




# Numerical simulation of an informal dwelling fire in the colombian context

Florez Trujillo, D.F., Eng.<sup>1</sup>, Mesa Montoya, C.A., MSc<sup>2</sup>, y Valencia Correa, A., PhD<sup>3</sup>  
<sup>1,2</sup>Technological University of Pereira, Colombia, [diegoflorez@utp.edu.co](mailto:diegoflorez@utp.edu.co), [caanmesa@utp.edu.co](mailto:caanmesa@utp.edu.co)  
<sup>3</sup>University of Canterbury, New Zealand, [andres.valencia@canterbury.ac.nz](mailto:andres.valencia@canterbury.ac.nz)

*Abstract— Informal settlement fires have been recognized as a global problem, affecting thousands of people annually and representing an extensive risk for millions. Informal settlements are characterized by poor infrastructure, lack of access to vital services, and flammable construction materials. This paper presents a simplified numerical simulation of a Colombian informal dwelling built with Guadua. The temperature and heat flux results are compared with respect to an informal timber dwelling. A sensitivity analysis of the mesh, computational domain, and burner configuration is performed. The results show that the properties of Guadua reduce the flashover growth rate, the heat fluxes at the door and window, and the maximum temperature of the enclosure compared to a timber dwelling. These results provide an opportunity to understand Colombia's informal dwelling fire damage and could afford to develop security strategies in the most critical areas.*

*Keywords— Fire simulation, informal settlements, Guadua, Latin America, FDS*

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).  
**DO NOT REMOVE**

# Simulación computacional de un incendio en una vivienda informal en el contexto colombiano

Florez Trujillo, D.F., Ing.<sup>1</sup>, Mesa Montoya, C.A., MSc<sup>2</sup>, y Valencia Correa, A., PhD<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, diegoflorez@utp.edu.co, caanmesa@utp.edu.co

<sup>3</sup>Universidad de Canterbury, Nueva Zelanda, andres.valencia@canterbury.ac.nz

**Resumen**— Los incendios en asentamientos informales han sido reconocidos como un problema global, afectando a miles de personas anualmente y representando un gran riesgo para millones. Los asentamientos informales se caracterizan por tener una pobre infraestructura, falta de acceso a servicios vitales, y una construcción con materiales altamente inflamables. En este artículo se realiza una simulación computacional simplificada de una vivienda informal colombiana construida con Guadua. Los resultados de temperatura y los flujos de calor irradiados por las aberturas son comparados con respecto a una vivienda informal de madera. Se realiza un análisis de sensibilidad de la malla, el dominio computacional, y la configuración del quemador. Los resultados muestran que las propiedades de la guadua reducen la tasa de crecimiento acelerado del incendio, los flujos de calor en la puerta y ventana, y la temperatura máxima del recinto en comparación con una vivienda de madera. Estos resultados brindan una posibilidad para comprender la capacidad de ocasionar daños de este fenómeno en las viviendas informales de Colombia, y para desarrollar estrategias de seguridad en las zonas más críticas.

**Palabras clave**— Simulación de incendios, asentamientos informales, Guadua, Latino América, FDS

## I. INTRODUCCIÓN

Los asentamientos informales son asentamientos que operan fuera de los sistemas legales y regulatorios formales, ya sea de manera individual o colectiva, en un contexto económico, político, cultural, geográfico o urbanístico. Desde 1990, a nivel global se han sumado cerca de 230 millones de personas viviendo en asentamientos informales [1], y el número absoluto de personas en barrios marginales ha aumentado de 689 millones en 1990 a 880 millones en 2014 [2]. Para el año 2018, el 29% de la población mundial vivía en asentamientos informales [3]; y se estima que para el año 2050, el número total de personas en esta situación de informalidad sea de 3500 millones [1]. En Latino América, esta situación de informalidad afecta al menos el 21% de la población urbana [4]. En algunos países del Sur Global (e.g., de África, sudeste asiático) se sabe que esta cifra puede ser superior al 60% [5]. Aunque las cifras pueden variar ampliamente dependiendo de la región, es reconocido como un fenómeno global [5–7].

El fenómeno de la informalidad en el contexto de América Latina y el Caribe está estrechamente relacionado al crecimiento demográfico generado después de la segunda mitad del siglo XX, y al gran flujo migratorio desde las zonas rurales hacia los centros urbanos. En Colombia, además de esto, la situación de informalidad también está asociada a los desplazamientos involuntarios, también conocidos como desplazamientos forzados, causados por disputas territoriales entre grupos armados al margen de la ley [8, 9]. La violencia interna generó un

desplazamiento de 4.6 millones de personas aprox. (que integran en promedio 925 mil familias) desde 1985 hasta el año 2008 [10], de un total histórico de 6.4 millones de personas aprox. reportadas por el Registro Único de Víctimas (RUV) a finales del año 2014 [11].

La ubicación física de estos asentamientos informales suele estar en terrenos menos que adecuados para su ocupación, como laderas empinadas y riberas de ríos; y frecuentemente carecen de bienes públicos como caminos pavimentados, sistemas de alcantarillado, desagües pluviales o alumbrado público [5]. Muchas de estas viviendas informales están construidas con elementos reciclables y/o económicos como cartón, laminas metálicas, plásticos o lonas, y pueden o no tener entradas de ventilación o iluminación [12, 13]. La mayoría de las personas dependen de proveedores y/o conexiones ilegales a la red para obtener su “servicio” de agua y electricidad, y pueden o no utilizar otro combustible (e.g., madera) para calentar, cocinar e iluminar en su vivienda [14]. Estas características, sumadas a los materiales altamente inflamables y/o a la falta de regulación asociada a su construcción, contribuyen a que los asentamientos informales sean extremadamente vulnerables a incendios. Solo en Sudáfrica se han generado emergencias que en un solo incendio han dejado a cerca de 10 mil personas sin hogar; y como lo evidencian los reportes mostrados por R. Walls *et al.* [15], el número de incendios presentados al año entre 2003 y 2018, ha aumentado de 3000 a cerca de 5500, y se espera que estos tiendan a ser cada vez mayores. En Costa Rica, entre el año 2015 y el año 2019, el número de casos de incendios en asentamientos informales fue de 229 [16]. Las causas más comunes de incendio en los asentamientos informales son la quema de basuras, las fallas eléctricas, las velas, la manipulación de fuego y los incidentes con gas [17, 18].

En los últimos años, como respuesta a esta gran necesidad de comprender los factores que contribuyen en la propagación y/o crecimiento de los incendios en asentamientos informales, las investigaciones han avanzado en el desarrollo de experimentos a gran escala [19, 20] y en la implementación de simulaciones computacionales (e.g., *Fire Dynamics Simulator* - FDS, B-RISK [21, 22]). Trabajos como el de Wang *et al.* 2020 [23], han contribuido experimentalmente en el desarrollo de una base de datos con las características de combustión de algunos materiales que se pueden encontrar en asentamientos de Sudáfrica, y algunas investigaciones como, por ejemplo, la de Flores Quiroz *et al.* 2021 [24] han contribuido en el desarrollo de una estructura de trabajo para la investigación de incendios en estos asentamientos.

A nivel global, la simulación computacional de incendios en recintos mediante FDS es conocida por la comunidad. Sin embargo, cuando nos referimos a pruebas sobre viviendas de asentamientos informales, la bibliografía disponible es limitada. En la literatura existen algunos trabajos que han contribuido en el análisis de diferentes parámetros (e.g., separación entre viviendas, aberturas de ventilación, cambios en algunas propiedades térmicas) sobre la cantidad de calor liberado, la temperatura de los gases, el consumo de combustible y la longitud de las llamas durante la propagación de incendios en viviendas informales [21, 25–29]. Sin embargo, aún existe poca o nula información sobre algunos procedimientos en la modelización numérica de estas viviendas informales. Por ejemplo, aplicaciones sobre estructuras con paredes finas, condiciones de ventilación que cambian continuamente, aberturas pequeñas, colapso estructural, amplios rangos en las cargas de combustible, entre otros.

Es en este contexto que, este artículo presenta mediante FDS v6.7 y PyroSim, un caso simplificado de una vivienda informal colombiana. El objetivo es investigar como algunos cambios en la configuración y en los parámetros de entrada de la simulación, modifican el desarrollo de incendios en viviendas informales construidas con madera. Para esto, en este estudio se utilizan los datos experimentales de temperatura y flujos de calor encontrados por Cicione *et al.* 2020 [25] en el desarrollo de un incendio a escala de una vivienda informal de Sudáfrica. Este artículo se centra en: i) simular computacionalmente de forma simplificada una vivienda informal con un material típico colombiano, ii) comparar gráficamente los resultados obtenidos en el montaje propuesto por [25] en el estudio de una vivienda informal de madera, iii) realizar un análisis de sensibilidad.

## II. SIMULACIÓN DE INCENDIOS EN FDS

FDS es un software de dinámica de fluidos computacional creado y publicado en el año 2000 por el *National Institute of Standards and Technology* (NIST) y el *VTT Technical Research Centre of Finland*. FDS permite establecer el modelo de turbulencia *Large Eddy Simulation* (LES) y la visualización de datos a través de una interfaz gráfica denominada *Smokeview* [30].

En el modelo LES, se incluyen de manera explícita los valores medios de masa, momentum y energía en cada elemento de la malla, mientras se tienen en cuenta los efectos de transporte y química que se generan en el *subgrid scale* (i.e., escalas más pequeñas que no se pueden modelar con la malla). En FDS, el modelo de turbulencia hace referencia a como se configuran

los términos del *subgrid-scale*. La viscosidad turbulenta, por ejemplo, puede ser configurada por el modelo constante o dinámico de Smagorinsky, el modelo de Vreman o el modelo de Deardoff. Por defecto, FDS utiliza una variación de este último en conjunto con el modelo *Wall-Adapting Local Eddy Viscosity* (WALE) en las cercanías de la pared. FDS también utiliza una suposición de *Low Mach Number* (i.e., flujos de unas decenas de metros por segundo que son mucho menores que la velocidad del sonido) que modifica la ecuación de estado y elimina los efectos de compresibilidad. Se reduce el número de variables dependientes del sistema, y se descartan los pasos de tiempo más pequeños que se necesitan para modelarlos. Para la mayoría de las aplicaciones, FDS utiliza un modelo de combustión con reacciones infinitamente rápidas y limitadas de mezcla. Para que las simulaciones sean viables, en términos de capacidad computacional, se limita la cantidad de combustibles a uno, y la cantidad de reacciones a solo una o dos [31, 32]. Los fundamentos matemáticos, físicos y computacionales están basados en la guía técnica de FDS presentada por McGrattan *et al.* 2021 [31].

En conjunto con FDS, se utilizará la versión académica de PyroSim 2022 para modelar la dinámica del fuego en la vivienda informal. PyroSim es una interfaz gráfica desarrollada por *Thunderhead Engineering Consultants* que está estrechamente asociada con FDS y *Smokeview*, por lo que muchos de los modelos y fundamentos teóricos utilizados también aplican para esta herramienta; para mayor detalle sobre este software se sugiere revisar el manual del usuario [33].

### A. Metodología

La ruta de trabajo utilizada en la preparación de la simulación computacional es mostrada en la Fig. 1. Se pretende desarrollar un modelo simplificado de la geometría de la vivienda, una preparación sobre el dominio y el mallado, y una configuración sobre las condiciones de frontera antes de finalizar con una solución numérica sobre las variables de interés (e.g., temperatura y flujos de calor). Los detalles de cada etapa son mostrados en próximas secciones.

1) *Limitaciones y suposiciones*: este trabajo no dispone de datos experimentales propios que representen el caso de estudio colombiano, ni que validen las pruebas o cambios realizados sobre la simulación. Los resultados serán comparados con pruebas experimentales realizadas en viviendas informales de Sudáfrica y los resultados deben interpretarse en consecuencia.

Las condiciones de ventilación, del combustible y la geometría de la vivienda se simplificaron durante la modelización:

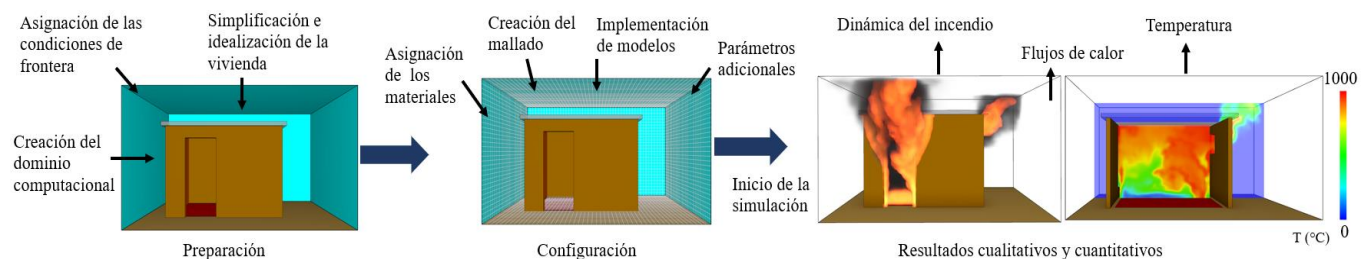


Fig. 1. Ruta de trabajo en la simulación computacional de un incendio en una vivienda informal

i) la ventilación se genera principalmente a través de una puerta y una ventana, ii) no se considera la gran variedad de materiales que se encuentran al interior de la vivienda, sino que más bien, se realiza una simplificación y suposición sobre una única fuente de combustible (i.e., un quemador), iii) en la geometría se consideran superficies, dimensiones y materiales ideales que por supuesto difieren de la realidad propia de una vivienda informal. Sin embargo, y de acuerdo con Cicione *et al.* 2021 [21], a pesar de las simplificaciones involucradas, las simulaciones computacionales en FDS logran captar la dinámica del incendio, los flujos de calor emitidos y las temperaturas.

### B. Modelo Virtual

El modelo, las dimensiones y las características de la vivienda informal son mostradas en la Fig. 2. El caso base está creado con las dimensiones utilizadas en el montaje experimental llevado a cabo por Cicione *et al.* 2020 [25], y supone una aproximación inicial para el caso de una vivienda informal colombiana. El modelo tiene un área de  $9 \text{ m}^2$  y una altura de 2.3 m, con solo una puerta y ventana de  $2030 \times 860 \text{ mm}$  y  $600 \times 600 \text{ mm}$ , respectivamente. Al igual que en el experimento, el modelo está configurado con paredes de madera, un recubrimiento interno de cartón y un techo que representa las tejas de zinc.

He de notar que, la creación de las paredes o de cualquier otra obstrucción sobre el dominio computacional depende estrictamente del tamaño del elemento con el que se crea la malla. Por consiguiente, el espesor mínimo de las obstrucciones debe ser ajustado en correspondencia con la mínima distancia disponible para modelarlos (e.g., 0.1 m). Como se mostrará más adelante, esto implica que se deban ajustar algunas propiedades de los materiales utilizados (e.g., densidad). En lo que respecta a la creación del modelo de la vivienda, se puede decir que, en general, todo está conformado a partir de planos y extrusiones con formas rectangulares o cuadradas.

1) *Puntos de interés durante la solución*: los puntos de interés que son utilizados para comparar los resultados experimentales son presentados en la Fig. 2. Se mide la temperatura en el centro de la vivienda con una termocupla tipo K y se miden los flujos de calor en la puerta y ventana con la herramienta *radiative heat flux gas*. La termocupla fue simulada con las siguientes propiedades: diámetro de punta de 6 mm, emisividad (0.85 Inconel), densidad ( $8900 \text{ kg/m}^3$ ) y calor específico ( $0.44 \text{ kJ/(kg K)}$ ) [34–36]. La configuración y orientación de los “instrumentos” del modelo virtual deben estar dispuestos de tal

forma que la punta tenga contacto directo con la variable de interés (e.g.,  $-z$  para la termocupla).

### C. Dominio Computacional

Cualquier exceso de combustible no quemado al interior de la vivienda informal se quemará fuera del compartimiento (i.e., donde hay oxígeno disponible) [32]. El dominio computacional debe considerar la salida de las llamas desde la vivienda y el espacio para ubicar los instrumentos de interés (e.g., para medir los flujos de calor a 1 m de la vivienda). Las dimensiones del dominio computacional y su ubicación relativa desde la vivienda son mostradas en la Fig. 2. Inicialmente, el dominio computacional es de  $5 \times 5 \times 3 \text{ m}$  (largo x ancho x alto), y se encuentra a 1.4 m de la ventana (i.e., a 0.4 m de los TSCs). Esta separación será modificada y probada más adelante en el estudio de sensibilidad (sección III).

1) *Condiciones de frontera*: como se presenta en la Fig. 3, todas las paredes del dominio computacional se consideran abiertas (*open*), excepto el suelo que se considera como inerte (*inert*). Las paredes de la vivienda se modelan como *air gap* y el techo como *exposed*. En FDS, las obstrucciones se modelan como dos paredes independientes que pueden o no, interactuar entre sí (i.e., *surface* uno y dos de la Fig. 3). Por ejemplo, la condición de frontera *air gap* permite transferencia de calor por convección ( $\dot{q}_c''$ ) y por radiación ( $\dot{q}_r''$ ) entre la superficie externa y una zona que se encuentra a temperatura ambiente (lo mismo para la superficie de la derecha), en cambio, la configuración *exposed* permite transferencia de calor entre ambos lados de la pared, aunque conservado la división de la obstrucción ( $T_1 = T_2$ ) [30]. Un resumen con la configuración utilizada sobre las obstrucciones del modelo es presentado en la Tabla 1.

Cabe señalar que, el espesor (*thickness*) utilizado para el cálculo de la conducción de calor de la superficie es independiente del espesor que tiene la obstrucción (e.g., 0.1 m). En FDS, el *namelist group %OBST* describe las obstrucciones sólidas que impiden que un gas fluya, mientras que, el *namelist group %SURF*, describe las características de la superficie (e.g., la superficie uno de la Fig. 3) que se utilizan en el modelo de transferencia de calor. Cuando se aplica una condición de frontera a una obstrucción (e.g., *Void*), FDS realiza un cálculo de transferencia de calor unidimensional por separado en cada cara del sólido utilizando el parámetro *thickness* definido en %SURF. Esta suposición unidimensional es para la mayoría de

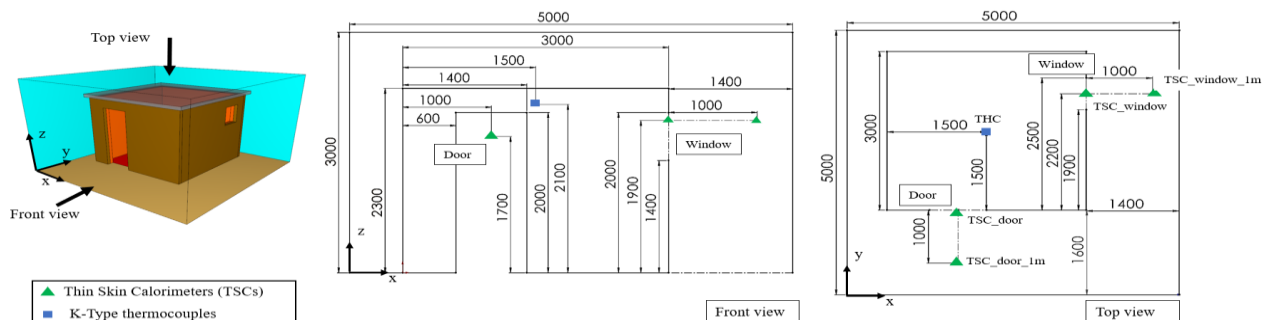


Fig. 2. Dimensiones, instrumentos, y ubicación de la vivienda sobre el dominio computacional creado en FDS, adaptado de [25]. Unidades en mm



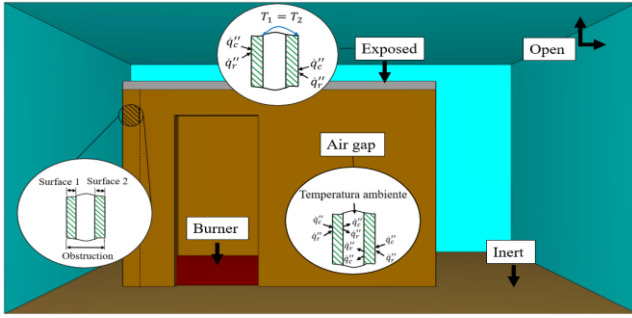


Fig. 3. Condiciones de frontera sobre el modelo y dominio computacional. Transferencia de calor por convección ( $q''_c$ ) y por radiación ( $q''_r$ ). Temperatura en la superficie uno ( $T_1$ ) y dos ( $T_2$ )

las situaciones de simulación de incendios una aproximación computacionalmente rápida y adecuada [31].

En la configuración de FDS, y en especial, sobre la interfaz de Pyrosim, es posible seleccionar la opción *Allow the Obstruction to Burn Away*. Esta opción permite que la obstrucción desaparezca del cálculo de la simulación una vez se consume. Sin embargo, para que esto suceda, se deben configurar las reacciones de pirólisis de la obstrucción, o como ocurre en este caso, estar configurada por una curva de *Heat Released Rate Per Unit Area* (HRRPUA) vs tiempo que modele su combustión (este tema es extendido en la sección E). Esta opción es empleada en la configuración de las paredes de madera y del cartón. Nótese que, también es necesario definir el *bulk density* sobre estas superficies (se utilizan los valores de densidad mostrados en la Tabla 2), ya que, si no se especifica este parámetro, el HRRPUA de la pared será evaluado con respecto al *thickness* de %SURF, y no con el tamaño de la obstrucción.

#### D. Mallado

La mayoría de los flujos generados durante el incendio, especialmente en la región de la llama, son turbulentos. En el recinto se producen mezclas entre el combustible y el aire fresco que determinan su dinámica y comportamiento. De ahí que, uno de los principales retos en la simulación de incendios sea representar, con una malla del orden de cm, las escalas de longitud y tiempo que se producen durante la combustión. De acuerdo con McGrattan *et al.* 2021 [30] el tamaño mínimo de los elementos de la malla que podrían representar esta dinámica, al menos en un nivel moderado de precisión, puede ser de aproximadamente  $0.1D^*$ . El valor  $D^*$  se puede calcular así:

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty T_\infty C_p \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (1)$$

Donde  $D^*$  es el *characteristic fire diameter* (m),  $\dot{Q}$  es la tasa de liberación de energía HRR (kW),  $\rho_\infty$  es la densidad del aire

TABLA 1  
RESUMEN DE LAS CONDICIONES DE FRONTERA

Obstrucción	% SURF [mm]	Backing	% OBST [mm]
Techo	0.25	Exposed	
Paredes	50	Air gap	100
Cartón			

ambiente ( $\text{kg/m}^3$ ),  $T_\infty$  es la temperatura ambiente (K),  $C_p$  es el calor específico ( $\text{kJ}/(\text{kg K})$ ), y  $g$  es la gravedad ( $\text{m/s}^2$ ). Si se considera un HRRPUA de  $1516 \text{ kW/m}^2$  (este valor se discutirá más adelante) para un área  $6.76 \text{ m}^2$  y condiciones estándar (i.e., 1 atm) de densidad ( $1.1614 \text{ kg/m}^3$ ), temperatura (300 K), y calor específico ( $1.007 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ ) del aire [37], entonces se obtiene que  $D^* = 2.44 \text{ m}$ . El tamaño mínimo de los elementos debería ser entonces de  $0.1D^*$ , es decir, de  $0.244 \text{ m}$ . Otros autores han utilizado esta misma referencia para definir el tamaño de los elementos en sus simulaciones computacionales y han mostrado tener un ajuste suficiente para representar el fenómeno y su comportamiento [21, 25]. Inicialmente, en este trabajo se toma un tamaño de  $0.1 \text{ m}$ , pero será modificado y probado más adelante en el estudio de sensibilidad. Las limitaciones asociadas a la capacidad computacional disponible para este trabajo también serán consideradas en este análisis.

#### E. Configuración

En este tipo de simulación las paredes, el techo, el suelo (e.g., fuente de ignición) y la vivienda en general, suponen las condiciones iniciales antes de generarse el incendio. En su implementación se pueden incorporar los procesos de ignición, la cinética de las reacciones, la generación de combustible (e.g., a través de un quemador) y los mecanismos de transferencia de calor (i.e., conducción, convección y radiación). A continuación, se presentan los detalles sobre las propiedades de los materiales, el quemador, la implementación de las curvas de liberación de energía que modelan la pirólisis y los parámetros finales de configuración.

1) *Materials*: los materiales, las superficies, y las obstrucciones definen en conjunto las condiciones de las paredes de la vivienda. Estas condiciones se generan de manera independiente utilizando los *namelist group* (%MATL, %SURF, y %OBST respectivamente) y son enlazadas por los *Properties Names* de forma secuencial. Así, por ejemplo, las propiedades del material se asignan a una superficie y luego esta superficie se aplica a una obstrucción (e.g., una pared). Las propiedades térmicas y superficiales que se definen en los materiales utilizados son densidad, calor específico, conductividad, emisividad, temperatura de ignición y coeficiente de absorción (por defecto es de  $5 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$ ). En la Tabla 2 se presenta un resumen de los materiales y propiedades utilizadas en la simulación computacional de la vivienda informal. Las propiedades establecidas en FDS son destacadas en negrilla.

Para compensar el cambio de volumen entre la pared real y la pared modelada por FDS, es necesario ajustar la densidad del material. Para esto, se genera una relación entre el espesor real y el tamaño del elemento utilizado en la simulación. Por ejemplo, para las paredes de madera esta relación es de  $0.12$ ; el espesor real es de  $12 \text{ mm}$  [25] y el tamaño de la obstrucción es de  $100 \text{ mm}$ . Este valor se multiplica por la densidad de la madera (i.e.,  $536 \text{ kg/m}^3$ ) y el valor ajustado es entonces el que se utiliza en FDS (i.e.,  $64.32 \text{ kg/m}^3$ ). Esto mismo aplica para las superficies que están creadas con cartón y Guadua.

La Guadua, conocida científicamente como "*Guadua Angustifolia Kunth*", es utilizada como material de construcción

TABLA 2  
RESUMEN DE LOS MATERIALES Y PROPIEDADES EMPLEADAS EN LAS SIMULACIONES

Propiedades	Material			
	Madera (pino)	Teja de zinc (acero galvanizado)	Guadua/Esterilla	Cartón
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	536 <sup>a</sup> ( <b>64.32</b> )	7850 <sup>i</sup> ( <b>7850</b> )	607 - 715 <sup>d,f</sup> ( <b>99.15</b> )	180 <sup>b</sup> ( <b>2.7</b> )
Calor específico (kJ/(kg·K))	1.24 - 2.8 <sup>b</sup> ( <b>1.3</b> )	0.49 - 0.6 <sup>j,a</sup> ( <b>0.6</b> )	2.8 - 3.7 <sup>*</sup> ( <b>3.3</b> )	1.52 - 2.7 <sup>b</sup> ( <b>2.7</b> )
Conductividad (W/(m·K))	0.11 - 0.2 <sup>b,h</sup> ( <b>0.14</b> )	33 - 54 <sup>j</sup> ( <b>45</b> )	0.31 - 0.35 <sup>e</sup> ( <b>0.33</b> )	0.064 - 0.42 <sup>b</sup> ( <b>0.42</b> )
Emisividad (-)	0.82 - 0.91 <sup>i</sup> ( <b>0.9</b> )	0.23 - 0.88 <sup>i</sup> ( <b>0.42</b> )	0.82 - 0.91 <sup>i</sup> ( <b>0.9</b> )	0.7 - 0.9 <sup>b</sup> ( <b>0.9</b> )
Temperatura de ignición (°C)	300 - 350 <sup>b</sup> ( <b>350</b> )	n/a	368 - 388 <sup>c</sup> ( <b>370</b> )	263 - 323 <sup>b</sup> ( <b>263</b> )
Poder calorífico (MJ/kg)	17.5 - 20 <sup>h,a</sup> ( <b>18</b> )	n/a	18 - 19.1 <sup>e,k</sup> ( <b>18</b> )	16.9 <sup>a</sup> ( <b>16.9</b> )

<sup>a</sup> [25], <sup>b</sup> [21], <sup>c</sup> [43], <sup>d</sup> [48], <sup>e</sup> [49], <sup>f</sup> [47], <sup>g</sup> [50], <sup>h</sup> [29], <sup>i</sup> para algunas maderas no propiamente especies de bambú [42], <sup>j</sup> [35], <sup>k</sup> [51], <sup>l</sup> los valores del calor específico de la guadua fueron calculados con la inercia térmica del bambú *Phyllostachys pubescens* "Moso" (i.e., valores de entre 0.61 - 0.80 kW<sup>2</sup> s/(m<sup>2</sup>K<sup>2</sup>)) [43] para un valor medio de densidad de 661 (kg/m<sup>3</sup>) y de conductividad 0.33 (W/(m K)).

en la simulación simplificada de la vivienda informal colombiana. De acuerdo con el trabajo de campo realizado por Torres Tovar 2009 [9], los materiales que predominan en la construcción de las viviendas informales de todas las ciudades en Colombia son la madera (incluida la Guadua) y la teja de zinc (72% aprox.). En el área Andina de Colombia, la estructura de estas viviendas se puede fabricar con Guadua y las paredes se pueden formar utilizando esterilla (i.e., una transformación de la Guadua en láminas de hasta 300 x 40 x 1.5 cm); se sugiere revisar [38] para una mejor ilustración. También se pueden utilizar otros materiales (e.g., tela de polipropileno y el plástico) para cubrir las paredes. En Colombia, la Guadua es el bambú nativo de mayor importancia y forma parte de una de las 1400 especies que existen en el mundo. A nivel nacional, la Guadua también ha acompañado el desarrollo de los caficultores y campesinos en la construcción tradicional de viviendas, puentes, canaletas, acueductos y en la elaboración de artesanías [39].

2) *Quemador*: el *fire load density* en una vivienda informal puede variar entre los 400 - 3000 MJ/m<sup>2</sup> [40]. Este valor depende ampliamente de los elementos internos que tenga la familia en su hogar y de los elementos externos que se encuentren en el techo o a su alrededor (e.g., llantas, madera, plásticos, ladrillos). Debido a la propia naturaleza cambiante de este tipo de asentamientos, Cicione *et al.* 2020 [25] utiliza el valor estipulado por el estándar europeo para una vivienda formal en su montaje experimental (i.e., 780 MJ/m<sup>2</sup> [41]). Para lograr representar esta cantidad de energía por metro cuadrado al interior de la vivienda, se consideran 9 *cribs* de madera con una altura de 0.48 m. El *fire load density* de esta configuración es de 750 MJ/m<sup>2</sup> aprox.

La tasa de liberación de energía (HRR) de esta colocación de *cribs* fue simplificada asumiendo un valor total por unidad de área, o, en otras palabras, un HRRPUA sobre un quemador (*burner*) al interior de la vivienda. Esta colocación implica suponer que, la disposición de los *cribs* utilizados en el experimento se comportan como una superficie que genera un flujo másico de combustible de la forma  $C_{3.4}H_{6.2}O_{2.5}$ . De esta manera, la combustión se produce en el recinto luego de que el combustible se mezcle con el aire circundante [29]. El HRRPUA de esta configuración fue estimado de acuerdo con las recomendaciones dadas por Babrauskas [42] en el estudio de *cribs* de madera y en su pérdida o cambio de masa bajo *surface-controlled*. El valor del HRRPUA generado por el quemador se puede calcular así:

$$HRRPUA = \frac{4 \Delta H_C m_0 v_p}{A D} \left( 1 - \frac{2 v_p t}{D} \right) \quad (2)$$

Donde  $A$  es el área del quemador (m<sup>2</sup>),  $\Delta H_C$  es el poder calorífico de la madera que forma los *cribs* (kJ/kg),  $D$  es el ancho de los palos utilizados en el *crib* (m),  $v_p$  depende del material y del ancho de los palos,  $m_0$  es la masa total inicial del *crib* (kg), y  $t$  es el tiempo transcurrido desde la ignición (s). De acuerdo con Babrauskas [42], para *cribs* de madera,  $v_p$  es igual a  $2.2 \times 10^{-6} D^{-0.6}$ . Previo a la ignición, el tiempo  $t$  es igual a cero. Para un área de 6.76 m<sup>2</sup>, un  $\Delta H_C = 18$  MJ/kg, una masa  $m_0 = 375$  kg y un ancho  $D = 0.04$  m, el HRRPUA es de 1516 kW/m<sup>2</sup> aprox. Este valor será utilizado en la configuración del modelo de pirolisis del quemador.

3) *Modelo de pirolisis*: en FDS, el modelo de pirolisis se puede definir utilizando la tasa de liberación de energía conocida del material. En esta configuración el programa no realiza un cálculo directo sobre el modelo, sino que más bien, utiliza el comportamiento experimental del HRRPUA del material de prueba. En la Fig. 4 se muestra un compendio de los perfiles utilizados en el programa para modelar el quemador, el cartón, la madera y la Guadua. En la gráfica se presenta la fracción de HRRPUA vs tiempo gracias a que, en FDS, los datos se dividen entre el valor máximo obtenido. Nótese que, solo se tomaron los primeros 420 s con el objetivo de comparar los resultados experimentales mostrados por [25].

a) *Quemador*: en el estudio a gran escala de viviendas informales se ha encontrado que, estas experimentan un comportamiento similar al de los recintos construidos con materiales resistentes al fuego. Durante un incendio, en ambos casos se desarrolla un proceso de crecimiento, una etapa de *flashover*,

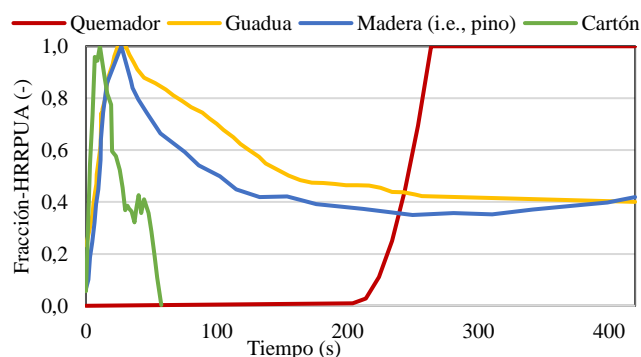


Fig. 4. Configuración de la tasa de liberación de energía en FDS

una etapa de *fully developed fire* y una etapa de decaimiento; aunque normalmente esta última no sucede en una vivienda informal ya que antes termina con el colapso estructural [15]. Experimentalmente se ha demostrado que, en modelos a escala de viviendas informales de Sudáfrica, la transición entre el crecimiento y la etapa de *fully developed fire* puede ocurrir en menos de 60 s [19]. Otros experimentos al aire libre sobre viviendas informales representativas de Sudáfrica sugieren menos 90 s para que se desarrolle completamente el incendio [14].

El perfil que configura el desarrollo de estas etapas típicas durante el incendio del modelo virtual es mostrado en la Fig. 4. La evolución del perfil del quemador a lo largo de la simulación presenta tres etapas: i) crecimiento entre 0 - 200 s, ii) transición entre 200 - 260 s, iii) *fully developed fire* entre 260 - 420 s. En la primera etapa se asume un crecimiento constante, aunque solo del 1% del HRRPUA máximo, con el objetivo de generar un precalentamiento del recinto y ajustar el inicio del *flashover* en 200 s aprox., ver Fig. 5a – minuto 3.5. En la segunda etapa, se representa la transición entre el crecimiento y el *fully developed fire*. Para esto, se utiliza un crecimiento acelerado del HRR conocido como función *t-squared*, que aumenta con el cuadrado del tiempo [32]. Las condiciones descritas anteriormente de HRRPUA máximo (i.e., 1516 kW/m<sup>2</sup>) y de transición entre crecimiento y *fully developed fire* (i.e., 60 s) fueron utilizadas para modelar la segunda etapa. Finalmente, para establecer la etapa de *fully developed fire* durante el incendio, el HRRPUA máximo se mantiene constante hasta terminar la simulación.

b) *Cartón y madera*: el perfil de HRRPUA vs tiempo del cartón y la madera es mostrado en el Fig. 4. Durante un incendio, la tasa de liberación de energía de un combustible no es constante, sino que más bien, es cambiante. Esto se evidencia, por ejemplo, al comparar el cartón y la madera. El cartón genera el máximo HRRPUA rápidamente y solo participa durante 60 s antes de consumirse completamente. Mientras que, por ejemplo, la madera libera su máximo poder y se mantiene constante en un 40% aprox. del máximo HRRPUA después de los 150 s (i.e., para las mismas condiciones experimentales necesita más tiempo para consumirse completamente). Las pruebas de la madera (i.e., el pino) y el cartón fueron realizadas en un *Fire Propagation Aparatus* (FPA) por [25]. Durante las pruebas se consideró que los flujos de calor al interior del recinto son iguales o mayores a 50 kW/m<sup>2</sup> y, por tanto, los resultados fueron determinados para ese valor. El HRRPUA máximo estimado para el cartón y la madera fue de 274 y 241.5 kW/m<sup>2</sup>, respectivamente. A diferencia del quemador, que participa desde el inicio de la simulación, estos modelos de HRRPUA vs tiempo solo actúan cuando se alcanza la temperatura de ignición en algún elemento de la malla que configura el material de prueba (i.e., al inicio de la simulación la madera y el cartón no se están consumiendo).

c) *Guadua*: el perfil de HRRPUA vs tiempo de la Guadua es mostrado en la Fig. 4. Su comportamiento fue estimado utilizando los datos de pérdida de masa para probetas laminadas de bambú *Phyllostachys pubescens* “Moso” [43]. En este trabajo se asume como una condición aproximada al no disponer de otras pruebas o estudios que caractericen el comportamiento

del HRR de la especie nativa colombiana *Angustafolia Kunth*. Según Solarte *et al.* 2021 [43] aún existe limitada información sobre el comportamiento de muchas especies de bambú en la dinámica de incendios. El perfil del HRRPUA vs tiempo de la Guadua fue estimado utilizando la bien conocida formulación para la tasa de liberación de energía:

$$HRRPUA = \dot{m}'' \Delta H_c \quad (3)$$

Donde  $\dot{m}''$  es la pérdida de masa (MLR por sus siglas en inglés - *mass loss rate*) medida en g/(s m<sup>2</sup>) tomada del estudio de [43], y  $\Delta H_c$  es el poder calorífico de la Guadua utilizado en este trabajo (i.e., 18 kJ/g). El valor máximo estimado para el HRRPUA de la Guadua fue de 231.85 kW/m<sup>2</sup>. Esta formulación sobre la tasa de liberación de energía implica suponer que, ambas variables solo están relacionadas por una constante; aunque se sabe que esto no es del todo cierto. Como lo sugiere Babrauskas [42], además de la pérdida de masa, el poder calorífico de un material también puede cambiar durante su combustión. Así que, en la práctica, la curva de HRR vs tiempo se calcula utilizando una bomba calorimétrica en vez de Eq. (3). Sin embargo, los resultados pueden ser representativos para este estudio.

El perfil de la Guadua fue ajustado para modelar 420 s de simulación. Sin embargo, al igual que para la madera y el cartón, la Guadua solo participa en el desarrollo del incendio luego de alcanzar la temperatura de ignición establecida. En esta prueba el HRRPUA máximo de la madera es un 4 % mayor que el calculado para la Guadua. De manera preliminar, se podría concluir entonces que, ambos perfiles exhiben un desarrollo similar en la simulación. Este cambio en el material de la pared es mostrado en la sección III.

4) *Parámetros adicionales*: en la configuración de la simulación es posible implementar algunas otras condiciones conocidas o sugeridas para el desarrollo del incendio (e.g., la temperatura ambiente o la generación de otras especies). En este trabajo se considera una temperatura ambiente de 25 °C, una generación de CO igual a cero y una producción de hollín de 0.03 kg<sub>soot</sub>/kg<sub>fuel</sub> sugerida para una configuración *post-flashover* [44].

### III. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de sensibilidad y de experimentación computacional aplicados a el modelo simplificado de la vivienda informal. Las pruebas de sensibilidad contemplan el cambio en el tamaño de los elementos de la malla, un aumento en las dimensiones del dominio computacional y una modificación sobre el tamaño del quemador. En la experimentación computacional se explora el cambio de material sobre las paredes de la vivienda y su efecto en las variables de interés. Se presentan graficas comparativas de temperatura y de flujos de calor entre los resultados numéricos y los datos experimentales.

#### A. Vivienda informal colombiana

En esta sección se presentan algunos aspectos relevantes sobre la dinámica de incendios en viviendas informales. Se presentan los resultados obtenidos al implementar la configuración

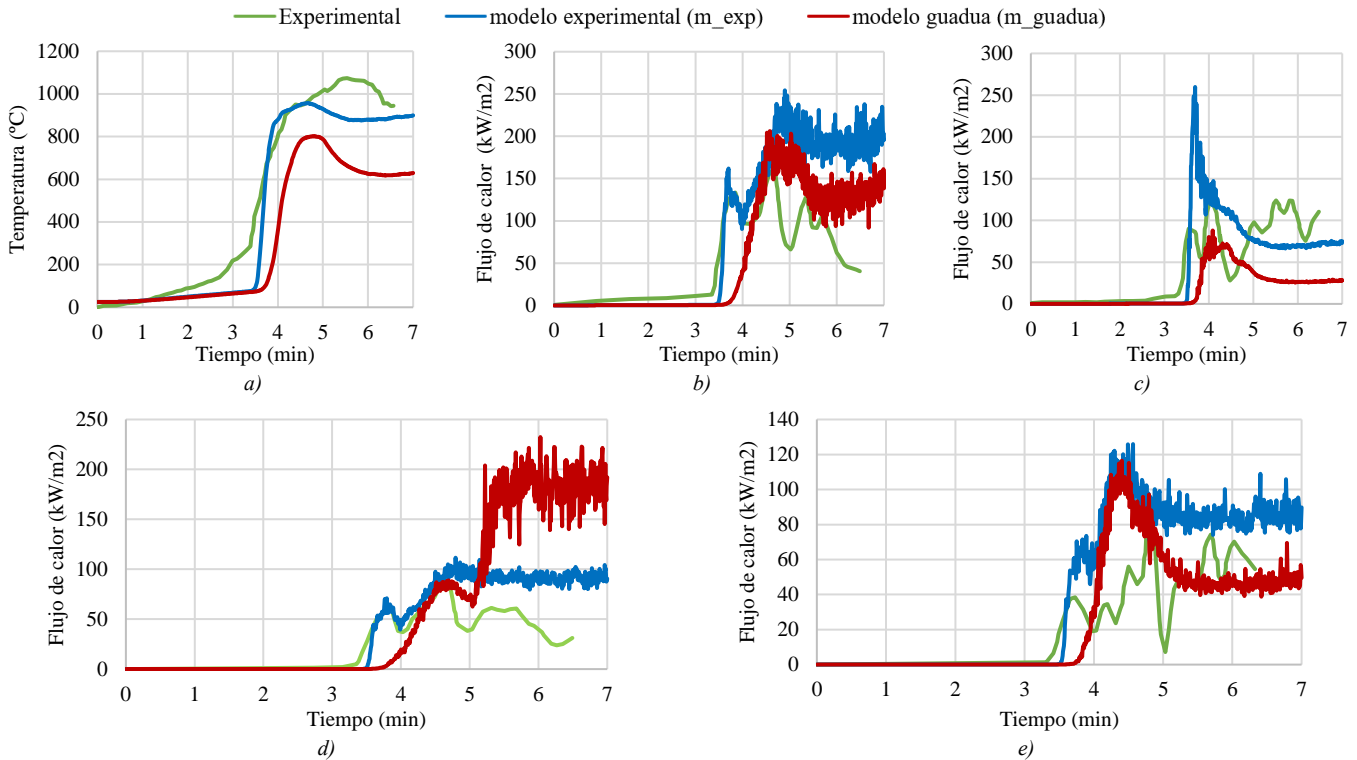


Fig. 5. Resultados obtenidos para el modelo simplificado de la vivienda informal. a) temperatura en el centro de la vivienda, b) flujos de calor en la puerta, c) flujos de calor en la ventana, d) flujos de calor a 1 m de la puerta, e) flujos de calor a 1 m de la ventana.

de la Guadua en las paredes del modelo virtual ( $m_{\text{guadua}}$ ) y se muestran los resultados del modelo simplificado que utiliza las condiciones del experimento -  $m_{\text{exp}}$  (i.e., paredes de pino y recubrimiento de cartón). Para ambas simulaciones se ilustrarán las principales diferencias y limitaciones. Los resultados son comparados con los datos experimentales presentados en [25] para una vivienda informal de madera. Los resultados de temperatura en la mitad del techo, los flujos de calor en la puerta y ventana y los resultados obtenidos a 1 m de la vivienda son presentados en la Fig. 5. Nótese que, los resultados fueron obtenidos luego de realizar un análisis de sensibilidad y la configuración cambia en algunos parámetros. Para ambos modelos se utiliza un tamaño de elemento de 50 mm (i.e., menor a los 100 mm asignados en la configuración), en el  $m_{\text{exp}}$  se utiliza un quemador con un área ligeramente inferior a la mostrada en la sección II (i.e.,  $5.76 \text{ m}^2$ ) y en el  $m_{\text{guadua}}$  no se utiliza recubrimientos de cartón. No es del conocimiento de los autores que este sea un material principal en la construcción de viviendas informales de Colombia. Los detalles de estos cambios son mostrados en el análisis de sensibilidad.

1) *Etapas de crecimiento*: en el transcurso de los primeros 3.5 minutos aprox. de la prueba se desarrolla la etapa de crecimiento del incendio. El quemador se encuentra liberando una pequeña cantidad energía que crea una capa de gases “calientes” en la parte superior del recinto. Las condiciones de temperatura y de radiación (i.e., flujos de calor) al interior aún no son suficientes como para encender todos los materiales inflamables del recinto, pero provocan un precalentamiento de las superficies antes de la ignición. Durante la etapa de crecimiento,

como se presenta en la Fig. 5a antes del min 3.5, la temperatura cerca del techo de la vivienda es subestimada por el modelo virtual. Los datos experimentales sugieren que la temperatura al interior de la vivienda crece mucho más rápido de lo muestra la simulación. Estas diferencias podrían estar asociadas a las propias dinámicas del experimento que no se representan en esta prueba. Experimentalmente, la ignición al interior de la vivienda se produce de forma puntual sobre algunos cuarterones y no sobre todos los *cribs* dispuestos en la vivienda (un total de 9). En cambio, en la simulación, esta “ignición” se configura sobre toda la superficie interna de la vivienda y se desarrolla de forma progresiva con un valor muy pequeño del HRRPUA máximo (i.e., 1%). Al final de la etapa de crecimiento, el tamaño del quemador y el aumento establecido en la tasa de liberación de energía es suficiente como para que las llamas y la radiación también incida sobre las paredes de cartón o Guadua. Estas condiciones provocan la ignición del material y una propagación sobre la superficie que suscita el inicio de la etapa 2.

2) *Crecimiento acelerado/flashover*: entre los 3.5 – 4.5 minutos de la prueba, justo después de la etapa de crecimiento, se produce un incremento acelerado de la temperatura y de los flujos de calor. En esta etapa el quemador incrementa aceleradamente la tasa de liberación de energía hasta llegar al valor máximo establecido. La propagación de la llama sobre la superficie de las paredes y el aumento en la radiación hacia otras zonas del recinto, provocan una participación total de todos los materiales combustibles de la vivienda (i.e., un *flashover*). Los combustibles generalmente proceden de materiales sólidos que se encuentran en el interior de la vivienda (e.g., muebles, camas,



electrodomésticos y ropa) que suelen tener propiedades altamente inflamables (i.e., requieren poca energía para encenderse) y altamente combustibles (i.e., liberan mucha energía). En general, los materiales como, por ejemplo, bolsas de plástico, espuma de poliestireno, funda de almohada, cortina de ducha, cortina de ventana, y leggings de mujer tienen un flujo de calor crítico (CHF por sus siglas en inglés – *Critical Heat Flux*) mayor a  $20 \text{ kW/m}^2$ . Mientras que, algunos materiales como, por ejemplo, el neumático, espuma de poliuretano (PU), frazadas, y alfombras pueden encenderse con valores menores a los  $10 \text{ kW/m}^2$  [23]. En esta etapa de crecimiento, la radiación supera el CHF de muchos de estos materiales, la temperatura puede superar rápidamente los  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  al interior del recinto y las condiciones se intensifican hasta tornarse letales en pocos segundos. Poco tiempo después de iniciada esta etapa, se aumenta la salida de gases no quemados y las llamas se extienden a través de las aberturas del recinto (i.e., puerta y ventana).

Los resultados de temperatura en el techo de la vivienda son mostrados en la Fig. 5a entre los 3.5 – 4.5 min. En el  $m_{\text{exp}}$  la temperatura máxima fue subestimada por la simulación y los resultados del  $m_{\text{Guadua}}$  sugieren que la temperatura máxima es de  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ . A diferencia del  $m_{\text{Guadua}}$ , el recubrimiento de cartón del  $m_{\text{exp}}$  aporta una energía extra a el desarrollo del incendio, aumenta la propagación de las llamas sobre las paredes del recinto e incrementan la temperatura máxima a  $950 \text{ }^\circ\text{C}$ . Como se observa en las Fig. 5b-e entre los 3.5 - 4 min., los flujos de calor en la puerta y ventana del  $m_{\text{exp}}$  crecen mucho más rápido que los estimados para el  $m_{\text{Guadua}}$ . Sin embargo, el crecimiento mostrado por el  $m_{\text{Guadua}}$  es más regular gracias a que, solo depende de la tasa de liberación de energía de las paredes (i.e., de la Guadua). El valor máximo de HRR utilizado para la madera es mayor que el valor estimado para la Guadua ( $10 \text{ kW/m}^2$  aprox.) y esto también proporciona un aumento en la temperatura máxima desarrollada en el recinto.

Una de las razones que explicaría la diferencia que exhiben ambos modelos durante el incremento acelerado de la temperatura, está asociada con la inercia térmica de los materiales empleados (e.g., cartón y Guadua). La inercia térmica indica la capacidad de un material para resistir el cambio de temperatura y puede utilizarse para comparar diferentes materiales [43]. Para sólidos térmicamente gruesos (normalmente, espesores superiores a 15 mm), la inercia térmica gobierna sus propiedades de ignición y de propagación [42]. En la configuración de las simulaciones el cartón, la madera y la Guadua tienen una inercia térmica de  $0.003$ ,  $0.012$  y  $0.108 \text{ kW}^2\text{s}/(\text{m}^4\text{K}^2)$  respectivamente. De acuerdo con Drysdale [45], la velocidad de propagación sobre una superficie térmicamente gruesa es directamente proporcional al inverso de la inercia térmica del material ( $V \propto 1/(kcp)$ ). Por lo que, el cartón y la madera tendrían una mayor velocidad de propagación que la Guadua sobre la superficie de las paredes. Esto explicaría los cambios de temperatura y los flujos de calor estimados en la Fig.5.

3) *Incendio completamente desarrollado/fully developed fire*: en esta última etapa todo el material combustible está involucrado en el incendio, la tasa de liberación de energía es máxima y la temperatura promedio de los gases a menudo es muy

alta (mayor a los  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Un bombero con un equipo completo de protección normalmente no sobreviviría a esta etapa. Como se presenta en la Fig. 5b-e después de los 4.5 min, el  $m_{\text{exp}}$  tiende a sobreestimar los flujos de calor máximos y el  $m_{\text{Guadua}}$  resalta por generar un mayor flujo de calor a 1 m de la puerta. Los resultados no muestran una disminución en los valores estimados como sugieren los datos experimentales de la Fig. 5b y Fig. 5d, y esto se puede deber a la propia configuración de la simulación (e.g., las condiciones de ventilación o el colapso estructural). A diferencia de otros materiales utilizados en paredes de algunas viviendas informales (e.g., hojas de zinc), en las viviendas de madera, las condiciones de ventilación resultan ser mucho más inestables después de iniciar el *fully developed fire*. Las paredes de madera o Guadua se consumen a medida que el incendio progresa y se incrementan el número de entradas de ventilación. En FDS, como resultado de las simplificaciones utilizadas, este aumento en la formación de entradas de ventilación no es contemplado y el material no termina de consumirse en el tiempo establecido para las pruebas. En consecuencia, después de 5 min, el flujo de calor seguirá un comportamiento más o menos estable. Adicionalmente, las pequeñas aberturas (e.g., agujeros en las paredes de Guadua) pueden influir en el tamaño de la llama y contribuir en la propagación del incendio hacia otros lugares de la vivienda. La radiación que se produce es suficiente como para encender algunos materiales de construcción a la distancia (e.g., cartón, plástico, tela de polipropileno, madera) y como para encender algunos otros materiales ubicados entre las viviendas (e.g., plantas, basuras, llantas) que funcionan como “puentes” durante la propagación del incendio [15]. Lo que muestran los resultados a 1 m de distancia de la ventana y la puerta, es que los flujos de calor estimados son suficientes como para generar una ignición y/o propagación sobre las viviendas cercanas. Experimentos realizados en torno al proyecto de investigación internacional IRIS-Fire (por sus siglas en inglés - *Improving the Resilience of Informal Settlements to Fire*), demostraron que la propagación del fuego entre viviendas se produce principalmente por el impacto directo de las llamas (i.e., *flame impingement*) [9]. Es por eso por lo que, aumentando la distancia de separación entre viviendas haría que estas sean menos susceptibles a la propagación de un incendio. En pruebas experimentales se encontró que, las viviendas espaciadas a 3 m aprox. (para condiciones de viento estacionario) son menos susceptibles a la propagación del fuego [46]. De acuerdo con Mena *et al.* 2012 [47], se requiere un mayor flujo de calor para quemar y propagar la llama en la Guadua que en la madera de pino contrachapada (CHF de 14 y  $11 \text{ kW/m}^2$ , respectivamente). La Guadua natural (i.e., en forma cilíndrica) presenta la tasa de carbonización (*charring rate*) más baja entre los tres materiales estudiados (i.e., pino, Guadua laminada, Guadua cilíndrica). La microestructura de la Guadua y una mayor concentración de fibras en la corteza exterior con contenido de sílice, podrían proporcionar una protección contra los fenómenos de ignición, así como, evitar o retrasar la carbonización en la superficie expuesta. Sin embargo, para el caso de la Guadua laminada, los valores estimados fueron similares a los del pino.

## B. Análisis de sensibilidad

En esta sección se presenta un resumen de los resultados encontrados en el análisis de sensibilidad del  $m_{exp}$ . Este análisis de sensibilidad está enfocado en realizar la tradicional independencia de malla, en buscar la independencia del tamaño del dominio y en probar que la configuración del quemador no genera singularidades cerca de la pared. En la independencia de malla se espera analizar la convergencia de los resultados con el cambio del tamaño de elementos de la malla, así como, analizar el ajuste de las variables de interés calculadas con respecto a los datos experimentales. El objetivo de probar un aumento en el tamaño del dominio es verificar que los resultados externos a la vivienda no cambien. O lo que sería lo mismo, que el dominio exterior es suficientemente grande como para no limitar las condiciones de ventilación de la simulación. La prueba sobre el quemador está enfocada en cambiar ligeramente el área inicial (i.e.,  $6.76 \text{ m}^2$ ) alejando los bordes del quemador de las paredes de cartón. Se espera probar que la ignición del cartón se produce por las condiciones del recinto y no por el contacto del quemador con la pared. Por limitaciones de espacio no fue posible agregar ninguna de las gráficas de temperatura y flujos de calor de estas pruebas.

1) *Independencia de malla:* se utilizaron tres tamaños diferentes en la configuración de la malla (i.e., 100, 50, y 25 mm). El primer valor corresponde con el valor estimado en la sección II, y los demás corresponden con un factor de refinamiento de dos. Los resultados de temperatura de ambos refinamientos muestran un mejor ajuste a la tendencia de los datos experimentales y estiman una temperatura máxima mayor que el caso de 100 mm ( $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Los flujos de calor en las aberturas son menores durante el crecimiento acelerado del incendio, pero son similares en la etapa de *fully developed fire*. El costo computacional de las simulaciones con un tamaño de elemento de 50 mm (i.e., 600 mil elementos) utilizando 6 núcleos de una Workstation Z440 y un procesamiento en paralelo de 6 mallas, es cerca de 24 h. Mientras que, para una simulación con un tamaño de elemento de 25 mm (i.e., 4.8 millones de elementos) el tiempo de cálculo requiere más de 2 semanas. Por el costo computacional y la tendencia mostrada en los resultados, se decide utilizar un tamaño de elemento de 50 mm como referencia para el  $m_{exp}$  y  $m_{guadua}$  de la Fig. 5.

2) *Independencia del dominio:* se incrementó la distancia de separación entre el dominio y la vivienda, ver Fig. 2. Se aumentó la distancia desde la puerta y ventana en 0.4 m, y desde el techo en 0.3 m. Las nuevas dimensiones entre el dominio y la ventana, la puerta y el techo son 1.8 m, 2 m y 1 m respectivamente. Esta prueba fue comparada con los resultados obtenidos para el  $m_{exp}$  con un tamaño de elemento de 50 mm. Se encontró que, ambas pruebas exhiben una tendencia similar en los resultados de temperatura y que los flujos de calor estimados a 1 m de la vivienda no cambiaron. Se concluye entonces que, la configuración original del dominio computacional es suficiente como para que los resultados externos a la vivienda no cambien. Esta configuración es usada en el  $m_{exp}$  y  $m_{guadua}$  de la Fig. 5.

3) *Configuración del quemador:* se crea una distancia de separación entre el quemador y las paredes de 0.1 m. El área de

esta nueva configuración es de  $5.76 \text{ m}^2$  y el HRRPUA es de  $1780 \text{ kW/m}^2$ , ver sección II. Esta prueba fue comparada con los resultados obtenidos para el  $m_{exp}$  con un tamaño de elemento de 50 mm. Los resultados de temperatura y de los flujos de calor con el área original del quemador muestran que el *flashover* se produce 40 s antes aprox. que con la nueva configuración. Una de las principales razones es que ahora no existe un contacto entre el quemador y la pared. Esto también cambia la dinámica interna del incendio y, por tanto, los flujos de calor emitidos desde las aberturas. Se decide utilizar este cambio sobre la configuración del quemador en el  $m_{exp}$  de la Fig. 5.

## IV. CONCLUSIONES

La dinámica de un incendio en una vivienda informal colombiana construida con Guadua fue simulada mediante FDS. Los resultados muestran que las propiedades de la guadua reducen la tasa de crecimiento acelerado del incendio en comparación con una vivienda de madera. En la etapa del incendio completamente desarrollado se reducen los flujos de calor en la puerta y ventana, se reduce la temperatura máxima y se aumenta el flujo de calor a 1 m de la puerta. Estos resultados brindan una posibilidad para comprender y predecir, en términos de propagación de incendios, la capacidad de ocasionar daños de este fenómeno al interior y alrededor de las viviendas informales de Colombia.

La dinámica de los incendios en los asentamientos informales está influenciada por factores como los materiales y el estilo de construcción de sus viviendas. Las principales incógnitas asociadas a la dinámica de incendios en las viviendas informales de Colombia, en comparación con las viviendas de Sudáfrica, están relacionadas con el uso de estructuras de Guadua y paredes de Esterilla. Las características físicas y químicas de la Guadua y de la Esterilla que no fueron contempladas en esta investigación (e.g., las cavidades, las separaciones internas y las múltiples aberturas) podrían cambiar la dinámica del incendio durante su propagación en un asentamiento informal. Sin embargo, esto aún no se ha explorado y más estudios son necesarios para mejorar la comprensión de este fenómeno. Futuros trabajos podrían enfocar sus esfuerzos en realizar análisis experimentales de algunas propiedades térmicas de la Guadua y la Esterilla, y en realizar estudios experimentales sobre su dinámica y comportamiento en incendios (e.g., HRR). Con una mejor comprensión de estas incógnitas, se podrían desarrollar soluciones de prevención y mitigación más efectivas para proteger a las comunidades vulnerables y reducir los riesgos físicos, materiales y económicos.

## AGRADECIMIENTOS

A EL PROFESOR RAMÓN VALENCIA POR FINANCIAR Y PERMITIR LA PUBLICACIÓN DE ESTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

## REFERENCIAS

- [1] L. A. Paloma Acevedo, G. Ginette Azcona, and F. B. Babio, *Informando lo informal: estrategias para generar información en asentamientos precarios*. LOTS OF ARCHITECTURE, 2021.
- [2] V. Sandoval and J. P. Sarmiento, "Una mirada desde la gobernanza del riesgo y la resiliencia urbana en América Latina y el Caribe: Los asentamientos

- informales en la Nueva Agenda Urbana,” *REDER*, vol. 2, no. 1, p. 38, Jan. 2018, doi: 10.55467/reder.v2i1.10.
- [3] UN-Hábitat, “Population living in slums (% of urban population),” *The World Bank*, 2018. <https://data.worldbank.org/indicator/EN.POP.SLUM.UR.ZS?end=2018&start=1990> (accessed Nov 23, 2022).
- [4] UN-Hábitat, “Temas Hábitat III Asentamientos informales,” New York, USA, May 2015.
- [5] UN-Hábitat, *Addressing the most vulnerable first pro-poor climate action in informal settlements*. Nairobi, 2018.
- [6] J. W. Pineda López, “Urbanización marginal e impacto ambiental en la ciudad de Montería,” Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2012.
- [7] D. Rush *et al.*, “Fire risk reduction on the margins of an urbanizing world,” *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, vol. 29, no. 5, Oct. 2020, doi: 10.1108/DPM-06-2020-0191.
- [8] J. E. Soler Barón, J. E. Torres Ramírez, J. L. Rodríguez Iglesias, and E. Pérez Pérez, *Legalización de asentamientos informales*, Primera edición. 2018.
- [9] C. A. Torres Tovar, *Ciudad informal colombiana: barrios construidos por la gente*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2009.
- [10] L. Adriana Romero Murillo, “Análisis del proceso de urbanización informal en una ciudad intermedia. Estudio de caso: la reliquia en Villavicencio –Meta (2005 –2015),” Bogotá, 2016.
- [11] Centro Nacional de Memoria Histórica, *Una nación desplazada: informe nacional del desplazamiento forzado en Colombia*. Bogotá: CNMH-UARIV, 2015.
- [12] S. Guevara Arce, C. Jeanneret, J. Gales, D. Antonellis, and S. Vaiciulyte, “Human behaviour in informal settlement fires in Costa Rica,” *Saf Sci*, vol. 142, p. 105384, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.SSCI.2021.105384.
- [13] D. Rush, R. Walls, G. Spinardi, R. Hadden, L. Bisby, and J. Cooper-Knock, “Improving the Resilience of Informal Settlements to Fire,” *IRIS-Fire Project*. <https://www.iris-fire.com/> (accessed Nov 01, 2022).
- [14] G. Spinardi, S. J. Cooper-Knock, and D. Rush, “Proximal design in South African informal settlements: users as designers and the construction of the built environment and its fire risks,” *Tapuya: Latin American Science, Technology and Society*, vol. 3, no. 1, pp. 528–550, 2020, doi: 10.1080/25729861.2020.1847531.
- [15] R. Walls, Antonio. Cicione, Robyn. Pharoah, P. Zweig, Smithm Mark, and D. Antonellis, *Fire safety engineering guideline for informal settlements: towards practical solutions for a complex problem in South Africa*, First edition. Matieland, South Africa: FireSUN, 2020.
- [16] S. M. Guevara Arce, “Analysis of the existing information of La Carpio informal settlement, Roble Norte sector, to create the basis for future research in fire safety,” Cartago, May 2020.
- [17] A. Zolkowitz, R. Khattar, and M. Doherty, “Fire risk reduction assessment of vulnerable displaced Syrian populations and host community in Lebanon,” Jan. 2017.
- [18] Women’s Commission for Refugee Women and Children., *Beyond firewood: fuel alternatives and protection strategies for displaced women and girls*. Women’s Commission for Refugee Women and Children, 2006.
- [19] Y. Wang, M. Beshir, R. Hadden, A. Cicione, M. Krajcovic, and L. Gibson, “Laboratory experiment of fire spread between two informal settlement dwellings,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 171, p. 107195, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107195.
- [20] N. de Koker *et al.*, “20 Dwelling Large-Scale Experiment of Fire Spread in Informal Settlements,” *Fire Technol*, vol. 56, no. 4, pp. 1599–1620, Jul. 2020, doi: 10.1007/s10694-019-00945-2.
- [21] A. Cicione and R. S. Walls, “Towards a simplified fire dynamic simulator model to analyse fire spread between multiple informal settlement dwellings based on full-scale experiments,” *Fire Mater*, vol. 45, no. 6, pp. 720–736, Oct. 2021, doi: 10.1002/fam.2814.
- [22] A. Cicione, C. Wade, M. Spearpoint, L. Gibson, R. Walls, and D. Rush, “A preliminary investigation to develop a semi-probabilistic model of informal settlement fire spread using B-RISK,” *Fire Saf J*, vol. 120, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103115.
- [23] Y. Wang, C. Bertrand, M. Beshir, C. Kahanji, R. Walls, and D. Rush, “Developing an experimental database of burning characteristics of combustible informal dwelling materials based on South African informal settlement investigation,” *Fire Saf J*, vol. 111, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.firesaf.2019.102938.
- [24] N. Flores Quiroz, R. Walls, and A. Cicione, “Developing a framework for fire investigations in informal settlements,” *Fire Saf J*, vol. 120, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103046.
- [25] A. Cicione, R. S. Walls, M. Beshir, and D. Rush, “Full-Scale Informal Settlement Dwelling Fire Experiments and Development of Numerical Models,” *Fire Technol*, vol. 56, pp. 639–672, 2020, doi: 10.1007/s10694-019-00894-w.
- [26] A. Cicione *et al.*, “An Experimental and Numerical Study on the Effects of Leakages and Ventilation Conditions on Informal Settlement Fire Dynamics,” *Fire Technol*, vol. 58, pp. 217–250, 2021, doi: 10.1007/s10694-021-01136-8.
- [27] M. Beshir, Y. Wang, L. Gibson, S. Welch, and D. Rush, “A Computational Study on the Effect of Horizontal Openings on Fire Dynamics within Informal Dwellings,” in *Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards (ISFEH9)*, 2019, pp. 512–523. doi: 10.18720/spbu/2/k19-122.
- [28] M. Beshir, Y. Wang, F. Centeno, R. Hadden, S. Welch, and D. Rush, “Semi-empirical model for estimating the heat release rate required for flashover in compartments with thermally-thin boundaries and ultra-fast fires,” *Fire Saf J*, vol. 120, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103124.
- [29] M. Beshir, S. Welch, and D. Rush, “Modelling the Effects of Boundary Walls on the Fire Dynamics of Informal Settlement Dwellings,” *Fire Technol*, vol. 57, 2021, doi: 10.1007/s10694-020-01086-7.
- [30] K. B. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, R. McDermott, and M. Vanella, *Fire Dynamics Simulator User’s Guide*, Sixtg edition. Gaithersburg, MD, 2021. doi: 10.6028/NIST.SP.1019.
- [31] K. B. McGrattan, R. McDermott, M. Vanella, S. Hostikka, and J. Floyd, *Fire Dynamics Simulator-Technical Reference Guide- Volume 1: Mathematical Model*, vol. 1. Gaithersburg, MD, 2021. doi: 10.6028/NIST.SP.1018.
- [32] B. Karlsson and J.G. Quintiere, *Enclosure Fire*. Florida: CRC Press LLC, 2000.
- [33] Thunderhead engineering, “PyroSim User Manual”, Manhattan, USA. 2022.
- [34] Special Metals Corporation, “INCONEL Alloy 600,” 2008. Accessed: Jan. 12, 2023. [Online]. Available: [www.specialmetals.com](http://www.specialmetals.com)
- [35] “The Engineering ToolBox,” Jan. 2001. <https://www.engineeringtoolbox.com/> (accessed Jan. 12, 2023).
- [36] Omega Engineering, “Thermocouple Probes with PFA Insulated Lead Wire.” <https://www.omega.com/en-us/temperature-measurement/temperature-probes/probes-with-lead-wires/tj36-icinp/TJ1-CAIN-IM60G-150> (accessed Jan. 17, 2023).
- [37] S. R. Turns, *An introduction to combustion*, Second edition. Singapore: McGraw-Hill, 2000.
- [38] Guadua Bamboo SAS, “Esterilla de Guadua.” <https://www.guadua-bambu.com.co/esterilla-de-guadua> (accessed Jan. 12, 2023).
- [39] C. F. Espinal G, H. J. Martínez Covalada, N. Pinzón Ruiz, and D. Espinosa Pérez, “La cadena de la Guadua en Colombia: una mirada global de su estructura y dinámica 1991-2005,” Dec. 2005. [Online]. Available: <http://www.agrociencias.gov.co>
- [40] R. Walls, G. Olivier, and R. Eksteen, “Informal settlement fires in South Africa: Fire engineering overview and full-scale tests on ‘shacks,’” *Fire Saf J*, vol. 997, no. 1006, 2017, doi: 10.1016/j.firesaf.2017.03.061.
- [41] CEN, “Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire,” Nov. 2002.
- [42] M. J. Hurley *et al.*, *SFPE handbook of fire protection engineering, fifth edition*, vol. 1–2. Springer New York, 2016. doi: 10.1007/978-1-4939-2565-0.
- [43] A. Solarte, J. Numapo, T. Do, A. Bolanos, J. P. Hidalgo, and J. L. Torero, “Understanding fire growth for performance based design of bamboo structures,” *Fire Saf J*, vol. 120, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103057.
- [44] A. P. Robbins and C. A. Wade, “Soot yield values for modelling purposes - Residential occupancies,” Porirua, New Zealand, 2007.
- [45] D. Drysdale, *An introduction to fire dynamics*, Third edition. John Wiley & Sons, 2011.
- [46] A. Cicione, R. S. Walls, and C. Kahanji, “Experimental study of fire spread between multiple full scale informal settlement dwellings,” *Fire Saf J*, vol. 105, pp. 19–27, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.firesaf.2019.02.001.
- [47] J. Mena, S. Vera, J. F. Correal, and M. Lopez, “Assessment of fire reaction and fire resistance of Guadua angustifolia kunth bamboo,” *Constr Build Mater*, vol. 27, no. 1, pp. 60–65, Feb. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.028.
- [48] J. R. Moreno Molina and M. L. Cendales Puentes, “Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la Guadua Angustifolia Kunth originaria de Armenia Quindío,” Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, 2018.
- [49] J. R. Becerra Lotero, “Análisis energético y ambiental en la producción de tableros de esterilla de guadua laminada,” Trabajo de grado, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2013.
- [50] F. Gordillo Delgado, D. M. Cortes Hernandez, C. Mejia Morales, and H. Ariza Calderon, “Comportamiento de los parámetros termofísicos de la guadua angustifolia - Kunth medidos con la técnica fotoacústica,” *Revista Colombiana de Física*, vol. 44, no. 1, 2012, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/279180250>
- [51] C. R. Ardila, M. B. Folgueras, and F. J. Fernández, “Oxidative pyrolysis of Guadua angustifolia Kunth,” in *Energy Reports*, Feb. 2020, vol. 6, pp. 738–743. doi: 10.1016/j.egyr.2019.09.057.