

Efecto de diferentes configuraciones de ventilación natural y materiales de cubierta sobre el confort térmico de trabajadores de una instalación para la producción de panela.

Effect of different natural ventilation configurations and roof materials on thermal comfort workers in a non-centrifugal cane production facility

Giovanni Andrés Cortés Tovar  Universidad Nacional de Colombia. Colombia.

gacortest@unal.edu.co (autor de contacto)

Robinson Osorio Hernández  Universidad Nacional de Colombia. Colombia. rosorioh@unal.edu.co

Lina Marcela Guerra García  Universidad Nacional de Colombia. Colombia. lmguerra@unal.edu.co

RESUMEN

Este estudio tuvo como objetivo analizar el efecto de tratamientos con diferentes configuraciones de ventilación natural, combinadas con tres tipos de materiales de cubierta, sobre las condiciones de confort térmico del trabajador dentro de una instalación para la producción de panela, utilizando modelamiento en Dinámica de Fluidos Computacional. Se encontró un efecto significativo de las aberturas perimetrales y el efecto chimenea generado por la ventana cenital, el cual mostró un papel decisivo en la transferencia de vapor y de calor al exterior. Adicionalmente, se comparó el Índice de Temperatura Efectiva para cada tratamiento, para determinar las condiciones de confort térmico para los trabajadores en cada configuración de ventilación natural. Se evidenció que el mejor ambiente para el confort térmico del trabajador es el tratamiento con las paredes perimetrales abiertas y la ventana cenital abierta, sin presentar diferencia estadística significativa el material de la cubierta.

Palabras clave: simulación computacional; estrés térmico; índice WBGT; producción de panela; radiación térmica.

ABSTRACT

This study's goal was to use computational fluid dynamics modeling to examine the effects of treatments with various natural ventilation configurations and three different types of roof materials on workers' thermal comfort levels in a facility used to produce non-centrifugal sugar cane. It was found that the lantern window's chimney effect and the perimeter openings had a major impact, in the heat and steam transfer to the exterior. To ascertain the thermal comfort levels for employees in each natural ventilation configuration, the effective temperature index for each treatment was also compared. With no statistically significant variation in the roof material, it was clear that the optimal conditions for the worker's thermal comfort were those with the lantern window and perimeter walls open.

Keywords: computer simulation; thermal stress; WBGT index; NCS production; thermal radiation.

Cómo citar este artículo/Citation: Giovanni Andrés Cortés Tovar, Robinson Osorio Hernández, Lina Marcela Guerra García (2024). Efecto de diferentes configuraciones de ventilación natural y materiales de cubierta sobre el confort térmico de trabajadores de una instalación para la producción de panela. Informes de la Construcción, 76 (576): 6951. <https://doi.org/10.3989/ic.6951>

Copyright: © 2024 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 09/04/2024

Aceptado/Accepted: 24/10/2024

Publicado on-line/Published on-line: 29/01/2025

1. INTRODUCCIÓN

El Azúcar de Caña no centrifugada, (non-centrifugal cane sugar – NCS en inglés), también llamada “panela” (1), es obtenida de la extracción, purificación y concentración de los jugos de caña de azúcar (2). Colombia con el 14.9% de producción mundial, es el segundo productor, después de la India (3, 4), y presenta el mayor consumo per cápita en el mundo (24 kg/persona/año) (5).

En Colombia la elaboración de la panela se lleva a cabo en edificaciones denominadas “trapiches” (6), las cuales son plantas de procesamiento agroindustrial naturalmente ventiladas. Se estima que en Colombia hay cerca de 18.473 trapiches, su tamaño está sujeto a la capacidad de producción que incluyen unidades con rangos de capacidad pequeña (menor a 100 kg h⁻¹), mediana (100 a 250 kg h⁻¹) y grande (mayor a 250 kg h⁻¹) (7-9).

En estas edificaciones se ubican los equipos necesarios para la transformación, especialmente, el horno, donde se lleva a cabo la evaporación de más del 90% del agua contenida en el jugo de caña (10). Lo anterior, hace que estas edificaciones emitan calor y vapor que pueden comprometer el confort y desempeño de los ocupantes en su interior.

Factores ambientales como la temperatura y humedad relativa contribuyen al confort, salud, rendimiento y productividad de los trabajadores (11). Si el proceso de diseño del edificio ignora los factores climáticos, se pueden generar afectaciones en las actividades de los ocupantes (12).

Una alternativa de diseño de edificaciones es la arquitectura bioclimática, la cual es una forma alternativa de diseño y construcción de edificaciones que involucra condiciones climáticas del entorno, el uso de recursos naturales y técnicas tradicionales y modernas de construcción (13), especialmente en el diseño de la envolvente del edificio (14), con el objetivo de proveer confort térmico a sus ocupantes (15), bajo parámetros de sostenibilidad y eficiencia energética.

La envolvente del edificio divide el ambiente interior de las condiciones climáticas externas (16), y está compuesta por cubiertas, paredes, ventanas, puertas y pisos (17). La envolvente interviene para regular el balance de masa (de aire) y energía entre la edificación y el exterior (18).

Entre las estrategias del diseño bioclimático pasivo se encuentra la ventilación natural, la cual tiene como objetivo, la sustitución del aire interior nocivo, por aire fresco, sin utilizar sistemas o equipos mecánicos (19, 20) esta puede ser térmica o mínima (higiénica), y con ella se busca reducir el consumo energético, incrementar el confort térmico y mejorar de la calidad del aire (21-23).

Colombia, es un país ubicado en la zona ecuatorial, donde predominan los climas cálidos y templados. Al interior de los trapiches se genera calor y vapor del proceso agroindustrial, por lo que estas edificaciones son naturalmente ventiladas. La ventilación natural en estas edificaciones es dinámica y térmica, producto la acción del viento, y el efecto chimenea que generan los gradientes de temperatura en su interior. Es de aclarar que la ventilación térmica en situaciones de calor,

suplen las necesidades de la ventilación higiénica al tener tasas de renovación mayores a las requeridas para la calidad del aire por emisiones de gases.

Cuando la temperatura del ambiente interno es mayor que la temperatura exterior, el aire externo más frío y denso ingresa a la edificación a través de las aberturas bajas, y el aire interno más caliente y menos denso asciende a la parte superior de las cubiertas o sale por las aberturas elevadas; este fenómeno se conoce como efecto chimenea (24), el cual es fundamental en las edificaciones tipo trapiche, por la emisión de calor y vapor en su interior.

En la industria es necesario mantener confort térmico, ya que permite una mayor comodidad y productividad, al tiempo que reduce el riesgo de accidentes en el trabajo y fatiga laboral (25, 26). En ambientes cálidos la incomodidad puede ser causada por alta humedad en la piel generada por niveles altos de humedad del aire (27).

La humedad relativa elevada reduce la capacidad del cuerpo para perder calor a través de la transpiración y la evaporación (28). Según (29), humedades relativas del 80 % al 95 %, pueden causar graves riesgos para la salud, además, puede causar daños en las superficies del edificio (30), por la condensación (31), situación que se presenta en las cubiertas de las instalaciones agroindustriales de fabricación de panela.

Para la clasificación de confort térmico, se han desarrollado diferentes índices, que agrupan en un parámetro el efecto conjunto de variables como: la temperatura de bulbo seco, humedad relativa, velocidad del aire y radiación térmica, y factores humanos como: el aislamiento de la ropa y el nivel de actividad metabólica (32).

Un índice utilizado para determinar el confort térmico en entornos de trabajo, es la temperatura efectiva (33-35), La cual está en función de la temperatura de bulbo seco, humedad relativa y velocidad del aire.

En este tipo de edificaciones, el proceso se lleva cabo en condiciones de alta humedad relativa que puede oscilar entre 80% y cerca de la saturación, y alta temperatura, que puede alcanzar entre 60 y 150°C (36). Estas condiciones ambientales adversas, combinadas con la actividades físicas pesadas propias del proceso, pueden causar estrés térmico y problemas de salud, cambios en el comportamiento mental, disminución del rendimiento, aumento del riesgo de accidentes, y conducir a un deterioro progresivo del trabajador (37).

Varias investigaciones utilizando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), han estudiado el ambiente interno de edificaciones, incluyendo construcciones rurales, y han demostrado ser una herramienta valiosa y eficaz en este tipo de análisis (38), ayudando a reducir costos y tiempo en el diseño y evaluación bioclimática (39).

Relacionados al sector panelero se encuentran estudios utilizando CFD orientados al diseño del horno y las pailas o fondos que la integran (40-42), pero no se registran estudios en instalaciones de producción tradicionales tipo trapiche.

Este estudio tuvo como objetivo analizar el efecto de trata-

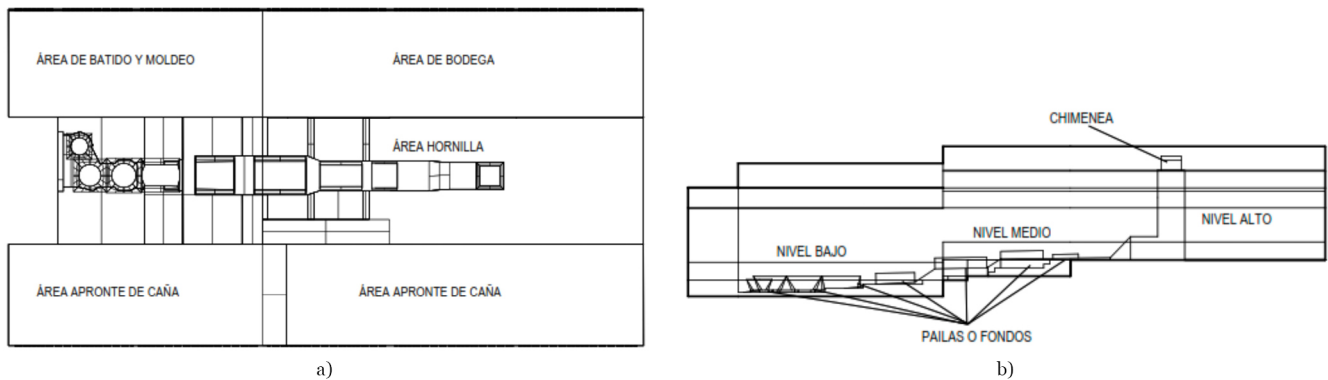


Figura 1. Instalación para la elaboración de panela. a) planta arquitectónica; b) fachada. Fuente: Elaboración autores

mientos con diferentes configuraciones de ventilación natural, combinadas con tres tipos de materiales de cubierta, sobre las condiciones de confort térmico de los ocupantes, dentro de una instalación para la producción de panela, utilizando CFD, con el fin de preservarlas y mejorarlas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se realizó en una edificación para la fabricación de panela, en el municipio de Santo Domingo - Antioquia - Colombia (No6°28'15";Wo75°09'57", 1440 msnm), el cual posee una temperatura media de 20°C, y humedad relativa de 80% (43). Su capacidad de producción es de 150 kg h⁻¹ (mediano), provista de hornos con cámara de combustión doble tipo Plana-CIMPA, que es un diseño mejorado de la cámara tradicional desarrollada por el Centro de Investigación para el Mejoramiento de la Agroindustria Panelera (CIMPA) (10). Las dimensiones de este trapiche son las aproximadas para una unidad con capacidad de producción de tamaño mediano y su distribución arquitectónica permite un flujo secuencial del proceso de producción.

En cada una de las tres áreas críticas de trabajo de la instalación (Hornilla, Apronte y Moldeo) se instaló un Datalogger de humedad y de temperatura marca EXTECH RHT10, rango de medida de -40°C a 70°C y de 0% a 100% de humedad relativa, precisión de 0.1°C y 0.1% respectivamente. Se tomaron datos de 3 moliendas y 2 días de referencia para las 214 horas. En el área de bodega no se instaló dispositivo porque es utilizada como área de tránsito y almacenamiento.

Se simuló el ambiente interno del edificio para las operaciones que se llevan a cabo en el área del horno u hornilla, ya que, cuando esta está en funcionamiento se presenta la situación más crítica para las condiciones de operatividad.

La Figura 1 muestra la distribución arquitectónica de la instalación, la cual tiene un piso en forma escalonada con tres niveles, lo que facilita el transporte del jugo de caña por gravedad en la hornilla. En el primer nivel está el área de batido y moldeo, el área de apronte de caña, el área baja de la hornilla, en el segundo nivel está el área de bodega, el molino de caña, el prelimpiador, el área de apronte de caña, el área media de la hornilla, y en el nivel tres está la chimenea y el área alta de la hornilla.

Las dimensiones de este edificio son, 16.00 m de ancho x 30.00 m de largo x 3.40 m de alto en promedio (Figura 2).

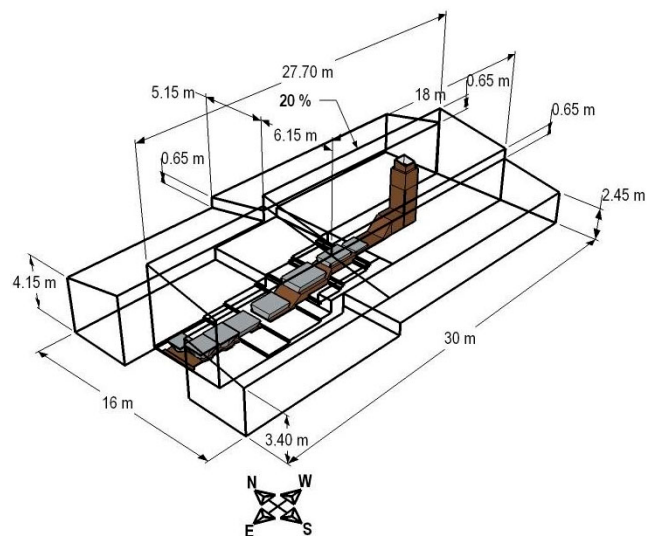


Figura 2. Dimensiones del trapiche panelero. Fuente: Elaboración autores

La edificación cuenta con una cubierta a dos aguas discontinua en dos niveles, y pendiente de 20%. Cada discontinuidad configura una ventana cenital, específicamente tiene una ventana cenital en la cumbre de 27.70 m de largo x 0.65 m de ancho sentido este-oeste, una segunda y tercera ventana cenital de techo discontinuas por cada una de las dos aguas de la cubierta de 5.15 m de largo x 0.65 m de ancho sentido norte-sur costado norte, y una de 6.15 m de largo x 0.65 m de ancho sentido norte - sur y costado sur respectivamente, y una cuarta ventana cenital de 18.00 m de largo x 0.65 m de ancho en el costado sur, sentido este - oeste, (Figura 2).

El edificio tiene cerramiento en ladrillo perforado en sus caras laterales. La cubierta posee, tejas de fibrocemento, cerchas y perfiles metálicos de 0.08 x 0.04 m. El piso está compuesto por una losa de contrapiso en concreto reforzado.

En la Figura 3 se muestran las geometrías 3D de la instalación en formato CAD, la primera es una condición con cerramiento en ladrillo tipo perforado para evaluar tres distribuciones constructivas, y la segunda es una condición base sin cerramiento perimetral, utilizada para evaluar nueve distribuciones constructivas.

Se simularon diferentes opciones de aberturas de ventilación natural con el fin de determinar la influencia del área de ventilación, y la ubicación de las aberturas en la temperatura

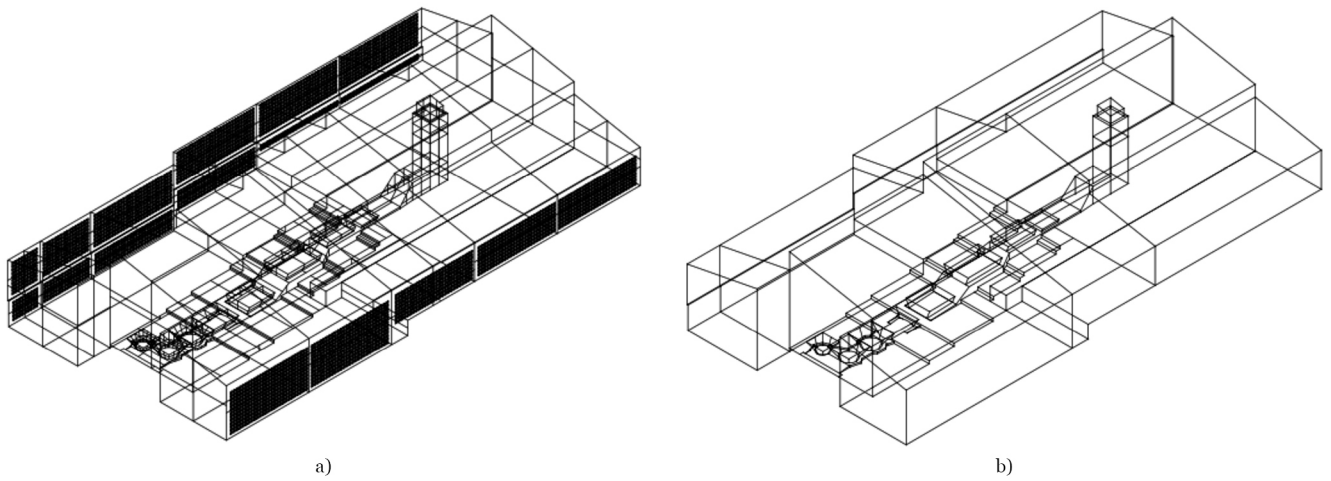


Figura 3. Geometría CAD 3D de la instalación para elaboración de panela.
a) condición ladrillo tipo perforado; b) condición base. Fuente: Elaboración autores

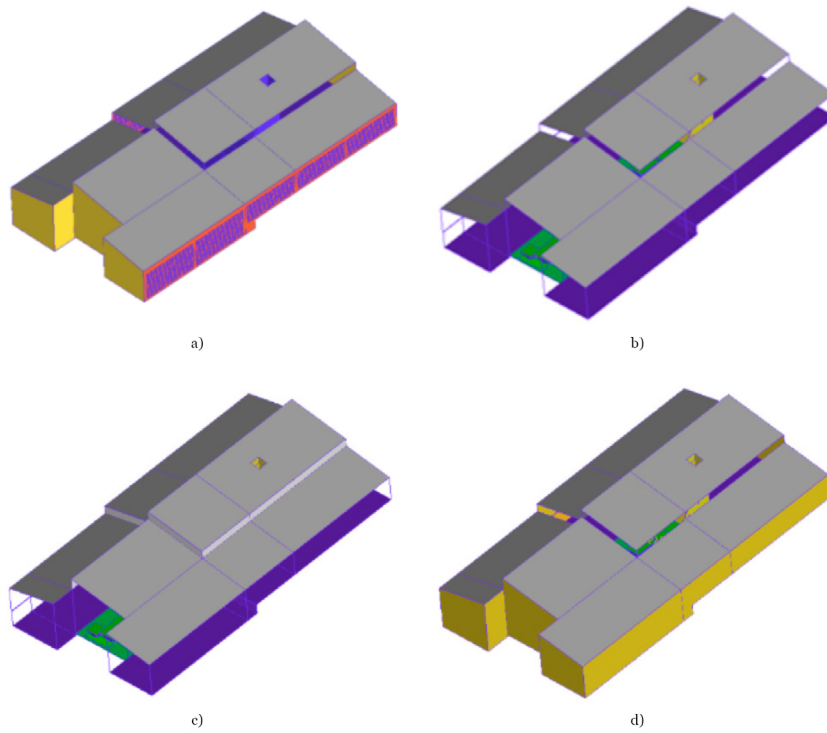


Figura 4. Tratamientos simulados con diferentes distribuciones arquitectónicas.
a) T1, T2 y T3; b) T4, T5 y T6; c) T7, T8 y T9; d) T10, T11 y T12. Fuente: Elaboración autores

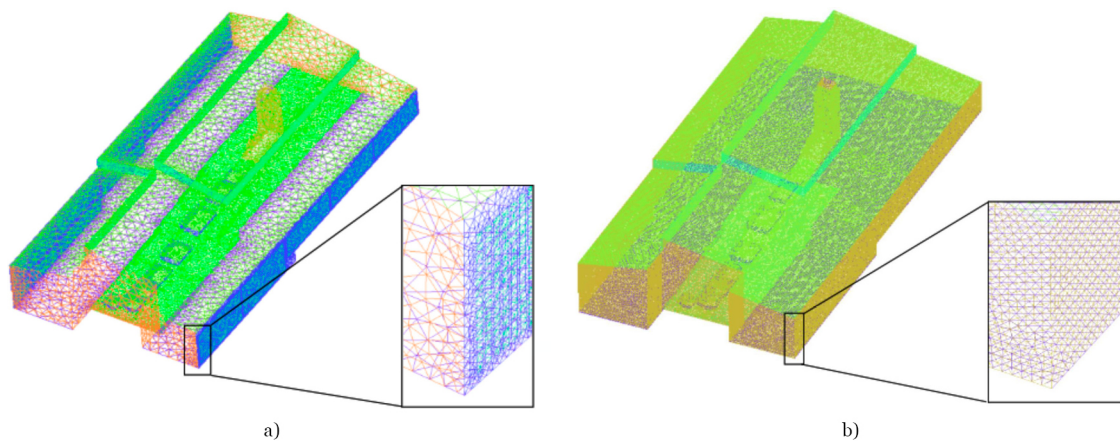


Figura 5. Malla computacional tetraédrica de edificio para la elaboración de panela.
a) condición ladrillo tipo perforado (tratamiento testigo); b) condición base. Fuente: Elaboración autores

y humedad relativa dentro de la instalación. Los diferentes tratamientos se pueden ver en la Tabla 1 y Figura 4, donde el tratamiento T1 es la geometría original (tratamiento testigo) que fue validada y simulada.

Tabla 1. Tratamientos simulados en CFD. Fuente: Elaboración autores

Tratamiento	Material de la cubierta			Cerramiento perimetral			Ventana cenital	
	F	Z	B	LP	A	LM	A	C
T1	X			X			X	
T2		X		X			X	
T3			X	X			X	
T4	X				X		X	
T5		X			X		X	
T6			X		X		X	
T7	X				X			X
T8		X			X			X
T9			X		X			X
T10	X					X	X	
T11		X				X	X	
T12			X			X	X	

Z - Zinc; F - Fibrocemento; B - Barro; LP - Ladrillo perforado; A - Abierto; LM - Ladrillo macizo; C - Cerrado.

Posteriormente, se realizó la malla computacional tetraédrica con ayuda del software ANSYS-ICEM-CFD con 128.197 nodos, y 629.596 elementos para el modelo con cerramiento en ladrillo perforado (Figura 5a), y 154.197 nodos y 776.124 elementos para los modelos sin cerramiento perimetral y con cerramiento perimetral con ladrillo macizo (Figura 5b). Cuando las geometrías son complejas, o el rango de longitudes de escala es grande, como se presentó para los dos modelos propuestos, una malla tetraédrica es apropiada, porque requiere un número menor de elementos (44). Se obtuvo diferentes tamaños de elementos después de varias pruebas de malla donde el refinamiento mayor se encuentra en las aberturas, debido a la necesidad de mayor detalle de análisis fluidodinámico por ventilación natural.

Una vez se ha generado la malla computacional, se importó a la plataforma ANSYS-CFX-Pre, en este punto se insertaron las condiciones de frontera del modelo: propiedades de los materiales, condiciones del ambiente externo, componente energético de la hornilla, entre otros. Las propiedades térmicas de los materiales de construcción utilizados como condiciones de frontera se muestran en la Tabla 2.

Se realizó un modelo transitorio a partir de las condiciones de la actividad crítica durante el proceso de fabricación de panela: flujo másico de vapor producido en promedio por la hornilla es de 0.15 kg de agua s⁻¹, temperatura promedio de las pailas o fondos y jugos en la hornilla alcanzan un valor de 132°C, temperatura del suelo de 20°C, temperatura media del exterior de 20°C, humedad relativa media externa de 80%, conductividad térmica del aire es 0.02514 W m⁻¹ K⁻¹ y la difusividad térmica del aire de 2.074 × 10⁻⁵ m² s⁻¹ (31).

Tabla 2. Propiedades térmicas de materiales de construcción. Fuente: Tomado de NBR ISO 10456 (45)

Material de la cubierta	λ	R	U
	W m ⁻¹ K ⁻¹	m ² K W ⁻¹	W m ⁻² K ⁻¹
Fibrocemento	0.8	0.0125	80
Zinc	110	0.0000027	366666.67
Barro	0.46	0.0239130	41.82
Ladrillo macizo	0.7	0.3714286	2.7
Ladrillo perforado	0.7	0.3714286	2.7

λ - conductividad térmica; R- Resistencia térmica; U - Coeficiente global de transferencia de calor.

La humedad relativa se insertó como una variable adicional a partir de la ecuación [1] (46), en función de la presión de vapor del aire y la presión de vapor de saturación del mismo representada en la ecuación [2] de Magnus-Tetens (47).

$$[1] \quad HR = P_v / P_{vs}$$

$$[2] \quad P_{vs} = 6.1078 \times 10^{(7.5 T_{bs} / (237.3 + T_{bs}))}$$

Donde, HR es la humedad relativa (%), es la presión parcial de vapor (hPa), es la presión de vapor de saturación (hPa), es la temperatura de bulbo seco (°C).

Las ecuaciones de transporte son ecuaciones de derivadas parciales utilizadas para describir fenómenos de transporte de energía, masa, y cantidad de movimiento (48), y se expresan en términos generales en las ecuaciones [3], [4] y [5] (41), donde, $\bar{\rho}$ es la densidad media de Reynolds en kg m⁻³; $\tilde{u}_i$, $\tilde{u}_j$, $\tilde{u}_k$ son los vectores de velocidad promedio de Favre en m s⁻¹; x_i , x_j , x_k son las posiciones del vector; u_i'' , u_j'' son los vectores de velocidad fluctuante de Favre en m s⁻¹; g_i es el vector aceleración de la gravedad en m s⁻²; μ es la viscosidad dinámica en Pa s; $\tilde{h}_t$ Favre promediado de la entalpía total en kJ kg⁻¹; Pr Número de Prandtl; S_r término promediado debido a la transferencia de calor por radiación en W m⁻³; p es la presión estática media en Pa.

$$[3] \quad \partial \rho u_j \partial x_j = 0$$

$$[4] \quad \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \bar{\rho} g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \right] + \frac{\partial \left(-\overline{\rho u_i'' u_j''} \right)}{\partial x_j}$$

$$[5] \quad \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}_t}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{h}_t}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu}{Pr} \left(\frac{\partial \tilde{h}_t}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{\partial \left(-\overline{\rho u_j'' \tilde{h}_t''} \right)}{\partial x_j} = \bar{S}_r$$

Posteriormente, en la plataforma SOLVER se simuló el modelo previamente realizado en ANSYS-CFX-Pre, para ello se utilizó como criterio de convergencia un error máximo de 10⁻⁴ para todos los tratamientos.

Para el modelo de turbulencia se utilizó el método de turbulencia k-ε estándar, que evalúa la viscosidad (μ_t) a partir de una relación entre la energía cinética turbulenta (k) y la disipación de energía cinética turbulenta (ε) (44). El modelo k-ε estándar se ha utilizado en estudios anteriores en aplicaciones industriales e instalaciones agrícolas (49, 50).

A partir de los resultados obtenidos en la modelación computacional, se utilizaron los valores obtenidos de temperatura de bulbo seco y humedad relativa dentro de la instalación, ubicando puntos en la edificación de las áreas de las actividades de molienda y procesamiento de jugos (clarificación, evaporación y concentración de jugos), distribuidos en cuatro áreas: hornilla, cuarto de batido moldeo, apronte de caña y bodega (Figura 2).

En la Figura 6, se indican las posiciones de los puntos ubicados en el edificio, en el plano horizontal los puntos están equidistantes a 3.00 m y en el plano vertical a tres alturas 0.80m, 1.50m y 2.20m sobre el nivel del suelo, para formar una malla de 180 puntos, identificando cada área con puntos de color. El objetivo de estas tres alturas fue determinar medidas de temperatura y humedad relativa a la altura de las mesas 0.80m, a la altura promedio de la cabeza del trabajador 1.50m y por encima de la cabeza del trabajador 2.20m.

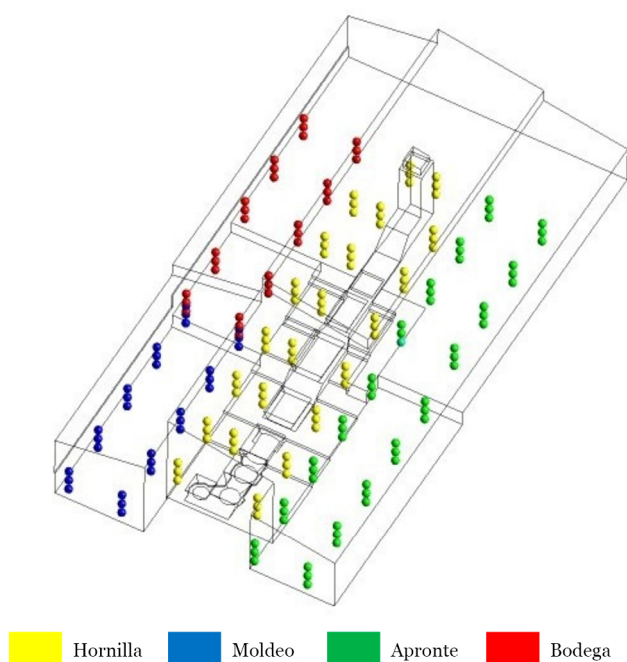


Figura 6. Posiciones de los 180 puntos ubicados en el edificio, para tomar datos de temperatura y humedad relativa. Fuente: Elaboración autores

En cada uno de los 180 puntos ubicados en el edificio se determinó la temperatura efectiva (T_e) (34), el cual está en función de la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del aire, con el fin de evaluar las condiciones bioclimáticas de los trabajadores.

Por medio psicrometría y los datos de temperatura y humedad relativa, se determinaron los valores de la temperatura de bulbo húmedo. La ecuación [6], define la temperatura efectiva en un frente de trabajo (34):

$$[6] \quad T_e = 0.3T_{bs} + 0.7T_{bh} - V_a$$

Donde, T_e es la temperatura efectiva en °C, T_{bs} es la temperatura bulbo seco en °C, T_{bh} es la temperatura de bulbo húmedo en °C, V_a es la velocidad de la corriente del aire en $m s^{-1}$.

La temperatura efectiva considera las variables ambientales de temperatura y humedad relativa, con el fin de evaluar los resultados obtenidos en la simulación, se compararon los tiempos de permanencia en los frentes de trabajo establecidos en el Reglamento (34).

Los resultados del modelo CFD para el T1 testigo (geometría original), fueron validados por medio del error cuadrático medio normalizado (NMSE) recomendado por la ASTM (51) por medio de la ecuación [7].

$$[7] \quad NMSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Y_{pi} - Y_{mi})^2}{Y_{pi} Y_{mi}}$$

Donde:

Y_{pi} : Valor predicho

Y_{mi} : Valor medido

n : número de datos

Para esto, se realizó el promedio de los datos de temperatura y humedad relativa cada hora para un periodo de 24 horas simulados para las áreas de Hornilla, Apronte y Moldeo. Los valores con un NMSE inferior a 0.25 se consideran como buenos indicadores de concordancia; a medida que este valor se acerca a cero, la concordancia entre los valores medidos y predichos es mayor.

Posteriormente se realizó un análisis de varianza, acompañado de un análisis de medias mediante la prueba de Tukey, con el fin de observar si existe diferencia estadística entre los diferentes tratamientos o configuraciones de la envolvente, además, se realizaron diagramas de caja para las variables temperatura, humedad relativa y temperatura efectiva.

3. RESULTADOS

Con fines de validación del modelo, se realizó el cálculo del NMSE para el modelo CFD y los datos experimentales del tratamiento T1 o testigo (Tabla 3), para temperatura y humedad relativa, indicando buena concordancia debido a que todos los valores del NMSE son menores a 0.25, por lo que se concluye que puede ser utilizado para predecir el comportamiento de la temperatura y la humedad relativa al interior de la instalación.

La Tabla 4, muestra el test de Tukey, para análisis estadístico medias de temperatura, humedad relativa y temperatura efectiva para los doce tratamientos, en el cual para los grupos unidos con la misma letra no existe diferencia estadística significativa.

Para los grupos unidos con la misma letra no hay una diferencia estadística significativa por la prueba de Tukey (Temperatura $P = <0.001$ y $F = 227.803$; Humedad relativa $P = <0.001$ y $F = 766.009$; Temperatura efectiva $P = <0.001$ y $F = 227.803$).

Es de destacar que no hubo diferencia estadística de temperatura, humedad relativa y temperatura efectiva en los tres tipos de cubierta para cada tipo de cerramiento, lo que indica

que en este tipo de edificaciones que emiten gran cantidad de calor y vapor, es más importante el cerramiento y la ventilación natural que el tipo de cubierta, para el intercambio de masa de aire caliente y húmedo con el exterior (52).

Los tratamientos T4, T5 y T6 (perímetro abierto y ventana cenital abierta, con cubierta de fibrocemento, zinc y barro respectivamente), con un valor alrededor de los 23°C, humedad relativa de 61.6%, y temperatura efectiva de 19.5°C, presentaron las mejores y únicas condiciones ambientales saludables para el trabajo, de acuerdo al (33), el cual sugiere rangos de temperatura en el ambiente laboral entre 14°C y 25°C y rangos de humedad relativa entre 30% y 70%.

Tabla 3. Cálculo de NMSE para las variables de temperatura y humedad relativa. Fuente: Elaboración autores

Área	Variable		Promedio	NMSE
Hornilla	T (°C)	S	27.91	0.00812
		M	28.68	
	HR (%)	S	80.94	0.00765
		M	79.65	
Apronte	T (°C)	S	23.85	0.00935
		M	24.97	
	HR (%)	S	79.82	0.00468
		M	81.76	
Moldeo	T (°C)	S	23.38	0.01609
		M	25.69	
	HR (%)	S	75.89	0.00876
		M	81.39	

T – temperatura; HR - humedad relativa; S – simulación; M - medición en campo.

Tabla 4. Análisis de medias de temperatura, humedad relativa y temperatura efectiva por el test de Tukey (°C). Fuente: Elaboración autores

Tratamiento	n	T (°C)	HR (%)	Te (°C)
T1	180	44.63 a +/- 17.95	73.04 a +/- 7.55	41.19 a +/- 18.28
T2	180	44.51 a +/- 18.76	72.87 a +/- 7.77	41.09 a +/- 19.11
T3	180	44.93 a +/- 18.15	72.82 a +/- 7.47	41.44 a +/- 18.46
T4	180	23.25 b +/- 7.39	61.66 b +/- 3.69	19.57 b +/- 7.37
T5	180	23.21 b +/- 7.34	61.65 b +/- 3.67	19.53 b +/- 7.32
T6	180	23.24 b +/- 7.37	61.66 b +/- 3.68	19.56 b +/- 7.35
T7	180	41.30 ca +/- 18.91	70.78 ca +/- 9.72	37.81 ca +/- 19.39
T8	180	41.34 ca +/- 19.14	70.78 ca +/- 9.51	37.81 ca +/- 19.55
T9	180	41.28 ca +/- 19.11	70.76 ca +/- 9.60	37.78 ca +/- 19.55
T10	180	85.48 d +/- 7.13	96.05 d +/- 2.46	84.73 d +/- 7.45
T11	180	86.08 d +/- 6.65	96.40 d +/- 2.10	85.38 d +/- 6.93
T12	180	87.46 d +/- 5.34	96.54 d +/- 1.40	86.79 d +/- 5.53

n - número de datos; T – temperatura; HR - humedad relativa; Te - temperatura efectiva.

Por otra parte, la situación más crítica se presentó en los tratamientos T10, T11 y T12 (cerramiento en muros de ladrillo macizo y ventana cenital abierta, con cubierta de fibrocemento, zinc y barro respectivamente), con valores de temperatura entorno de 86°C, humedad relativa cerca de la saturación, y valores de temperatura efectiva alrededor de 85°C.

Para los tratamientos T1, T2 y T3 (cerramiento de muros de ladrillo perforado y ventana cenital abierta con cubiertas de fibrocemento, zinc y barro respectivamente), no hubo diferencia estadística en las tres variables. La temperatura media se encuentra alrededor de 44°C, humedad relativa cercana a 73%, y temperatura efectiva alrededor de 41°C.

Aunque los tratamientos T1, T2 y T3 registran valores de temperatura efectiva aproximadamente de 4°C por encima de los tratamientos T7, T8 y T9, no se puede asegurar que exista diferencia estadística significativa entre estos seis tratamientos.

En el área circundante a la hornilla se presentan los mayores valores de temperatura y humedad relativa, ya que esta zona es la mayor fuente de calor y vapor,

Es importante considerar alternativas constructivas que faciliten la evacuación al ambiente externo del vapor generado por la hornilla, especialmente en países tropicales donde los niveles óptimos de humedad relativa para el confort se sitúan entre el 30% y el 70% (53).

La Tabla 5 muestra los tiempos de permanencia en frentes de trabajo. Para desarrollar labores sin límite de permanencia, los valores de una temperatura efectiva deben estar por debajo de 28°C, los tratamientos T4, T5 y T6, cumplen con esta condición y los requerimientos mínimos de confort térmico, los demás tratamientos no se recomiendan como ambientes saludables para los trabajadores.

Tabla 5. Tiempos de permanencia en frentes de trabajo. Fuente: Reglamento de seguridad en las labores subterráneas, Decreto 1335 de 1987 (34)

Temperatura efectiva, Te (°C)	Tiempo límite de permanencia (Horas)
≤ 28	Sin limitaciones
29	Seis (6)
30	Cuatro (4)
31	Dos (2)
32	Cero (0)

Como ya se ha mencionado, el área más crítica de la edificación es la circundante a la hornilla, los puntos tomados alrededor de esta se muestran en la Figura 6, identificados con puntos de color amarillo. Por la relevancia de esta área, se realizó un análisis de medias de la temperatura efectiva para ella, la cual se muestra en la Tabla 6.

Se puede observar que al igual que lo mencionado anteriormente, en los tres tipos de cubierta para cada tipo de cerramiento, pero si en el tipo de envolvente. También se puede observar que los tratamientos T4, T5 y T6, de acuerdo a los rangos presentados en la Tabla 6, para estos tratamientos los valores de la media de la temperatura efectiva para el área hornilla, se encuentran por debajo de 28°C, que corresponde

a un tiempo de permanencia sin limitaciones, de lo que se concluye, las aberturas en los laterales y la abertura en la ventana cenital ofrece las condiciones higrotérmicas adecuadas al interior de la instalación para los trabajadores, independiente del material de la cubierta.

Tabla 6. Análisis de medias de temperatura efectiva para los diferentes tratamientos por el test de Tukey, en el área de la hornilla. Fuente: Elaboración autores

Tratamiento	Numero de datos	Temperatura efectiva media (°C)	Desviación estándar
T1	66	42.42 a	17.82
T2	66	42.70 a	18.55
T3	66	42.99 a	17.76
T4	66	22.58 b	10.38
T5	66	22.51 b	10.35
T6	66	22.56 b	10.37
T7	66	41.23 ca	15.81
T8	66	40.88 ca	16.04
T9	66	40.87 ca	16.02
T10	66	86.25 d	5.76
T11	66	86.99 d	5.01
T12	66	88.09 d	4.06

Para los grupos unidos con la misma letra no hay una diferencia estadística significativa por la prueba de Tukey ($P = < 0,001$ y $F = 227.803$).

Los demás tratamientos superan el límite máximo de 32°C para permanencia según el índice de temperatura efectiva, lo que sugiere, que no es recomendable que los trabajadores laboren con las condiciones, y que se deben adoptar medidas para mejorar la extracción de calor y vapor del interior, sea por medios pasivos (modificación de la envolvente), o por medios activos como el uso de extractores.

Resultado de la modelación CFD, se obtuvieron los perfiles de temperatura y humedad relativa, para los tratamientos T1, T4, T7 y T10, siendo los tratamientos representativos de la modelación computacional, debido a que no hay diferencia estadística según los materiales de la cubierta.

En el tratamiento T1 (Figura 7) las temperaturas oscilan entre los valores de 60°C y 80°C (333.15K y 353.15K) principalmente en el área que colinda con la emisión de vapor generada en los fondos o pailas de la hornilla. En las áreas que no hay contacto directo con la hornilla se observan temperaturas entre 20°C y 40°C (293.15K y 313.15K) presentándose las temperaturas más altas en el área que corresponde al costado derecho de la hornilla, y las temperaturas más bajas al costado izquierdo. El ladrillo perforado disminuye el área de ventilación, pero permite el ingreso del aire lo que ayuda a evacuar el aire caliente.

Con respecto a la humedad relativa en el tratamiento T1, los valores oscilan entre el 80% y 90%, al reducirse el área de ventilación en las laterales, lo que en este caso no es suficiente para ofrecer valores de humedad relativa por debajo del 70% y ofrecer un ambiente no sofocante.

Se encontró que el tratamiento T4 (Figura 8), exceptuando el área que corresponde a los límites con la hornilla, la temperatura osciló entre 20°C y 25°C (293.15K y 298.15K) en casi toda la instalación. Se encontraron temperaturas de 60°C y 80°C (333.15K y 353.8K) en la superficie interna de la cubierta, esto por efecto del ascenso de vapor caliente que genera el proceso, y por la acumulación de calor en esta región por el efecto chimenea.

Por otro lado, se observa que la humedad relativa oscila entre el 60% y 65% en la mayoría del espacio de la instalación, valores aceptables para ofrecer un confort térmico a los trabajadores.

En el tratamiento T7 (Figura 9) al igual que en el tratamiento T1, la temperatura oscilan entre 60°C y 80°C (333.15K y 353.15K) en casi toda la instalación, esto se debe que al cerrarse o no poseer la ventana cenital, no hay salida del vapor por efecto chimenea. Se genera un volumen de aire caliente y húmedo en la parte superior de la edificación, con humedad relativa entre 70% y el 85%, y cerca de la ventana cenital de 90% a 100%, con peligros de condensación en la cubierta.

El tratamiento T10 (Figura 10), presenta la condición más crítica, ya que al cerrarse las paredes laterales se limita la entrada de aire fresco (más frío y denso), por lo que se incrementa la temperatura y la humedad relativa al interior a valores que oscilan entre 80°C y 97°C (353.15K y 370.15K) y humedad

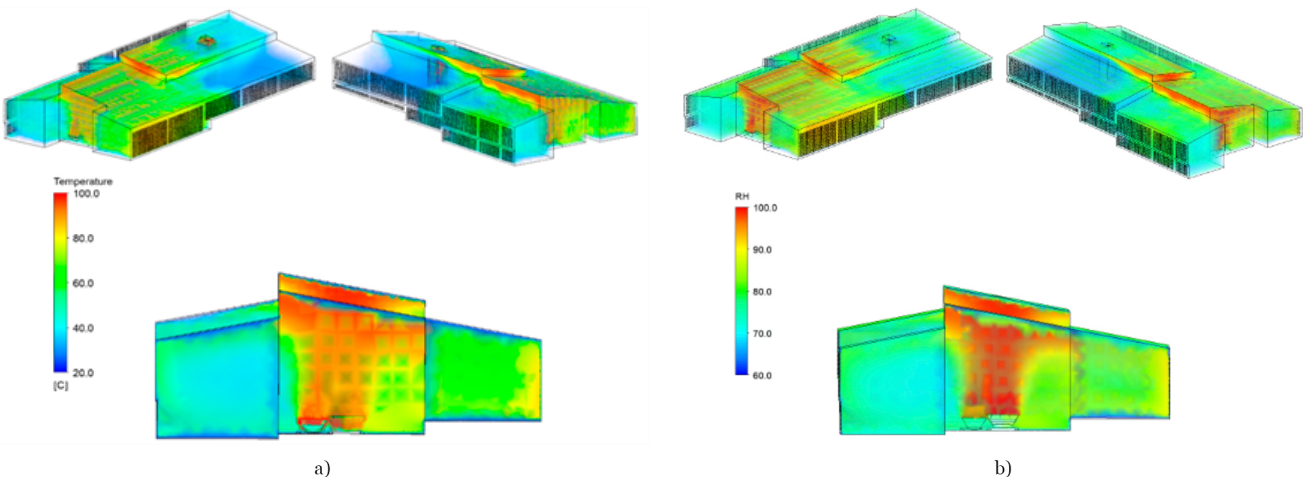


Figura 7. Comportamiento en la edificación a partir del modelo CFD para T1. a) Temperatura en °C, b) Humedad relativa en %. Fuente: Elaboración autores

de 90% a 100%, por la limitación de expulsión de los vapores calientes generados en el proceso. Esta condición de ambiente sofocante, puede afectar considerablemente el confort y la salud de los trabajadores (33), y generara condensaciones de agua en las superficies internas del edificio, con implicaciones negativas para los ocupantes, el edificio y el producto.

Por lo tanto, el tratamiento T4, presenta las condiciones más adecuadas de temperatura y humedad relativa para el confort

higrotérmico de los trabajadores, cumpliendo con los rangos de temperatura y humedad relativa establecidos por (33).

La humedad del aire puede llegar a la saturación cuando se cierran las paredes del edificio, o se prescinde de la ventilación cenital, lo que también puede afectar el confort térmico humano. Con el fin de evitar el uso de equipos de climatización y mejorar las condiciones ambientales internas, se sugiere potenciar el efecto chimenea en este tipo de edificaciones.

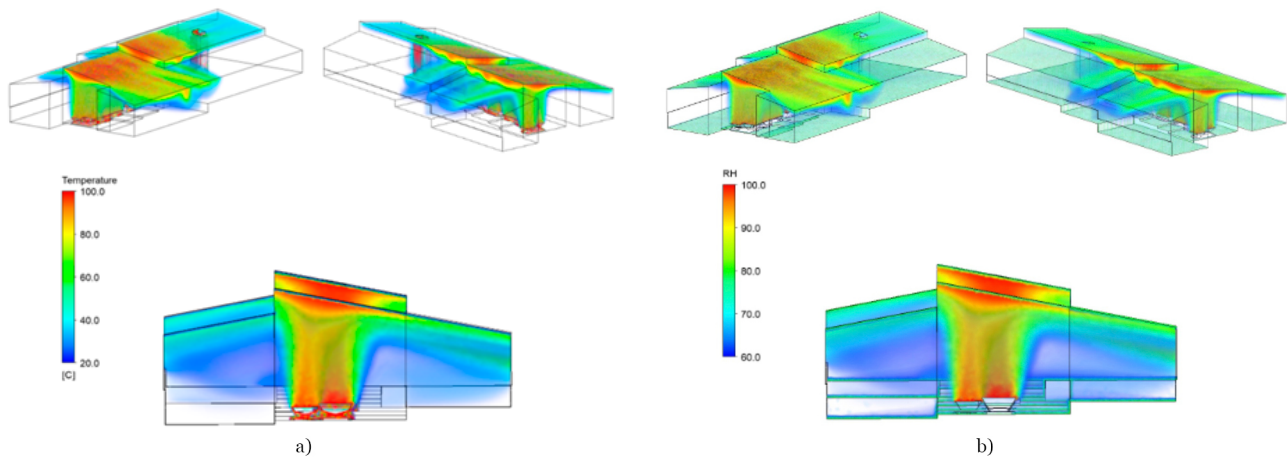


Figura 8. Comportamiento en la edificación a partir del modelo CFD para T4. a) Temperatura en °C, b) Humedad relativa en %. Fuente: Elaboración autores

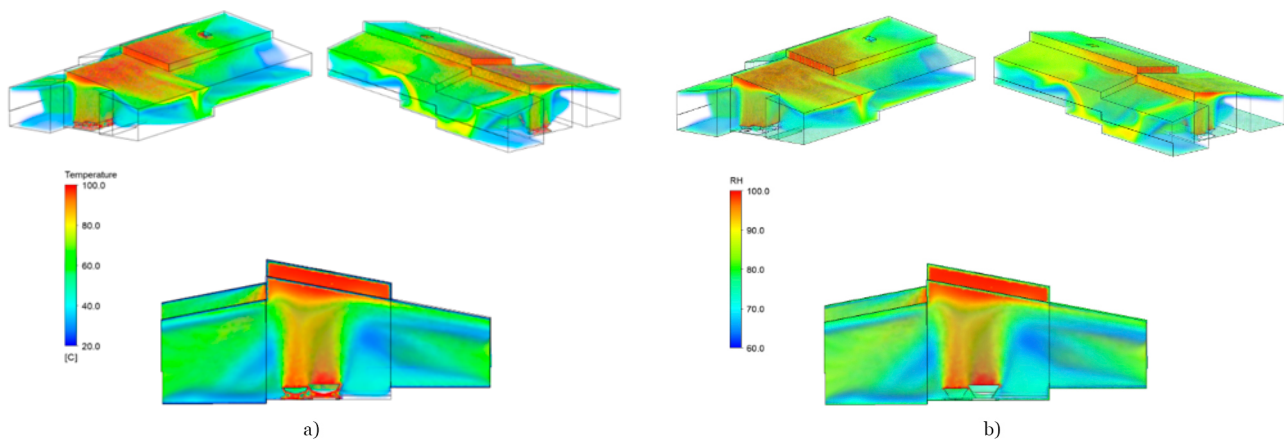


Figura 9. Comportamiento en la edificación a partir del modelo CFD para T7. a) Temperatura en °C, b) Humedad relativa en %. Fuente: Elaboración autores

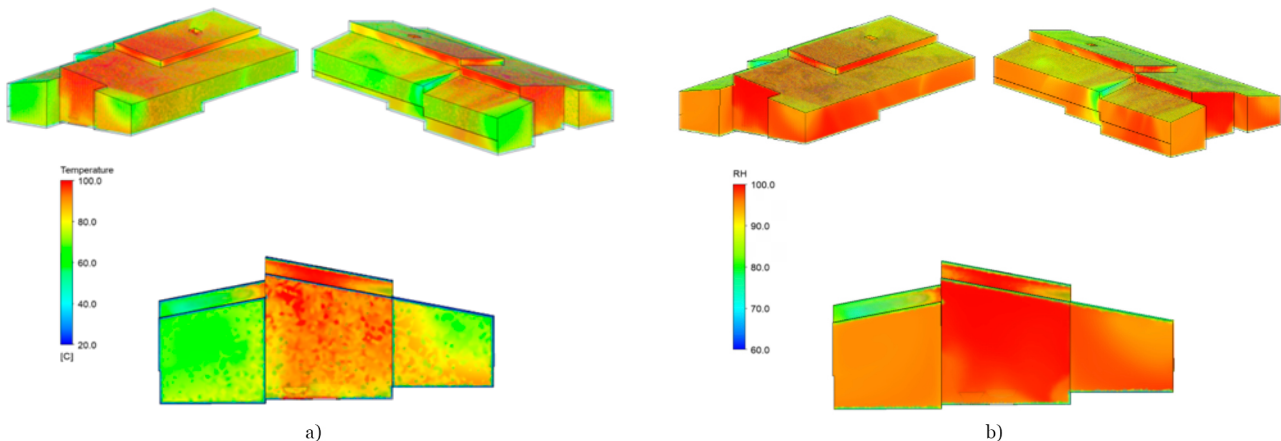


Figura 10. Comportamiento en la edificación a partir del modelo CFD para T10. a) Temperatura en °C, b) Humedad relativa en %. Fuente: Elaboración autores

Al favorecer el movimiento del aire dentro de la instalación mediante el efecto chimenea, se logra reducir la temperatura efectiva (T_e) mejorando la sensación térmica del trabajador, esto se debe a que la temperatura efectiva está directamente relacionada con la velocidad del aire.

La Figura 11 presenta un diagrama de cajas de la temperatura efectiva para los 12 tratamientos, donde se puede observar la mediana y la dispersión de datos de cada uno de los tratamientos estudiados.

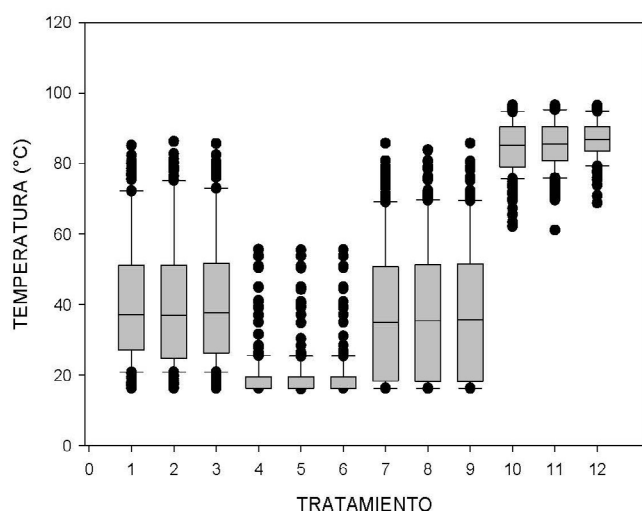


Figura 11. Diagrama de caja para la temperatura efectiva en los doce tratamientos. Fuente: Elaboración autores

Los tratamientos, T1, T2 y T3 con valores de mediana de 37.08°C, 37.03°C y 37.62°C, Mientras que T4, T5 y T6 presenta valores de mediana de 16.38°C, siendo los valores más bajos, cumpliendo con los requerimientos de confort; los datos atípicos (de mayor valor) se presentan justo encima de la hornilla donde se produce el vapor caliente.

Los tratamientos, T7, T8 y T9 con valores de mediana de 35°C, 35.47°C y 35.82°C respectivamente, presentan un comportamiento similar a T1, T2 y T3, pero con mayor dispersión de datos.

Los tratamientos T10, T11 y T12 con valores de mediana de 85.28°C, 85.62°C y 86.73°C respectivamente, representan la condición más crítica en la instalación para los trabajadores.

En Colombia es común que este tipo de instalaciones agroindustriales presentan envoltentes con perímetro abierto, pero no con ventana cenital o chimenea en la cubierta, por lo anterior, se recomienda con fines de eficiencia energética y confort, adaptar estrategias pasivas de climatización como adoptar diseños con perímetro abierto, y ventanas cenitales o chimenea para favorecer el efecto chimenea, y con ello el intercambio de calor y humedad al exterior, favoreciendo las condiciones adecuadas para el ocupante, el edificio y el producto.

4. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos, se concluyó que la simulación en CFD se puede utilizar en el diseño y evaluación para mejorar las condiciones de confort de edificaciones para la producción de panela tipo trapiche, teniendo en cuenta el diseño bioclimático.

De los doce tratamientos que se propusieron y se evaluaron, se observó que los mejores comportamientos bioclimáticos se presentan en los tratamientos con perímetro abierto y ventana cenital abierta (T4, T5 y T6), envoltente que favorece la ventilación natural, especialmente el efecto chimenea, lo que permite ofrecer condiciones higrotérmicas adecuadas para los trabajadores de esta agroindustria.

Se evidenció la importancia de promover y potenciar el efecto chimenea en la ventilación natural como estrategia pasiva de climatización, con el fin de evacuar vapores calientes de este proceso, y evitar la utilización de equipos de climatización, mayores gastos y reducir huella de carbono en la utilización de los mismos.

Los resultados del índice de temperatura efectiva para los tratamientos de perímetro abierto y ventana cenital abierta (T4, T5 y T6) en el área total de la edificación se encuentran dentro del rango adecuado con valores de 22.58, 22.51 y 22.56 para T4, T5 y T6 respectivamente, y el tiempo de permanencia no presenta límites.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a la Universidad Nacional de Colombia, y a los productores de panela, especialmente a los del municipio de Santo Domingo Antioquia - Colombia, para la elaboración de esta investigación.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los/as autores/as de este artículo declaran no tener conflictos de intereses financieros, profesionales o personales que pudieran haber influido de manera inapropiada en este trabajo.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Giovanni Andrés Cortés Tovar: Conceptualización, Metodología, Investigación, Análisis formal, Administración de proyecto, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

Robinson Osorio Hernández: Conceptualización, Metodología, Investigación, Análisis formal, Administración de proyecto, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

Lina Marcela Guerra García: Conceptualización, Metodología, Redacción – borrador original.

REFERENCIAS

- (1) García, J. M., Narváez, P. C., Heredia, F. J., Orjuela, Á., y Osorio, C. (2017). Physicochemical and sensory (aroma and colour) characterisation of a non-centrifugal cane sugar ("panela") beverage. *Food Chemistry*, 228, 7-13, <http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.134>
- (2) Gutiérrez-Mosquera, L. F., Arias-Giraldo, S., y Ceballos-Peñaloza, A. M. (2018). Energy and Productivity Yield Assessment of a Traditional Furnace for Noncentrifugal Brown Sugar (Panela) Production. *International Journal of Chemical Engineering*, 2018(1), 6841975, <http://doi.org/10.1155/2018/6841975>
- (3) Volverás-Mambuscay, B., González-Chavarro, C. F., Huertas, B., Kopp-Sanabria, E., y Ramírez-Durán, J. (2020). Effect of the organic and mineral fertilizer on the performance of sugarcane yield in Nariño, Colombia. *Agronomy Mesoamerican*, 31(3), 547-565, <http://doi.org/10.15517/AM.V31I3.37334>
- (4) Alarcón, A. L., Palacios, L. M., Osorio, C., et al. (2021). Chemical characteristics and colorimetric properties of non-centrifugal cane sugar ("panela") obtained via different processing technologies. *Food Chemistry*, 340, 128183, <http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128183>
- (5) Gutiérrez-Mosquera, L. F., Arias-Giraldo, S., y Ceballos-Peñaloza, A. M. (2018). Actualidad del sistema productivo tradicional de panela en Colombia: análisis de mejoras y alternativas tecnológicas. *Ingeniería Y Competitividad*, 20(1), 107, <http://doi.org/10.25100/iyv.v20i1.6190>
- (6) Ministerio de la Protección Social de Colombia (2006). Resolución Numero 779 de 2006, del 17 de Marzo. Por la cual se establece el reglamento técnico sobre los requisitos sanitarios que se deben cumplir

- en la producción y comercialización de la Panela para consumo humano y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial de la Republica de Colombia N° 46.223 del 17 de marzo de 2006; 2006, <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/Resolucion-779-de-2006.pdf>
- (7) Minagricultura - Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2006). *El sector panelero colombiano*, <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/18667>
 - (8) Rodríguez, G. A., Polo, S., Ángel, M., y Buitrago, A. (2019). *La agroindustria panelera impulsando el desarrollo rural en Colombia, un diagnóstico de la cadena productiva*. Roffaprint Editores S.A.S; 2019, <https://fedepanela.org.co/gremio/conoce-el-sistema-de-informacion-panelero-sipa/>
 - (9) Sistema de Información Panelero (SIPA). (2020). Cifras del sector panelero. Published 2020, <https://fedepanela.org.co/gremio/gestion-del-conocimiento/sistema-de-informacion-panelero-sipa/>
 - (10) García, H. R., Albarracín, L. C., Toscano LaTorre, A., Santana, N., y Insuasty, O. (2007). *Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de la caña panelera* (pp. 56-58). Bogotá: Produmedios.
 - (11) Shi, X., Zhu, N., y Zheng, G. (2013). The combined effect of temperature, relative humidity and work intensity on human strain in hot and humid environments. *Building and Environment*, 69, 72-80, <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.07.016>
 - (12) Dewi Larasati, Zr., Sahid Mochtar. (2013). Application of Bioclimatic Parameter as Sustainability Approach on Multi-story Building Design in Tropical Area. *Procedia Environmental Sciences*, 17, 822-830, <http://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.02.100>
 - (13) Puertollas, R. F., Losada Gonzalez, J. C., Castro, S. S., Benito, P. A., y Arrebola, C. V. (2020). A bioclimatic building in Madrid: Analysis of the thermal response and long-term comfort indices review. *Developments in the Built Environment*, 3, 100015, <http://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100015>
 - (14) Pajek, L., y Košir, M. (2018). Implications of present and upcoming changes in bioclimatic potential for energy performance of residential buildings. *Building and Environment*, 127, 157-172, <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.10.040>
 - (15) Daemei, A. B., Eghbali, S. R., y Khotbehsara, E. M. (2019). Bioclimatic design strategies: A guideline to enhance human thermal comfort in Cfa climate zones. *Journal of Building Engineering*, 25, 100758, <http://doi.org/10.1016/j.jobee.2019.100758>
 - (16) Mastouri, H., Bahi, H., Radoine, H., y Benhamou, B. (2020). Improving energy efficiency in buildings: Review and compiling. *Materials Today: Proceedings*, 27(4), 2999-3003, <http://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.270>
 - (17) Chang, S., Castro-Lacouture, D., y Yamagata, Y. (2020). Decision support for retrofitting building envelopes using multi-objective optimization under uncertainties. *Journal of Building Engineering*, 32, 101413, <http://doi.org/10.1016/j.jobee.2020.101413>
 - (18) Al-Yasiri, Q., y Szabó, M. (2021). Incorporation of phase change materials into building envelope for thermal comfort and energy saving: A comprehensive analysis. *Journal of Building Engineering*, 36, 102122, <http://doi.org/10.1016/j.jobee.2020.102122>
 - (19) Cheng, Q., Li, H., Rong, L., Feng, X., Zhang, G., y Li, B. (2018). Using CFD to assess the influence of ceiling deflector design on airflow distribution in hen house with tunnel ventilation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151, 165-174, <http://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.029>
 - (20) Zhang, H., Yang, D., Tam, V. W. Y., et al. (2021). A critical review of combined natural ventilation techniques in sustainable buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110795, <http://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110795>
 - (21) Li, W., y Chen, Q. (2021). Design-based natural ventilation cooling potential evaluation for buildings in China. *Journal of Building Engineering*, 41, 102345, <http://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.102345>
 - (22) Kumar, R., Farhan, H. A., Nayak, S., Paswan, y M., Achintya (2021). Building design on wind driven natural ventilation with different simulation air model. *Materials Today: Proceedings*, 46(15), 6770-6774, <http://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.336>
 - (23) Sakiyama, N. R. M., Carlo, J. C., Frick, J., y Garrecht, H. (2020). Perspectives of naturally ventilated buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130, 109933, <http://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109933>
 - (24) Morishita, C., y Schmid, A. L. (2007). Ventilação Natural Por Efeito Chaminé Em Sobrados : Um Estudo Do Uso Desta Técnica Pelos Arquitetos Do Paraná. *IX Encontro Nacional a V Latino Americano de Conforto no Ambiente Construido ENTAC*, Ouro Preto, Minas Gerais.
 - (25) Teixeira, L., Talaia, M., y Meles, B. (2018). Assessment of thermal comfort in a Portuguese metalworking industry. *Occupational Ergonomics*, 13(S1), 59-70, <http://doi.org/10.3233/OER-170254>
 - (26) Vellei, M., Herrera, M., Fosas, D., y Natarajan, S. (2017). The influence of relative humidity on adaptive thermal comfort. *Building and Environment*, 124, 171-185, <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.005>
 - (27) Jing, S., Li, B., Tan, M., y Liu, H. (2013). Impact of relative humidity on thermal comfort in a warm environment. *Indoor and Built Environment*, 22(4), 598-607, <http://doi.org/10.1177/1420326X12447614>
 - (28) Kaynakli, O., Mutlu, M., Atmaca, I., y Kilic, M. (2014). Investigation of Humidity Effects on the Thermal Comfort and Heat Balance of the Body. In: Dincer I, Midilli A, Kucuk H, eds. *Progress in Exergy, Energy, and the Environment*. Springer International Publishing; 2014, 421-434, http://doi.org/10.1007/978-3-319-04681-5_37
 - (29) Nugrahanti, F. I., Koerniawan, M. D., Kawakami, R., Hasebe, H., y Budiarto, R. (2019). Influence of Humidity on Thermal Comfort for Worker Productivity in Hot-Humid Climate. *Proceedings - 2019 3rd International Conference on Smart Grid and Smart Cities, ICSGSC 2019*, Published online 2019, 127-133, <http://doi.org/10.1109/ICSGSC.2019.000-7>
 - (30) Annala, P. J., Hellemaa, M., Pakkala, T. A., Lahdensivu, J., Suonketo, J., y Pentti, M. (2017). Extent of moisture and mould damage in structures of public buildings. *Case Studies in Construction Materials*, 6: 103-108, <http://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.01.003>
 - (31) Cengel, Y. A. (2007). *Heat Transfer: A Practical Approach*. 3rd ed. McGraw-Hill; 2007.
 - (32) Shooshtarian, S., Lam, C. K. C., y Kenawy, I. (2020). Outdoor thermal comfort assessment: A review on thermal comfort research in Australia. *Building and Environment*, 177, 106917, <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106917>
 - (33) MinTrabajo - Ministerio de Trabajo y Seguridad Social de Colombia (1979). Resolución 2400 de 1979. Por el cual se establecen disposiciones sobre vivienda, higiene y seguridad industrial en los establecimientos de trabajo. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=53565>
 - (34) MinMinas-Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2015). Decreto 1886 de 2015, de 21 de septiembre. Por el cual se establece el Reglamento de Seguridad en las Labores Mineras Subterráneas. Diario oficial No. 49642 del 21 de septiembre de 2015. <https://www.anm.gov.co/?q=content/decreto-1886-de-2015minminas>
 - (35) ASHRAE - American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers (2017). *ASHRAE Handbook Fundamentals 2017*. Atlanta: ASHRAE Inc.
 - (36) Cortés-tovar, G. A., Osorio-hernández, R., y Osorio-saráz, J. A. (2024). Adaptive comfort modeling for a typical non-centrifugal cane sugar processing facility. *DYNA (Colombia)*, 91(232), 16-22, <http://doi.org/10.15446/dyna.v91n232.112625>
 - (37) Kumar, P., y Sharma, A. (2021). Assessing the monthly heat stress risk to society using thermal comfort indices in the hot semi-arid climate of India. *Materials Today: Proceedings*, 61(2), 132-137, <http://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.292>
 - (38) Nadarajan, M., y Kirubakaran, V. (2017). Simulation studies on small rural residential houses using sustainable building materials for thermal comfort - case comparison. *Advances in Building Energy Research*, 11(2), 193-207, <http://doi.org/10.1080/17512549.2016.1215260>
 - (39) Tong, X., Hong, S. W., y Zhao, L. (2019). CFD modelling of airflow pattern and thermal environment in a commercial manure-belt layer house with tunnel ventilation. *Biosystems Engineering*, 178, 275-293, <http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.08.008>
 - (40) Espitia, J., Velásquez, F., López, R., Escobar, S., y Rodríguez, J. (2020). An engineering approach to design a non-centrifugal cane sugar production module: A heat transfer study to improve the energy use. *Journal of Food Engineering*, 274, 109843, <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109843>
 - (41) La Madrid, R., Orbegoso, E. M., Saavedra, R., y Marcelo, D. (2017). Improving the thermal efficiency of a jaggery production module using a fire-tube heat exchanger. *Journal of Environmental Management*, 204(1), 622-636, <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.035>
 - (42) Kulkarni, S. N., y Ronge, B. P. (2018). CFD simulation and field data assessment of open pan jaggery making furnace. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 8(3), 647-652, https://www.researchgate.net/profile/Sunildatta-Kulkarni/publication/325736191_CFD_Simulation_and_Field_Data_Assessment_of_Open_Pan_Jaggery_Making_Furnace/links/5b7f99334585151fd12e7989/CFD-Simulation-and-Field-Data-Assessment-of-Open-Pan-Jaggery-Making-Furnace.pdf
 - (43) IDEAM - Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. (2021). *Atlas Climatológico de Colombia*. <https://www.ideam.gov.co/AtlasWeb/index.html>
 - (44) Osorio, R. H., Osorio, J. A., Oliveira, K. S., Aristizaba, I. D., y Arango, J. C. (2020). Computational fluid dynamics assessment of effect of different openings configurations on the thermal environment of a facility for coffee wet processing. *Journal of Agricultural Engineering*, 51(1), 21-26, <http://doi.org/10.4081/jae.2020.892>
 - (45) ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR ISO 10456: Materiais e produtos de construção - Propriedades higrotérmicas - Valores e procedimentos de projeto tabulados para determinar valores térmicos declarados e de projeto. <https://www.normas.com.br>

- (46) Viggiano, M., Gheraldi, E., Cimini, D., et al. (2021). The role of temporal resolution of meteorological inputs from reanalysis data in estimating air humidity for modelling applications. *Agricultural and Forest Meteorology*, 311, 108672, <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108672>
- (47) Xu, J., Wei, Q., Peng, S., y Yu, Y. (2012). Error of saturation vapor pressure calculated by different formulas and its effect on calculation of reference evapotranspiration in high latitude cold region. *Procedia Engineering*, 28, 43-48, <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.680>
- (48) Betancourt, R. (1991). *Fenómenos de Transporte: Un Curso Introductorio*. 1st ed. Manizales: Centro de publicaciones Universidad Nacional de Colombia.
- (49) Bustamante, E., García-Diego, F. J., Calvet, S., et al. (2013). Exploring ventilation efficiency in poultry buildings: The validation of computational fluid dynamics (CFD) in a cross-mechanically ventilated broiler farm. *Energies*, 6(5), 2605-2623, <http://doi.org/10.3390/en6052605>
- (50) Maher, D., Hana, A., y Sammouda, H. (2020). Numerical approximation of air flow, temperature distribution and thermal comfort in buildings. *Scientific African*, 8, e00353, <http://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00353>
- (51) ASTM - American Society for Testing Materials. (2002). Guide For Statistical Evaluation Of Indoor Air Quality Models (D5157). https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=ASTM%20D5157&item_s_key=00137897
- (52) Aflaki, A., Mahyuddin, N., Al-Cheikh Mahmoud, Z., y Baharum, M. R. (2015). A review on natural ventilation applications through building façade components and ventilation openings in tropical climates. *Energy and Buildings*, 101, 153-162, <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.033>
- (53) Guzmán-Hernández, I., Franco, F., y Roset, J. (2019). Problematic of the passive cooling systems in hot-humid tropical zones. *Aula Revista de Humanidades y Ciencias Sociales*, 64(4), 73-86, <http://doi.org/10.33413/aulahcs.2019.64i4.104>