

## Evaluación de materiales de cambio de fase en zonas climáticas del Ecuador

Hugo Sebastián Romero Espinosa, Catalina Vallejo-Coral, Miguel Darío Ortega López,  
Javier Martínez Gómez

### Abstract

Nowadays, the building sector aims to improve the thermal comfort and to reduce the energy consumption implementing new alternative systems. For this purpose, a new phase change material (PCM) is being studied to analyze performance of a building in three different climates of Ecuador by using a simulation tool.

This work assesses the PCM performance used as part of a building envelopes through a virtual model in Design Builder. To improve reliability of simulation results, model is calibrated with experimental previous existing data of a building, which is a monitoring room without occupancy.

The virtual model includes PCM in the roof and walls of the virtual calibrated model. The prime matter of PCM is found in Ecuador and thermal and chemical characteristics were product of a previous study. On the other hand, this study assesses annual thermal comfort by using the predicted mean vote (PMV). The original model and PCM results are compared by the total time of thermal comfort during a year in three Ecuadorian cities.

The results shows that the use of a PCM into a building located in Quito increase the thermal comfort hours, since the PMC decrease the air temperature fluctuation decrease throughout the year. However, the use of PCM in Zumbahua represents a disadvantage because the climate conditions do not allow storing energy by PCM as latent heat. In Guayaquil, the impact of the the PCM use in the envelope can be useful when a HVAC equipment is used since the

maximum thermal load is reduced resulting in energy savings by equipment operation.

**Index terms.**— Phase change material (PCM), building thermal comfort, energy simulation, Ecuador climate zones.

### Resumen

Hoy en día, el sector de las edificaciones tiene como objetivo mejorar el confort térmico y reducir el consumo energético implementando nuevos sistemas alternativos. Con este propósito, un nuevo material de cambio de fase (PCM) es estudiado para conocer su desempeño en una edificación en diferentes climas del Ecuador. Este estudio evalúa el rendimiento del uso del PCM a través de un modelo virtual en DesignBuilder. Para mejorar la fiabilidad de los resultados el modelo se calibra con datos experimentales previamente obtenidos de un cuarto de monitoreo sin ocupación.

El modelo virtual contempla el uso de PCM en las paredes y cubierta. La materia prima para su elaboración se la encuentra en Ecuador; y las características químicas y térmicas fueron evaluadas en un trabajo anterior. El objetivo del presente estudio es evaluar el confort térmico anual, mediante el voto medio predictivo (PMV por sus siglas en inglés), de una edificación utilizada como oficina en 3 ciudades ecuatorianas.

Como resultado se obtiene que el uso del PCM en Quito incrementa la cantidad de horas de confort debido a que el PCM reduce las

fluctuaciones de temperatura del aire al interior de la edificación; mientras que en Zumbahua el efecto del PCM es una desventaja ya que las condiciones climáticas no permiten que el material almacene calor latente. En el caso de Guayaquil, el impacto del uso del PCM puede ser beneficioso cuando existe la utilización equipos de aire acondicionado ya que se disminuye la carga térmica máxima produciéndose ahorros de energía en dichos equipos.

**Palabras clave**— Material de cambio de fase (PCM), Confort Térmico, Simulación energética en Edificaciones, Zonas Climáticas en el Ecuador

## 1. INTRODUCCIÓN

Las naciones unidas, en el 2015, acordaron un conjunto de objetivos para el desarrollo sostenible, de los cuales uno de ellos está relacionado con las edificaciones y las condiciones de habitabilidad [1]. Actualmente, 130 millones de familias en América Latina habitan en áreas urbanas, de las cuales 42 millones viven bajo las condiciones mínimas de habitabilidad afectando al confort y la salud de las personas [2]. En el Ecuador existen aproximadamente 15 millones de habitantes, que constituyen 3.8 millones de hogares. El 45% de hogares ecuatorianos habitan en viviendas inadecuadas, de las cuales, el 36% sufre de déficit cualitativo y el 9% de déficit cuantitativo. El déficit cualitativo corresponde a viviendas las cuales no están construidas con materiales apropiados (muros, techo, pisos), presentan un estado de conservación de la edificación inadecuado y a nivel nacional existe 1.37 millones de hogares en estas condiciones [3].

A pesar del déficit cualitativo existente a nivel nacional, el diseño arquitectónico de las edificaciones en el Ecuador, generalmente, no contempla las propiedades termo-físicas de los materiales en función de las condiciones climáticas a las cuales están expuestas. No obstante, el territorio ecuatoriano se encuentra en diferentes zonas climáticas debido a la influencia de la cordillera de los Andes, las corrientes marinas, la localización y la altitud [4]. Los estudios enfocados en el comportamiento térmico de las edificaciones en distintas zonas climáticas pretenden optimizar el diseño y de esta manera mejorar las condiciones de vida dentro de las edificaciones [5]. Gallardo [5] en su trabajo estudia el desempeño térmico de los materiales en una vivienda social, mediante simulación, identificando que el diseño de la edificación propuesta por el Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda son inadecuados para mantener un ambiente en condiciones de confort. Además, propone una combinación de materiales de construcción que mejoran las condiciones de confort térmico al interior de la

vivienda. Para climas fríos recomienda usar paredes de adobe, concreto para el piso, galvalume de alta eficiencia, para el techo y acristalamiento simple con una emisividad baja; mientras que para la región de la costa recomienda los mismos materiales con la diferencia del uso de acristalamiento claro. Un estudio con la misma temática y del mismo autor [4] evalúa el confort térmico de viviendas sociales en diferentes zonas climáticas del Ecuador dando como resultados que el mayor desconfort térmico se presenta en las edificaciones ubicada en zonas altas de la Cordillera de los Andes.

Otro estudio, sobre la influencia de las condiciones climáticas en el confort térmico de las edificaciones, es desarrollado por el INER [2] (Instituto de Investigación Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables), el cual describe estrategias para mejorar la habitabilidad y disminuir la demanda de consumo energético en viviendas ubicadas en varias zonas climáticas del Ecuador.

Considerando la importancia del uso adecuado de materiales para edificaciones de acuerdo a las condiciones climáticas locales Beltrán [7] selecciona un material de cambio de fase para una vivienda, mediante un análisis multicriterio, y compara el rendimiento térmico a través de simulaciones energéticas. Mediante la simulación concluye que es necesario realizar la evaluación térmica del material para conocer el comportamiento de los materiales en respuesta a las condiciones ambientales externas. A partir de esto, menciona que el material de cambio de fase (PCM por sus siglas en inglés) tiene un buen comportamiento en climas fríos mientras que en climas cálidos y húmedos presentan una disminución en el confort.

Por otro lado, Acurio [8] caracterizó el comportamiento térmico y químico de PCMs obtenidos partir de diferentes mezclas de componente orgánicos, ésteres de aceite de palma y ácido esteárico comercial, que utiliza diatomita reciclada como material de soporte la cual es un residuo de la industria de la

palma de aceite en el Ecuador. Los PCMs caracterizados pueden ser utilizados como un sistema de almacenamiento térmico en edificaciones debido a que, después de 360 ciclos, presentaron un desempeño térmico aceptable y rangos de temperatura de cambio de fase cercanos a los valores de confort térmico.

En base a lo expuesto, el objetivo de este estudio es determinar el confort térmico, mediante simulación validada, de una edificación tipo con material de cambio de fase en la envolvente en varias zonas climáticas del Ecuador. Para cumplir con el objetivo, se realiza un modelo virtual en el software DesignBuilder de una edificación y su validación se obtiene comparando los resultados simulados con datos experimentales de una localidad específica. Posteriormente, se evalúa el confort térmico en las distintas zonas climáticas del Ecuador. Se incluye el material de cambio de fase en la envolvente de la edificación y se comparan los resultados.

El uso del PCM en la envolvente de la edificación tiene un comportamiento distinto en cada zona climática. En Quito, el material de cambio de fase disminuye las fluctuaciones de la temperatura del aire dentro de la edificación debido a que el rango de fusión del PCM es adecuado para las condiciones climatológicas en esta ciudad. El comportamiento del PCM en Guayaquil puede ser una ventaja si se lo utiliza con sistemas activos ya que el material de cambio de fase disminuye las temperaturas máximas por lo tanto disminuyen el consumo energético del algún sistema activo de aire acondicionado.

## 2. METODOLOGÍA

En esta sección se detalla la metodología que se empleó para la calibración del modelo, simulación del material de cambio de fase en distintas zonas climáticas del Ecuador y la evaluación del confort térmico.



**Figura 1: Edificación estudiada.**

En este estudio se toma como modelo para la simulación una edificación localizada en Monterrey – México. Esto debido a que, en el Ecuador el 61 % de las edificaciones utilizan bloque para la construcción de paredes y el 47 % utilizan hormigón armado en la cubierta, siendo estas las características constructivas de la edificación estudiarse. Además, se dispone datos experimentales de temperaturas superficiales de pared, cubierta y aire confiables y necesarios para la calibración del modelo.

La edificación modelo forma parte de las instalaciones del ITESM (Instituto Tecnológico y de Estudios superiores de Monterrey) - Campus Monterrey, presenta 2.6 m de altura con una área de 7.2 m<sup>2</sup>, paredes de bloque de concreto y techo de concreto macizo. En la Fig. 1 se presenta una fotografía de su fachada frontal.

Una vez calibrado el modelo, se seleccionan las ciudades de estudio ubicadas en diferentes zonas climáticas del Ecuador y se determinan las horas de confort del ambiente interior para condiciones constructivas originales (sin PCM) y con PCM en cada ciudad seleccionada.

### 2.1. Calibración

La calibración de una simulación energética aumenta la confiabilidad de los resultados. El método de calibración utilizado en este trabajo se basa en pasos manuales e iterativos descrito por Reddy [10]. La construcción del modelo se

basa en la información disponible en el trabajo de Vallejo [11]. Para la simulación se genera un modelo considerando dimensiones de la geometría de la edificación, propiedades de los materiales, datos climáticos de los meses de la calibración y parámetros propios del modelo que se mencionan más adelante. Para la calibración no se utiliza horarios de ocupación ya que durante la recopilación de datos experimentales no se presentó ocupación.

La geometría del modelo se realizó en la interfaz del programa DesingBuilder con las dimensiones suministradas por Vallejo [1]. Tomando en cuenta las coordenadas geográficas se determinó el ángulo de orientación de la edificación con respecto al norte magnético. Los datos climatológicos fueron adquiridos de una estación meteorológica cerca de la edificación de monitoreo y corresponde al intervalo de tiempo desde 1 de julio del 2016 hasta el 29 de septiembre del mismo año.

Respecto a los materiales de la envolvente, para la pared se creó una estructura de 3 partes; dos de enlucido de 0.01905 m de espesor y una intermedia de bloque de concreto de 0.1016 m de espesor. La cubierta es una capa de concreto de 0.15241 m de espesor expuesta a la intemperie y una capa de enlucido interno. Las propiedades superficiales fueron las variables de ajuste para calibrar el modelo. Se tomó como punto de partida de los valores del ASHRAE Handbook Fundamentals [11] y fueron modificadas sin superar una variación del 10 %.

Para validar la simulación térmica del modelo se utiliza, como parámetros de comparación, las temperaturas superficiales internas del techo, pared y la temperatura del aire interior obtenidas del modelo versus los valores registrados experimentalmente. La comparación es evaluada a través de indicadores estadísticos, los cuales cuantifican la variación de los resultados de la simulación respecto a los experimentales.

Los indicadores estadísticos RMSE (error cuadrático medio) y MBE (error marginal

medio) son usados por varios autores para evaluar si la simulación energética se encuentra calibrada. Cuando se utiliza datos experimentales de temperatura es recomendable utilizar indicadores adicionales [3], [4]. En este estudio se utiliza el coeficiente de correlación (R), el error máximo y mínimo de todas las horas de calibración.

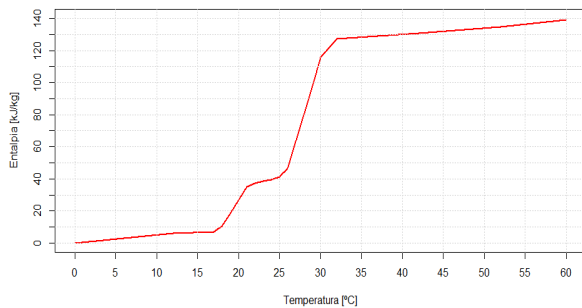
## 2.2. Simulación de la edificación utilizando PCM

Tomando de base el modelo calibrado y los datos climáticos de 3 ciudades de Ecuador se realiza la simulación de la edificación implementando una capa de PCM de 0.01 m de espesor. En el techo, el PCM se ubica entre las capas de enlucido interior y concreto macizo, mientras que en la pared se encuentra entre el bloque de concreto y el enlucido interno.

En este estudio, el PCM utilizado está compuesto por un material de soporte y un compuesto orgánico. El material de soporte es tierra diatomita nueva que es un material poroso y que se lo puede adquirir a las empresas que extraen petróleo en el Ecuador. El compuesto orgánico es una mezcla entre aceite de palma, materia sobre producida en Ecuador, y ácido esteárico comercial derivado de la producción del aceite de palma producido en el país. Las características térmicas de este material se encuentran en los resultados del trabajo de Acurio [5]. En el presente estudio, se utiliza el PCM que presenta 100% ácido esteárico, como compuesto orgánico, y diatomita nueva, como material de soporte. Los resultados del ensayo DSC (escaneo diferencial de calorimetría) realizado por Acurio [5], muestran que este tipo de PCM presenta mayor capacidad de almacenamiento de calor latente y su rango de temperatura de fusión es cercano a la fluctuaciones de la temperatura ambiental. Además muestran que el PCM se estabiliza a los 360 ciclos en el ensayo DSC.

Por lo expuesto, se obtuvo la curva entalpia versus temperatura, requerida por el DesignBuilder, a partir de los datos del ensayo

a 360 ciclos. La curva obtenida se presenta en la Fig. 2. y provee información sobre el rango de temperatura de fusión. El proceso de fusión del material ocurre cuando la entalpia incrementa el valor de manera abrupta en un pequeño intervalo de temperatura. El rango de temperatura de fusión se encuentra entre 17 °C y 32 °C.



**Figura 2: Curva de entalpia-temperatura del PCM**

Para evaluar el comportamiento de la envolvente se compara las temperaturas del aire y de la superficie interna de la cubierta con y sin el uso del PCM. La comparación se realiza en intervalos horarios para un día representativo; mientras que la evaluación del impacto, al utilizar PCM, en el confort de los ocupantes se realiza considerando al modelo calibrado como oficina ocupada por una persona que se encuentra sentada escribiendo frente a un computador desde 8:00 hasta 18:00 los 365 días del año. Es importante mencionar que la vestimenta definida para el ocupante depende de la zona climática.

El Ecuador continental se encuentra dividido en tres macro zonas: Costa, Sierra y Amazonia. Las condiciones climáticas están determinadas por la influencia marítima, la ubicación de la cordillera de los Andes y la altitud [2]. Se selecciona las ciudades de Quito y Guayaquil debido a que presentan la mayor densidad poblacional a nivel nacional, mientras que Zumbahua representa a los poblados que superan los 3000 m.s.n.m.

Los parámetros climatológicos considerados son: temperatura de bulbo seco, temperatura de rocío, radiación solar normal directa, radiación solar horizontal difusa, velocidad del viento, dirección del viento y

presión atmosférica. Los datos utilizados, para las simulaciones de cada zona climática, fueron generados por el software Meteonorm, que es una base de datos meteorológica y genera datos horarios para un año meteorológico típico. Estos datos son generados para un punto localizado en el centroide de cada ciudad.

### 2.3. Evaluación del Confort

El análisis del confort térmico del estudio se basa en estándar 55 de la ANSI/ASHRAE y se utiliza el método del PMV (voto medio predictivo) aplicable para condiciones del ambiente específicas [15].

El metabolismo y vestimenta, requeridos por el método PMV, se determinan dependiendo de la actividad elegida y del de las condiciones climáticas de estudio respectivamente [16]. Los valores de aislamiento por vestimenta se obtienen de ASHRAE Handbook Fundamentals [12].

Por otro lado, el método mencionado utiliza como parámetros de evaluación la temperatura del aire, temperatura radiante y humedad relativa del ambiente. Dichos parámetros se obtienen del modelo simulado dando como resultado el valor del PMV horario. El rango de aceptación a partir del cual se define si la persona se encuentra en confort es  $-0.5 < PMV < +0.5$ . Una vez calculado los valores de PMV se realizan histogramas de frecuencia en intervalos de 0.1 PMV y se determina parámetros estadísticos de posición y dispersión. Además, se calcula el porcentaje de horas de confort respecto a las horas que presentaron ocupación durante un año.

## 3. RESULTADOS

En esta sección se detallan los resultados de la calibración con datos experimentales de la temperatura del aire y los respectivos indicadores estadísticos obtenidos. Además, se presentan los resultados del comportamiento térmico de la envolvente con y sin el uso del PCM de una semana representativa en tres zonas climáticas del Ecuador. Finalmente, se presentan los resultados del confort térmico al

interior de la edificación con y sin el uso de PCM.

### 3.1. Calibración de la simulación

Para realizar el análisis de la calibración se utiliza gráficos de comparación entre la temperatura experimental y simulada para los 3 parámetros de calibración e indicadores estadísticos (RMSE, MBE, R, error máximo y mínimo).

El periodo de calibración es desde el 16 al 20 de septiembre del 2016 correspondiente a 120 horas como se observa en la Fig. 3 en la cual se presenta la temperatura del aire resultado del modelo calibrado y la temperatura experimental en el periodo de calibración observándose una tendencia similar.

Debido a que, la temperatura del aire es resultado de la temperatura superficial de la envolvente, se analizó los errores entre los valores simulados respecto los valores medidos. Se identificó que, alrededor del 85% de errores son negativos, es decir que en la mayoría de los casos la temperatura del aire simulada es mayor a la temperatura del aire experimental. No obstante, el 65% de los errores no superan la tolerancia de  $\pm 1$  °C de los instrumentos de medición, por lo tanto la mayoría de resultados de la simulación se encuentran en el rango de tolerancia de los instrumentos que se utilizaron para obtener los datos experimentales.

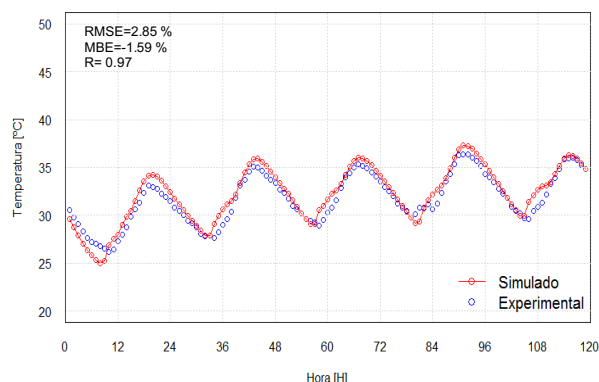
Las diferencias observadas se pueden generar debido a que las propiedades de los materiales no fueron obtenidas experimentalmente alterando los resultados de simulación respecto a la realidad.

Los errores máximos y mínimos indican el rango en el que se encuentran las diferencias identificadas entre los valores simulados y los valores medidos. Los errores calculados se muestran en la Tabla 2 y se observa que la temperatura de la cubierta presenta el mayor rango, esto quiere decir que los errores están más dispersos respecto a los parámetros de calibración adicionales. Una de las causas de dicha dispersión es el efecto de la

precipitación en el comportamiento térmico de la cubierta.

El dato de entrada de precipitación en la simulación es mayor a la cantidad real de agua que recibió la edificación. Esto debido a que, durante la recopilación de datos la edificación se encuentra localizado bajo un árbol que protege a la cubierta en los días lluviosos, mientras que en el modelo simulado dicho elemento no fue considerado. En consecuencia, durante las horas de lluvia la temperatura simulada de la cubierta es menor a la experimental por lo que el error máximo de 3.44 °C.

Por otro lado, los indicadores estadísticos RMSE y MBE, respecto a la comparación de los parámetros de calibración obtenidos, están dentro del rango aceptable de acuerdo a la normativa [17], [18], es decir  $MBE < 10\%$  y  $RMSE < 30\%$  para datos horario, como se muestra en la Tabla 2. Además, se observa que el valor de R es cercano a 1 para todos los parámetros de calibración, lo que demuestra que las temperaturas simuladas y experimentales tiene una relación directa aceptable según lo descrito en la bibliografía [19].



**Figura 3: Datos experimentales y simulados de la temperatura interior del aire desde 16 de septiembre al 20 de septiembre del 2016, en Monterrey.**

**Tabla 1: Valores de indicadores de calibración calculados.**

Parámetro de calibración	RMSE (horario) [%]	MBE (horario) [%]	Max Error [°C]	Min Error [°C]	R
Temperatura interior del aire	2.85	-1.59	1.8	-1.8	0.97
Temperatura superficial interior de la pared	3.2	1.85	1.5	-1.8	0.97
Temperatura superficial interior de la cubierta	3.99	1.37	3.44	-1.62	0.98

El MBE y el RMSE son utilizados para analizar el comportamiento del error y verificar la desviación de la simulación respecto a los valores experimentales. MBE representa la cercanía de las predicciones con respecto a lo medido, mientras que RMSE es una medida de la variabilidad o dispersión de los errores entre los datos simulados y los experimentales. Los valores cercanos a 0 representan un mejor ajuste.

Considerando que la recopilación de datos experimentales presenta incertidumbre y que los indicadores estadísticos se encuentran dentro de rangos definidos como admisibles, de acuerdo a las normas pertinentes, se observa una correspondencia aceptable entre los parámetros de calibración simulados y las medidas experimentales.

### 3.2. Evaluación del comportamiento térmico de la edificación en Ecuador

Para conocer la influencia del uso del PCM, como parte de la envolvente, en el confort

térmico se analiza comportamiento térmico de la edificación con y sin el uso del PCM considerando 3 zonas climáticas diferentes del Ecuador, a partir del modelo calibrado. La evaluación se realiza mediante la comparación de la temperatura superficial interna de la cubierta y el aire interno. El periodo analizado, desde el 25 al 29 de diciembre, corresponde a los cinco días continuos de un año meteorológico típico que presentan la temperatura media del aire exterior dentro del rango de mayor frecuencia en Quito, Guayaquil y Zumbahua como se muestra en la Fig. 4.

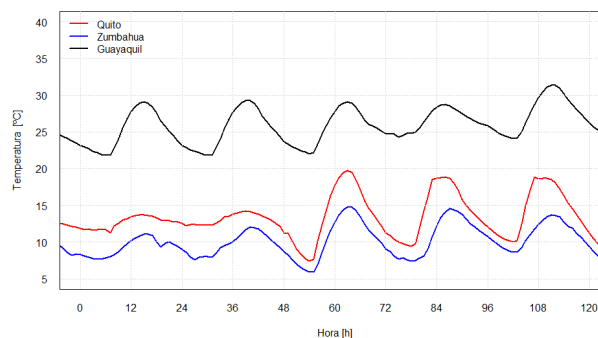
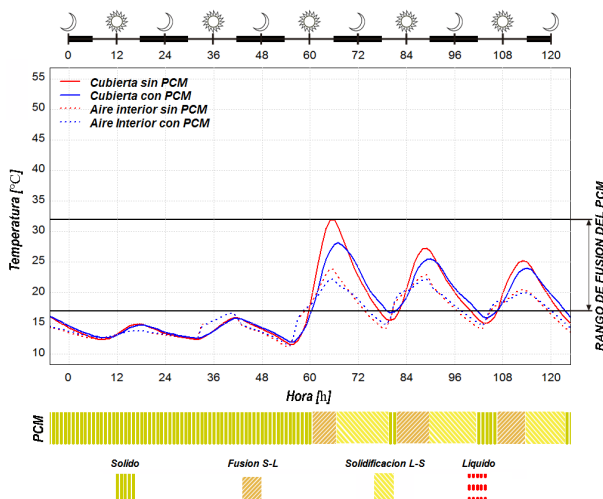


Figura 4: Temperatura ambiental de las ciudades de estudio desde el 25 al 29 de diciembre de un año meteorológico típico.

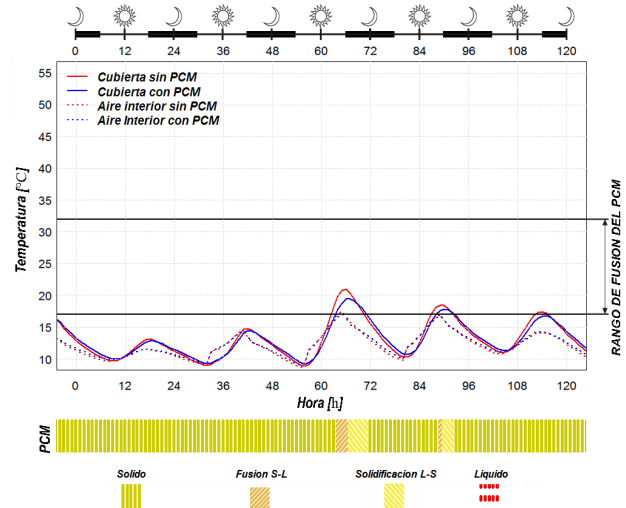
Para Quito, en la Fig. 5 se presentan las temperaturas superficiales internas de la cubierta y se diferencia dos comportamientos. En las 60 primeras horas las condiciones climáticas no permiten que la temperatura de la cubierta sea mayor al límite inferior del rango fusión del PCM por lo que su comportamiento es similar a la cubierta sin PCM. A partir de la hora 61, durante el día, la temperatura de la cubierta se eleva y sobrepasa el límite inferior de fusión del material, lo que produce que el PCM almacene calor latente por cambio de fase disminuyendo la temperatura del aire. En la noche, la cubierta disminuye la temperatura, permitiendo el rechazo de calor hacia el interior, por lo que la temperatura del aire incrementa. Esto demuestra que, el uso del PCM en Quito disminuye el rango de fluctuación de las temperaturas del aire interno y de la envolvente.

Por otro lado, en la Fig. 6 se presenta la comparación de la temperatura superficial interna de la cubierta con y sin el uso del PCM, y el comportamiento de la temperatura del aire para la ciudad de Zumbahua. Se observa un comportamiento similar a Quito durante a las primeras 60 horas. No obstante, las condiciones climáticas no elevan la temperatura de la cubierta lo suficiente para que el PCM cambie de fase por lo que no se observa un cambio significativo en la temperatura del aire.

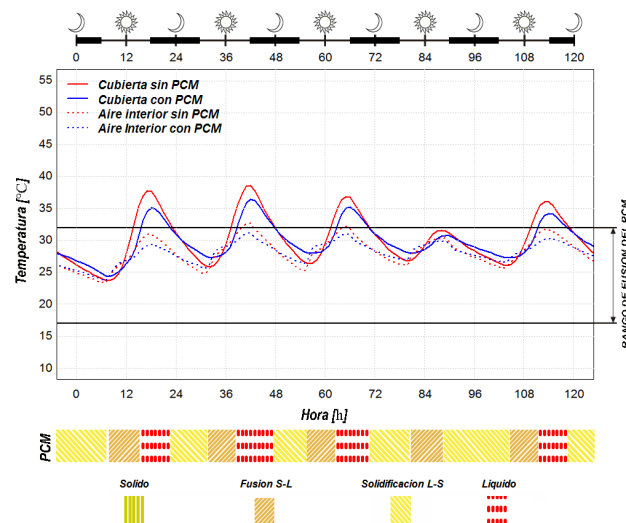
En la Fig. 7 se representa la comparación de la temperatura superficial interna de la cubierta y la temperatura del aire con y sin el uso del PCM para la ciudad de Guayaquil. Las condiciones climatológicas mantienen la temperatura de la cubierta cercana al límite superior del rango fusión por lo que el PCM se mantiene en estado líquido o disuelto en una mezcla líquido-sólido. El almacenamiento de calor latente de fusión durante la mañana disminuye la fluctuaciones de la temperatura del aire y cubierta, es decir que el PCM presenta un comportamiento térmico similar a Quito.



**Figura 5:** Temperatura superficial interna de la cubierta y del aire con y sin el uso del PCM en Quito, del 25 al 29 de diciembre de un año meteorológico típico.



**Figura 6:** Temperatura superficial interna de la cubierta y temperatura del aire con y sin el uso del PCM en Zumbahua, del 25 al 29 de diciembre de un año meteorológico típico.



**Figura 7:** Temperatura superficial interna de la cubierta y temperatura del aire con y sin el uso del PCM en Guayaquil, del 25 al 29 de diciembre de un año meteorológico típico.

### 3.3. Evaluación del confort térmico

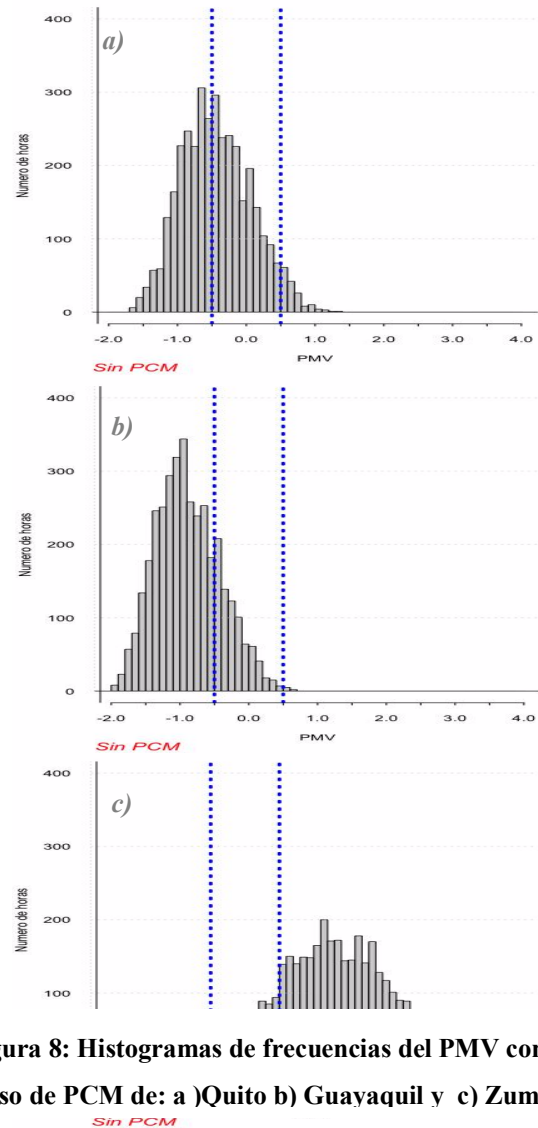
Para evaluar el confort térmico se utilizó el método del PMV considerando un uso de oficina cuyo horario de ocupación es de 8:00 a 18:00, resultando 3650 horas de ocupación durante un año.

El análisis de confort, realizado en cada ciudad, determina el porcentaje de horas de confort y horas de desconfort, causadas por baja o alta temperatura, respecto a las horas totales de ocupación en un año. Los resultados

detallan en la Fig. 8 y en la Tabla 3.

Para Quito, en la Fig. 8 se observa que la distribución de frecuencias sin el uso de PCM tiene un sesgo positivo; mientras que el uso de PCM genera que la distribución de los valores del PMV sea simétrica en el rango de confort (entre -0.5 y -0.4). Esto se debe a un cambio de la posición del rango moda, es decir que existe un incremento del confort térmico durante un año de uso de la edificación.

El confort térmico, en Quito, aumenta en un 5.56% debido al uso del PCM, lo que representan 203 horas más de confort al año. Esto significa una disminución del 3.32% (121 horas) de disconfort por altas temperaturas, y del 2.24% (82 horas) de disconfort por bajas temperaturas, debido a que las condiciones climáticas de la ciudad mantienen la temperatura de la cubierta y las paredes dentro del rango fusión del material, produciendo disminución del rango de fluctuaciones de la temperatura del aire interior

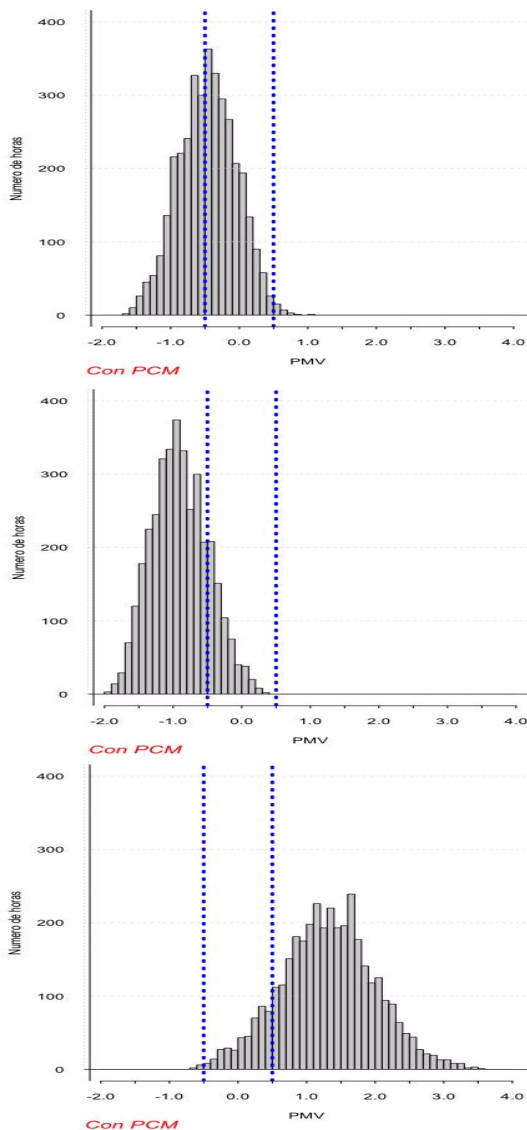


**Figura 8: Histogramas de frecuencias del PMV con y sin el uso de PCM de: a )Quito b) Guayaquil y c) Zumbahua**

Por otro lado, en la Fig. 8 se observa, para Zumbahua, una distribución simétrica sin y con el uso del PCM. Esto demuestra que el PCM no genera un cambio significativo en el confort térmico, debido a que no acumula ni rechaza calor la mayoría de días.

En Zumbahua el confort térmico disminuyó en un 3.65%, que representan 133 horas, debido al uso del PCM. Esto se manifiesta en una disminución del 0.1% (3 horas) de disconfort por altas temperaturas, que son depreciables frente al aumento de 3.75% (136 horas) del disconfort por bajas temperaturas. El aumento en el tiempo de disconfort se debe a que en algunos días, durante la mañana, las

temperaturas de la cubierta son mayores al límite inferior del rango de fusión del PCM. Esto permite que el material almacene calor latente disminuyendo la temperatura del aire al interior, en las horas de ocupación como se observa en el intervalo de 60 a 72 horas en la Fig. 6.



Finalmente, durante el periodo de ocupación, en Guayaquil, el material almacena energía por cambio de estado en las horas de mayor carga térmica por lo que, la temperatura del aire y de la superficie interior de la cubierta disminuye. Por esta razón, en la Fig. 8, se observa un aumento del rango moda del PMV y un cambio de sesgo positivo a negativo

de la distribución en el histograma de frecuencias.

En Guayaquil las condiciones climáticas de la ciudad mantienen la temperatura de la cubierta y las paredes cerca del límite superior fusión del PCM. Esto produce que disminuya rango de fluctuaciones de la temperatura del aire. Por esta razón, el confort térmico disminuye en un 3.4%, que representan 124 horas, debido al uso del PCM. Dicho porcentaje representa una disminución del 0.16% (6 horas) de disconfort por bajas temperaturas, y un aumento del 3.56% (130 horas) de disconfort por altas temperaturas. Además, se observa que el PCM presenta cambio de fase más días en Guayaquil que Quito y Zumbahua.

Las fluctuaciones de temperatura ambiente en Guayaquil están cerca del límite superior de fusión del PCM y presentan un rango de variación menor respecto a Quito. Esto genera mayor modificación del ambiente térmico a causa del uso del PCM durante un año. Por esta razón al usar PCM en Guayaquil el rango moda del PMV tiene el mayor cambio de posición (equivalente a 4 rangos) comparado a Quito, que presenta un cambio de 1 rango, y a Zumbahua que no presenta ningún cambio.

En la Tabla 3 se presentan los resultados de la evaluación del confort térmico y las causas de disconfort al usar PCM en las ciudades antes descritas. Se observa que el uso de PCM incrementa el confort térmico únicamente en Quito, ya que su uso implica, en mayor proporción, la disminución del disconfort térmico por bajas temperaturas.

**Tabla 2. Resultados del confort térmico con y sin uso del PCM en las ciudades de Quito, Guayaquil y Zumbahua.**

Estado de confort	Quito		Guayaquil		Zumbahua	
	Con PCM	Sin PCM	Con PCM	Sin PCM	Con PCM	Sin PCM
Confort [%]	53.91	48.35	12.02	15.42	17.69	21.34
Disconfort por alta temperatura [%]	0.69	4.01	87.75	84.19	0	0.1
Disconfort por baja temperatura [%]	45.4	47.64	0.23	0.39	82.31	78.56

#### 4. DISCUSION

El material de cambio de fase en Quito produce un aumento en las horas de confort debido a que aumenta las temperaturas superficiales internas de la cubierta y del aire durante las horas más frías del día, mientras que disminuye las temperaturas en las horas de mayor calor. El comportamiento del PCM evaluado para Quito es similar al trabajo de Beltrán en el cual se muestra que dependiendo de las condiciones climáticas el PCM tiene distinto comportamiento. Menciona que en Quito el PCM presenta buen comportamiento térmico durante el día y especialmente en la noche [20]. El PCM que tiene el mejor desempeño para un tipo de clima homólogo al de Quito (Cwb en la clasificación de Köppen-Geiger [21]) presenta una temperatura de fusión similar al PCM que se utiliza en este estudio. Por esto, se observa que el PCM utilizado en este estudio tiene el mejor comportamiento en las condiciones climáticas de Quito que en otras ciudades.

En el caso de Zumbahua, el uso de PCM no genera un cambio significativo en el comportamiento de la temperatura del aire. Esto se debe a que las condiciones climáticas no logran elevar la temperatura de la envolvente lo suficiente para que el PCM pueda alcanzar su temperatura de fusión para acumular y rechazar calor latente. El

comportamiento del PCM en la zona climática fría, en su mayoría del tiempo es como el de un sólido y no presenta un efecto notable.

En Guayaquil, el comportamiento de la temperatura del aire interior cuando se usa PCM, es similar a los resultados de Beltrán [7]. Desde las 0:00 hasta las 12:00 la temperatura del aire aumenta mientras desde las 12:00 hasta las 24:00 disminuyen con respecto al modelo sin PCM, aumentando el disconfort por altas temperaturas. El uso de PCM genera un cambio en la distribución de los valores de PMV de un sesgo positivo a un sesgo negativo. Esto significa que en las horas de ocupación el PCM modifica el ambiente térmico debido a que presentan más cantidad de ciclos de cambio de fase a lo largo del año.

Cuando el PCM alcanza temperaturas dentro de su rango de fusión, este modifica el ambiente interior caso contrario no genera un cambio considerable en la temperatura del aire. En Quito y Guayaquil el PCM almacena energía debido a las condiciones climáticas. En Guayaquil, el PCM almacena y rechaza calor en más días que en Quito durante un año. Esto claramente se observa comparando las Fig. 5 y Fig. 7, y que el cambio del rango moda en Guayaquil es 4 rangos; mientras que en Quito es 1 rango y Zumbahua no cambia de rango moda cuando se usa PCM. Esto demuestra que en Guayaquil hay más horas de confort durante un año que son modificadas por el uso del material de cambio de fase.

Comparando el comportamiento de la cubierta de las 3 ciudades, Quito almacena más cantidad de calor debido a que las condiciones climáticas permiten que las temperaturas de la cubierta estén dentro del rango de fusión del PCM. Mientras que, en Guayaquil, la temperatura de la cubierta se encuentra cerca del límite superior causando que en las temperaturas más calientes el PCM se encuentre en estado líquido y no almacene calor latente por cambio de fase. En Zumbahua, la temperatura de la cubierta no logra alcanzar el límite inferior del rango de fusión por lo que no almacena calor latente.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En cuanto a la calibración, las propiedades superficiales de los materiales son importantes durante el proceso de validación de la simulación. Los valores que tienen estas propiedades modifican los resultados de la simulación de la temperatura interna de las superficies y del aire. En este sentido, la selección de valores, de las propiedades superficiales de los materiales, cercanos a los encontrados en bibliografía disminuye los errores entre los resultados simulados y los datos experimentales.

Generalmente, los indicadores estadísticos MBE y RMSE se emplean para evaluar la calibración de simulaciones energéticas tomando como parámetro de comparación la energía consumida en la edificación durante un periodo de tiempo. Para evaluar la calibración de una simulación utilizando datos experimentales de temperaturas es necesario utilizar indicadores estadísticos adicionales que complementen a los recomendados. Esto disminuye el tiempo del proceso y mejoran los resultados de calibración.

La precipitación es un parámetro influyente en el proceso de calibración. El valor correcto de la precipitación puede disminuir la diferencia entre los resultados de la calibración y los datos experimentales. Un valor mayor en la precipitación genera un error disminuyendo la temperatura interior de la cubierta y del aire produciendo que en las horas de lluvia se produzcan los errores máximos. El modelador puede confundir el error por precipitación con los valores en las variables de ajuste mal seleccionados.

En cuanto a la evaluación del confort térmico, comparando las 3 ciudades, el mejor desempeño del PCM se presentó en la ciudad de Quito. Esto se debe a que el rango de fusión del PCM es adecuado para las condiciones climatológicas en Quito.

En Guayaquil, el uso del PCM puede ser una ventaja si se lo emplea junto a sistemas activos como el aire acondicionado. La

disminución de las fluctuaciones de la temperatura de la cubierta y del aire genera una disminución en las temperaturas máximas produciendo que la capacidad del equipo de aire acondicionado requerido para una edificación en Guayaquil sea menor. En espacios acondicionados, el PCM disminuiría el consumo energético

Evaluar el confort térmico para determinar el comportamiento de una envolvente con PCM permite conocer el efecto real que tiene su desempeño en las personas que habitan un espacio.

El análisis diario brinda información sobre la cantidad de calor latente que puede acumular el PCM, dependiendo de las condiciones climáticas y explica el comportamiento térmico del material de cambio de fase durante un ciclo de trabajo. El análisis anual brinda información sobre el número de días los cuales el PCM está influyendo en el ambiente térmico dentro de la edificación.

Se recomienda para los trabajos futuros realizar un análisis del PCM con el uso del aire acondicionado y de esta manera evaluar si el PCM genera ahorros energéticos.

Desarrollar un modelo de calibración automático que dependa menos de la experiencia del modelador, de esta manera disminuir el tiempo de calibración.

Extender este estudio a más zonas climáticas del Ecuador de esta manera poder evaluar el comportamiento del PCM de manera más específica.

Evaluar el comportamiento térmico de varios PCM con diferentes proporciones de aceite de palma y ácido esteárico.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Instituto de Investigación Geológico y Energético por el acompañamiento técnico durante el desarrollo del este estudio y por las facilidades tecnológicas prestadas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Council of Science, Review of the SDGs - ICSU. .
- [2] INER, “Estrategias para mejorar las condiciones de habitabilidad y el consumo de energía en viviendas,” 2016.
- [3] MIDUVI, “Programa nacional de vivienda social. Subsecretaría de vivienda,” 2015.
- [4] A. Gallardo, G. Villacreses, M. Almaguer, J. Martínez, and A. Lobato-, “Estimating the indoor thermal comfort deficit in the social housing built in Ecuador by integrating Building Information Modelling and Geographical Information Systems,” IBPSA Build. Simul. Conf. 2017, no. December, 2017.
- [5] A. Gallardo, M. Palme, D. Beltrán, A. Lobato, G. Villacreses, and L. Godoy, “Analysis and Optimization of the Thermal Performance of Social Housing Construction Materials in Ecuador,” PLEA, pp. 360–366, 2016.
- [6] A. Sandoya, C. Leonel, G. Ordóñez, and J. Arias, NEC-HS-EE, MIDUVI. 2018.
- [7] R. D. Beltrán and J. Martínez-Gómez, “Analysis of phase change materials (PCM) for building wallboards based on the effect of environment,” J. Build. Eng., vol. 24, 2019.
- [8] K. Acurio, A. Chico-Proano, J. Martínez-Gómez, C. F. Ávila, Á. Ávila, and M. Orozco, “Thermal performance enhancement of organic phase change materials using spent diatomite from the palm oil bleaching process as support,” Constr. Build. Mater., vol. 192, pp. 633–642, 2018.
- [9] E. Fabrizio and V. Monetti, “Methodologies and advancements in the calibration of building energy models,” Energies, vol. 8, no. 4, pp. 2548–2574, 2015.
- [10] T. A. Reddy, “Literature review on calibration of building energy simulation programs: Uses, problems, procedures, uncertainty, and tools.,” ASHRAE Trans., vol. 112, no. 1, pp. 226–240, 2006.
- [11] E. Vallejo, “DETERMINACIÓN DE CLTD PARA CARGAS DE ENFRIAMIENTO DE EDIFICACIONES UBICADAS EN CIUDADES DE CLIMA CÁLIDO EN MÉXICO,” Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), 2017.
- [12] ASHRAE, Handbook - Fundamentals (SI Edition), American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2017.
- [13] F. Roberti, U. Filippi, and A. Gasparella, “Calibrating historic building energy models to hourly indoor air and surface temperatures: Methodology and case study,” Energy Build., vol. 108, pp. 236–243, 2015.
- [14] B. Gucyeter, “CALIBRATION OF A BUILDING ENERGY PERFORMANCE SIMULATION MODEL VIA MONITORING DATA Basak Gucyeter Department of Architecture , Faculty of Architecture and Engineering , Eskisehir,” Chicago, IL, 2018.
- [15] M. A. Humphreys and J. Fergus Nicol, “The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments,” Energy Build., vol. 34, no. 6, pp. 667–684, 2002.
- [16] E. Ordóñez, “Indumentaria y adaptabilidad: El clima como factor influyente en el diseño y la tecnología.,” pp. 1–124, 2016.
- [17] US Department of Energy Federal Energy Management Program, “M & V Guidelines : Measurement and Verification for Contracts,” no. November, 2015.
- [18] ASHRAE, “ASHRAE Guideline14-2014 Measurement of Energy , Demand , and Water Savings,” vol. 2014, 2014.
- [19] D. Lind, W. Marchal, and S. Wathen, Estadística aplicada a los negocios y la economía. New York.

- [20] R. D. Beltrán and J. Martínez-Gómez, “Analysis of phase change materials (PCM) for building wallboards based on the effect of environment,” *J. Build. Eng.*, vol. 24, no. February, p. 100726, 2019.
- [21] M. KOTTEK, J. GRIESER, C. BECK, B. RUDOLF, and F. RUBEL, “World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated,” *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 11, no. 5, pp. 1633–1644, 2007.