

Artículo de investigación

Herramientas de modelamiento físico en la seguridad contra incendios y explosiones

Physical modeling tools for fire and explosion safety

Autores:

Sebastián López-Gómez¹

David Alejandro Soto-Gómez²

Luis Fernando Vallejo-Molina³

Jorge Martín Molina-Escobar⁴

Alejandro Molina^{5*}

Recibido: 09-08-2024

Aceptado: 02-09-2024

Publicado: 20-11-2024

Palabras clave:

protección contra incendios, seguridad, modelo de simulación.

Key words:

fire protection, safety engineering, simulation models.

Forma de citar este artículo:

López-Gómez S, Soto-Gómez DA, Vallejo-Molina LF, Molina-Escobar JM, Molina A. Herramientas de modelamiento físico en la seguridad contra incendios y explosiones. Rev. Salud, Trabajo y Sostenibilidad. 2024; 1(1): 32-45. ISSN: en trámite. Disponible en: ccs.org.co/publicaciones/

Resumen

El personal dedicado a la seguridad contra incendios y explosiones se expone a herramientas de modelamiento físico en el diseño por desempeño, la investigación de incidentes y la educación. Resulta entonces importante conocer qué herramientas de modelamiento físico están disponibles y en qué casos se pueden usar.

Objetivo: describir las diferentes características de las herramientas de modelamiento físico que están disponibles para el personal involucrado en la seguridad contra incendios y explosiones para simular los escenarios.

Materiales y métodos: realizar simulaciones que permitan evaluar estas herramientas para determinar sus características e ilustrarlas mediante ejemplos para distintos escenarios: 1) Incendios en compartimientos: Consolidated Model of Fire and Smoke Transport, Fire Dynamic Simulator, FireFoam. 2) Ventilación luego de un incendio en espacios subterráneos: VentFIRE and MFIRE. 3) Cobertura vegetal: Fire Dynamic Simulator y FlamMap. 4) Incendio por empozamiento: Fire Dynamic Simulator. 5) Explosiones: Ansys Fluent, Flame Acceleration Simulator, Cantera, Shock and Detonation Toolbox y XiFoam.

¹ Ingeniero químico, magíster en Ingeniería Química. Universidad Nacional de Colombia - sede Medellín (Colombia). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0369-7187>. CvLAC: https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001434485. Correo: selopezgo@unal.edu.co.

² Ingeniero químico, magíster en Ingeniería Química. Universidad Nacional de Colombia - sede Medellín (Colombia). CvLAC: https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001350155. Correo: dasotog@unal.edu.co.

³ Ingeniero químico, magíster en Ingeniería Química. Universidad Nacional de Colombia - sede Medellín (Colombia). CvLAC: https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001666042. Correo: lvallejom@unal.edu.co.

⁴ Ingeniero de minas y metalurgia. Ph. D. en Ordenamiento Territorial. Docente de la Universidad Nacional de Colombia - sede Medellín. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6068-2571>. CvLAC: https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000226963. Correo: jmmolina@unal.edu.co.

^{5*} Ingeniero químico, Ph. D. en Química y Combustibles. Docente de la Universidad Nacional de Colombia - sede Medellín (Colombia). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6068-2571>. CvLAC: https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000087912. Correo: amolinao@unal.edu.co. Autor de correspondencia.

Resultados: en el caso de incendios se identificó que el Fire Dynamic Simulator es la herramienta de modelamiento físico más versátil pues se puede emplear en incendios por compartimiento, en la interfase urbana/cobertura vegetal y por empozamiento. Para el análisis del instante antes de una explosión se recomiendan simulaciones de dinámica de fluidos computacional. Para el estudio del efecto de la explosión se sugiere utilizar Flame Acceleration Simulator o XiFoam.

Conclusiones: se identificó la necesidad de formar profesionales en el manejo de estas herramientas de modelamiento físico de tal forma que se garantice su uso responsable en la seguridad contra incendios y explosiones y se reconoció la importancia de realizar investigaciones que aumenten las capacidades de estas herramientas mediante la aplicación de inteligencia artificial.

Abstract

Fire and explosion safety personnel are exposed to physical modelling tools in performance design, incident investigation and education. It is, therefore, essential to know which tools are available and in which cases they can be used.

Objective: to describe the different features of physical modelling tools that are available to personnel involved in fire and explosion safety, and to simulate the scenarios.

Materials and methods: To perform simulations to evaluate some of these tools to determine the characteristics. These are illustrated by examples for different scenarios: 1) Compartment fires: Consolidated Model of Fire and Smoke Transport, Fire Dynamic Simulator, FireFoam. 2) Ventilation after a fire in underground spaces: VentFIRE and MFIRE. 3) Vegetation cover: Fire Dynamic Simulator and FlamMap. 4) Fire by ponding: Fire Dynamic Simulator. 5) Explosions: Ansys Fluent, Flame Acceleration Simulator, Cantera, Shock and Detonation Toolbox and XiFoam.

Results: In the case of fires, it was identified that the Fire Dynamic Simulator is the most versatile physical modeling tool since it can be used in compartment fires, in the urban/vegetation cover interface and by ponding. For the analysis of the instant before an explosion, computational fluid dynamics simulations are recommended. For the study of the effect of the explosion, it is suggested to use Flame Acceleration Simulator or XiFoam.

Conclusions: The need to train professionals in the management of these physical modeling tools in such a way that their responsible use in fire and explosion safety is guaranteed was identified, and the importance of conducting research that increases the capabilities of these tools through the application of artificial intelligence was recognized.

Introducción

El diseño por desempeño en la industria, particularmente en el área de la seguridad contra incendios y explosiones, se basa en el correcto uso de herramientas de modelamiento físico (HsMF) especializadas en la simulación de incendios y explosiones. Es importante distinguir que en un incendio se genera una rápida reacción química entre un combustible y el oxígeno normalmente presente en el aire. Si bien en un incendio se registran altas temperaturas, la velocidad de liberación de energía y de los gases producto de la reacción es mucho menor que la que tiene lugar en una explosión. En esta última, se alcanzan altas temperaturas y se desprenden gases de una forma violenta. Mientras la presencia de una llama visible es una característica en un incendio, el sonido y la onda de choque son aspectos típicos de una explosión.

Las HsMF en el área de seguridad contra incendios y explosiones representan programas de computación que se aplican en un amplio rango de escalas y que, mediante diferentes modelos físicos, predicen el comportamiento de incendios y explosiones. Estas son ampliamente utilizadas en la investigación de incidentes y en los procesos educativos, como herramientas preventivas de incendios y explosiones en escenarios de simulación. Así las cosas, para el personal especializado en estas áreas resulta muy importante conocer qué herramientas están disponibles para los distintos escenarios que se puedan presentar en un incendio o explosión.

A menudo el personal en el área de seguridad contra incendios y explosiones solo puede prepararse para el uso de estas herramientas mediante ejemplos en la literatura científica y técnica o por información disponible en internet.

Sin embargo, se desconocen aspectos importantes como el carácter comercial o de código abierto, su integridad conceptual, el tiempo que tarda una simulación, la facilidad de uso o la disponibilidad de soporte.

La tabla 1 presenta seis escenarios de incendios y explosiones que, según los autores de este artículo, son relevantes para la seguridad en Colombia. A continuación, se realiza una breve descripción de ellos:

Tabla 1. Descripción de escenarios relevantes para incendios y explosiones

	Escenario	Descripción	Ejemplos
Incendio	Por compartimento	Espacios con tamaños inferiores a 100 m ³	Incendio del Edificio Avianca(1973)
	Espacios subterráneos	La profundidad es mucho mayor en comparación con la altura y el ancho	Incendio en el túnel Quebrada Blanca, vía al Llano (2023)
	Cobertura vegetal	Fuego sobre cobertura vegetal de origen natural o antrópico que se propaga sin control y que, normalmente, abarca grandes extensiones de terreno (> 5000 km ²). También incluye la interfase cobertura vegetal/urbana(WUI)	Incendios forestales causados por el fenómeno de El Niño 2023-2024
	Por empozamiento (<i>pool fire</i> en inglés)	Ocurre sobre una superficie horizontal de combustible estático que se quema a medida que se evapora	Incendio de tanques de almacenamiento de combustible en Barranquilla(2022)
Explosiones	Gases	Un gas combustible se mezcla con aire	Explosión de gas en cocina
	Polvos combustibles	Mezcla de finos polvos combustibles dispersos en aire	Explosión en mina de carbón

Fuente: elaboración propia.

1. Los incendios por compartimentos están normalmente relacionados con edificios de viviendas y oficinas cuyo volumen individual es inferior a 100 metros cúbicos. Un ejemplo en Colombia es el incendio del Edificio Avianca, en 1973 (1).
2. Los incendios en espacios subterráneos son aquellos que tienen lugar en minas o túneles, ambos claves en la infraestructura de Colombia; por ejemplo, el incendio que se registró a finales del 2023 en la vía al Llano en el túnel de Quebrada Blanca.
3. Los incendios de cobertura vegetal suceden, como su nombre lo indica, en zonas con cobertura vegetal de dimensiones superiores a los 5000 kilómetros cuadrados. También se pueden incluir en esta categoría aquellos que suceden en la interfase cobertura vegetal/urbana (WUI, Wildland Urban Interface), los cuales cobran cada vez más importancia debido al cambio climático, como se evidenció durante el fenómeno de El Niño, entre el 2023 y el 2024 (2).
4. Los incendios por empozamiento se registran cuando un combustible líquido hace ignición en su lugar de almacenamiento, como

sucedió en los tanques de almacenamiento de Barranquilla en 2022.

5. En una explosión de gases, un combustible en fase gaseosa (normalmente un hidrocarburo) se mezcla con aire y forma una mezcla explosiva como puede suceder en una cocina.
6. Por último, las explosiones de polvos combustibles en Colombia involucran polvo de carbón en minas (3). Por efectos de extensión, la tabla 1 omite otros escenarios importantes de incendios y explosiones como aquellos causados por baterías o en espacios con dimensiones superiores a 1000 metros cúbicos, volumen a partir del cual el incendio deja de ser por compartimiento.

Este artículo tiene como objetivo describir las diferentes características de HsMF que están disponibles para el personal involucrado en la seguridad contra incendios y explosiones para así, simular los escenarios descritos en la tabla 1. Más allá de revisar aspectos como su disponibilidad y los escenarios en los cuales se pueden usar estas herramientas, se abordan casos con aplicación en Colombia.

Materiales y métodos

La lista de HsMF disponibles para simular incendios y explosiones es extensa (4). Por lo tanto, una revisión exhaustiva de todas estas desborda el objetivo de este artículo en el cual se escogieron aquellas que los autores de este estudio consideran más relevantes, con base en el trabajo que han realizado en esta área en los últimos años y de acuerdo con evaluaciones publicadas en la literatura (4-6).

Las HsMF seleccionadas presentan procesos de verificación y validación a ciegas (*a priori*) o abiertas (*a posteriori*) que se han detallado en la literatura científica, por ejemplo, en las referencias (5,7). Sin embargo, las simulaciones que se presentan a continuación se realizaron con carácter

demostrativo con el fin de ilustrar el uso de cada herramienta y no con el objetivo de reproducir exactamente un incendio o explosión en específico.

La revisión se limitó a HsMF que simularan incendios y explosiones o propiedades relevantes de los mismos. Se debe reconocer que existen otras áreas de gran envergadura para la simulación de incendios y explosiones, como la predicción del comportamiento humano, el análisis de riesgos o consecuencias, la respuesta de detectores y la resistencia al incendio, que no se consideraron en la revisión. Adicionalmente, las herramientas se evaluaron con base en los escenarios descritos en la tabla 1.

En un trabajo complementario a este artículo (8) se presentan rúbricas que comparan estas herramientas en detalle, considerando aspectos como disponibilidad, facilidad de instalación, calidad técnica de las simulaciones, detalle de ecuaciones, entre otros.

Resultados

La tabla 2 resume las HsMF consideradas en este estudio, indicando su fuente de obtención y destacando si son de naturaleza comercial (requieren licencia) o de código abierto (disponibles para el público en general). La tercera columna resume brevemente aplicaciones dentro del contexto de seguridad contra incendios y explosiones de acuerdo con los escenarios que se presentan en la tabla 1.

1. **Incendios por compartimiento.** En 1990, Consolidated Model of Fire and Smoke Transport (CFAST) (9) fue una de las primeras HsMF que representó un incendio mediante dos zonas, una fría y una caliente. La aproximación de dos zonas se caracteriza por cortos tiempos de cómputo ya que solo involucra cuatro ecuaciones diferenciales (presión, volumen de la capa superior, temperatura de la capa

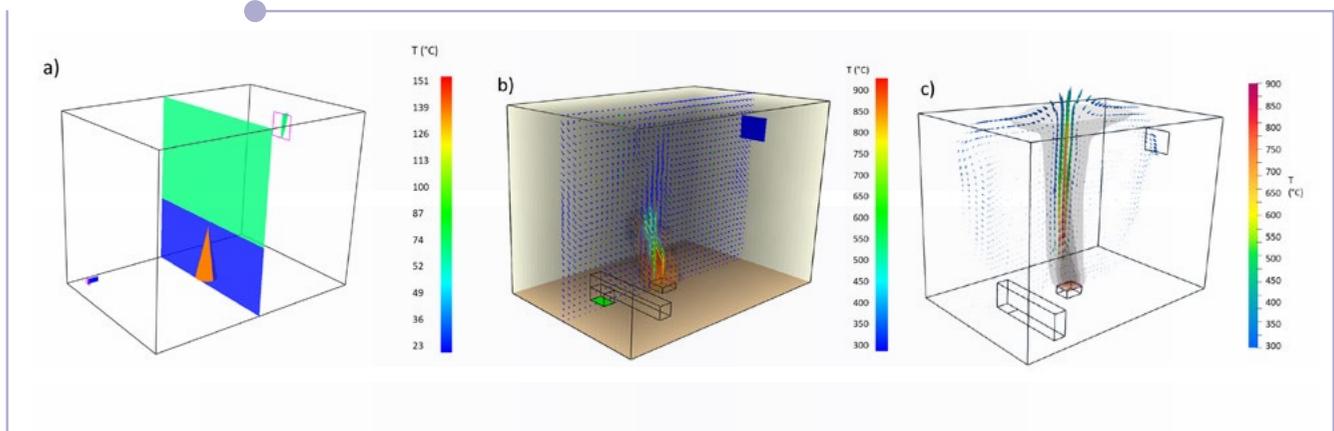
superior y temperatura de la capa inferior) por cada compartimento analizado. CFAST entrega información sobre el transporte de especies con base en correlaciones semiempíricas, las cuales también controlan la transferencia de masa y energía entre la capa superior y la inferior.

La figura 1a presenta la simulación en CFAST de un compartimento de 6 metros de largo, 4 metros de ancho y 4,5 metros de alto con un quemador de metano en el centro del espacio, con una potencia por unidad de área de 1000 kiloWattios/metro² (kW/M²). CFAST

predice una temperatura para las zonas inferior y superior y la existencia de una pluma de incendio cuyas dimensiones se calculan con base en correlaciones empíricas.

De génesis posterior a CFAST, la HMF FDS (12) utiliza dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) para capturar los procesos que se registran en un incendio. FDS entrega resultados con mayor detalle pues resuelve las ecuaciones de transferencia de masa, energía y especies en cada una de las celdas que usa para discretizar el espacio donde se registra el incendio.

Figura 1. Ejemplos de resultados de la simulación de incendios por compartimiento utilizando a) CFAST, b) FDS, c) FireFoam



Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Resumen de las HsMF que se consideraron en el estudio

Nombre	Fuente	Escenario y principales aplicaciones	Referencia
Ansys Fluent	Comercial - Ansys	Explosión de gases y polvos combustibles / instante justo antes de la explosión, manejo de humo	(10)
Cantera	Código abierto originalmente desarrollado en el California Institute of Technology - CALTECH	Incendios y explosiones / simulaciones de llamas canónicas, determinación de propiedades termoquímicas	(11)
Consolidated Model of Fire and Smoke Transport (CFAST)	Código abierto - National Institute of Standards and Technology (NIST)	Incendios por compartimentos mediante método de zonas	(9)

Nombre	Fuente	Escenario y principales aplicaciones	Referencia
Fire Dynamic Simulator (FDS)	Código abierto - National Institute of Standards and Technology (NIST)	Incendios en general con aplicación para los cuatro escenarios en la tabla 1, aun cuando su uso en incendios de cobertura vegetal se limita a la interfase cobertura vegetal/zona urbana	(12)
Flame Acceleration Simulator (FLACS)	Comercial - Gexcon	Explosiones de gases, polvos y nubes de aerosoles.	(13)
FireFoam	Código abierto patrocinado por FM Global	Incendios en general con énfasis en incendio de cajas de cartón, almacenamiento y protección con rociadores en estantería, almacenamiento en estantes	(14)
FlamMap	Forest Service - U.S. Department of Agriculture (algunos componentes son código abierto).	Incendios de cobertura vegetal	(15)
MFIRE	Código abierto - National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)	Incendios en minas subterráneas con énfasis en ventilación	(16)
Shock and Detonation Toolbox (SDT)	Código abierto - Explosion Dynamics Laboratory - California Institute of Technology - CALTECH	Problemas canónicos de explosiones en fase gaseosa	(17)
VentFIRE	Comercial - The Howden Group	Incendios en minas subterráneas con énfasis en ventilación	(18)
XiFoam	Código abierto en la plataforma OpenFOAM	Explosiones de gas	(19)

Fuente: elaboración propia.

La figura 1b muestra resultados de la misma simulación de la figura 1a usando FDS en la cual se exponen los vectores de velocidad y el campo de concentración de humo. El mayor detalle en los resultados que arroja FDS requiere un mayor tiempo de cómputo. Mientras que las simulaciones con CFAST pueden completarse en minutos, las realizadas con FDS requieren tiempos de cálculo de varias horas.

FireFoam (14) es una HMF similar a FDS pues también aplica CFD. Sin embargo, su desarrollo

comenzó aproximadamente en 2011, once años después de la primera versión de FDS y ha sido principalmente empleada por la comunidad académica o en instituciones especializadas en la simulación de incendios, probablemente, porque su uso demanda mayor conocimiento de programación que FDS. En la figura 1c se muestran resultados de la misma simulación del compartimento en las figuras 1a y 1b, pero con FireFoam. Aun cuando hay diferencias en la forma en que cada HMF presenta los resultados, es de resaltar que FDS

(figura 1b) permite observar el campo de humo y vectores de velocidad de aire, aunque esta sea muy baja. Por el contrario, CFAST (figura 1a) solo indica la presencia de la llama. En la figura 1 la similitud entre FDS y FireFoam resulta evidente. La velocidad de cómputo en FireFoam es comparable a la de FDS.

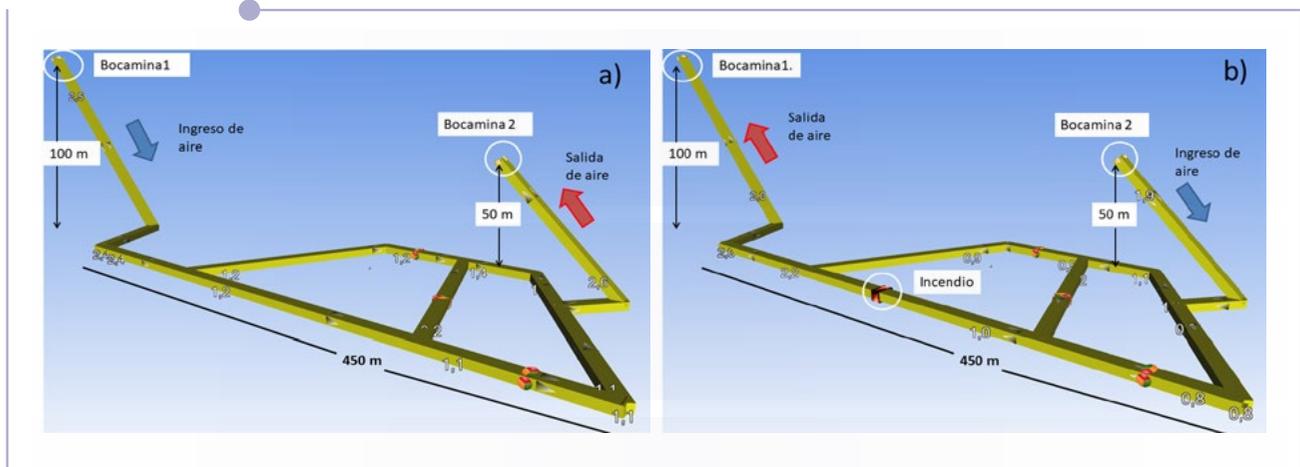
2. Espacios subterráneos. Un componente fundamental en un incendio subterráneo es el análisis de la ventilación. Por lo tanto, las HsMF que se emplean en el diseño de sistemas de ventilación como, por ejemplo, VentSIM (20), han desarrollado módulos que combinan el tradicional análisis de la ventilación con aproximaciones que buscan caracterizar el efecto de un incendio. Entre estas aproximaciones se encuentra VentFIRE (18) de origen comercial y MFIRE (16), de código abierto. Estas HsMF utilizan aproximaciones bastantes simples para representar un incendio, pero permiten analizar todo el espacio asociado a una mina o un túnel. Por ejemplo, en la figura 2 se predice la velocidad del aire al interior de la mina con ventilación natural antes (figura 2a) y durante (figura 2b)

un incendio de madera en una de las galerías (sección tres por dos metros cuadrados).

En la simulación se evidencia que el incendio cambia el sentido del flujo de aire al interior de la mina debido a diferencias de temperatura cuando este se encuentra activo. Este tipo de análisis sirve de guía en la definición de estrategias para atender emergencias en caso de incendio en espacios subterráneos. Los números representan la velocidad (metros/segundo) y las flechas de dirección indican el comportamiento del aire antes (figura 2a) y durante (figura 2b) un incendio en una de las galerías.

Cuando se busca realizar un análisis más detallado de un incendio en un espacio subterráneo, HsMF como FDS o FireFoam se pueden usar para simular una longitud de túnel del orden de 100 metros. La figura 3 presenta los resultados de una simulación en FDS de un incendio de un automóvil en una sección de un túnel vehicular de 2 metros de ancho, 6 metros de alto, 96 metros de largo y una inclinación del 2,2 %, que cuenta con un sistema de ventilación que suministra aire a una velocidad de 2 m/s.

Figura 2. Resultados de la simulación de un incendio en un sistema de túneles usando la HMF VentFIRE

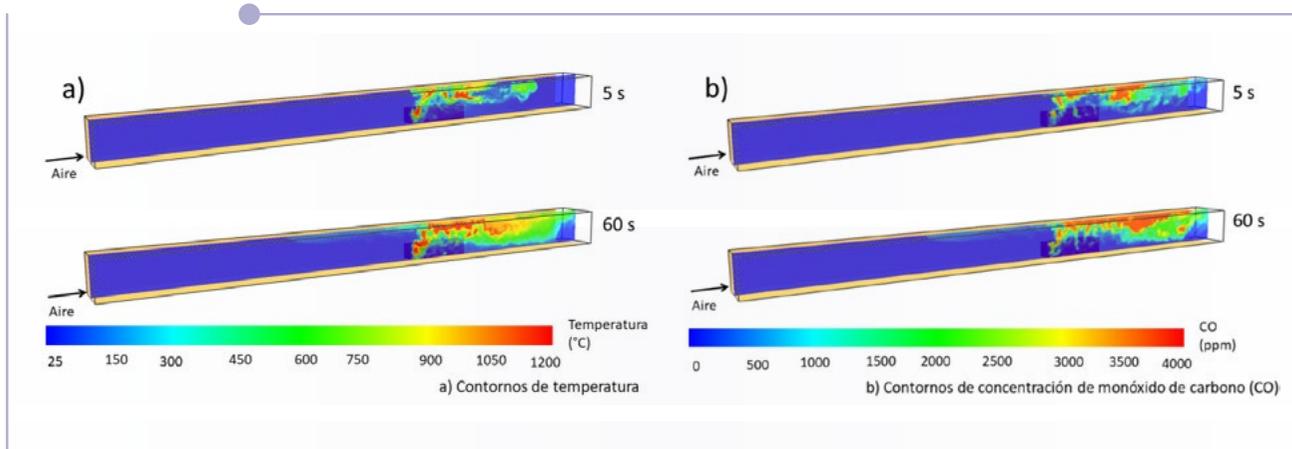


Fuente: elaboración propia.

Los resultados de la figura 3 permiten tomar decisiones importantes para una evacuación segura, en dirección opuesta al flujo de aire. Al desconocerse el flujo del aire, una evacuación en dirección de este podría generar un riesgo para los seres humanos debido a que pasado un tiempo de 60 segundos

y a una altura relevante de 1,5 metros, la temperatura podría alcanzar los 60 grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$) (figura 3a) y la concentración de monóxido de carbono (CO) podría llegar a 3000 partes por millón (ppm) (figura 3b), condiciones que superan los valores límites permisibles para la salud y vida humana.

Figura 3. Resultados de la simulación de un incendio en un túnel vehicular de 96 metros de largo utilizando FDS



Fuente: elaboración propia.

3. Cobertura vegetal. Para incendios de cobertura vegetal que comprenden dominios del orden de 100 kilómetros cuadrados (y que escapan del alcance de esta revisión) se utilizan HsMF como CAWFE, WRF-FIRE, ARPS/DEVS-FIRE y ForeFire/Meso-NH, los cuales consideran de forma dinámica el efecto de la atmósfera en el incendio y viceversa (6).

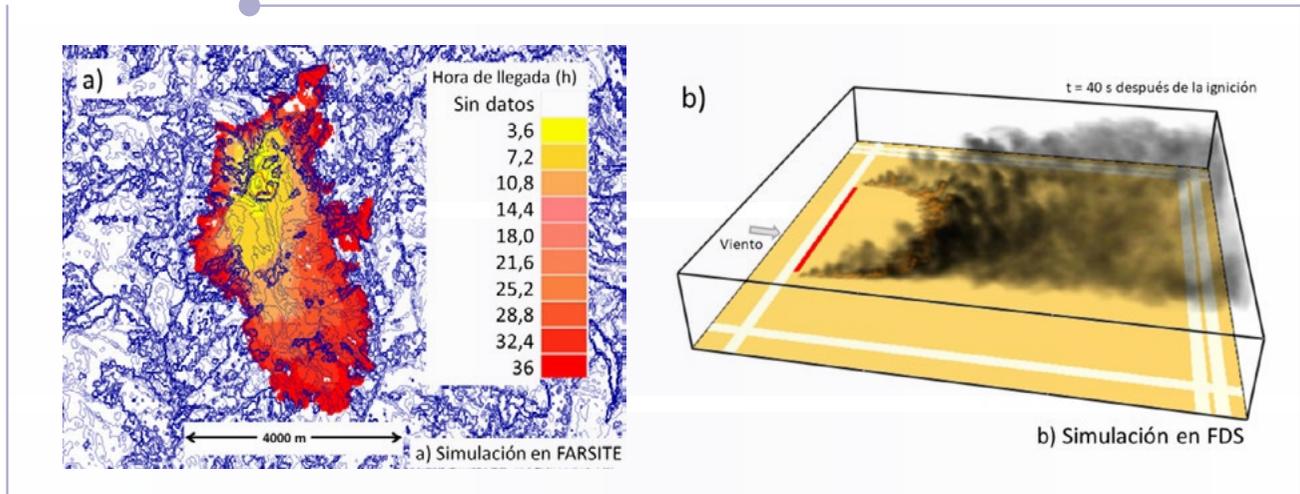
4. FARSITE, ahora parte de FlamMap, es una HMF más sencilla que las anteriores. Utiliza en su predicción datos atmosféricos, pero no permite que el incendio modifique el ambiente. La figura 4a presenta un ejemplo del uso de FARSITE en un incendio de cobertura vegetal que se registra en una zona boscosa con pinos y vegetación. Según la simulación se estima que el incendio llegue a cuatro

kilómetros del punto de ignición, en aproximadamente 36 horas.

Existen otras HsMF que se enfocan más en la WUI como el módulo de incendios de cobertura vegetal dentro de FDS (12) que, si bien se pueden aplicar solo en una escala menor (del orden de un km^2), permiten un análisis detallado del proceso de combustión.

La figura 4b reproduce experimentos que caracterizan el avance en el incendio de praderas cubiertas de pasto, cuando se produce una ignición con antorchas en la línea roja y la velocidad del viento es de 4,8 m/s. Una simulación de una WUI con FDS integraría incendios como el que aparece en la figura 4b con simulaciones sobre compartimentos como las de la figura 1. En la figura 4 resulta evidente la diferencia entre la información que se obtiene con FARSITE y FDS.

Figura 4. Resultados de simulaciones de incendios de cobertura vegetal

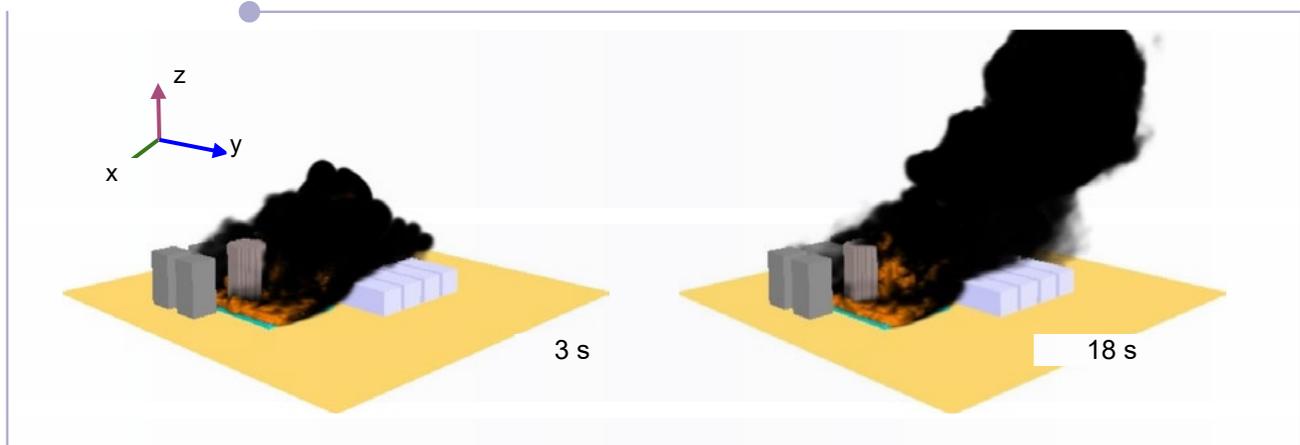


Fuente: elaboración propia.

5. Incendio por empozamiento. Aun cuando algunos fenómenos físicos asociados con un incendio por empozamiento son diferentes a los que tienen lugar en uno por compartimentos, la mayoría de simulaciones de estos escenarios se realizan mediante las mismas HsMF como FDS y FireFoam. La figura 5 presenta los resultados de una simulación mediante FDS de un incendio por empozamiento de un tanque de xileno de

80 metros cúbicos el cual está rodeado por tanques que contienen solventes y productos químicos. En la simulación se registra viento en la dirección -X con una velocidad uniforme de seis m/s. El incendio tiene una liberación de calor por unidad de área de 3700 kW/m². Uno de los objetivos de la simulación fue determinar el efecto del viento en la transferencia de calor a los tanques vecinos al lugar del incendio.

Figura 5. Resultados de simulación de un incendio por empozamiento utilizando FDS

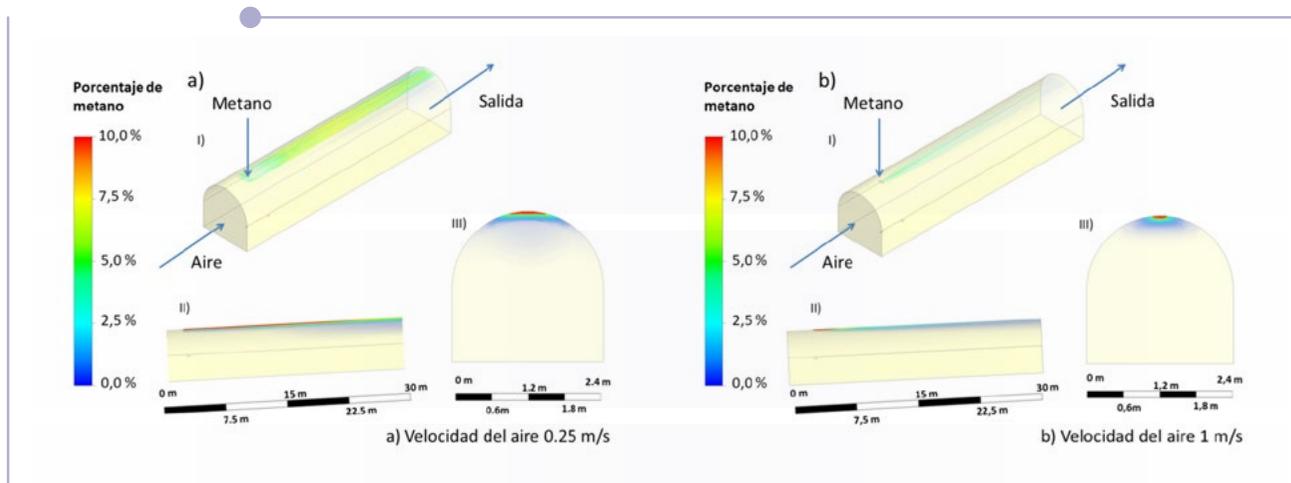


Fuente: elaboración propia.

6. Explosión de gases. En el caso de explosiones, es importante entender tanto las condiciones antes del incidente como su potencial efecto. HsMF de CFD tradicionales como Ansys Fluent permiten caracterizar la atmósfera antes de una explosión de gases. La figura 6 presenta cómo se dispersa metano cuando se emite por la parte superior de una galería con una región superior

en forma de arco y una sección cuadrada de 4,05 metros cuadrados para velocidades de ventilación de 0,25 (figura 6a) y 1,00 m/s (figura 6b), respectivamente. La simulación mediante Ansys Fluent muestra cómo la longitud de la capa de metano dentro del límite de inflamabilidad en la parte superior de la galería disminuye de 30 a 10 metros cuando la velocidad del aire pasa de 0,25 a 1 m/s.

Figura 6. Simulación de la dispersión de metano en la galería de una mina utilizando HsMF de CFD tradicionales



Fuente: elaboración propia.

Para el análisis de los efectos de la explosión existen HsMF de tipo comercial como el Flame Acceleration Simulator (FLACS) (13) que simulan mediante aproximaciones CFD el resultado de una explosión en distintos espacios. Una alternativa a FLACS para representar de forma aproximada el resultado de una explosión es XiFoam (19). Tanto FLACS como XiFoam realizan aproximaciones semiempíricas para representar la velocidad de quema turbulenta, con base en resultados de los modelos de turbulencia de simulaciones CFD e incluyen variables de progreso para aproximar las múltiples reacciones químicas que tienen lugar durante una explosión.

En el estudio de una explosión de gases resultan útiles los modelos fisicoquímicos que calculan propiedades claves de una mezcla explosiva y resuelven casos canónicos de explosiones como, por ejemplo, las propiedades Chapman-Jouguet, las estructuras Zeldovich-von Neuman-Döring (ZND) y los tiempos característicos del proceso. En este caso, se encuentran disponibles HsMF como Cantera (11) y la Shock and Detonation Toolbox (17). Ambas son de dominio público y permiten estimar también parámetros fisicoquímicos importantes al simular una explosión tales como la velocidad del sonido de mezclas explosivas, capacidades caloríficas de gases y líquidos, entalpías de reacción, así como el manejo de complejos sistemas

de reacción química con miles de reacciones elementales. Cantera incluye módulos para el análisis de llamas características como, por ejemplo, aquellas en quemadores de difusión, premezcla y contradifusión, cuyo análisis permite entender las principales características de un incendio.

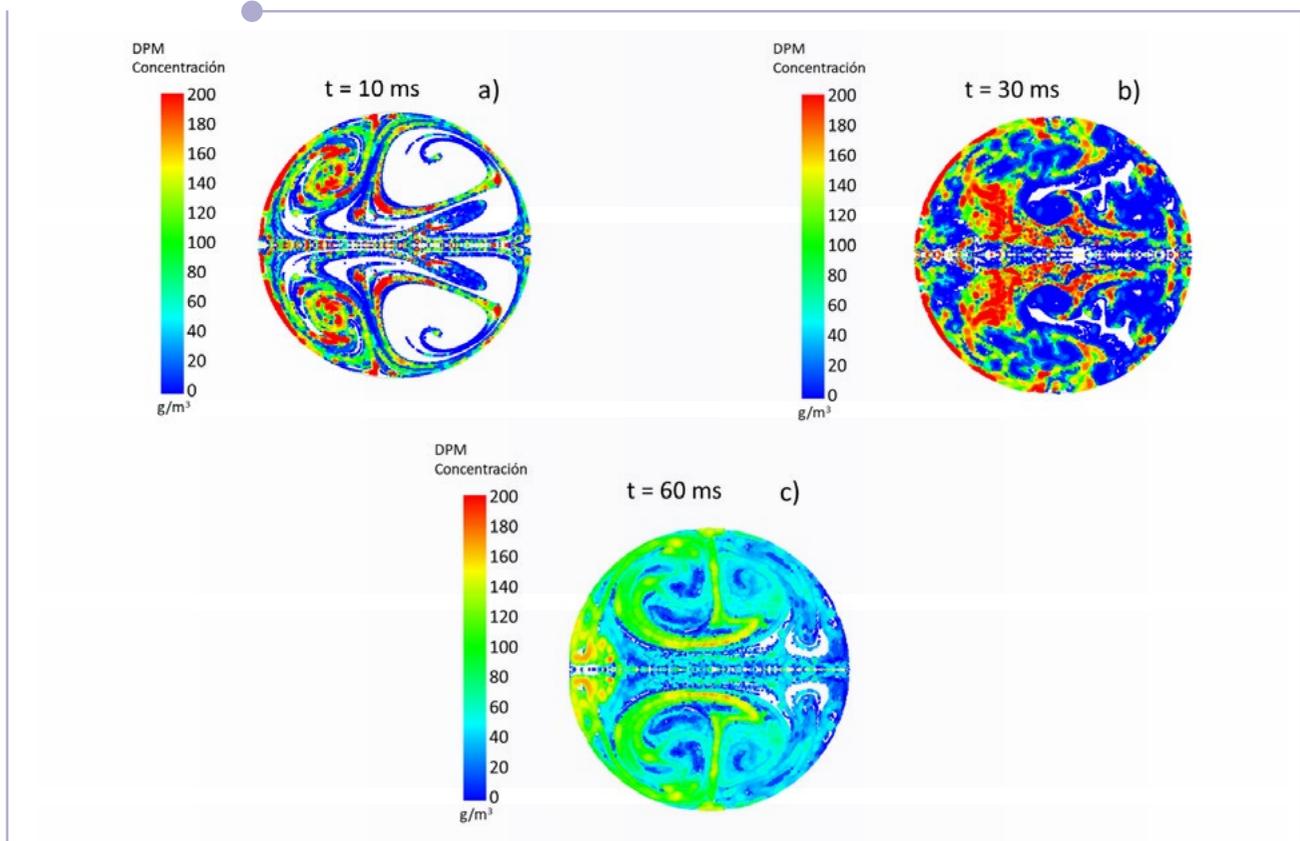
7. Explosión de polvos combustibles. En el análisis del instante antes de la explosión de polvos es muy importante reproducir la dispersión del polvo. Este es un problema de alta complejidad desde el punto de vista computacional dada la dificultad para simular al mismo tiempo numerosas partículas.

HsMF de CFD como Ansys Fluent aproximan el proceso considerando nubes que aglomeran cientos de partículas. La figura 7 presenta cómo varía la

concentración de partículas de carbón con un rango de tamaño entre 15 y 25 micrómetros al ingresar a una esfera de 20 litros (L), como las que se utilizan para determinar el índice de deflagración (KSt) de un polvo inflamable. Diez milisegundos después de la inyección (figura 7a) las partículas de carbón no se han dispersado en la esfera y se encuentran concentradas en la zona central y hacia la periferia. Luego de 60 metros (figura 7c), la concentración de partículas es mucho más uniforme y se acerca al valor de equilibrio de 90 gramos/metro cúbico (g/m³).

La simulación del efecto de una explosión de polvos se realiza de forma similar a la de gases puesto que, normalmente, se asume que los sólidos ya pasaron a fase gaseosa para el análisis de la explosión.

Figura 7. Análisis de la dispersión de partículas de carbón dentro de una esfera de 20 L según simulación con Ansys Fluent



Fuente: elaboración propia.

Discusión

El personal dedicado a la seguridad contra incendios y explosiones tiene la responsabilidad de determinar las HsMF que mejor permitan representar este tipo de eventos. Una primera aproximación a la elección es la identificación del escenario en el cual se van a usar. Para los seis escenarios expuestos en este artículo, la HMF que más aplicación tiene es FDS dada su versatilidad para simular diferentes tipos de incendios como por compartimento, WUI y empozamiento.

Una alternativa para FDS es la HMF, también de código abierto, FireFoam. Sin embargo, la aplicación de esta última se ha centrado en instituciones académicas o de investigación con énfasis en incendios. En el caso de incendios en espacios subterráneos se pueden incluir también HsMF como VentFIRE o MFIRE que permiten un análisis de todo del sistema de ventilación. Cuando se trata de incendios de cobertura vegetal, FDS permite representar escalas del orden de 1 km², relevantes en el caso de incendios WUI. Escalas mayores demandan herramientas que permitan la interacción de dos vías entre el incendio y la atmósfera.

En la simulación del instante antes de la explosión, HsMF que empleen CFD resultan útiles en el análisis de los procesos de dispersión de gases o sólidos. La simulación de las consecuencias de la explosión puede realizarse con HMF comerciales como FLACS o de código abierto como XiFoam. Mientras FLACS es de amplio uso, la aplicación de XiFoam se ha realizado principalmente por parte de centros especializados o institutos de investigación.

Conclusiones

Es fundamental que el personal de seguridad contra incendios y explosiones encargado de

utilizar las HsMF tenga un conocimiento sólido de su aplicabilidad y de las suposiciones en las que se basan estas herramientas. Es esencial destinar recursos a la formación de estos profesionales y establecer normas técnicas, códigos, y leyes que regulen el uso de las HsMF en el diseño basado en el desempeño para la seguridad contra incendios y explosiones.

De igual forma se deben realizar investigaciones que permitan ajustar estas HsMF al contexto específico de Colombia. Es importante considerar el efecto de aspectos como el clima y la topografía, el tipo de carga combustible, las características inflamables de los polvos combustibles y las biomasas y las particularidades de las edificaciones colombianas en el desempeño de estas herramientas.

En el futuro inmediato se debe preparar a las entidades que educan a los profesionales en ingeniería contra incendios y explosiones en el uso de la inteligencia artificial (IA), acoplada a HsMF como las descritas en este artículo y se debe colaborar en incorporar la IA en la seguridad contra incendios y explosiones en el país.

Declaraciones de financiación y agradecimientos

Se reconoce financiación parcial por parte del Instituto Colombiano de Crédito Educativo y Estudios Técnicos en el Exterior (ICETEX) y el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, por medio del contrato de financiación 2022-0742, en marco del proyecto "Educación para la prevención de incendios y explosiones, mediante (1) uso de herramientas de simulación, (2) caracterización de sustancias inflamables y (3) experimentos demostrativos".

Referencias bibliográficas

1. Barajas-Pinzón ÓM. Incendio del Edificio Avianca: hallazgos y lecciones aprendidas tras 50 años de una emblemática tragedia. *Revista Protección & Seguridad. Consejo Colombiano de Seguridad*. [Internet]. 2023;68-75. Available from: <https://ccs.org.co/wp-content/uploads/2024/01/50-anos-del-incendio-edificio-Avianca-PS-410.pdf> LB - 7mEv
2. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres UNGRD, "Colombia inicia marzo con 17 incendios forestales activos" [Internet]. 2024. Available from: <https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Noticias/2024/Colombia-inicia-marzo-con-17-incendios-forestales-activos.aspx> LB - hfSc
3. Vallejo-Molina L, Blandón-Montes A, López S, Molina-Escobar J, Ortiz A, Soto D, et al. Application of Artificial Intelligence to the alert of explosions in colombian underground mines. *Mining, Metall Explor* [Internet]. 2024; Available from: <https://doi.org/10.1007/s42461-024-01008-z>
4. Olenick SM, Carpenter DJ. An updated international survey of computer models for fire and smoke. *J Fire Prot Eng* [Internet]. 2003;13(2):87-110. Available from: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1042391503013002001>
5. Dey M. Assuring fire safety in nuclear plants with international standards. *Nucl Eng Des* [Internet]. 2024 Sep 24;428(113532):113532. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113532>
6. Bakhshaii A, Johnson EA. A review of a new generation of wildfire-atmosphere modeling. *Can J For Res* [Internet]. 2019 May 24; Available from: <https://cdnsiencepub.com/doi/full/10.1139/cjfr-2018-0138>
7. van Hees P. Validation and verification of fire models for fire safety engineering. *Procedia Eng* [Internet]. 2013;62:154-68. Available from: <https://pdf.sciencedirectassets.com/278653/1-s2.0-S1877705813X00141/1-s2.0-S1877705813012344/main.pdf>
8. López S, Gómez DA, Vallejo-Molina LF, Molina A. Comparación de herramientas de simulación física con aplicación en seguridad contra incendios y explosiones [Internet]. 2024. Available from: [https://github.com/FR-UN/Education/tree/9b31fcaa97a9bb339a0397a28856b2098fbf5b7f/Minciencias 890 Fire project](https://github.com/FR-UN/Education/tree/9b31fcaa97a9bb339a0397a28856b2098fbf5b7f/Minciencias%20890%20Fire%20project) LB - Td5E
9. Richard D, Peacock Kevin B, McGrattan Glenn P, Forney Paul A, Reneke. 'CFAST', CFAST Consolidated Fire and Smoke Transport. [Internet]. 2021. Available from: <https://pages.nist.gov/cfast/index.html> LB - fTkLZ
10. ANSYS. Ansys - Fluent [Internet]. 2021. Available from: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent> LB - MjLfn
11. Goodwin DG, Speth RL, Moffat HK, Weber BW. Cantera: An object-oriented software toolkit for chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes [Internet]. Zenodo; 2021. Available from: <https://zenodo.org/record/4527812>
12. McGrattan K, Hostikka S, Floyd J, McDermott R, Vanella M. FDS-SMV [Internet]. 2021. Available from: <https://pages.nist.gov/fds-smv/> LB - e00b2

13. US G. FLACS software modules [Internet]. 2019. Available from: <https://www.gexcon.com/us/products-services/FLACS-Software-Modules/25/en> LB - i4Z1o
14. Open-Source-Fire-Modeling [Internet]. 2021. Available from: <https://www.fmglobal.com/research-and-resources/research-and-testing/theoretical-computational-and-experimental-research/open-source-fire-modeling> LB - bGmNd
15. Flammap [Internet]. 2022. Available from: <https://www.firelab.org/project/flammap> LB - solbm
16. (NIOSH) TNI for OS and H. MFIRE - 4.0.2.0 [Internet]. 2020. Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/works/coversheet1816.html> LB - cYSpa
17. Shepherd JE. Shock and Detonation Toolbox (SDT) - 2021 Version [Internet]. 2021. Available from: <https://shepherd.caltech.edu/EDL/PublicResources/sdt/> LB - FaSrc
18. VentFIRE® [Internet]. 2023. Available from: <https://ventsim.com/ventsim-ventfire/> LB - Uwujh
19. OpenFOAM: User Guide: XiFoam [Internet]. 2021. Available from: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-applications-solvers-combustion-XiFoam.html> LB - KtWqZ
20. Group TH. VENTSIM [Internet]. 2023. Available from: <https://ventsim.com/es/> LB - J627