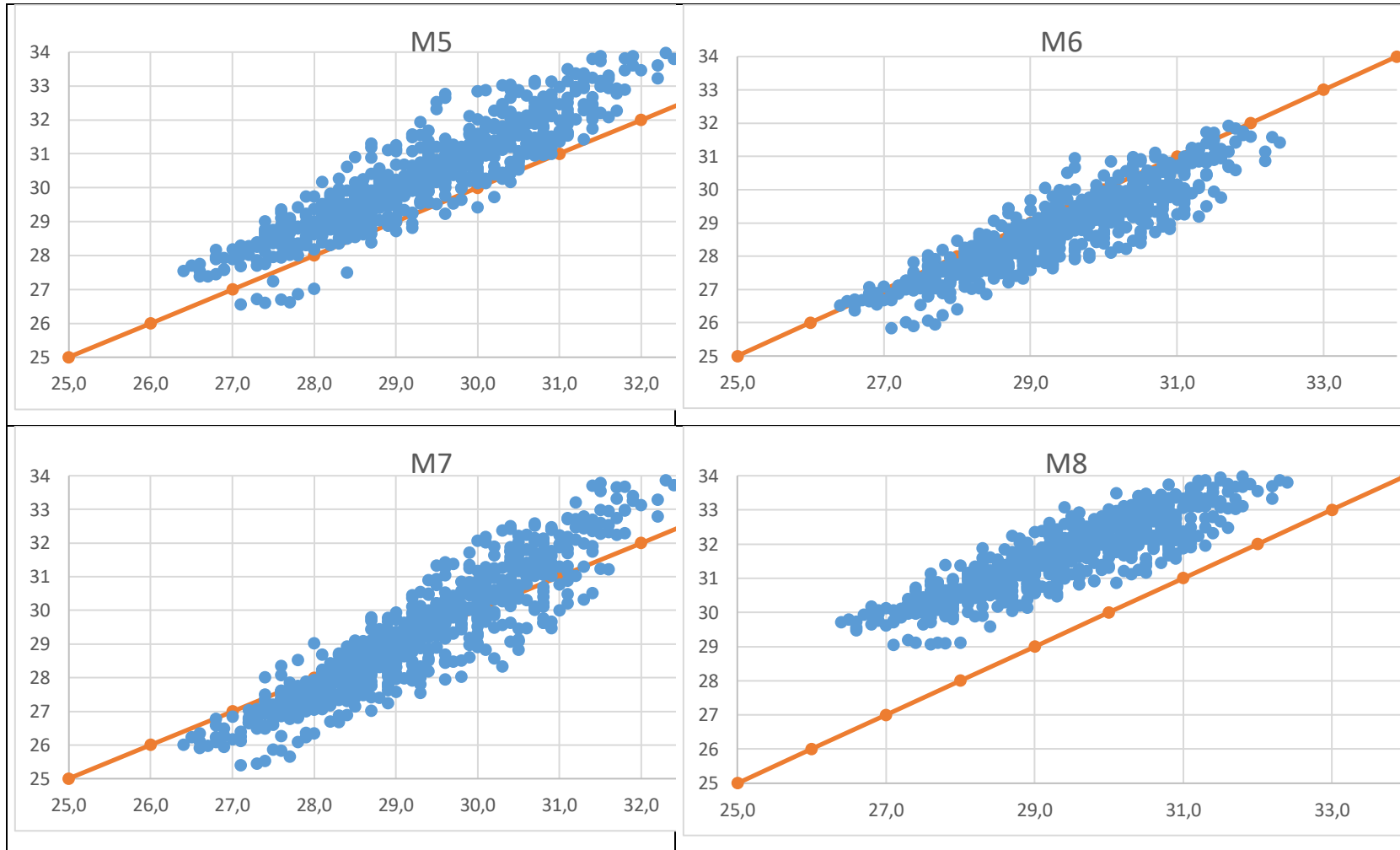
REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE  
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,  
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

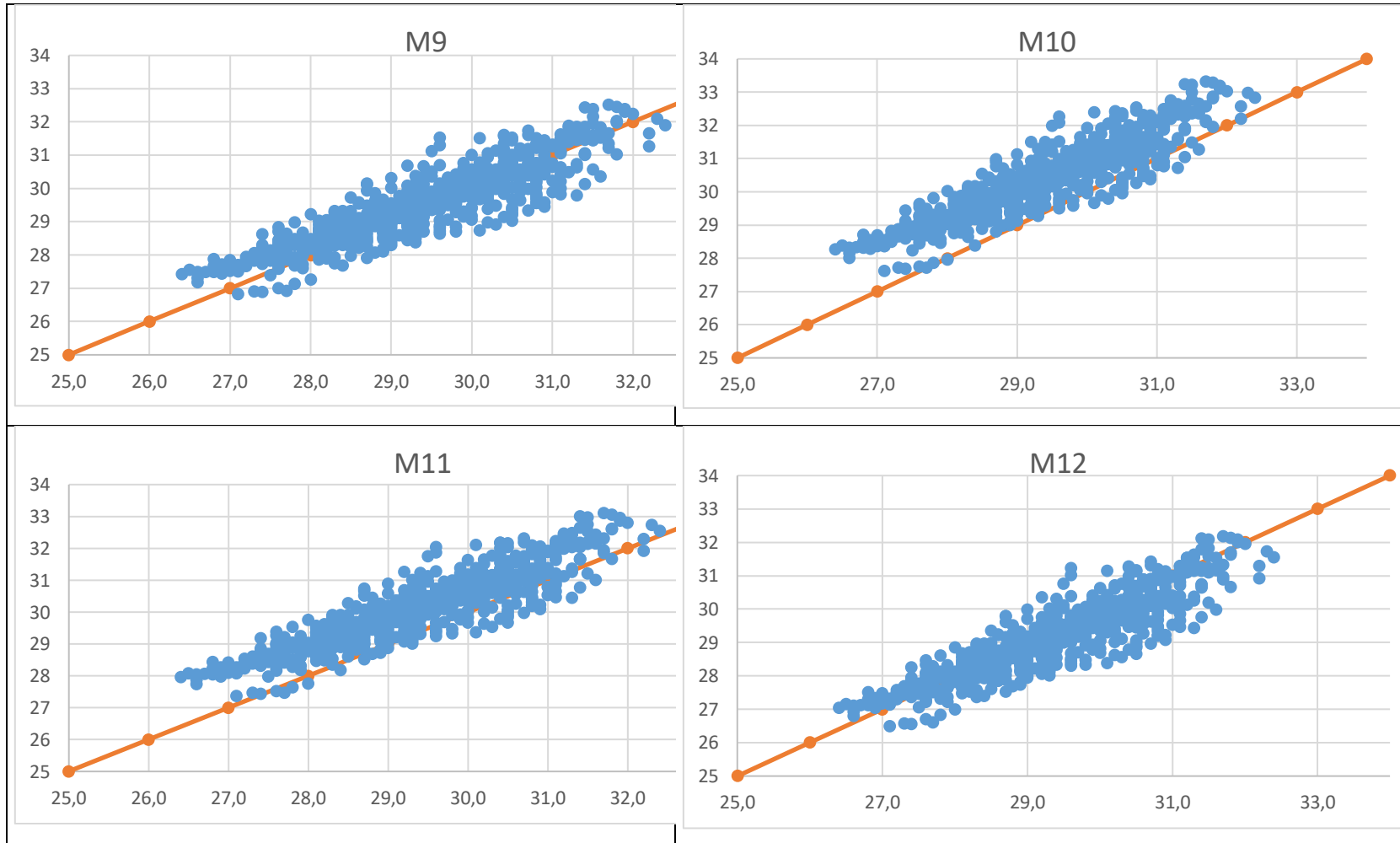
VERSIÓN: 1.0



ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

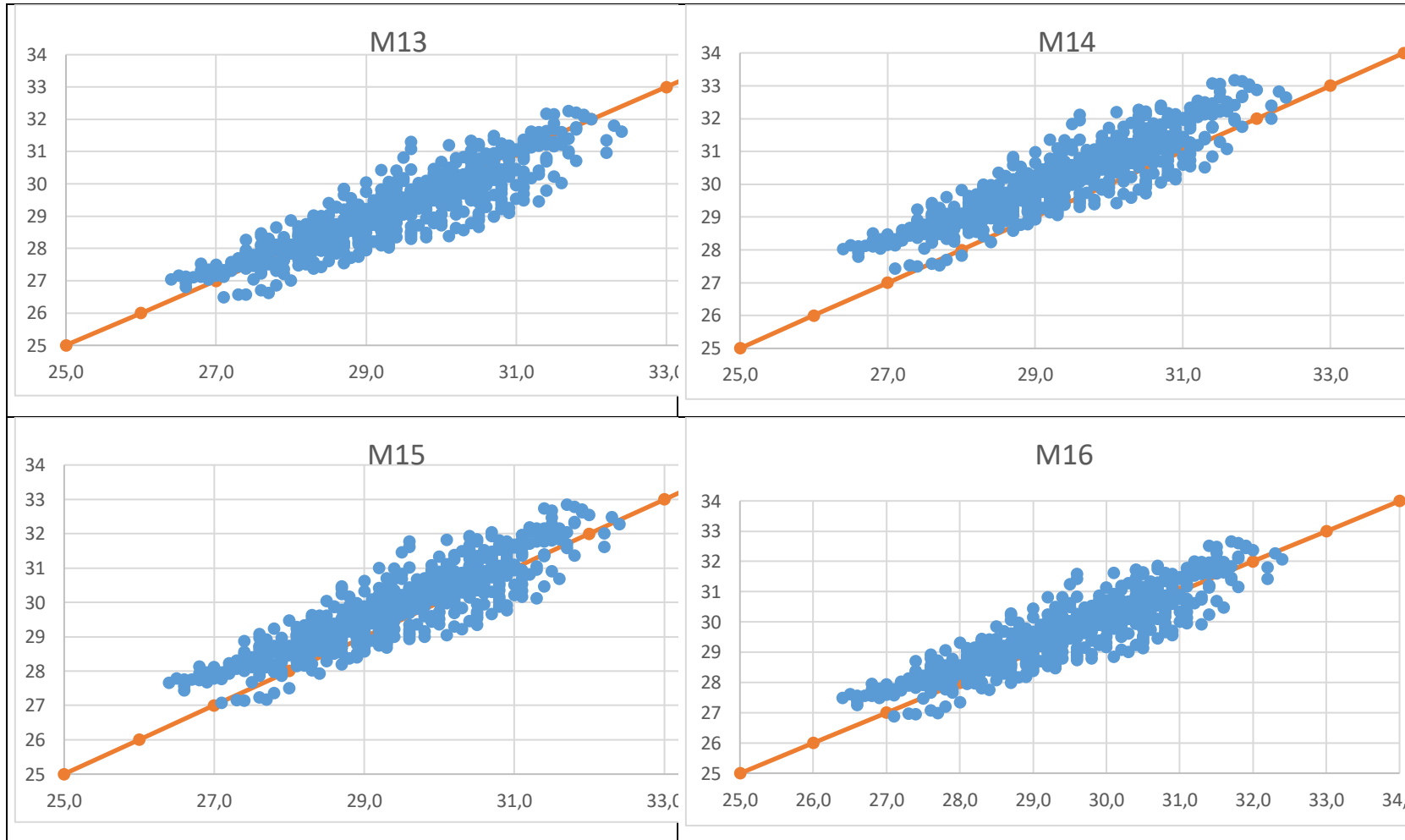
APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:



ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

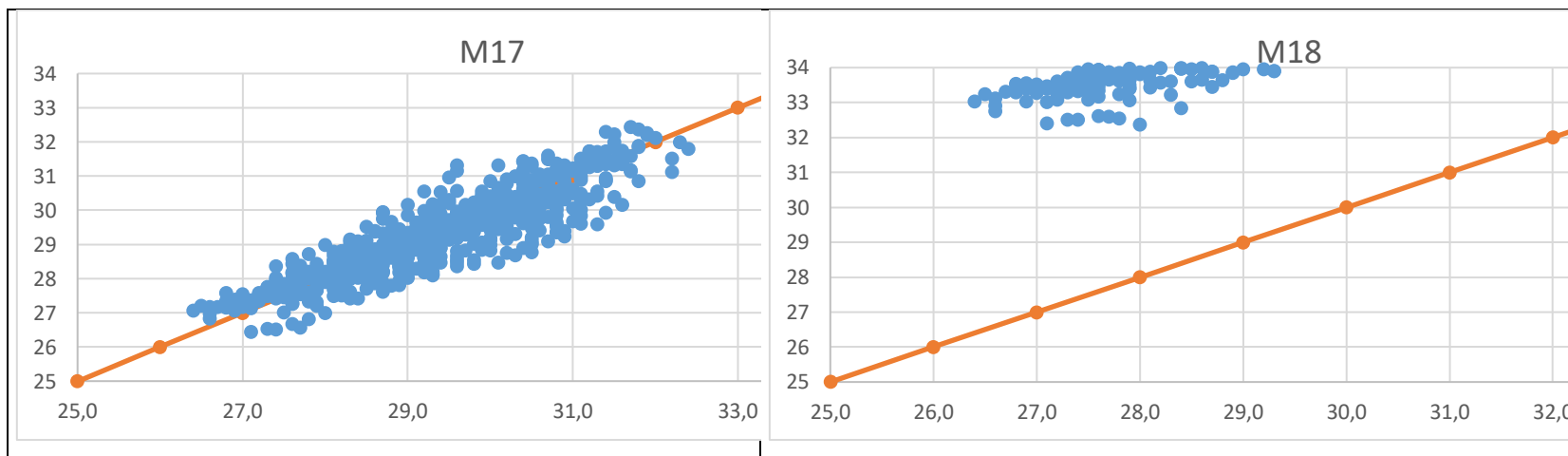
APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:



ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:



ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

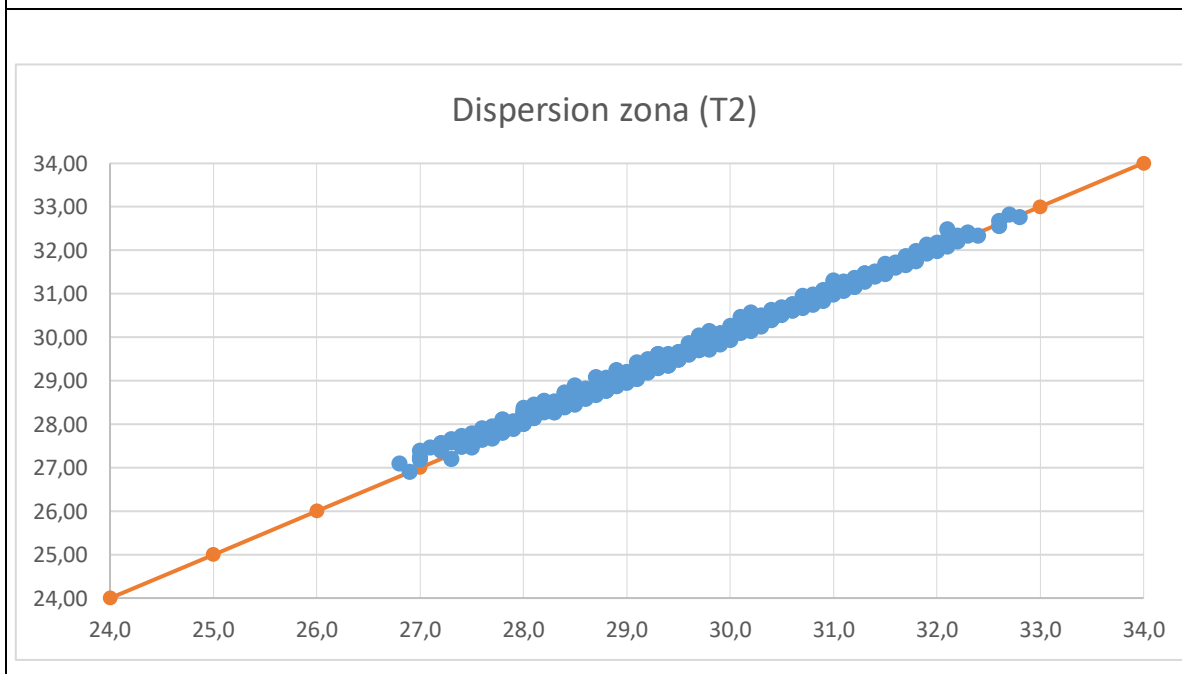
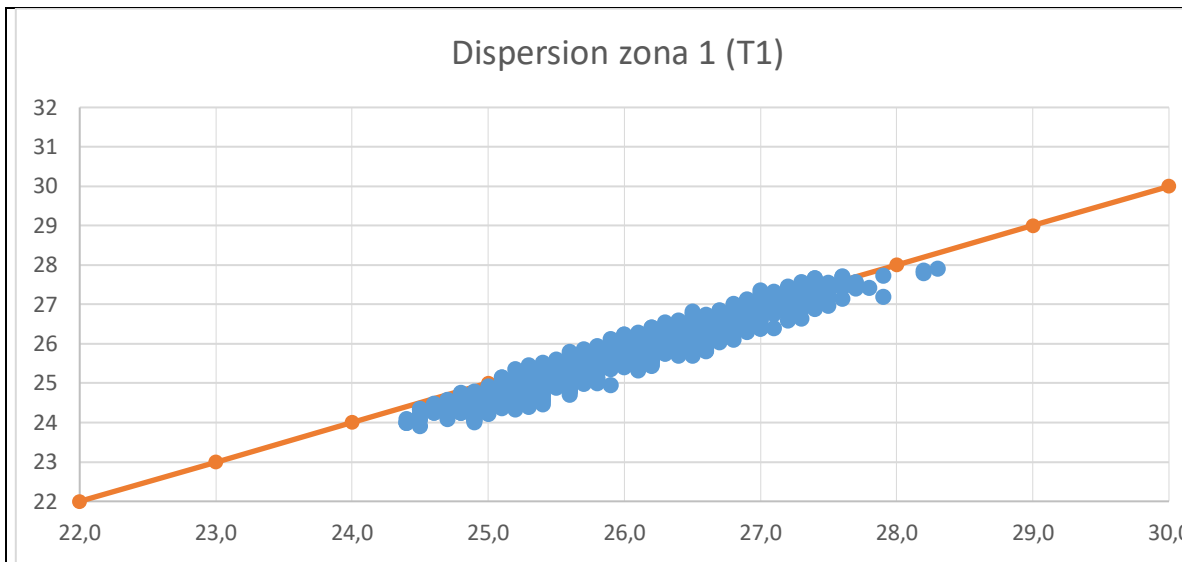
#### **5.4. Calibración del modelo**

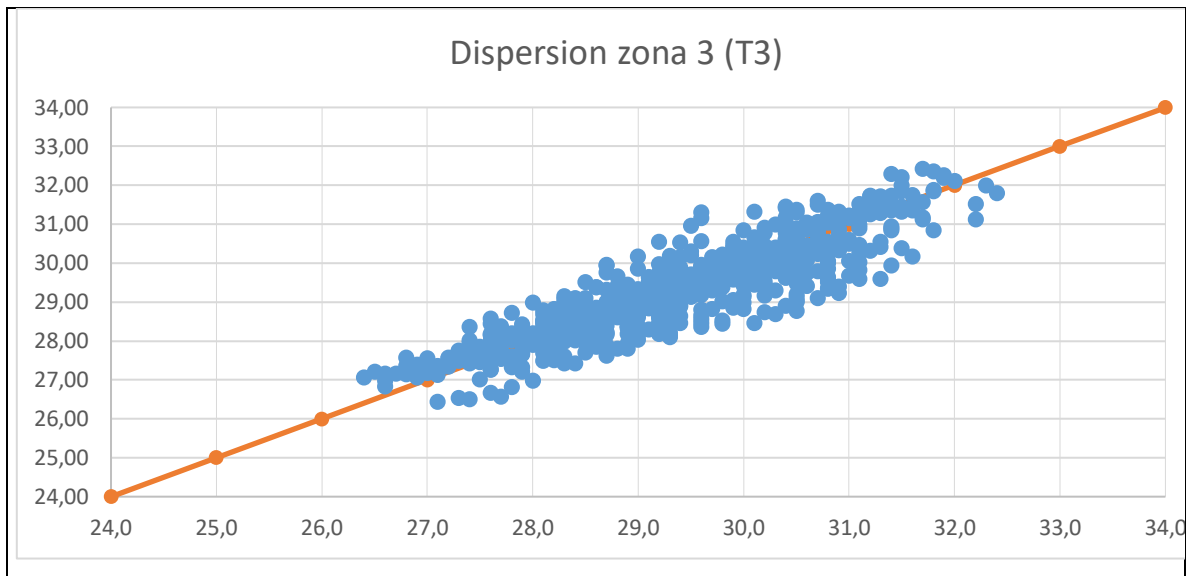
Al reconciliar valores medidos y simulados, existen dos fuentes generales de error. Error de medición contenido en los datos reales y error del modelo que emana del proceso de simulación. Los errores de medición se pueden identificar con referencia a la literatura del fabricante del equipo o realizando la calibración del equipo. Sin embargo, los errores del modelo subyacente son más complicados debido a las incertidumbres intrínsecas involucradas.

Dada la naturaleza diversa y variada de las incertidumbres subyacentes en los intentos de simulación, los resultados del desempeño de la construcción pueden, en el mejor de los casos, descansar dentro de un pequeño margen de error permitido. En la primera etapa de la calibración, un modelo de construcción detallado se seleccionó como el modelo que contenía los datos calibrados de los parámetros influyentes en la simulación, este caso es seleccionado el modelo número 17 dentro de los resultados obtenidos en las simulaciones, ya que se acerca y asimila más a la línea naranja, presentando menor dispersión en las 3 zonas como se presenta en la Tabla 10.

Tabla 10. Modelo 17 con las gráficas de dispersión.







Como se puede observar en las gráficas anteriores, la correlación entre la dispersión de los valores de las temperaturas medidas y simuladas se asimilan a los valores del modelo ideal (real). En las Figura 36, Figura 37 y Figura 38 se presentan las gráficas de temperatura (línea azul) y radiación (línea amarilla), donde se puede se puede observar que el modelo es consistente, ya que el comportamiento de la temperatura obtenida concuerda con la variación de la radiación solar.

Figura 36. Gráfica de temperatura y radiación hora a hora mensual de la zona 1 modelo 17.

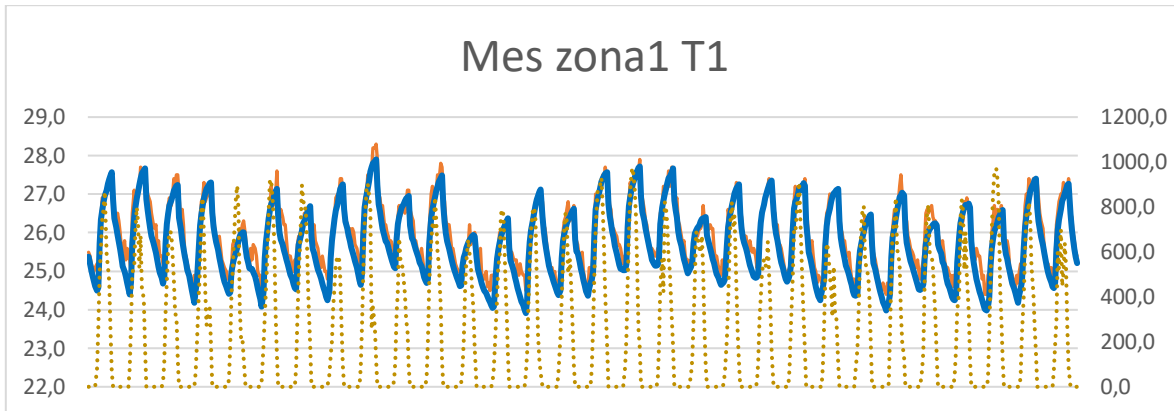
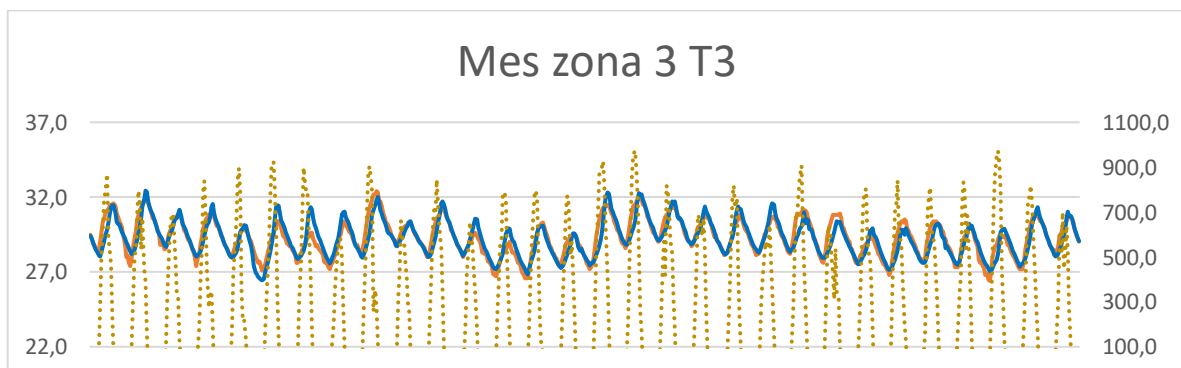


Figura 37. Gráfica de temperatura y radiación hora a hora mensual de la zona 2 modelo 17.



Figura 38. Gráfica de temperatura y radiación hora a hora mensual de la zona 3 modelo 17.



## 6. CONCLUSIONES

La simulación sigue siendo una herramienta indispensable para el análisis del rendimiento de los edificios antes y después de la construcción. En este trabajo se ha desarrollado 18 modelos de una vivienda unifamiliar caso de estudio mediante el programa de DesignBuilder, los cuales han sido alimentados con datos de entrada como la geometría, dimensiones, ubicación, datos de climatización como la temperatura; estos datos son recopilados del trabajo Ascanio (2021), donde evaluó el comportamiento térmico de la vivienda por medio de termohigrómetros durante 30 días del mes de mayo. Seguidamente se ingresan los valores de las cargas térmicas, los cuales han sido determinados como parámetros influyentes que serán variados en cada modelo como la densidad de ocupación, uso de equipos de oficina, ordenadores y misceláneos, programación de horario, hermeticidad y puentes térmicos. De estos modelos se obtienen los datos de temperatura del ambiente el cual se compara con los datos medidos con el fin de calibrar un modelo que coincida o se asimile al modelo real.

De los diagramas de dispersión se puede inferir que proporcionan una luz sobre la tendencia del modelo a predecir de más o de menos en todo el rango de valores simulados. En este caso se demostró que el modelo 17 coincide con el modelo real gracias a que las gráficas de temperatura medidas y simulada son similares.

A medida que las nuevas ideas de diseño amplían los límites del desempeño de las viviendas, la evaluación del desempeño debe justificarse por el desempeño energético de la edificación. La simulación se ha vuelto crucial para investigar la precisión, validez y relevancia de los modelos desarrollados. Estos modelos

implican varios miles de parámetros de entrada; cada parámetro influye de manera diferente en el consumo de energía del edificio. Por lo tanto, la necesidad de identificar los parámetros que influyen es bastante evidente para facilitar el proceso.

Los conjuntos de datos mínimos de la guía pueden ser ventajosos durante numerosas etapas de la simulación del rendimiento energético del edificio durante el ciclo de vida de un edificio. El tiempo dedicado a recopilar y definir datos de entrada de parámetros, junto con el tiempo de modelado requerido, se puede reducir significativamente identificando y modelando con precisión solo los parámetros de entrada más influyentes. En las últimas etapas de diseño y/o puesta en marcha del ciclo de vida.

## 7. RECOMENDACIONES

Si bien el conjunto de datos mínimos de la guía producidos en este estudio solo se aplica a las viviendas en clima cálido seco, la metodología propuesta se puede aplicar a varios tipos de modelos de edificaciones residenciales en DesignBuilder en diferentes tipos de climas de Colombia. Este programa es una herramienta de simulación muy versátil, que puede evaluar varios parámetros de construcción y, aunque algunos parámetros pueden no ser completamente aplicables, existen varios enfoques para superar estos problemas similares a los procedimientos tomados en este trabajo.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ascanio, J. (2021). *Evaluación del comportamiento térmico de una vivienda convencional en clima cálido-seco con monitorización de termohigrómetros*. [Actividad Complementaria Investigación de Doctorado]. Universidad del País Vasco.

Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., Mauro, G. M., & Vanoli, G. P. (2017). Energy retrofit of educational buildings: Transient energy simulations, model calibration and multi-objective optimization towards nearly zero-energy performance. *Energy and Buildings*, 144, 303-319. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.056>

Baba, F. (2019). Efecto del cambio climático y los fenómenos meteorológicos extremos en las condiciones térmicas de los edificios residenciales de unidades múltiples canadienses. *Build.Eng.*, 125(2), 30-33.

Bamdad, K., Cholette, M. E., & Bell, J. (2020). Building energy optimization using surrogate model and active sampling. *JOURNAL OF BUILDING PERFORMANCE SIMULATION*, 2020(6), 760-776. <https://doi.org/10.1080/19401493.2020.1821094>

- Bruno, R., Arcuri, N., & Carpino, C. (2017). Study of innovative solutions of the building envelope for passive houses in Mediterranean areas. *Energy Procedia*, 140, 80-92. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.125>
- Chakrabarty, A., Maddalena, E., Qiao, H., & Laughman, C. (2021). Scalable Bayesian optimization for model calibration: Case study on coupled building and HVAC dynamics. *Energy and Buildings*, 253, 111460. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2021.111460>
- Coakley, D., Raftery, P., & Keane, M. (2018). A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 123-141. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.007>
- EIA. (2019). *Informe especial sobre recuperación sostenible: Perspectivas energéticas mundiales*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>
- EIA. (2021). *Informe de perspectivas energéticas mundiales*. <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/index.php>
- Google Earth. (2022). *Localización LA RONDA Bucarmanga Santander, Colombia*. [https://earth.google.com/web/search/Santander/@6.92657016,-73.01300238,1817.76848251a,638230.1716999d,35y,0.02744294h,0t,0r/data=CnQaShJECiUweDhINDI3ODUyZmQwNDhjOWI6MHhmNzBINDZIZGEyZmFIMDI1GSG\\_yBUokxpAldpewezUaVLAKgITYW50YW5kZXIYAiABliYKJ](https://earth.google.com/web/search/Santander/@6.92657016,-73.01300238,1817.76848251a,638230.1716999d,35y,0.02744294h,0t,0r/data=CnQaShJECiUweDhINDI3ODUyZmQwNDhjOWI6MHhmNzBINDZIZGEyZmFIMDI1GSG_yBUokxpAldpewezUaVLAKgITYW50YW5kZXIYAiABliYKJ)



AnGipRO9jMhQBHyXX2stowUQBm6yWYtKqdRwCHO4BBXaNJSwDIpCic

KJQohMVBzZWFlazJIZGFmTGJjbzktckVtcVAwanNMZUZZLWpZIAE

Heiselberg, P., Brohus, H., Hesselholt, A., Rasmussen, H., Seinre, E., & Thomas, S.

(2019). Application of sensitivity analysis in design of sustainable buildings.

*Renewable Energy*, 34(9), 2030-2036.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.02.016>

Helton, J. C., Johnson, J. D., Sallaberry, C. J., & Storlie, C. B. (2018). Survey of

sampling-based methods for uncertainty and sensitivity analysis. *Reliability*

*Engineering & System Safety*, 91(10), 1175-1209.

<https://doi.org/10.1016/j.ress.2005.11.017>

Hermelink, A., Schimschar, S., Boermans, T., Pagliano, L., Zangheri, P., Armani, R.,

Voss, K., & Musall, E. (2017). *Towards nearly zero-energy buildings.*

*Definition of common principles under the EPBD. Final report.*

<https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/22151613>

Hu, S., Yan, D., Azar, E., & Guo, F. (2020). A systematic review of occupant behavior

in building energy policy. *Building and Environment*, 175, 106807.

<https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2020.106807>

Huerto-Cardenas, H. E., Leonforte, F., Aste, N., Del Pero, C., Evola, G., Costanzo,

V., & Lucchi, E. (2020). Validation of dynamic hygrothermal simulation models

for historical buildings: State of the art, research challenges and

recommendations. *Building and Environment*, 180(March), 107081.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107081>

Krayenhoff, E. S., Jiang, T., Christen, A., Martilli, A., Oke, T. R., Bailey, B. N., Nazarian, N., Voogt, J. A., Giometto, M. G., Stastny, A., & Crawford, B. R. (2020). A multi-layer urban canopy meteorological model with trees (BEP-Tree): Street tree impacts on pedestrian-level climate. *Urban Climate*, 32, 100590. <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2020.100590>

Kristensen, M. H., & Petersen, S. (2019). Choosing the appropriate sensitivity analysis method for building energy model-based investigations. *Energy and Buildings*, 130, 166-176. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.038>

Menberg, K., Heo, Y., & Choudhary, R. (2018). Sensitivity analysis methods for building energy models: Comparing computational costs and extractable information. *Energy and Buildings*, 133, 433-445. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.005>

P. Tootkaboni, M., Ballarini, I., & Corrado, V. (2021). Analysing the future energy performance of residential buildings in the most populated Italian climatic zone: A study of climate change impacts. *Energy Reports*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.04.012>

Ribeiro, I., Martilli, A., Falls, M., Zonato, A., & Villalba, G. (2021). Highly resolved WRF-BEP/BEM simulations over Barcelona urban area with LCZ.

F-DC-125

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE  
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,  
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 1.0

*Atmospheric Research, 248, 105220.*

<https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2020.105220>

Risch, S., Remmen, P., & Müller, D. (2021). Influence of data acquisition on the Bayesian calibration of urban building energy models. *Energy and Buildings*, 230, 110512. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110512>

Royapoor, M., & Roskilly, T. (2015). Building model calibration using energy and environmental data. *Energy and Buildings*, 94, 109-120. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2015.02.050>

Salata, F., Ciancio, V., Dell'Olmo, J., Golasi, I., Palusci, O., & Coppi, M. (2020). Effects of local conditions on the multi-variable and multi-objective energy optimization of residential buildings using genetic algorithms. *Applied Energy*, 260, 114289. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114289>

Samuelson, H. W., Ghorayshi, A., & Reinhart, C. F. (2016). Analysis of a simplified calibration procedure for 18 design-phase building energy models. *Journal of Building Performance Simulation*, 9(1), 17-29. <https://doi.org/10.1080/19401493.2014.988752>

Shiel, P., Tarantino, S., & Fischer, M. (2018). Parametric analysis of design stage building energy performance simulation models. *Energy and Buildings*, 172, 78-93. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.045>

- Suh, W.-J., Park, C.-S., & Kim, D.-W. (2019). APPLICATION OF A WHOLE BUILDING SIMULATION TOOL FOR A REAL-LIFE BUILDING. *12th Conference of International Building Performance Simulation Association*, 1-8.
- Tian, W. (2018). A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 411-419. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.014>
- Tian, & Wei. (2019). A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20(C), 411-419.
- Uncertainty in building simulation. (2018). En *Advanced Building Simulation* (pp. 39-73). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203073674-8>
- Watts, N., Amann, M., Arnell, N., Ayeb-Karlsson, S., Belesova, K., Berry, H., Bouley, T., Boykoff, M., Byass, P., Cai, W., Campbell-Lendrum, D., Chambers, J., Daly, M., Dasandi, N., Davies, M., Depoux, A., Dominguez-Salas, P., Drummond, P., Ebi, K. L., ... Costello, A. (2018). The 2018 report of the Lancet Countdown on health and climate change: Shaping the health of nations for centuries to come. *The Lancet*, 392(10163), 2479-2514. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)32594-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)32594-7)
- Yang, G., Li, Z., & Augenbroe, G. (2018). Development of prototypical buildings for urban scale building energy modeling: A reduced order energy model

approach. *Science and Technology for the Built Environment*, 24(1), 33-42.

<https://doi.org/10.1080/23744731.2017.1328943>

Yang, T., Pan, Y., Mao, J., Wang, Y., & Huang, Z. (2016). An automated optimization

method for calibrating building energy simulation models with measured data:

Orientation and a case study. *Applied Energy*, 179, 1220-1231.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.084>

## 9. ANEXOS

### ANEXO 1.

Valores de las variaciones de los parámetros influyentes en las cargas térmicas de la vivienda caso de estudio.

Modelo	Área	Zona	área	ocupación	Cargas térmicas	infiltraciones	Grietas	adyacencia	Ventada	Horario
1	T1	Área común salón	52	0,1000	O=5; EQU=5; M=5	0	media	Automático	Aluminio puente térmico	on 24/7
	T2	Habitación	18	0,1000	O=5; EQU=5; M=5	0	media	Automático	Aluminio puente térmico	on 24/7
	T3	Habitación	16	0,1000	O=5; EQU=5; M=5	0	media	Automático	Aluminio puente térmico	on 24/7
2	T1	área común salón	52	0,1000	O=5; EQU=5; M=5	100	media	Automático	Aluminio puente térmico	on 24/7
	T2	habitación	18	0,1000	O=5; EQU=5; M=5	100	media	Automático	Aluminio puente térmico	on 24/7

Modelo	Área	Zona	área	ocupación	Cargas térmicas	infiltraciones	Grietas	adyacencia	Ventada	Horario
	T3	habitación	16	0,1000	O=5; EQU=5; M=5	100	media	automático	Aluminio puente térmico	on 24/7
3	T1	área común salón	52	0,1000	O=5; EQU=5; M=5	50	media	automático	Aluminio puente térmico	on 24/7
	T2	habitación	18	0,1000	O=5; EQU=5; M=5	50	media	automático	Aluminio puente térmico	on 24/7
	T3	habitación	16	0,1000	O=5; EQU=5; M=5	50	media	automático	Aluminio puente térmico	on 24/7
4	T1	área común salón	52	0,0400	O=5; EQU=5; M=5	0,7	media	automático	Aluminio puente térmico	on 24/7
	T2	habitación	18	0,0400	O=5; EQU=5; M=5	0,7	media	automático	Aluminio puente térmico	on 24/7
	T3	habitación	16	0,0400	O=5; EQU=5; M=5	0,7	media	automático	Aluminio puente térmico	on 24/7
5	T1	área común salón	52	0,0400	0	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio puente térmico	on 24/7
	T2	habitación	18	0,0400	0	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio puente térmico	on 24/7
	T3	habitación	16	0,0400	0	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio puente térmico	on 24/7

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

Modelo	Área	Zona	área	ocupación	Cargas térmicas	infiltraciones	Grietas	adyacencia	Ventada	Horario
6	T1	área común salón	52	0,0400	O=5; EQU=5; M=5	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio puente térmico	on 24/7
	T2	habitación	18	0,0400	O=5; EQU=5; M=5	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio puente térmico	on 24/7
	T3	habitación	16	0,0400	O=5; EQU=5; M=5	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio puente térmico	on 24/7
7	T1	área común salón	52	0,0400	O=5; EQU=0; M=0	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio puente térmico	on 24/7
	T2	habitación	18	0,0400	O=0; EQU=0; M=0	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio puente térmico	on 24/7
	T3	habitación	16	0,0400	O=0; EQU=0; M=0	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio puente térmico	on 24/7
8	T1	área común salón	52	0,0400	O=100; EQU=0; M=0	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio puente térmico	on 24/7
	T2	habitación	18	0,0000	O=0; EQU=0; M=0	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio puente térmico	on 24/7
	T3	habitación	16	0,0000	O=0; EQU=0; M=0	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio puente térmico	on 24/7
9	T1	área común salón	52	0,0577	O=12; EQU=0; M=0	0,7	medio	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio puente térmico	on 24/7

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:



Modelo	Área	Zona	área	ocupación	Cargas térmicas	infiltraciones	Grietas	adyacencia	Ventada	Horario
	T2	habitación	18	0,0556	O=0; EQU=0; M=0	0,7	medio	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio puente térmico	on 24/7
	T3	habitación	16	0,0625	O=0; EQU=0; M=0	0,7	medio	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio puente térmico	on 24/7
10	T1	área común salón	52	0,0577	O=12; EQU=0; M=0	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio sin puente térmico	on 24/7
	T2	habitación	18	0,0000	O=0; EQU=0; M=0	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio sin puente térmico	on 24/7
	T3	habitación	16	0,0000	O=0; EQU=0; M=0	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio sin puente térmico	on 24/7
11	T1	área común salón	52	0,0577	O=6; EQU=0; M=0	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio sin puente térmico	on 24/7
	T2	habitación	18	0,0000	O=0; EQU=0; M=0	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio sin puente térmico	every day 8 - 18
	T3	habitación	16	0,0000	O=0; EQU=0; M=0	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio sin puente térmico	every day 8 - 18
12	T1	área común salón	52	0,0577	O=8; EQU=0; M=0	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio sin puente térmico	on 24/7
	T2	habitación	18	0,0000	O=0; EQU=0; M=0	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio sin puente térmico	every day 8 - 18

 ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

 REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

 APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

Modelo	Área	Zona	área	ocupación	Cargas térmicas	infiltraciones	Grietas	adyacencia	Ventada	Horario
	T3	habitación	16	0,0000	O=0; EQU=0; M=0	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio sin puente térmico	every day 8 - 18
13	T1	área común salón	52	0,0577	O=12; EQU=0; M=1	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio sin puente térmico	every day 8 - 18
	T2	habitación	18	0,0000	O=0; EQU=0; M=0	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio sin puente térmico	every day 8 - 18
	T3	habitación	16	0,0000	O=0; EQU=0; M=0	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio sin puente térmico	every day 8 - 18
14	T1	área común salón	52	0,0577	O=5; EQU=0; M=6	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio sin puente térmico	every day 8 - 18 ; on24/7
	T2	habitación	18	0,0000	O=0; EQU=0; M=5	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio sin puente térmico	every day 8 - 18 ; on24/7
	T3	habitación	16	0,0000	O=0; EQU=0; M=5	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio sin puente térmico	every day 8 - 18 ; on24/7
15	T1	área común salón	52	0,0577	O=6; EQU=0; M=6	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio sin puente térmico	every day 8 - 18 ; on24/7

 ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

 REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

 APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

Modelo	Área	Zona	área	ocupación	Cargas térmicas	infiltraciones	Grietas	adyacencia	Ventada	Horario
	T2	habitación	18	0,0000	O=0; EQU=0; M=3	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio sin puente térmico	every day 8 - 18 ; on24/7
	T3	habitación	16	0,0000	O=0; EQU=0; M=3	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio sin puente térmico	every day 8 - 18 ; on24/7
16	T1	área común salón	52	0,0577	O=7; EQU=0; M=7	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio sin puente térmico	every day 8 - 18 ; on24/7
	T2	habitación	18	0,0000	O=0; EQU=0; M=4	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio sin puente térmico	every day 8 - 18 ; on24/7
	T3	habitación	16	0,0000	O=0; EQU=0; M=1	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio sin puente térmico	every day 8 - 18 ; on24/7
17	T1	área común salón	52	0,0577	O=7; EQU=0; M=7	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio sin puente térmico	every day 8 - 18 ; on24/7
	T2	habitación	18	0,0000	O=0; EQU=0; M=4	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio sin puente térmico	every day 8 - 18 ; on24/7

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

Modelo	Área	Zona	área	ocupación	Cargas térmicas	infiltraciones	Grietas	adyacencia	Ventada	Horario
	T3	habitación	16	0,0000	O=0; EQU=0; M=0	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas	Aluminio sin puente térmico	every day 8 - 18 ; on24/7
18	T1	área común salón	52	0,0577	O=7; EQU=0; M=7	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas/ Bloques de componente Adiabático	Aluminio sin puente térmico	every day 8 - 18 ; on24/7
	T2	habitación	18	0,0000	O=0; EQU=0; M=4	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas/ Bloques de componente Adiabático	Aluminio sin puente térmico	every day 8 - 18 ; on24/7
	T3	habitación	16	0,0000	O=0; EQU=0; M=1	0,7	media	adiabática a las viviendas aledañas/ Bloques de componente Adiabático	Aluminio sin puente térmico	every day 8 - 18 ; on24/7

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**F-DC-125**

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE  
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO,  
MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO**

**VERSIÓN: 1.0**

**ELABORADO POR:**  
Oficina de Investigaciones

**REVISADO POR:**  
soporte al sistema integrado de gestión

**APROBADO POR:** Asesor de planeación  
**FECHA APROBACION:**