



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

---

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CARTOGRÁFICA, GEODESIA Y FOTOGRAMETRIA.

TESIS DOCTORAL

---

**SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA APLICADA A LA GENERACIÓN DE  
MODELOS DE PREVENCIÓN DE INCENDIOS DEL PATRIMONIO MONUMENTAL  
HISTÓRICO.**

Presentada por:

E. Miguel García García

Dirigida por

D. José Herráez Boquera

Dña. Eloína Coll Aliaga.

Valencia, Septiembre 2012.

---

**DEDICATORIA ESPECIAL:**

---

*A mi mujer Susi, que me ha apoyado y alentado para que pudiera dedicar el trabajo necesario para terminar esta Tesis, sacrificando su tiempo e intereses.*

---

*A mis hijos Miguel y Ana, que han crecido durante la realización de esta Tesis.*

---

*A mis hermanos Paco y Toni, que con su apoyo me han motivado para poder continuar en los momentos difíciles.*

---

*Y a mis padres Paz y Paco, que con su ejemplo me enseñaron a valorar la honradez y el trabajo. Os echo de menos.*

## **Agradecimientos**

Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo, en especial al Dr. D. José Herráez Boquera y Dra. Dña. Eloína Coll Aliga, co-directores de esta Tesis, por la orientación, el seguimiento y la supervisión continúa de la misma, pero sobre todo por la motivación y el apoyo recibido a lo largo de estos años.

Especial reconocimiento merece el interés mostrado por mi trabajo y las sugerencias recibidas por mi compañero de trabajo y amigo Eduardo Loma-Ossorio Blanch, con el que me encuentro en deuda por el ánimo infundido y la colaboración recibida. También me gustaría agradecer la ayuda del profesor D. José Luis Denia, Dña. Carmen Coll y a la técnico de laboratorio Dña. M<sup>a</sup> Jesús González, por compartir conmigo esos momentos de dudas.

Quisiera hacer extensiva mi gratitud a mis compañeros del Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, y en especial a Francisco Ruiz y Pablo Crespo, por su amistad y colaboración.

Un agradecimiento muy especial merece la comprensión, paciencia y el ánimo recibidos de mi familia y amigos.

A todos ellos, muchas gracias.

# RESUMEN

Esta Tesis aborda la simulación de incendios en varios entornos, utilizando para ello geometría real. Si queremos comprender el comportamiento de incendios específicos no es suficiente estudiar la simulación usando geometría no real. Para obtener la geometría aplicaremos un escáner de laser. Como la cantidad de puntos obtenidos por el escáner es excesiva estudiamos como obtener la geometría de la nube de puntos y transferirla de forma optima al programa de simulación. Se aborda:

- Análisis y comparación de dos métodos para obtener parámetros que describan la geometría de nube de puntos obtenidos a partir de mediciones con escáner laser. Para ello se ha realizado un programa informático para poder aplicar los algoritmos sobre datos extraídos desde un escáner láser, analizar sus resultados y generar la simulación informática de incendios.
- Su aplicación al estudio de un suceso real en la ciudad de Valencia y en el que quedan atrapados miembros del servicio de bomberos, comparado los hechos con la simulación virtual, para entender exactamente el desarrollo del fuego.
- Se analiza también la comparación de sucesos reales en ambiente forestal con los resultados obtenidos mediante simulación con geometría real. El estudio sobre los fenómenos que se producen en los incendios forestales y que por su complejidad no se llegan a entender por parte del personal que interviene en la extinción ha provocado en algunos de los ejemplos estudiados resultados catastróficos.
- Otro ambiente distinto al que se ha aplicado es el de fuego en túneles. El estudio ha servido para determinar la influencia de los pavimentos en el interior de un túnel en situación de incendio. Aportando como conclusión la diferencia que existe entre el aporte energético en el desarrollo del incendio con pavimento de mezclas bituminosas o pavimento de hormigón.

El trabajo de investigación consta de un análisis de la situación actual para comprender la envergadura del problema. Seguidamente se realiza un estudio sobre como optimizar la obtención de la geometría por medio del escáner laser. Se trabaja con la nube de puntos y se realiza una limpieza de los parámetros que ralentizan el cálculo. A continuación se realiza un programa informático para introducir los datos extraídos desde el escáner láser al programa informático que nos permite realizar los estudios de los incendios.

La metodología aplicada permitirá continuar los estudios de simulación y comparación en incendios reales. Se finaliza el trabajo con un estudio de incidentes reales que deben de ser líneas futuras de investigación para profesionales que se dediquen a este tema.

# ABSTRACT

This thesis deals with the simulation of fires in various environments, using real geometry. If we want to understand the specific fire behavior is not enough to study the simulation using actual geometry. For geometry apply a laser scanner. As the amount of points earned over the scanner is studied as getting the geometry of the point cloud and to optimally transfer simulation program. This is addressed:

- An analysis and comparison of two methods to obtain parameters describing the geometry of point clouds obtained from laser scanner. This has been done to apply software algorithms on data extracted from a laser scanner, analyze the results and generate a file to begin the computer fire simulation.
- The study of a real event in the city of Valencia with trapped fire service members, compared with the virtual simulation, allows a scientific better understanding the fire development.
- We apply also in forest environment comparing the results obtained by simulation with real geometry with the real case. The study of the phenomena that occur in forest fires and their complexity not come to understand by the staff involved in the extinction has led in some of the examples studied catastrophic results.
- Another different environment that can be applied in simulation studies is over fire in tunnels. The study is used to determine the floor influence over a tunnel fire. We get conclusions over provided energy with bituminous pavement or concrete pavement.

The research analyzes the current situation to understand the scale of the problem. This followed by a study on how to optimize the geometry obtained by laser scanner. It works with the point cloud and cleans up the parameters calculation slowing. Given below is a computer program to enter the data extracted from the laser scanner to the computer program that allows us to perform studies of fires.

The methodology allows continuing the simulation studies and compared with real fires. It concludes with a study analyzing incidents that remain today and that should be for future research professionals dedicated to this topic.

## RESUM.

Esta Tesi aborda la simulació d'incendis en diversos entorns, utilitzant per a això geometria real. Si volem comprendre el comportament d'incendis específics no és prou estudiar la simulació usant geometria no real. Per a obtenir la geometria aplicarem un escàner de làser. Com la quantitat de punts obtinguts per l'escàner és excessiva estudiem com obtenir la geometria del núvol de punts i transferir-la de forma òptima al programa de simulació. Per a això s'aborda:

- Anàlisi i comparació de dos mètodes per a obtenir paràmetres que descriuen la geometria de núvol de punts obtinguts a partir de mesuraments amb escàner làser. Per a això s'ha realitzat un programa informàtic per a poder aplicar els algoritmes sobre dades extrets des d'un escàner làser, analitzar els seus resultats i generar la simulació informàtica d'incendis.
- La seua aplicació a l'estudi d'un succés real en la ciutat de València i en el que queden atrapats membres del servei de bombers, comparat els fets amb la simulació virtual, per a entendre exactament el desenrotllament del foc.
- S'analitza també la comparació de successos reals en ambient forestal amb els resultats obtinguts per mitjà de simulació amb geometria real. L'estudi sobre els fenòmens que es produïxen en els incendis forestals i que per la seua complexitat no s'arriben a entendre per part del personal que intervé en l'extinció ha provocat en alguns dels exemples estudiats resultats catastròfics.
- Un altre ambient diferent del que s'ha aplicat és el de foc en túnels. L'estudi ha servit per a determinar la influència dels paviments en l'interior d'un túnel en situació d'incendi. Aportant com a conclusió la diferència que existix entre l'aportació energètica en el desenrotllament de l'incendi amb paviment de mescles bituminoses o paviment de formigó.

L'estudi d'investigació consta d'una anàlisi de la situació actual per a comprendre l'envergadura del problema. A continuació es realitza un estudi sobre com optimitzar l'obtenció de la geometria per mitjà de l'escàner làser. Es treballa amb el núvol de punts i es realitza una neteja dels paràmetres que ralentitzen el càlcul. A continuació es realitza un programa informàtic per a introduir les dades extrets des de l'escàner làser al programa informàtic que ens permet realitzar els estudis dels incendis.

La metodologia aplicada permetria continuar els estudis de simulació i comparació en incendis reals. Es finalitza el treball amb un estudi d'incidents reals que deuen de ser línies futures d'investigació per a professionals que es dediquen a este tema.

# ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN.....	2
1.1.	ORIGEN DEL TRABAJO.....	2
1.2.	OBJETIVOS DE LA TESIS.....	5
1.3.	PLAN DE TRABAJO.....	6
1.4.	ESTADO DEL ARTE.....	17
1.4.1.	EL PROBLEMA DEL INCENDIO.....	20
1.4.1.1.	PROBABILIDAD DE LOS SINIESTROS.....	22
1.4.1.2.	PANORAMA ESTADÍSTICO.....	23
1.4.1.3.	FUEGO REAL.....	36
1.4.1.3.1.	Fases del desarrollo.....	36
1.4.1.3.2.	Física y Química del fuego.....	37
1.4.1.3.3.	Elementos de un incendio.....	38
1.4.1.3.3.1.	Carga de Fuego.....	38
1.4.1.3.3.2.	Ignición.....	39
1.4.1.3.3.3.	Generación de Calor:RHR.....	40
1.4.1.3.3.4.	Flash-Over.....	41
1.4.1.3.3.5.	Ventilación.....	45
1.4.1.4.	EL PROBLEMA DEL INCENDIO FORESTAL.....	46
1.4.2.	LA SIMULACION COMO HERRAMIENTA EN LOS INCENDIOS.....	49
1.4.2.1.	CARACTERÍSTICAS.....	49
1.4.2.2.	LIMITACIONES.....	50
1.4.2.3.	INTERVALOS DE TRABAJO.....	51
1.4.2.4.	MATICES RELEVANTES.....	51
1.4.2.5.	LA SIMULACION PARA EL INCENDIO FORESTAL.....	52
1.4.3.	LA SEGURIDAD PARA TÚNELES.....	55
1.4.4.	EL LÁSER ESCÁNER PARA LA PREVENCIÓN DE INCENDIOS.....	57
1.4.4.1.	EVALUACIÓN DE RIESGOS.....	61
1.4.4.2.	CARACTERÍSTICAS DEL ESCÁNER LÁSER.....	63
1.4.4.3.	ESCANEADO LÁSER ESTÁTICO Y DINÁMICO.....	64
1.4.4.4.	APLICACIONES DEL ESCANEADO LÁSER.....	64
1.4.4.5.	ESCÁNER LÁSER Y ANÁLISIS DE INCENDIO.....	65
1.4.4.6.	EXPERIENCIA EN OTRO CAMPOS.....	67

1.4.4.6.1.	<i>Investigación en accidentes de circulación.</i>	67
1.4.4.6.2.	<i>Investigación de criminología.</i>	68
1.4.5.	<i>BIBLIOGRAFÍA.</i>	69
2.	<i>ESTUDIOS Y MÉTODOS.</i>	74
2.1.	<i>OBTENCIÓN DE DESCRIPTORES GEOMÉTRICOS.</i>	78
2.1.1.	<i>Obtención de datos crudos mediante láser escáner.</i>	78
2.1.1.1.	<i>Registro de la Nube de Puntos.</i>	79
2.1.1.2.	<i>Base de datos.</i>	79
2.1.2.	<i>Pre-procesado de los puntos.</i>	80
2.1.2.1.	<i>Tratamiento de puntos.</i>	80
2.1.2.2.	<i>Indexado espacial.</i>	80
2.1.3.	<i>Parámetros descriptores de la geometría.</i>	81
2.1.3.1.	<i>Estimador de la Varianza.</i>	82
2.1.3.1.1.	<i>Fundamentos matemáticos.</i>	83
2.1.3.1.2.	<i>Aplicación del Fundamento.</i>	86
2.1.3.1.3.	<i>Interpretación.</i>	87
2.1.3.2.	<i>Momentos de Inercia.</i>	89
2.1.3.2.1.	<i>Fundamento Matemático.</i>	89
2.1.3.2.2.	<i>Resolución del Polinomio Asociado.</i>	91
2.1.3.2.3.	<i>Aplicación de Rotaciones Sucesivas.</i>	92
2.1.3.2.4.	<i>Interpretación de Autovalores.</i>	94
2.1.3.3.	<i>Resultados obtenidos.</i>	98
2.1.3.3.1.	<i>Resultados para el estimador de la varianza.</i>	99
2.1.3.3.2.	<i>Resultados para los momentos de inercia.</i>	103
2.2.	<i>SOFTWARE DESARROLLADO.</i>	109
2.2.1.	<i>APLICACIÓN DESARROLLADA EN ArcGIS.</i>	110
2.2.2.	<i>APLICACIÓN EN LENGUAJE DE PROGRAMACION JAVA.</i>	121
3.	<i>TRABAJOS REALIZADOS.</i>	131
3.1.	<i>INCENDIOS DOMINADOS POR EL VIENTO.</i>	131
3.1.1.	<i>AREA DE ESTUDIO.</i>	131
3.1.2.	<i>RESULTADOS OBTENIDOS.</i>	133
3.1.2.1.	<i>Resultados mediante la simulación informática de incendios.</i>	133
3.1.2.2.	<i>Resultados en experimento de laboratorio.</i>	140
3.2.	<i>APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA AL INCENDIO FORESTAL.</i>	145

3.2.1.	<i>VARIABLES DE SALIDA.</i>	146
3.2.2.	<i>EJEMPLOS DE APLICACIÓN.</i>	148
3.3.	<i>ESTUDIO DE TÚNELES CON DIFERENTES TIPOS DE PAVIMENTO.</i>	171
3.3.1.	<i>SISTEMAS DE SEGURIDAD EN TÚNELES.</i>	171
3.3.2.	<i>DESARROLLO DE LOS INCENDIOS EN TÚNELES.</i>	175
3.3.3.	<i>COMPORTAMIENTO DEL PAVIMENTO.</i>	180
3.3.4.	<i>CONDICIONES PARA LOS EQUIPOS DE INTERVENCIÓN.</i>	184
3.3.5.	<i>CONDICIONES DE EVACUACIÓN.</i>	192
3.3.6.	<i>DAÑOS A INSTALACIONES E INFRAESTRUCTURAS.</i>	196
3.3.7.	<i>MEDIDAS A ADOPTAR EN CASO DE INCENDIO.</i>	197
4.	<i>CONCLUSIONES.</i>	202
4.1.	<i>INCENDIO EN INTERIORES.</i>	202
4.2.	<i>INCENDIOS FORESTALES.</i>	203
4.3.	<i>INCENDIOS EN TUNELES.</i>	205
4.4.	<i>NUEVOS ESTUDIOS.</i>	206
5.	<i>DISCURSIÓN Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.</i>	213
6.	<i>BIBLIOGRAFIA</i>	219

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Elementos principales de un fuego real</i> .....	37
<i>Figura 2. Curvas de Generación de Calor</i> .....	41
<i>Figura 3. Fase del Flash-Over. Inicio del incendio</i> .....	42
<i>Figura 4. Fase del Flash-Over. Desarrollo del incendio</i> .....	42
<i>Figura 5. Fase del Flash-Over. Desarrollo generalizado</i> .....	42
<i>Figura 6. Simulación FARSITE</i> .....	53
<i>Figura 7. Aplicación GEO-WFDS para ArcGis</i> .....	54
<i>Figura 8. Ciclo de la Gestión de Riesgo</i> .....	62
<i>Figura 9. Aplicaciones del Láser Escáner</i> .....	65
<i>Figura 10. Imagen de la nube de puntos de la zona afectada</i> .....	75
<i>Figura 11. Detalle de patología en estructura</i> .....	75
<i>Figura 12. Posicionamiento de los vehículos tras el incendio</i> .....	76
<i>Figura 13. Alzado de la zona del incendio con la posición de los vehículos afectados</i> .....	76
<i>Figura 14. Zona de máxima afección por parte del incendio</i> .....	77
<i>Figura 15. Parte del edificio por donde se desarrolla la combustión</i> .....	77
<i>Figura 16. Zona del interior donde se encuentra el foco de inicio</i> .....	77
<i>Figura 17. Vista en perspectiva de la subdivisión del espacio</i> .....	81
<i>Figura 18. Campana de distribución de errores accidentales</i> .....	83
<i>Figura 19. Esquema del plano MMCC ajustado en un entorno de puntos</i> .....	88
<i>Figura 20. Plano que ajusta perfectamente a un entorno que modela un trozo de acera</i> .....	88
<i>Figura 21. Vista planta de un entorno de puntos "contaminado"</i> .....	89
<i>Figura 22. Representación de los momentos de inercia calculados</i> .....	96
<i>Figura 23. Representación de los momentos de inercia calculados</i> .....	97
<i>Figura 24. Esquema del método utilizado para medir homogeneidad</i> .....	98
<i>Figura 25. Gráfico de valores de la varianza</i> .....	99
<i>Figura 26. Imagen con colores modificados</i> .....	100
<i>Figura 27. Modelo tridimensional</i> .....	101
<i>Figura 28. Fotografía del edificio escaneado, con detalle del forjado</i> .....	102
<i>Figura 29. Detalle de la diferencia de densidades</i> .....	103
<i>Figura 30. Gráfico de las diferencias de comportamiento</i> .....	104
<i>Figura 31. Modelo coloreado</i> .....	106
<i>Figura 32. Modelo de estudio clasificado</i> .....	107

<i>Figura 33. Histograma de puntos según su naturaleza.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 34. Ejemplo en un entorno real de la clasificación del método. ....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 35. Barra de herramientas de la aplicación "GIS-WFDS". ....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 36. Datos WFDS, aplicación ArcGIS.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 37. Cálculo topografía, aplicación ArcGIS. ....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 38. Base de datos de los parámetros de la vegetación, aplicación ArcGIS. ....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 39. Capas usos, aplicación ArcGIS.....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 40. Explicación capa matorral.....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 41. Asignación usos, aplicación ArcGIS. ....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 42. Datos LiDAR, aplicación ArcGIS.....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 43. Datos WFDS, de MDE a WFDS, aplicación ArcGIS. ....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 44. Cálculo topografía, de MDE a WFDS, aplicación ArcGIS. ....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 45. Datos LiDAR, de MDE a WFDS, aplicación ArcGIS. ....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 46. Parámetros, aplicación JAVA. ....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 47. Menú Unidades, aplicación JAVA.....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 48. Menú Unidades, aplicación JAVA.....</i>	<i>124</i>
<i>Figura 49. Datos Fuego, aplicación JAVA.. ....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 50. Método de introducción de coordenadas, aplicación JAVA. ....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 51. Tipo declaración fuego, aplicación JAVA.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 52. Datos Visualización, aplicación JAVA.....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 53. Datos Visualización, aplicación JAVA.....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 54. Datos Salida, aplicación JAVA 55.....</i>	<i>129</i>
<i>Figura 55. Menú Ayuda, aplicación JAVA.....</i>	<i>129</i>
<i>Figura 56. Perspectiva de la vivienda motivo del análisis. ....</i>	<i>132</i>
<i>Figura 57. Foco inicial y desarrollo en fase de Flash-Over. ....</i>	<i>133</i>
<i>Figura 58. Rotura de cristales y apertura de puerta de entrada.....</i>	<i>134</i>
<i>Figura 59. Maniobra de penetración y de refugio exterior.....</i>	<i>134</i>
<i>Figura 60. Sección del desarrollo de un incendio considerado normal. ....</i>	<i>135</i>
<i>Figura 61. Sección del desarrollo del incendio estudiado. ....</i>	<i>136</i>
<i>Figura 62. Esquema del desarrollo de un incendio dominado por el viento. ....</i>	<i>136</i>
<i>Figura 63. Vectores indicando la velocidad del viento en el interior del escenario. ....</i>	<i>137</i>
<i>Figura 64. Distribución de oxígeno en el interior del escenario.....</i>	<i>137</i>
<i>Figura 65. Flujo del incendio ascendente por la caja de escalera.....</i>	<i>139</i>
<i>Figura 66. Flujo del incendio ascendente por la caja de escalera.....</i>	<i>139</i>

<i>Figura 67. Maqueta virtual para la simulación.....</i>	<i>140</i>
<i>Figura 68. Colocación virtual de la situación más óptima en el escenario. ....</i>	<i>140</i>
<i>Figura 69. Simulación del efecto Wind Driven Fire. Optimización de la carga.....</i>	<i>141</i>
<i>Figura 70. Distribución de la maqueta. ....</i>	<i>141</i>
<i>Figura 71. Colocación de termopares por todo el escenario.....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 72. Carga de fuego. ....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 73. Aplicación de flujo de aire.....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 74. Desarrollo del incendio. ....</i>	<i>143</i>
<i>Figura 75. Representación de las temperaturas en las superficies.....</i>	<i>146</i>
<i>Figura 76. Representación de planos de temperatura de gases.....</i>	<i>147</i>
<i>Figura 77. Plano de vectores de velocidad de flujos.....</i>	<i>147</i>
<i>Figura 78. Plano de isosuperficies de presiones y succiones programadas.....</i>	<i>147</i>
<i>Figura 79. Análisis simplificado del incendio eruptivo de ThirtyMile en EEUU.....</i>	<i>148</i>
<i>Figura 80. Análisis simplificado del incendio fuegos eruptivos de Kornati en Croacia.....</i>	<i>148</i>
<i>Figura 81. Velocidad de avance del frente de llamas, Millares, (4 Julio 1994).....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 82. Velocidad de avance del frente de llamas, Riba de Saelices (17 Julio 2005). ....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 83. Terreno introducido de forma automática con una perspectiva cercana.....</i>	<i>150</i>
<i>Figura 84. Terreno introducido de forma automática con una perspectiva alejada.....</i>	<i>150</i>
<i>Figura 85. Incendio sobre modelo digital del terreno. ....</i>	<i>151</i>
<i>Figura 86. Estudio del viento en una superficie de 10 x 15 km. ....</i>	<i>151</i>
<i>Figura 87. Combustible vegetal en formas geométricas.....</i>	<i>152</i>
<i>Figura 88. Combustible vegetal en forma de sustrato combustible sobre el propio terreno.....</i>	<i>152</i>
<i>Figura 89. Configuración de frente en busca de la cima.....</i>	<i>153</i>
<i>Figura 90. Configuración de frente en coincidencia en valle.....</i>	<i>153</i>
<i>Figura 91. Configuración de frente en llano. ....</i>	<i>153</i>
<i>Figura 92. Configuración de frente en laderas opuestas. ....</i>	<i>154</i>
<i>Figura 93. Configuraciones de una de las simulaciones estudiadas.....</i>	<i>154</i>
<i>Figura 94. Mediante la imagen no se observa incremento de velocidad. ....</i>	<i>156</i>
<i>Figura 95. Los vectores de velocidad no muestran variación. ....</i>	<i>156</i>
<i>Figura 96. Comportamiento del viento según la configuración del terreno. ....</i>	<i>157</i>
<i>Figura 97. Comportamiento del viento según fuerza y dirección. ....</i>	<i>157</i>
<i>Figura 98. Isosuperficie del efecto de viento sobre el terreno.....</i>	<i>158</i>
<i>Figura 99. Vectores de velocidad del viento sobre valle.....</i>	<i>158</i>
<i>Figura 100. Plano de vectores de velocidad del viento sobre el terreno.....</i>	<i>159</i>

<i>Figura 101. Trazas puntuales para el estudio de los vientos locales.</i>	159
<i>Figura 102. Inicio de frente de llama en incendio de matorral con pendiente del 35%.</i>	160
<i>Figura 103. Frente de llama, fase intermedia, matorral con pendiente del 35%.</i>	160
<i>Figura 104. Frente de llama de un incendio desarrollado de matorral con pendiente del 35%.</i>	161
<i>Figura 105. Convección en un foco inicial del desarrollo de un incendio forestal.</i>	161
<i>Figura 106. Efecto de aceleración por la entrada del viento hasta el frente.</i>	162
<i>Figura 107. Secuencia de quema de protección y avance del frente de llama en fase inicial.</i>	163
<i>Figura 108. Quema de protección y avance del frente de llama en fase intermedia.</i>	163
<i>Figura 109. Secuencia de quema de protección y avance del frente de llama en fase final.</i>	163
<i>Figura 110. Ubicación de sensores de temperatura (color verde).</i>	164
<i>Figura 111. Plano de temperaturas en el interior de la quema.</i>	164
<i>Figura 112. Zona de encuentro de llama con una zona de viviendas.</i>	166
<i>Figura 113. Comportamiento de las cabañas.</i>	166
<i>Figura 114. Fuego eruptivo desencadenando por el efecto trinchera sobre el combustible.</i>	167
<i>Figura 115. Fuegos eruptivos con pendiente y combustible uniformemente distribuido.</i>	167
<i>Figura 116. Disposición de combustible y de la incidencia de la radiación térmica.</i>	168
<i>Figura 117. Comparación de fotografías con imágenes simuladas.</i>	168
<i>Figura 118. Diferentes geometrías para la reconstrucción informática.</i>	168
<i>Figura 119. Ladera en la se formó el fuego eruptivo.</i>	169
<i>Figura 120. Simulaciones para el estudio de la influencia del combustible.</i>	169
<i>Figura 121. Imágenes de la reconstrucción informática del incendio de Millares.</i>	170
<i>Figura 122. Esquemas de las configuraciones fundamentales de la ventilación forzada.</i>	172
<i>Figura 123. Funcionamiento de los sistemas de ventilación utilizados.</i>	175
<i>Figura 124. Primera fase o fase de crecimiento.</i>	175
<i>Figura 125. Segunda fase o fase de crecimiento exponencial.</i>	178
<i>Figura 126. Tercera fase o fase de desarrollo.</i>	180
<i>Figura 127. Nueva configuración del incendio en el escenario.</i>	182
<i>Figura 128. Características del escenario para la intervención de los bomberos.</i>	183
<i>Figura 129. Zonas de trabajo para los bomberos.</i>	184
<i>Figura 130. Primera geometría a estudiar, forma abovedada.</i>	186
<i>Figura 131. Segunda geometría, forma rectangular.</i>	186
<i>Figura 132. Longitud de instalación referida para el estudio.</i>	187
<i>Figura 133. Diferencias en la evolución de un incendio.</i>	190
<i>Figura 134. Secuencia del desarrollo del incendio con pavimento de mezcla bituminosa.</i>	191

<i>Figura 135. Diferencia de grado de opacidad de los humos en función del pavimento .....</i>	<i>193</i>
<i>Figura 136. Aplicaciones informáticas utilizadas para el cálculo de evacuación.....</i>	<i>195</i>
<i>Figura 137. Ubicación de los termopares utilizados para la medición de temperaturas .....</i>	<i>196</i>
<i>Figura 138. Imágenes del escenario.....</i>	<i>206</i>
<i>Figura 139. Imagen de la escalera afectada.....</i>	<i>207</i>
<i>Figura 140. Imágenes que muestran la secuencia del incendio. ....</i>	<i>208</i>
<i>Figura 141. CCTV antes y después del incendio y durante su reconstrucción. ....</i>	<i>208</i>
<i>Figura 142. Tres imágenes del incendio de la torre CCTV de Beijing.....</i>	<i>209</i>
<i>Figura 143. Evolución del edificio, antes, durante y después del incendio. ....</i>	<i>210</i>
<i>Figura 144. Planta y simulación informática de incendio. ....</i>	<i>210</i>
<i>Figura 145. Edificio con fachada de madera.....</i>	<i>212</i>

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Víctimas lesionadas por edad..	23
Gráfica 2. Víctimas mortales por edad y sexo.....	24
Gráfica 3. Víctimas mortales por grupos de edad.....	24
Gráfica 4. Víctimas mortales por sexo.....	25
Gráfica 5. Víctimas mortales por grupos de edad y sexo.....	26
Gráfica 6. Víctimas por meses.....	26
Gráfica 7. Número de lesionados por meses.....	27
Gráfica 8. Víctimas mortales por meses.....	27
Gráfica 9. Porcentajes de víctimas mortales por meses.....	28
Gráfica 10. Número de víctimas por día de la semana.....	28
Gráfica 11. Víctimas por franja horaria.....	29
Gráfica 12. Víctimas mortales por uso del edificio.....	30
Gráfica 13. Porcentaje de víctimas mortales por número de planta.....	30
Gráfica 14. Porcentaje según tipo de ocupantes de la vivienda.....	31
Gráfica 15. Porcentaje según forma de vida familiar: sola o acompañada.....	31
Gráfica 16. Porcentaje según nacionalidades del ocupante.....	32
Gráfica 17. Causa probable de la muerte.....	32
Gráfica 18. Porcentaje causa probable de la muerte.....	33
Gráfica 19. Origen de los incendios con víctimas mortales.....	33
Gráfica 20. Origen de los incendios con víctimas mortales en viviendas.....	34
Gráfica 21. Incendios en edificios por CCAA.....	34
Gráfica 22. Víctimas lesionadas por CCAA.....	35
Gráfica 23. Víctimas mortales por CCAA.....	35
Gráfica 24. Víctimas mortales por millón de habitantes.....	35
Gráfica 25. Gráfico número incendios entre 2005-2010 en la Comunitat Valenciana.....	46
Gráfica 26. Gráfico número hectáreas quemadas entre 2004-2010 en la C. V.....	47
Gráfica 27. Gráfico número hectáreas quemadas de media 2005-2010 en la C. V.....	47
Gráfica 28. TASA DE GENERACIÓN DE CALOR.....	138
Gráfica 29. TASA DE CONSUMO DE MATERIALES.....	138
Gráfica 30. Temperaturas en el sensor "A" del pasillo.....	143
Gráfica 31. Gráfico de temperaturas obtenidas por los termopares en los ensayos realizados.....	144
Gráfica 32. Tasa de combustión de dos frentes separados.....	155

<i>Gráfica 33. Tasa de combustión en frentes y simultáneos.....</i>	<i>155</i>
<i>Gráfica 34. Temperaturas en el exterior e interior de la quema controlada .....</i>	<i>165</i>
<i>Gráfica 35. Respuesta de extinción de los servicios de bomberos.....</i>	<i>185</i>
<i>Gráfica 36. Resultados obtenidos en los estudios realizados.....</i>	<i>188</i>
<i>Gráfica 37. Potencia desarrollada en los incendios .....</i>	<i>188</i>
<i>Gráfica 38. Contribución del material al incendio en el interior del túnel .....</i>	<i>189</i>
<i>Gráfica 39. Masa de humo en el interior de la instalación .....</i>	<i>192</i>
<i>Gráfica 40. Medición de la concentración de humo en función del pavimento.....</i>	<i>193</i>
<i>Gráfica 41. Concentración de oxígeno en función del pavimento.....</i>	<i>194</i>
<i>Gráfica 42. Temperatura de los gases en función del pavimento .....</i>	<i>194</i>
<i>Gráfica 43. Distancias de seguridad para la evacuación en función del tipo de pavimento.....</i>	<i>195</i>
<i>Gráfica 44. Temperaturas en la parte superior de la instalación.....</i>	<i>197</i>

## ÍNDICE DE IMÁGENES

<i>Imagen 1. Lapida recuerdo de los fallecidos en Millares de 1994.....</i>	<i>17</i>
<i>Imagen 2. Escaner Láser Leica. ....</i>	<i>60</i>
<i>Imagen 3. Equipo de la Guardia Civil en el escenario del accidente. ....</i>	<i>68</i>
<i>Imagen 4. Estado de la habitación principal y del pasillo. ....</i>	<i>135</i>

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Grupos de edades y porcentajes de víctimas mortales .....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 2. Rampa de color temática para las nubes procesadas en función de su geometría. ....</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 3. Umbrales de varianza para ajuste a planos en función de la geometría.....</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 4. Umbrales giro para el método de momento de inercia en caso general de estudio...</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 5. Umbrales giro para el método de momento de inercia en el caso de predominio de geometrías planas .....</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 6. Propiedades Termo-Físicas de los materiales utilizados en la simulación.....</i>	<i>133</i>
<i>Tabla 7. Relación entre el tipo y el volumen de ventilación .....</i>	<i>175</i>

## ÍNDICE DEL CAPÍTULO 1

1.	INTRODUCCIÓN.....	2
1.1.	ORIGEN DEL TRABAJO.....	2
1.2.	OBJETIVOS DE LA TESIS.....	5
1.3.	PLAN DE TRABAJO.....	6
1.4.	ESTADO DEL ARTE.....	17
1.4.1.	EL PROBLEMA DEL INCENDIO.....	20
1.4.1.1.	PROBABILIDAD DE LOS SINIESTROS.....	22
1.4.1.2.	PANORAMA ESTADÍSTICO.....	23
1.4.1.3.	FUEGO REAL.....	36
1.4.1.3.1.	Fases del desarrollo.....	36
1.4.1.3.2.	Física y Química del fuego.....	37
1.4.1.3.3.	Elementos de un incendio.....	38
1.4.1.3.3.1.	Carga de Fuego.....	38
1.4.1.3.3.2.	Ignición.....	39
1.4.1.3.3.3.	Generación de Calor:RHR.....	40
1.4.1.3.3.4.	Flash-Over.....	41
1.4.1.3.3.5.	Ventilación.....	45
1.4.1.4.	EL PROBLEMA DEL INCENDIO FORESTAL.....	46
1.4.2.	LA SIMULACION COMO HERRAMIENTA EN LOS INCENDIOS.....	49
1.4.2.1.	CARACTERÍSTICAS.....	49
1.4.2.2.	LIMITACIONES.....	50
1.4.2.3.	INTERVALOS DE TRABAJO.....	51
1.4.2.4.	MATICES RELEVANTES.....	51
1.4.2.5.	LA SIMULACION PARA EL INCENDIO FORESTAL.....	52
1.4.3.	LA SEGURIDAD PARA TÚNELES.....	55
1.4.4.	EL LÁSER ESCÁNER PARA LA PREVENCIÓN DE INCENDIOS.....	57
1.4.4.1.	EVALUACIÓN DE RIESGOS.....	61
1.4.4.2.	CARACTERÍSTICAS DEL ESCÁNER LÁSER.....	63
1.4.4.3.	ESCANEO LÁSER ESTÁTICO Y DINÁMICO.....	64
1.4.4.4.	APLICACIONES DEL ESCANEO LÁSER.....	64
1.4.4.5.	ESCÁNER LÁSER Y ANÁLISIS DE INCENDIO.....	65
1.4.4.6.	EXPERIENCIA EN OTRO CAMPOS.....	67
1.4.4.6.1.	Investigación en accidentes de circulación.....	67
1.4.4.6.2.	Investigación de criminología.....	68
1.4.5.	BIBLIOGRAFÍA.....	69

## CAPITULO 1

---

### 1. INTRODUCCIÓN.

#### 1.1. ORIGEN DEL TRABAJO.

Desde que comencé mi profesión de Bombero en Febrero de 1988, me doy cuenta que todo el conocimiento se basa en la experiencia que los profesionales más veteranos transmiten a los jóvenes. Esta situación se viene repitiendo hasta que a principio de los años 90, el Consorcio Provincial de Bomberos de Valencia, contacta con un Servicio de Bomberos de Suecia y comienza una formación específica.

Se trata de un punto de inflexión a nivel nacional. La oportunidad de que los bomberos se forman en temas tan puntuales como es la actuación en interiores o como se dio en llamar los cursos de “Flash-Over”, realizados por los Suecos.

En el año 1992, entro a formar parte del equipo de formación del mencionado cuerpo y comienzo a instruir al personal operativo del Consorcio Provincial de Bomberos de Valencia. La experiencia con el desarrollo de los cursos ha sido muy importante. Transmitir los conocimientos de incendios a los profesionales que arriesgan sus vidas por salvar las de los demás [1], [2].

El equilibrio entre conocimiento y experiencia se encontraban en un balance equilibrado hasta que en el año 2005 se produce un siniestro que parece no tener explicación. Se trata del incendio del Edificio Windsor en Madrid. Un incidente donde los profesionales de la extinción tienen que abandonar el edificio y deben dejar arder uno de los elementos emblemáticos de la capital. Un siniestro que no causó ninguna víctima pero si produjo elevadas pérdidas materiales.

Tras este incidente, aparece la necesidad para el personal técnico de bomberos, de buscar una herramienta que permita entender este tipo siniestro. Situaciones muy peligrosas donde la comprensión de los fenómenos de la combustión es un reto. Por esa línea, el autor del trabajo ya investiga y parte de la explicación se expone en el VIII de los Servicios de Emergencia a nivel Nacional [ 3].

Existe una explicación clara, la sociedad evoluciona y con ella los problemas a los que se enfrentan los servicios de emergencias. Es obvio pensar que el fuego es nuestro aliado y nuestro enemigo más mortal. El arma suprema de la naturaleza.

A raíz del incidente entro en contacto con Eduardo Loma-Ossorio Blanch, ingeniero industrial, miembro del Servicio de Bomberos y especialista en Simulación Informática de Incendios y me propone trabajar con el departamento de operaciones en el análisis de los incendios, comenzamos a realizar análisis y formación sobre el tema [4]

Empezamos a observar, que un campo que necesita de mucha formación, es el de los incendios que pueden afectar al patrimonio monumental histórico. Este tipo de patrimonio carece de medios para acometer los problemas que se le presentan. El problema radica en que no se comprende la evolución del desarrollo del incendio. Para ello, se valora la necesidad de tratar el estudio desde una vertiente que puede ser más enriquecedora. Se valora tratar el tema desde el fuego de interiores con afección del viento, por ser un problema más global. Valorar el tema desde el punto de vista que el fuego puede venir desde fuera, y para ello tratamos el incendio forestal. Finalizando el problema con los incendios en túneles de carretera, por ser las líneas de comunicación, un medio de enlace, que se ven afectados por los incendios forestales. Esta situación nos lleva a trabajar en los análisis y en la formación del personal interviniente [5].

Mi relación con el departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría se inicia con la búsqueda de una herramienta que permitiera poder extraer una geometría precisa del lugar donde se ha producido un incendio. Tras unas indagaciones en la Universidad consigo contactar con el Departamento que dispone de un Escáner Laser. Es entonces cuando con la posibilidad de complementar esta tarea D. José Herráez, Catedrático de Universidad en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos y Dña Eloína Coll, titular de Universidad en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Geodesia y Cartografía, me proponen que trabaje en la línea de los análisis de incendio y dado mi interés por obtener el grado de doctor, oriente el proyecto de doctorado hacia la búsqueda de las utilidades de aplicación del escáner laser hacia el análisis de incendios.

Desde ese momento hemos colaborado en algunos proyectos con el CONBE [6], con el Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España [7], con la Fundación de Estudios para la Administración Pública. Finalmente nos encontramos trabajando con IECA (Instituto Estudios del Cemento y sus Aplicaciones), desarrollando un estudio comparativo sobre la evolución de los incendios en túneles de carretera con diferentes tipos de pavimento.

Hemos presentado ponencias en:

- Congreso Internacional, CFD2010, “Combustion and Fire Dynamics”, celebrado en Santander, del 20 al 23 de Octubre de 2010, con la ponencia, “Aplicación de la Simulación de Incendios en la Prevención y Formación de los Equipos de Extinción de Incendios y Salvamento de la Ciudad de Valencia”.
- IV Simposio Nacional sobre Incendios Forestales con la ponencia, “Simulación Informática de Incendios Forestales mediante dinámica de Fluidos. Incendio de Millares, 1994”. Celebrado en la Nucía, Alicante en Noviembre del 2011.
- International Conference on Computational and Mathematical Methods in Science and Engineering, con la ponencia, “Comparison of two methods for defining geometric properties of surfaces measured with laser scanner for automatic geometry extraction in urban areas”, celebrado en Benidorm en Junio de 2011.
- I Fire Engineerig Conference 2011, con la ponencia, “Estudio de las circunstancias que rodean un incendio dominado por el viento. Análisis del siniestro”. Celebrado en la Universidad Politécnica de Valencia en Junio del 2011.

En la actualidad nos encontramos preparando los siguientes artículos para las siguientes revistas y Congresos:

- On the description of parameters for a fire prevention mathematical model, para la revista “Fire Safety Journal”
- A study fire using laser technology to obtain for its implementation in geometry simulation of fire, para la revista “Building and Environment”
- Aplicación de nuevas herramientas tecnológicas para la actuación de los servicios de emergencia en la noche de “la Crema”, para la “Revista d’Estudis Fallers”.
- “Aplicación del modelado informático al estudio de las condiciones de trabajo de los equipos de emergencia durante los incendios en túneles de carretera con diferente tipos de pavimento”, para el International Congress “Fire Computer Modeling” en Santander.

## 1.2. OBJETIVOS DE LA TESIS.

Cuando se inicio el trabajo de investigación de esta tesis se plantearon los siguientes objetivos principales:

- Evaluar las necesidades que tienen los servicios de bomberos cuando se encuentran en un edificio del patrimonio monumental histórico que se ha producido un incendio y tienen que actuar y posteriormente realizar una investigación.
- Obtener criterio para extraer la geometría y a continuación poder diseñar unos programas que faciliten el traspaso de datos obtenidos con tecnología láser a la programación de simulación informática de incendios.
- Analizar servicios de incendios relevantes que han sucedido en un ámbito nacional y que por su connotación presentan circunstancias que han supuesto que se hayan convertido en siniestros peligrosos.
- Poner a punto un servicio de asesoramiento en simulación de incendios para los servicios de bomberos, del cual carece Protección Civil a nivel nacional.

Para poder responder a estas cuatro cuestiones se elabora un plan de trabajo y se establecen los siguientes objetivos metodológicos:

- Seleccionar tres tipos de siniestros que son los considerados más peligrosos para la seguridad de los bomberos. Este tipo de siniestros son los incendios urbanos, los incendios forestales y los incendios en túneles.
- Realizar unos programas informáticos para poder complementar los datos extraídos desde la maniobrabilidad del escáner láser y poder transmitirlos a un programa de simulación informática de incendios.
- Desarrollar unos estudios de siniestros ocurridos para mostrar los efectos que suceden en incendios de interiores donde predominan la fuerte afección del aire, el comportamiento del incendio forestal en función de las inclemencias meteorológicas y topográficas y finalmente cómo evoluciona un incendio en el interior de un túnel.

### 1.3. PLAN DE TRABAJO.

El plan de trabajo elaborado para conseguir los objetivos planteados se puede dividir en 4 bloques que se han desarrollado en paralelo. Estos 4 bloques son:

- El bloque primero dedicado a realizar una valoración de la situación actual de los incendios urbanos y forestales por ser los que causan mayor número de vidas humanas y de bienes materiales.
- En el segundo bloque, se muestran dos nuevas herramientas que se deben de incorporar a la organización de la prevención de incendios. Se trata del Láser Escáner y de la Simulación Informática de Incendios. Es la esencia del trabajo. Obtener y mostrar las ventajas que nos pueden aportar este tipo de tecnología.
- El siguiente bloque se muestran tres trabajos que se han realizado con las nuevas herramientas.
- Se informa de las conclusiones a la que llega el autor de la tesis desde un punto de vista práctico.

El trabajo se vertebra desde un punto de vista práctico y pretende mostrar que el mundo de los incendios tiene que romper con unos moldes que tiene establecidos para poder evolucionar. Queda demostrado que la inversión económica de este país suele ser enviada a los servicios de extinción. Son al final, los que consiguen apagar el incendio. Pero cuando ellos trabajan, el daño ya se encuentra producido. Con toda la preparación que demuestran, lo único que consiguen es atajar el problema. Valga el ejemplo que refuerza el objetivo de la tesis, los incendios forestales que han ocurrido a principios de Julio y durante Agosto en la Comunidad Valenciana.

Seguramente el costo que ha supuesto la extinción, datos que hasta el momento se desconocen, han sido muy elevados. Si aplicamos el sentido común, se puede llegar a la conclusión que si ese montante económico se hubiera destinado a realizar tareas de prevención, en este momento los ciudadanos de la provincia seguirían disfrutando de su zona de vegetación arbolada. Los fallecidos, el piloto del helicóptero, el brigadista y el agente forestal con su familia y el resto de los intervinientes, sin la secuela que produce una intervención de esa magnitud.

Con este discurso, se pretende poner en antecedentes de la necesidad que se tienen en estos campos para dotar de nuevas herramientas al personal que trabaja en la prevención de incendios e incorporar nuevos mecanismos a la organización. Por ello, en el primer capítulo se realiza una recopilación de la problemática actual. Desde punto de vista práctico.

Es importante este análisis por la necesidad de salir del punto de estancamiento que nos encontramos, con un desarrollo de incendios característicos. Se trata del "Flash-Over". Término que asignó la Escuela Sueca de Protección Civil al desarrollo generalizado de un incendio y que mostraron a todo el mundo.

El documento trata de exponer conceptos como carga de fuego, ignición, generación de calor y ventilación. Términos que se encuentran en fase de comprensión por parte de la sociedad. Y uno de ellos con un alto grado de peligrosidad y con una carencia importante de análisis. Se trata de la ventilación. Es un fenómeno peligrosísimo que define el desarrollo del incendio y que no se analiza.

Los autores que trabajan en los temas de incendios tratan la ventilación como un elemento que se encuentra estable. Un parámetro que tratan como superficie de apertura y que por ahí entra el aire necesario para el que incendio se desarrolle.

Pero la experiencia nos muestra que en la realidad no es así. La geometría, la altura y las inclemencia meteorológicas, denominador común de la mayoría de los siniestros, juegan un papel relevante en los fenómenos.

En la ciudad de Valencia, el servicio de Bomberos ha sufrido tres de estos siniestros con estas características en el último año. Son incendios donde el aire que entra desde el exterior juega un papel decisivo en el proceso. Llega a cambiar el desarrollo de la combustión. Son muy peligrosos y por ello, estudio de la tesis.

El viento es muy significativo también para los incendios forestales. Suele ser el motivo del número de accidentes del personal interviniente. Es por ello, que esta parte es la que se encuentra a continuación del tema del incendio urbano.

Para poder tratar la problemática se necesita una herramienta que permita mostrar unos resultados cuantificables que analizar. Esto se muestra a continuación de los incendios forestales. Un programa de simulación informática de incendios que nos permite analizar la mayoría de parámetros que entran a formar parte del desarrollo de un incendio. Es una herramienta innovadora que hace su aparición en EEUU.

En el apartado se plasman sus características principales, sus limitaciones, intervalos de trabajo y matices más relevantes. También se hace una reseña a la adaptación que se hace de este programa para los incendios forestales.

Otro tema expuesto, por tratarse de una necesidad que aparece durante la realización del trabajo, es la intervención en túneles. Se incluye para ampliar la seguridad de las personas que intervienen. El estudio se analiza con la comparación del comportamiento del siniestro bajo los dos tipos de pavimentos que nos encontramos en este tipo de instalación. Por una parte el pavimento de hormigón, que es de obligado cumplimiento, a nivel europeo para los túneles con una longitud superior a 1000 m. Por otra, el pavimento asfáltico, con la mezcla de productos bituminosos que son los más utilizados en la actualidad.

Para completar este primer bloque se muestra la herramienta que permite la obtención de la geometría. Como se ha comentado, denominador común de los análisis. Se muestra como se utiliza en los temas de evaluación de riesgo y las características que tiene. Se dan unas pinceladas del papel que puede jugar en los análisis de incendios y de las experiencias en otros campos que han visto el potencial de esta herramienta

Con la problemática planteada se pasa a mostrar cómo podemos optimizar las nuevas herramientas. Este es el contenido del capítulo segundo. Para ello se muestran los trabajos de campo realizados. La obtención por una parte de la nube de puntos de dos de los escenarios de incendios con los que han tenido que enfrentarse el Servicio de Bomberos de la ciudad de Valencia. Por otra, valorar la geometría necesaria para poder tratar mayores superficies de terreno, con distintos tipos de vegetación.

Con este planteamiento, se ha trabajado en obtener los algoritmos necesarios con que simplificar la nube de puntos obtenida en el terreno. El trabajo se ha centrado en buscar los enclaves relevantes en todo tipo de escenarios, estudiando el momento de inercia de la superficie y realizando un ajuste por mínimos cuadrados. Con ello podemos obtener la geometría de las esquinas, los paramentos lisos y las zonas de difícil definición.

Durante el desarrollo del trabajo se encontró algo que no se esperaba. Ha sido el tratamiento de las superficies de difícil definición y que tiene un papel muy importante en los incendios, sobre todo cuando se trata de patologías en la estructura. Cuando se trabaja con el escáner láser, encontrar en un paramento liso, como es una viga o una vigueta, una superficie de difícil definición, muestra que ese elemento puede estar sufriendo una patología. Y suele ser así.

Este descubrimiento, junto con la posibilidad de poder trabajar con el escáner en lugares de riesgo, permite que nada más controlar un incendio y antes de que puedan entrar los técnicos a valorar el estado de la estructura, puede entrar un equipo de bomberos, colocar el aparato y comenzar a trabajar. Los datos se pueden estar recibiendo en una zona limítrofe, sin riesgo de opacidad ni toxicidad de los humos.

Esta primera valoración permitirá profundizar posteriormente de una manera más específica en el tema de la rehabilitación, pero en un primer momento, para los intervinientes y los mandos, en poner las medidas adecuadas de seguridad.

En el capítulo 1 estudiamos “el problema del incendio” 1.4.1, (pág. 20). Cuál es la falta de perspectiva por parte de la sociedad en entender este proceso químico. Los estudios sobre incendios no son muy extensos y el acerbo científico sobre el proceso del fuego, es más bien escaso. Solo hay que mirar en los planes de estudios y observar que existen muy pocas Universidades que tengan en sus planes de estudio incorporado esta disciplina.

En un primer apartado, 1.4.1.1, (pág. 22), se trata “la probabilidad de los siniestros”, por todos es conocidas las elevadas pérdidas económicas y sobre todo en vidas humanas que los incendios causan anualmente. En EEUU, durante el periodo en que tuvo lugar la guerra de Vietnam, los incendios ocasionaron un número mayor de víctimas y unas pérdidas económicas superiores a las ocasionadas en dichas guerra.

Se analiza “el panorama estadístico”, 1.4.1.2, (pág. 23), con el objetivo de tener una visión general de la problemática. Las variables consideradas son las características de la persona afectada, las características temporales y las del lugar.

Se continúa con el apartado sobre el “fuego real”, 1.4.1.3, (pág. 36), donde se realiza un análisis pormenorizado. Hasta ahora solamente una parte de este tema, las técnicas de protección contra incendios, ha progresado en los últimos años y no se ha hecho sobre una base sólida, ya que los estudios de protección han tenido como objetivo evitar el “proceso” más que estudiar el “fenómeno” como un “hecho perceptible” que tiene lugar en el espacio-tiempo.

El problema se agudiza cuando esta falta de saber, ha hecho que el legislador dictase la normativa, no en función del estado del conocimiento en ese momento, sino más bien ante la magnitud del desastre. Como ejemplo tenemos: el incendio en el Teatro Novedades de Madrid, dio luz al reglamento de Espectáculos Públicos: el incendio en el Hotel Corona de Aragón, hizo que la autoridad propusiese un estudio que se tradujo en el Reglamento de Protección en

Establecimientos Hoteleros; la explosión en el camping Los Alfaques, facilitó el Reglamento del Transporte de Mercancías Peligrosas por Carretera. La Legislación, siempre ha sido a posteriori al hecho.

Las fases del desarrollo, 1.4.1.3.1, (pág. 36), la física y química del fuego, 1.4.1.3.2 (pág. 37), son los siguientes apartados que se describen en el capítulo. El desconocimiento de la dinámica de los incendios ha hecho que muchos incendios provocados hayan sido considerados como fortuitos y a la inversa. Es obvio que si se desconocen las causas y circunstancias que desencadenan los incendios, no se podrán tomar adecuadas medidas para prevenirlos, ni las más apropiadas técnicas de protección, así como los más eficaces métodos de control y extinción.

Los elementos que intervienen se trata en el apartado, 1.4.1.3.3 (pág. 38). Carga de fuego, ignición, generación de calor, flash-over y ventilación.

Se continúa con el problema de los incendios forestales, 1.4.1.4, (pág. 46), que se han convertido en uno de los mayores problemas ecológicos que sufre la sociedad por la frecuencia y cantidad de hectáreas afectadas que se cobran todos los años.

En el apartado 1.4.2, (pág. 49), se trata la utilización de la simulación informática como una herramienta muy importante para poder determinar el por qué ocurre un incendio, por mínimas que sean sus consecuencias, es fundamental para poder realizar estudios de prevención que eviten la ocurrencia, así como técnicas de protección que mitiguen sus efectos, al mismo tiempo que acrecentar el conocimiento científico.

La seguridad en túneles, 1.4.3, (pág. 55), se ocupa de analizar la gravedad de los incendios en la carretera y más exactamente en los túneles. Las explotaciones contaban con las medidas de seguridad exigidas por las normativas correspondientes y no se consiguieron evitar las graves consecuencias producidas.

En 1.4.4, (pág. 57), se plantea como la tecnología láser se encuentra ayudando en otras disciplinas como es la investigación en accidentes de circulación y la criminología. También se analiza cómo trabaja en campos referente a la prevención, evaluando los riesgos asociados con ciertos azares, cuantificándolos para poder medirlos y determinarlos para poder controlarlos.

Se completa el capítulo con una bibliografía sobre las referencias de donde se ha extraído el estado actual de los temas motivos de este trabajo.

El desarrollo del segundo capítulo 2, (pág. 74), continúa con los trabajos realizados para conseguir los algoritmos necesarios para poder simplificar la nube de puntos. Anclándose en los procesos matemáticos y en los parámetros descriptores de la geometría. Se han comparado los resultados obtenidos utilizando dos procesos, el Momento de Inercia y un ajuste por Mínimos Cuadrados. Se completa con la obtención de los comandos necesarios para poder introducir la información obtenida en el programa de simulación informática.

Por otra parte y como complemento, se desarrolla los algoritmos de otro programa, para que mediante el desarrollo de un GIS, se puedan conseguir los datos necesarios para poder introducir la información requerida del terreno, esta vez en el programa de simulación de incendios. La aplicación se desarrolla en ArcGIS y en lenguaje de programación JAVA.

En este capítulo se estudia, “la obtención de descriptores geométricos”, 2.1, (pág. 78), con dos métodos para poder obtener parámetros que describan la geometría de nubes de puntos que previamente se han obtenido a partir de la tecnología láser. Se valora “la obtención de datos crudos mediante láser escáner”, 2.1.1, (pág. 78). Se realiza “el registro de la nube de puntos”, 2.1.1.1, (pág. 79), y a continuación se obtiene “una base de datos”, 2.1.1.2, (pág. 79), con todos los puntos medidos en un mismo sistema de coordenadas espacial.

En el punto 2.1.2, (pág. 80), se trabaja “el pre-procesado de puntos”, con un “tratamiento de puntos”, 2.1.2.1, (pág. 80), con el objetivo de mejorar el rendimiento, con un software propio. Tras el estudio de las características de la nube de puntos se crea un “indexado espacial”, 2.1.2.2, (pág. 80), para programar rutinas que busquen secuencialmente los puntos que se necesitan para construir los entornos sobre los que se extraen las propiedades geométricas.

Con los datos listos para su tratamiento, se procede a extraer la información que proporcione la manera de distribución de la nube de puntos mediante los “parámetros descriptores de la geometría”, 2.1.3, (pag.81), para poder determinar las geometrías que conforman el objeto escaneado. Para ajustar la nube de puntos a un plano, de modo que se pueda valorar de qué tipo de elemento vamos a referenciar, acudimos al “Estimador de Varianza”, 2.1.3.1, (pág. 82). Para determinar el grado de ajuste se utiliza la técnica de mínimos cuadrados, con la utilización el valor de la varianza a posteriori como estadístico representativo del ajuste. En 2.1.3.1.1, (pág. 83), se estudian “los fundamentos matemáticos”. El método de mínimos cuadrados se basa en un modelo matemático y un modelo estadístico. Se matiza que el modelo matemático exige el cumplimiento de la condición que la suma de los residuos al cuadrado sea mínima. El modelo

estadístico se consigue cuando todos los residuos siguen una distribución normal de media 0 y desviación típica la unidad.

En la “Aplicación del Fundamento”, 2.1.3.1.2, (pág. 86), se trata a grandes rasgos de montar el sistema matricial para resolver el plano en un punto y estudiar el estadístico. A continuación en la “Interpretación”, 2.1.3.1.3, (pág. 87), se establece por medio del estimador unos umbrales de aceptación de una hipótesis de si el punto del cual se analiza su entorno pertenece a un plano o no. Con una característica, que cuanto menor sea el valor del estimador más se acerca la distribución de puntos al plano teórico, puesto que los residuales tienen que ser necesariamente menores.

En 2.1.3.2, (pág. 89), a través de los “momentos de inercia”, se plasma otra estrategia distinta para obtener información de la configuración geométrica. Se tratan los puntos obtenidos como elementos de masa unidad, que en función de su pequeño aporte al momento de inercia a calcular, se posicionan en función de su lugar espacial respecto al centro de masas. Con ello en el “fundamento matemático”, 2.1.3.2.1, (pág. 89), se calcula el centro de masas y posteriormente se construye la matriz de inercia para el punto. Para diagonalizar la matriz se prueban dos métodos distintos, la resolución del polinomio y la aplicación de rotaciones sucesivas. En 2.1.3.2.2, (pág. 91), “resolución del Polinomio Asociado”, los autovalores son las soluciones que se obtienen al resolver la ecuación de tercer grado. En 2.1.3.2.3, (pág. 92), “aplicación de Rotaciones Sucesivas”, con un método más sencillo que el anterior, con menos operaciones matemáticas complejas, se obtiene llevar los vectores de la matriz a espacios ortogonales entre sí, por medio de aplicar sucesivas rotaciones, el truco es la aplicación de sumas y funciones trigonométricas más sencillas que requiere un menor coste computacional.

También se pueden obtener la matriz de autovalores como la matriz de inercia original por la matriz de autovectores. Para ello, en 2.1.3.2.4, (pág. 94), “interpretación de Autovalores”, los autovalores representan los momentos de inercia en las direcciones principales, consiguiendo que sean independientes entre sí, anulando (de ahí su diagonalización) los elementos cruzados de la matriz.

Con todo ello, en 2.1.3.3, (pág. 98), tenemos “resultados obtenidos”, donde tras realizar las pruebas establecidas se llegan a tener los resultados previstos. Para poder asegurar que no hay errores de cálculo se trabaja paralelamente con software de distinta procedencia para garantizar unos resultados fiables. Se han utilizado Microsoft Excel, Matlab y software de elaboración propia. Con ello acudimos a los “resultados para el estimador de la varianza”, 2.1.3.3.1, (pág.

99). Se llega a la conclusión que los resultados obtenidos en la discriminación de la varianza son positivos, por ser capaz de determinar con garantías aquellas geometrías con forma de plano. Referente a “los resultados para los momentos de inercia”, 2.1.3.3.2, (pág. 103), ha resultado ser ligeramente más sensible que la desviación típica y sin embargo más resolutivo, en el sentido de que cuando se acerca a la arista, el método “no duda” y clasifica con mucha mayor claridad esas geometrías diferentes al plano, evitando en mayor medida las clasificaciones intermedias obtenidas por el estimador de la varianza a posteriori.

Tras este análisis se llega a una conclusión sobre el método del segundo momento de inercia. No es el más adecuado para configuraciones geométricas curvas. No obstante se podría extender, buscando momentos de inercia de orden superior, para ajustarse a esas configuraciones más complejas. Dejando así, una línea de investigación abierta por ese camino.

La segunda parte del capítulo 2 está destinada a los sistemas de información geográfica. En 2.2, (pág. 109), “Software desarrollado para el tema forestal”, sirve para poder generar los ficheros de entrada que debe leer el software WFDS para calcular la simulación de los incendios forestales, y posteriormente mostrar su visualización por medio de Smokeview. Toda la información se introduce por medio de un formulario. Este se encuentra conectado con un SIG, por lo que toda la información cartográfica, datos LIDAR, o usos del suelo extraídos por técnicas de teledetección, se transforman al lenguaje del software WDFS.

Se realiza una separación en dos programas, la razón ha sido que la programación de herramientas SIG es muy complicada si no se hace desde un software específico como ArcGIS, y porque la introducción de elementos puede variar con el tiempo. Por un lado una aplicación programada en ArcGIS, que sirve para generar la superficie topográfica, tratar los datos LIDAR y modelar la masa arbórea con sus respectivos parámetros de combustibilidad y por otro una aplicación programada en lenguaje JAVA, para introducir datos meteorológicos.

En 2.2.1, (pág. 110), “aplicación desarrollada en ArcGIS”, se desarrollan tres procedimientos para la conversión al fichero WFDS:

- Datos cartográficos (ficheros de tipo Shapefile);
- TIN (malla de triángulos irregulares);
- Modelo Digital de Elevaciones.

En 2.2.2, (pág. 121), “aplicación desarrollada en lenguaje de programación JAVA”, sirve para abrir un fichero .fds creado con la aplicación anterior y que contiene la superficie topográfica y la

masa arbórea con sus respectivos parámetros a falta de poder añadir datos meteorológicos, puntos de inicio del fuego y los datos de salida para visualización.

Los lenguajes de programación son VBA (Visual Basic for Applications) en la aplicación desarrollada en ArcGIS y JAVA para la otra aplicación.

Con los programas elaborados pasamos al tercer capítulo 3, (pág. 131). Se pone en práctica las herramientas que se han desarrollado en los capítulos anteriores. Se realizan tres estudios sobre el análisis del comportamiento del incendio.

En el capítulo tres se estudia, el caso de los incendios dominados por el viento, 3.1 (pág. 131). Es un tipo de servicio donde el aire actúa con una virulencia desproporcionada, consiguiendo hacer peligrar la vida de los intervinientes. El comportamiento de la combustión es similar al de una caldera, cuando se le incorpora un ventilador y se consigue aumentar el rendimiento de la misma. Con este análisis, que fue motivo de felicitación por parte de la Dirección del Servicio de Bomberos, se han impartido jornadas de formación para todo el personal con el objetivo de que los intervinientes en los incendios, sean conocedores de la problemática que pueden encontrarse cuando se abre una ventana o se queda abierta una puerta por detrás del personal que actúa.

En 3.1.1, (pág. 131), se muestra el “área de estudio”, con la geometría del escenario y los materiales que se queman. El apartado siguiente, “resultados obtenidos”, 3.1.2, (pág. 133), se divide en dos. El 3.1.2.1, (pág. 133), con “resultados mediante la simulación informática de incendios”, donde se obtienen unos resultados que permiten comprender el fenómeno de una manera muy clara y donde se observa las altas temperaturas, la velocidad del viento y la distribución de oxígeno en el interior del escenario. Con unas gráficas sobre la tasa de generación de calor y sobre el consumo de combustible. Con unas comparativas sobre la dirección de los humos en caso de rotura de cristales, de forma que nos indica que en caso de que el aire dirija el incendio, puede subir e incluso puede bajar por el interior del edificio.

En 3.1.2.2, (pág. 140), se trata, “resultados extraídos mediante experimento de laboratorio”, donde se compara el mismo proceso pero en una maqueta. Se coloca una carga de fuego a escala de la que hay en una vivienda y unos termopares para poder medir las temperaturas. Se comienza el desarrollo del proceso y tras la aplicación de un aporte de aire extra se observa que los resultados son similares a los obtenidos en la simulación. Esta circunstancia nos permite valorar la magnitud verdadera del proceso.

A continuación en 3.2, (pág. 145), se realiza el estudio de un caso con la “herramienta informática de la simulación del incendio forestal”. Se realiza pensando en la carencia formativa que tienen el personal que interviene en los siniestros forestales. Se centra en una serie de fenómenos que se producen en el monte y que hasta ahora no se han podido explicar de forma clara debido a la falta de una herramienta que permita exponer de una forma cuantitativa y cualitativa el problema. El análisis concluye con las conclusiones del incidente que sucedió en el municipio valenciano de Millares en Agosto de 1994, cuando seis brigadistas, un voluntario y un pastor, fallecieron en un fatal accidente por desconocer un fenómeno denominado “incendio eruptivo” y que se caracteriza por la rápida velocidad que adquiere y la insignificante sensación de peligro que transmite.

Suceso que volvió a repetirse el 17 de julio de 2005 y donde el fuego se cobro la vida de once personas, (dos agentes medioambientales y nueve miembros de retenes) mientras trabajaban en las tareas de extinción de un incendio declarado el día anterior en el municipio de Riba de Saelices (Guadalajara), por una barbacoa mal apagada, y que devasto 11.313 hectáreas.

Sigue el análisis con “las variables de salida” 3.2.1, (pág. 146), tras el modelado. Son muy relevantes las posibilidades gráficas de la aplicación, con los planos de lectura, isosuperficies, valores superficiales y así, hasta completar un conjunto muy importantes de datos. Con unas imágenes de la capacidad de representación.

En 3.2.2, (pág. 148), “ejemplos de aplicación”, se presentan una serie de casos donde se puede constatar las propiedades de la herramienta por los análisis de incendios tipos analizados. Se han analizado en función del terreno y del combustible. Por la aceleración por coincidencia de frentes de llamas. Efectos de los vientos locales y de ladera en la evolución del fuego. Un estudio de los frentes de llama. Quema selectiva como protección. El estudio de la interface urbano-forestal. Para finalizar con el comportamiento eruptivo de un incendio forestal y el análisis del incendio de Millares.

El capítulo tercero se completa con un estudio comparativo del pavimento de carreteras. Cuando se produce un incendio forestal, una de los elementos afectados y que son motivo de corte de comunicaciones son las carreteras. En este estudio, el análisis se traslada a donde este riesgo es de mayor virulencia. Se trata de los incendios en túneles. Por ese motivo, el apartado 3.3, (pág. 171). El primer párrafo se dedica a “los sistemas de seguridad en túneles”, 3.1.1, (pág. 171), se mencionan para indicar que los sistemas de seguridad se encuentran calculados para una potencia tipo de fuego, el problema se observa cuando esa potencia es superada.

Se complementa con “el desarrollo de los incendios en este tipo de instalaciones”, 3.3.2, (pág. 175), teniendo en cuenta las características del combustible y la evolución del incendio. En el apartado 3.3.3, (pág. 180), se analiza el comportamiento del pavimento. Hasta ahora se piensa que no existe contribución del material asfáltico en los incendios. A partir de estos análisis se pueden demostrar que cuando la radiación emitida por las llamas aumenta alcanzando a nivel de suelo los 40 Kw/m<sup>2</sup> el pavimento alcanza 300°C. Es en ese momento cuando el comportamiento del pavimento se comporta de forma diferente en función que se trate de hormigón o de mezclas bituminosas.

Si bien esta parte anterior es buena para el diseñador del proyecto, es necesario que el personal que interviene en el siniestro controle con qué condiciones se va a encontrar, por ello en el punto 3.3.4 (pág. 184), se matiza las “condiciones para los equipos de intervención”.

Muy importante es el párrafo que trata sobre las “condiciones de evacuación” 3.3.5, (pág. 192), sobre todo por salvar a las personas que se encuentran en el interior y para entender con que parámetros se mueven los bomberos en la instalación.

Para poder determinar el grado de peligrosidad de este tipo de incidentes se acude al punto 3.3.6, (pág. 196), “daños en instalaciones e infraestructuras”. Con estos datos se puede valorar que lo importante pasa por una buena prevención en estos casos.

Para finalizar se hace una recopilación sobre las “medidas a adoptar en caso de incendio”, 3.3.7, (pág. 197), con la intención de plasmar las pautas a seguir en caso de verse en este tipo de instalaciones cuando se produce un incendio.

El cuarto capítulo, 4, (pág. 202), se plasman las conclusiones. En 4.1, (pág. 202), las dedicadas a incendios en interiores, por el peligro que reviste para las personas que habitan estos edificios. En 4.2, (pág. 203), el tema de los incendios forestales, por la gravedad que reviste cada vez mayor, en referencia a las víctimas que se suele cobrar. Los incendios en túneles en 4.3, (pág. 205). Se realiza un estudio de incendios 4.4, (pág. 206), que han sucedido y que no han sido analizados. Para finalizar se recomiendan unas “líneas de investigación”, 5, (pág. 206), con las que poder continuar con el estudio de la simulación informática de incendio y poder mostrar análisis que son necesarios, para poder disponer de mejores criterios a la hora de actuar y de proyectar. Cumpliendo una máxima de la profesión y es la de que si se quiere tener un buen servicio de bomberos, previamente tiene que pasar por disponer de una buena formación y unas buenas herramientas de trabajo.

Con esta tesis se quiere conseguir que los estamentos públicos giren la vista hacia de la evolución de la ciencia y piense en incorporar medios y dinero en la prevención y en el posterior análisis de los incendios. Será la única forma de conseguir que los incendios dejen de ser una plaga maléfica.

#### 1.4. ESTADO DEL ARTE.

Se observa en estos últimos años un proceso creciente de sensibilización social sobre la importancia de la prevención de incendios, a lo que ha contribuido, sin duda alguna, no sólo sucesos con desgraciadas consecuencias en términos de vidas humanas, daños materiales y medioambientales, sino también el desarrollo y aplicación de un cuerpo reglamentario en los ámbitos de la edificación, la seguridad industrial, la normalización y la certificación, la prevención de riesgos laborales y la protección civil, [8].



*Imagen 1. Lapida recuerdo de los fallecidos en Millares de 1994.*

No obstante, y aunque la mayoría de los actores implicados coinciden en esta evolución positiva, resulta preocupante la situación de los grupos de población más vulnerable (menores de 5 años y mayores de 70), que siendo la séptima parte de la población, suponen más del 40% de las víctimas mortales por incendio.

Desde el mundo de la prevención, este proceso de evolución nos está llevando de la mera definición de unas condiciones de diseño a la gestión del riesgo de incendio en el ciclo de vida completo de una actividad: concepción, construcción, utilización, mantenimiento y posteriores modificaciones, todo ello en un contexto de creciente complejidad normativa.

D. Antonio Rodríguez de la Prada, director del INSHT (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo) [9], hace referencia y comenta que sin seguridad no hay calidad. Añade que la normativa contra incendios es sumamente compleja, puesto que en los últimos años hemos asistido a una constante promulgación de medidas que ha hecho aún más confuso, - por la excesiva acumulación - el marco de medidas contra incendios. La Ley de Ordenación de la Edificación (LOE) [10] y el Código Técnico de la Edificación (CTE) [11], forman el marco técnico jurídico, en cuanto a definición de actores, responsabilidades y procedimientos técnicos y administrativos, en España. La primera regula los tres documentos que constituyen los pilares normativos de la protección contra incendios: el citado CTE, el Reglamento de Seguridad contra Incendios en Establecimientos Industriales (RSCIEI) [12], y el Reglamento de Instalaciones de Protección Contra Incendios (RIPCI) [13].

Desde la Unidad de Calidad en la Edificación, D. Luis Vega Catalán, arquitecto y jefe de la Unidad, matiza que el nuevo CTE, [14] es el comienzo de una reglamentación basada en prestaciones. Surge además de cómo una necesidad de actualización de la reglamentación técnica y de adaptación al nuevo marco normativo europeo, como una respuesta moderna a la necesidad de convertir el ámbito reglamentario en una herramienta capaz de potenciar el desarrollo tecnológico y la innovación dentro del sector de la edificación, superando el carácter inmovilista de los tradicionales códigos prescriptivos.

Esta situación, nos lleva a pensar, en un panorama esperanzador, más aún teniendo en cuenta las modificaciones conceptuales introducidas en el Código Técnico de la Edificación en relación al diseño basado en el cumplimiento de objetivos (prestaciones), que aportan flexibilidad para la definición de soluciones a medida que optimicen las condiciones de seguridad en combinación con la funcionalidad de la actividad. Esta visión, sería deseable que se unificara en el resto de normativas relacionadas con la seguridad contra incendios, facilitando así la labor de todos los agentes involucrados. .

Relacionado con el tema, el desarrollo de la Norma Básica de Autoprotección, va a permitir disponer no sólo de edificios “seguros”, sino también de la estructura organizativa y procedimientos que garanticen la correcta aplicación de medidas de emergencia. Si bien, Fernando Bermejo, presidente de APICI [8], asegura que esta norma se ha quedado corta.

Con todo ello, aún existen ciertos aspectos susceptibles de mejora que pueden contribuir a impulsar el avance de la prevención de incendios en nuestro país, entre los que hay que destacar:

- Elaboración de programas de formación en el ámbito universitario que puedan proporcionar a los profesionales de la prevención de altos niveles de especialización que les permitan afrontar con garantías el nuevo marco técnico-normativo basado en prestaciones.
- Preparación y publicación de estadísticas que cuantifiquen las causas, el desarrollo y las consecuencias de los incendios y permitan un mayor conocimiento de los riesgos y la mejora de los mismos por medios eficientes.
- Aumento de la sensibilización de ciudadanos, trabajadores y empresarios a través de la formación y la información sobre los riesgos, las medidas de prevención y funcionalidad de medios de protección activa y pasiva contra incendios.
- Aumento del desarrollo de tecnologías, normativas y reglamentación de sistemas de protección que con un coste asumible por las diferentes actividades suponga una protección relevante a los usuarios de los edificios, especialmente en el uso residencial.

Para llevar a cabo estas mejoras es necesario entender cual es realmente la problemática de los factores que entran a formar parte de este estudio. La protección contra incendios no es una ciencia unívoca y con un solo manual de aplicación a cada una de las circunstancias que se suceden antes, durante o después del fuego. Además de la normativa y de los requisitos legales aplicables a la edificación, para poner en marcha un proyecto bajo el paraguas de la seguridad, entran en juego muchos otros elementos de deben facilitar la respuesta de una estructura y de las personas que en ella se encuentran cuando se produce un incendio.

Para finalizar hay que matizar la necesidad de una formación y especialización como claves de la nueva normativa. La evolución tecnológica y los permanentes cambios desafíos arquitectónicos no pueden quedar a merced de una ingeniería de protección contra incendios anclada en los conocimientos del pasado, cuando los únicos requisitos se basaban en el cumplimiento de las obligaciones legales. Los agentes responsables de la seguridad en edificaciones e infraestructuras trabajan cada vez más con elementos constructivos, materiales y configuraciones novedosas que requieren unos conocimientos paralelos en materia de protección contra incendios. Ambas áreas han de crecer de la mano, y eso sólo será posible si existe una formación adecuada que garantice la excelencia de los profesionales en este campo.

Kathy Ann Notarianni, Jefa de departamento de Ingeniería de Protección contra Incendios del Instituto Politécnico Worcester de Massachussets (EEUU). Afirma que la educación superior en la protección contra incendios es básica, [15]. Basa su afirmación en el crecimiento y el cambio de la protección contra incendios con nuestro mundo actual. La educación de los ingenieros en protección contra incendios es más importante que nunca, y su formación debe de tener en cuenta esos cambios.

También, Kodur, V. [16] nos comenta que la seguridad contra incendios estructurales es una de las principales consideraciones en el diseño y el mantenimiento de la infraestructura construida, sin embargo, hay serias limitaciones en los enfoques actuales de la seguridad contra incendios estructurales y graves lagunas de conocimiento en la literatura. Se remarca que hay existen dos razones principales de estas limitaciones. Una la falta de actividades de investigación importantes en este campo y la segunda la falta de programas educativos y de formación en las universidades.

#### **1.4.1. EL PROBLEMA DEL INCENDIO.**

Según Utiskul [17], la importancia y la necesidad que tiene el hombre de entender y dominar el fuego para poder evitar o, por lo menos reducir sus efectos, dado el costo que en vidas humanas representa, además de las grandes pérdidas económicas y culturales que pueda suponer, se ve reflejada en cualquier país desarrollado, con un intento por mejorar su nivel de estudio e investigación, dejando patente en sus Códigos y Reglamentos esta preocupación, al tratar de dar cumplimiento a las regulaciones acerca de la seguridad y protección en los edificios contra incendios.

Cantidades importantes de dinero se han invertido en el estudio e investigación del fenómeno de la combustión, de las llamas [18] y su propagación. Otros estudios se han centrado en las columnas térmicas, composición de los humos, la interacción de la combustión con los rociadores [19] y demás productos resultantes de la combustión, en cómo se efectúa la transferencia de calor, el efecto de la ventilación sobre la intensidad del fuego, probabilidades de que se produzca la combustión súbita, etc. A pesar de esta preocupación, el nivel actualmente alcanzado sobre el conocimiento del fuego es todavía escaso, aunque se haya podido conseguir un cierto avance en el desarrollo de la tecnología destinada a combatir sus efectos.

En ocasiones, esta base científica conduce, a que resultados de análisis sobre incendios reales pongan en entredicho criterios ya muy establecidos, lo que trae en consecuencia modificaciones reglamentarias que, erróneamente, suele ser interpretada como causa prioritaria del lento avance en la lucha por reducir o suprimir los efectos del fuego.

Esta dinámica puede llegar a resultar positivos al provocar una inquietud e incluso un estímulo en el trabajo de investigación siendo en todo caso, otras e importantes las razones que están frenando la puesta en práctica de los conocimientos tecnológicos logrados; razones de orden social, económico, comercial y político.

La postura de considerar el incendio como una posibilidad demasiado remota para tener que darle una respuesta activa, es el primer factor que nos encontramos de una manera muy generalizada. Esta circunstancia obstaculiza el proceso educativo e impide poner en práctica lo que obstaculiza los conocimientos adquiridos.

El gasto que, en ocasiones, puede presentar el costar unas instalaciones de protección contra incendios, hace a veces preferible aceptar un riesgo calculado que cubra sus efectos mediante póliza de seguros, lo que conduce a que se puedan producir siniestros de grandes proporciones, ante la engañosa valoración comercial de su menor costo. En la actualidad, esto no sucede tratándose de empresas aseguradoras de solvencia, ya que sus criterios van a favor de la seguridad, al primer a los clientes con cuotas muy inferiores en función de los medios de protección de que se dispongan, llegando a grandes penalizaciones, e incluso a no cubrir con sus pólizas la evidencia del riesgo de incendio que vaya unido a la inexistencia de medios de protección.

Otro factor que está frenando este avance es el político, ya que es una decisión política la que fija el costo que una nación puede dedicar a la seguridad, estableciendo el margen que se quiere cubrir y reflejándolo en sus normas y reglamentos.

Hay un detalle significativo y es el que son poco los países que desde la esfera política son conscientes de la magnitud del problema, de cómo es mayor el número de víctimas por incendios que el debido a colapsos en estructuras, y como por inhalación de gases tóxicos mueren más personas que a causa de otros aspectos técnicos más regulados y a los que normalmente se les dedica más atención.

#### 1.4.1.1. PROBABILIDAD DE LOS SINIESTROS.

Es prácticamente imposible conocer e investigar todos los factores asociados al fenómeno del fuego, lo que dificulta el poder lograr una mayor prevención y, en todo caso, un mayor conocimiento de la evolución en su desarrollo, caso de producirse. Son muy altas las cifras invertidas por algunos países en esta tarea de investigación.

El edificio constituye ya, por sí mismo, esa infinita combinación de factores, con independencia de los elementos o materiales que posteriormente contenga o de las actividades que se desarrollen en su interior; es una integración de materiales susceptibles de arder en mayor o menor grado y de una serie de componentes, equipos o instalaciones, susceptibles de aportar la fuente de ignición en un incendio, con o sin intervención humana.

Del análisis efectuado en un número importante de incendios, se ha obtenido como conclusión una serie de factores que, de forma más directa, permiten que el fuego se desarrolle y cause grandes pérdidas: defectos constructivos que favorecen la propagación del fuego, almacenamiento indebido en el interior del edificio, falta de medios de protección y el factor humano.

Como defectos constructivos más frecuentes han dado lugar a la propagación del incendio, se pueden citar:

- La falta de una lógica compartimentación con elementos resistentes al fuego en grandes espacios.
- Cuando ha existido esa compartimentación no ha cumplido su función, debido a que las puertas o elementos de cierre, en su caso, habían quedado bloqueadas en posición de abiertas.
- La propagación vertical del fuego a través de los huecos de fachada, al no interponerse ningún elemento cortafuego entre ellos.
- La propagación a través de las cajas de escaleras sin compartimentar, así como del hueco del ascensor.
- La propagación a través de pisos, por huecos de paso de cañerías y conducciones.
- La gran combustibilidad de los materiales de acabado superficial o de revestimientos en paramentos verticales en techo.

En almacenamiento es importante en el desarrollo de un incendio cuando se hace de forma poco adecuada, al apilarse en grandes alturas o junto a ventanas, o cuando al tratarse de materiales combustibles o inflamables, no se acompaña de un mantenimiento de la adecuada protección, evitando que se derrame, etc.

Hay un denominador común en los siniestros. La mayoría se producen cuando el personal se encuentra despierto realizando actividades normales, de lo que se deduce que no son conscientes del peligro, o lo son y no ponen los medios adecuados para evitarlo.

La ausencia o el mal funcionamiento de los medios de protección, como sistemas de rociadores, ha dado lugar a que se produzcan incendios donde fácilmente hubieran sido evitados.

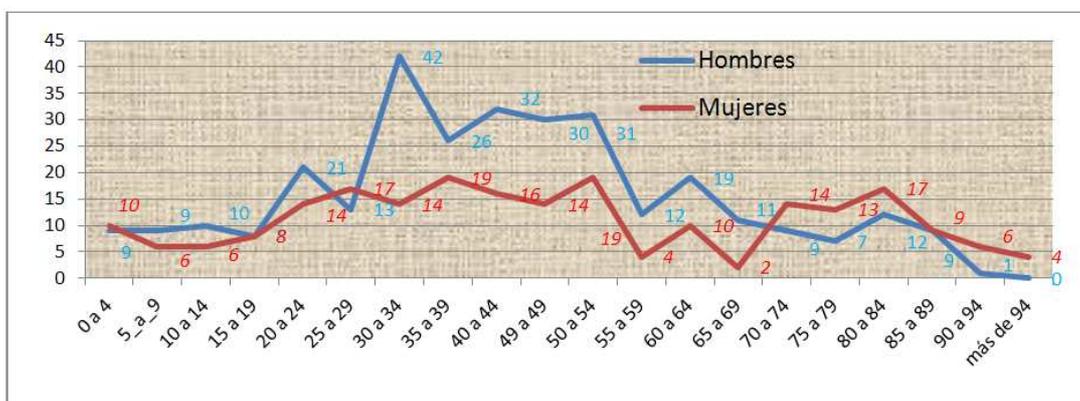
El factor humano, frecuentemente causa directa de un gran porcentaje de incendios ocurridos, también lo es de una forma indirecta, cuando el hombre no alcanza a percibir la importancia que tiene como riesgo de incendio, cualquiera de los factores anteriormente citados.

#### 1.4.1.2. PANORAMA ESTADÍSTICO.

Las variables consideradas para realizar este estudio extraído de un trabajo [20], realizado por la Asociación Profesional de Técnicos de Bomberos y la Fundación Mapfre ha sido la siguiente:

- Características de la persona afectada.
- Características temporales.
- Características de lugar.

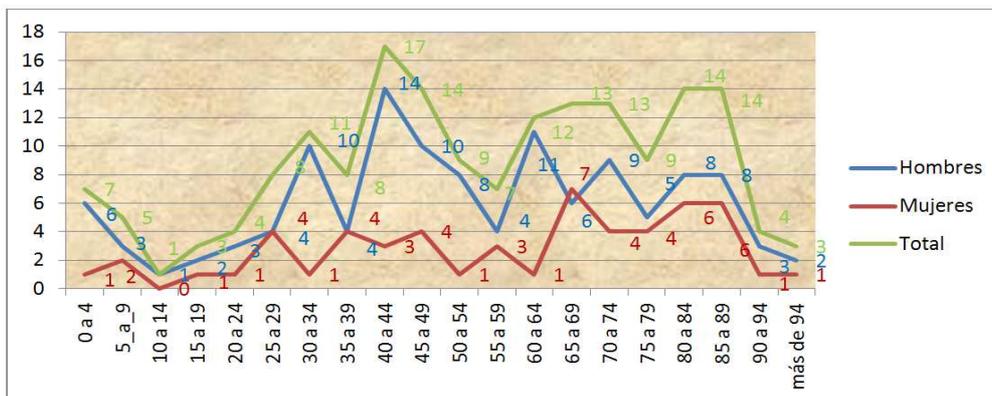
La distribución de víctimas por características del afectado nos permite tener el conocimiento de la edad y el sexo. Permitirá establecer grupos y prioridades a la hora de desarrollar actividades de prevención dirigidas a la formación.



**Gráfica 1. Víctimas lesionadas por edad.**

## INTRODUCCIÓN

En la gráfica 1, se observa, que el segmento de edad que sufre más lesiones en los incendios es el de 20 a 65 años de edad. En prácticamente todas las franjas de edad, el número de heridos por incendio y explosión es mayor entre los hombres que entre las mujeres y tan solo a partir de los 74 años el número de mujeres heridas es superior al de los hombres, cuando la población femenina supera ampliamente a la población masculina.



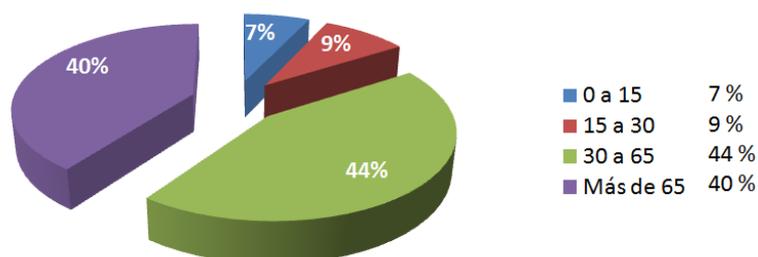
**Gráfica 2. Víctimas mortales por edad y sexo.**

En la Gráfica 2, se muestra que la mayor mortalidad se encuentra en la franja de 40 y 45 años, debido al elevado número de fallecidos entre los varones de esa edad.

Grupo por edades	Porcentaje de víctimas mortales	Índice por millón de habitantes
0<15	7 %	1,6
15<30	9 %	1,97
30<65	44 %	4,1
65>	40 %	8,8

**Tabla 1. Grupos de edades y porcentajes de víctimas mortales.**

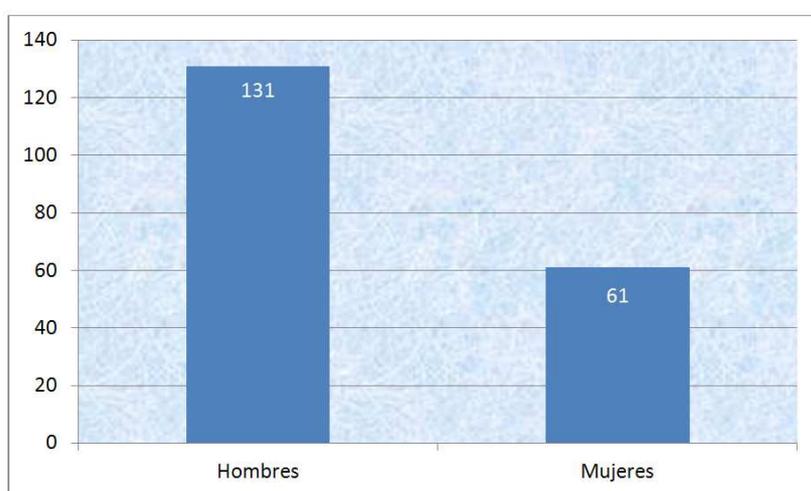
El objetivo de la tabla 1, es poder comparar los datos de España con otros de carácter internacional. Por ello se han diferenciado a la población en los siguientes grupos.



**Gráfica 3. Víctimas mortales por grupos de edad.**

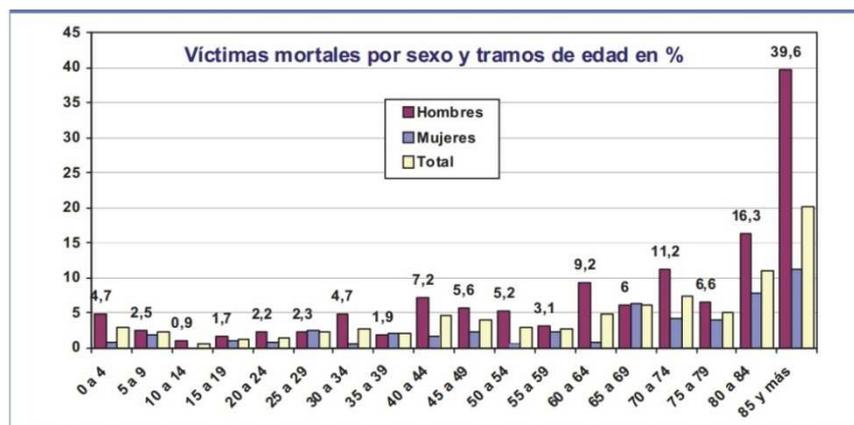
Al determinar el índice por millón de habitantes por grupos de edad, se puede apreciar en la gráfica 3, la vulnerabilidad de los mayores de 65 años que se vienen apreciando en las estadísticas generales de incendios de los últimos años. Es fácil concluir que se considera necesario más campañas de prevención dirigidas a las personas mayores de 65 años.

Referente a la distribución de víctimas mortales por sexo, de las 192 víctimas mortales producidas se distribuyen irregularmente en cuanto a varones y hembras. El número de hombres fallecidos como se puede observar en la gráfica 4, asciende a 131 y el de mujeres a 61. En el gráfico se visualiza que, como suele ser frecuente en las estadísticas de incendios, el número de fallecidos varones en los incendios supone el 68%, notablemente mayor que los fallecimientos del sexo femenino en incendios, siendo el 32% de las víctimas mortales.



**Gráfica 4. Víctimas mortales por sexo.**

Con el objetivo de obtener una referencia más precisa sobre la vulnerabilidad de las distintas franjas de edad, se debe relacionar el número de fallecidos en cada tramo de edad con la población que corresponde a cada tramo, gráfica 5, obteniéndose así el índice de muertos por millón de habitantes en tramos de cinco años y por sexos. Esto nos proporciona el resultado de que los españoles más vulnerables a los incendios son los hombres de más de 80 años. Un varón de más de 85 años en España tiene tres veces más posibilidades de morir en un incendio que una mujer de la misma edad. Se debe adoptar medidas especiales para prevenir los incendios en los edificios donde se alojen personas mayores. El índice medio de víctimas mortales por millón de habitantes es de 4,1.

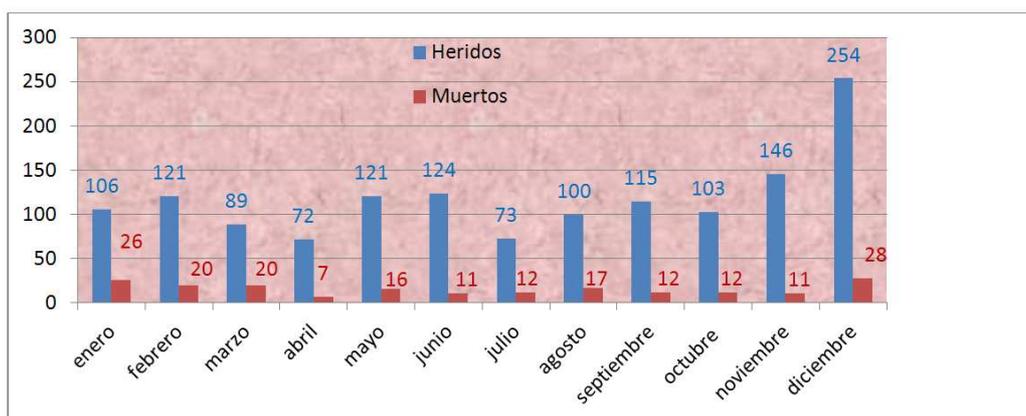


**Gráfica 5. Víctimas mortales por grupos de edad y sexo.<sup>1</sup>**

Referente a la distribución de víctimas atendiendo a variables temporales, uno de los aspectos interesantes de conocer es cuándo tienen lugar los siniestros que producen víctimas. Con este fin, las variables de tiempo que se han tenido en cuenta en el estudio son:

- El mes en que se producen los incendios y explosiones,
- El día de la semana,
- La hora del día.

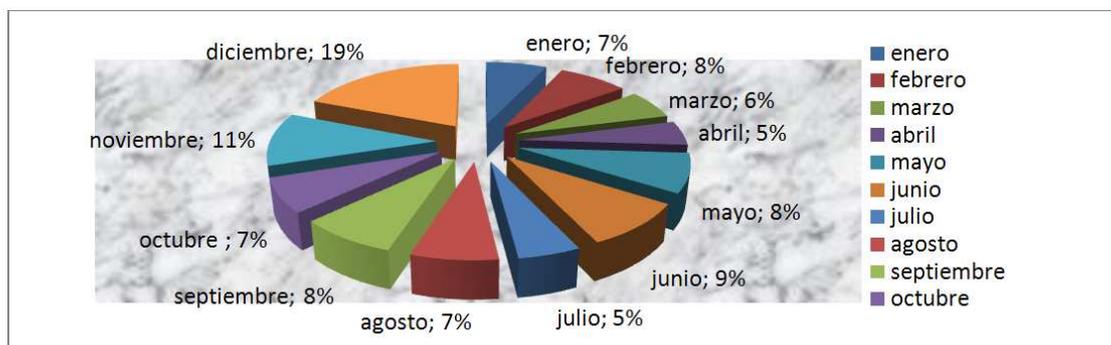
En cuanto a la distribución por meses, resulta notable que es el mes de diciembre, con 254 lesionados y 28 muertos el que destaca como el mes en que se producen muchas más víctimas, tanto lesionados como fallecidos, que el resto de los meses, triplicando los resultados del mes de abril, que es el de menor número de lesionados y muertos por incendio y explosiones, gráfica 6. El segundo mes con más víctimas totales es el mes de noviembre.



**Gráfica 6. Víctimas por meses.**

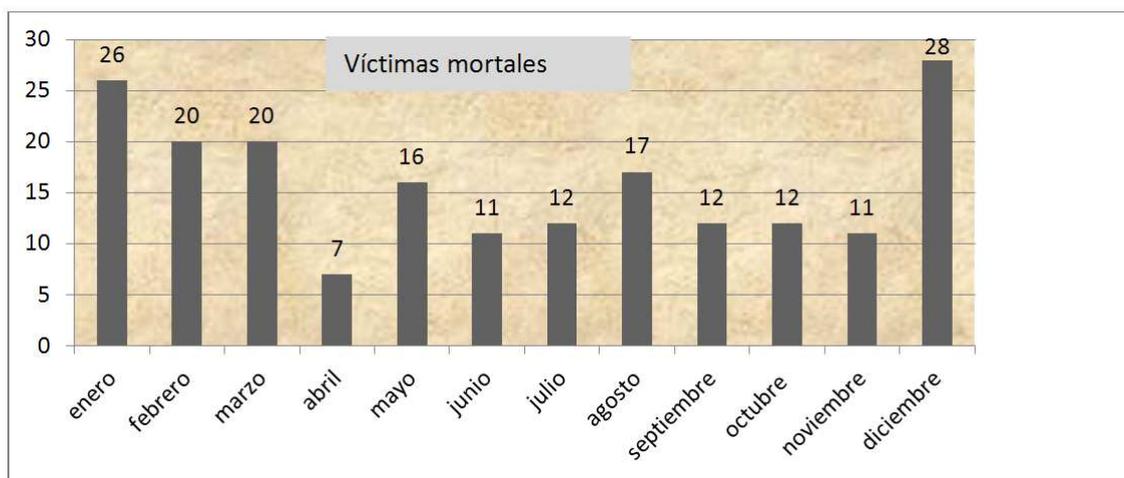
<sup>1</sup> El valor indicado corresponde al índice de fallecidos por millón para "hombres".

El 28% de todos los lesionados se producen entre los meses de noviembre y diciembre, casi la tercera parte de todos los heridos del año 2010, gráfica 7.



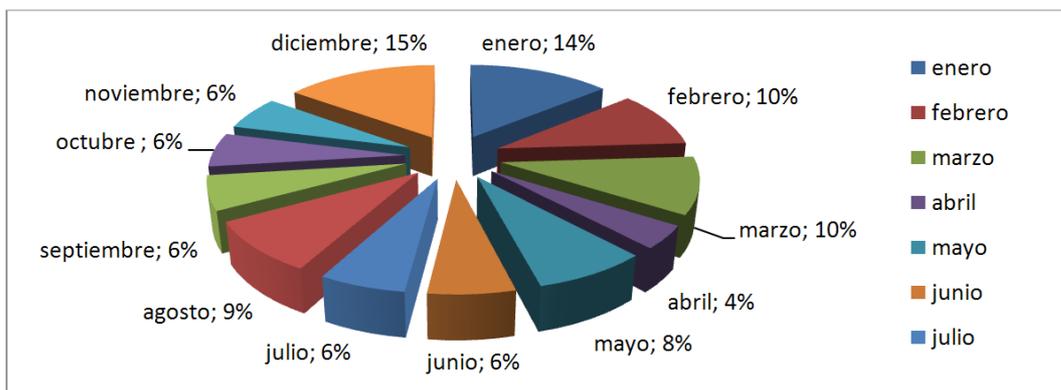
**Gráfica 7. Número de lesionados por meses.**

Según el análisis de las víctimas mortales por mes de siniestro atendido, se proporciona la información de que los meses en que se producen más víctimas mortales son los correspondientes a la estación invernal, gráfica 8.



**Gráfica 8. Víctimas mortales por meses.**

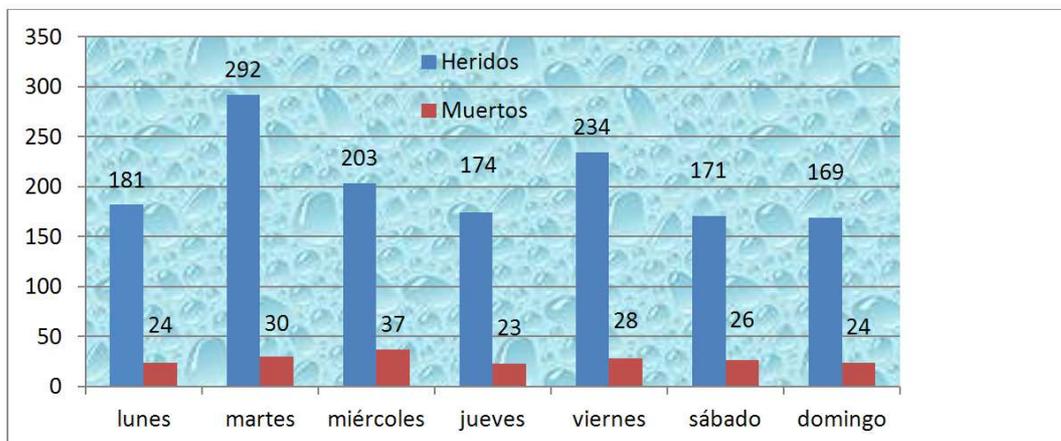
En el análisis de los porcentajes, se puede apreciar que entre diciembre, enero, febrero y marzo se producen el 49% de las víctimas mortales, prácticamente la mitad de todos los del año. Por debajo, destaca el mes de abril como el mes en que menos muertos se producen, la cuarta parte que en diciembre, gráfica 9.



**Gráfica 9. Porcentajes de víctimas mortales por meses.**

Esto podría explicarse debido al uso de aparatos productores de calor (como veremos más adelante) y por el mayor número de horas que la población permanece en sus hogares (mayor actividad doméstica que en otras estaciones).

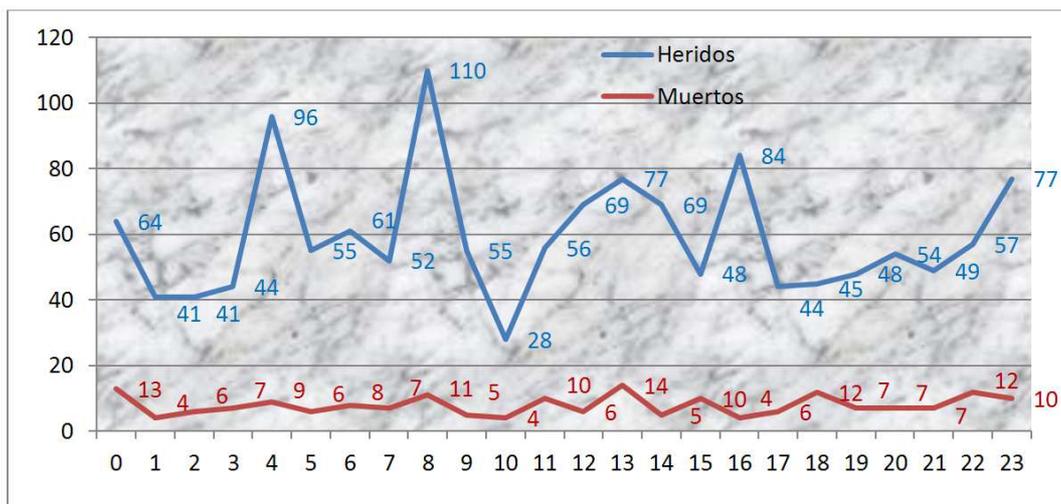
En cuanto a la distribución de víctimas por día de la semana, los días más trágicos, en los que más víctimas mortales se han producido son los miércoles y los viernes y los días con más víctimas lesionadas son los martes y los viernes. No se constata una relación causa efecto entre el número de víctimas y el día de la semana, aunque es perceptible un menor número de víctimas lesionadas los fines de semana: los sábados y domingos, gráfica 10.



**Gráfica 10. Número de víctimas por día de la semana.**

La distribución por franja horaria indica una menor cantidad de incidencias entre las 6 de la tarde y las 4 de la mañana, gráfica 11.

. Por lo que se refiere al reparto de personas fallecidas es muy irregular, no encontrándose una pauta respecto a las horas del día. Las horas más críticas, con más de 10 muertos, se reparten a lo largo de todo el día y la noche sin relación causal aparente.



**Gráfica 11. Víctimas por franja horaria.**

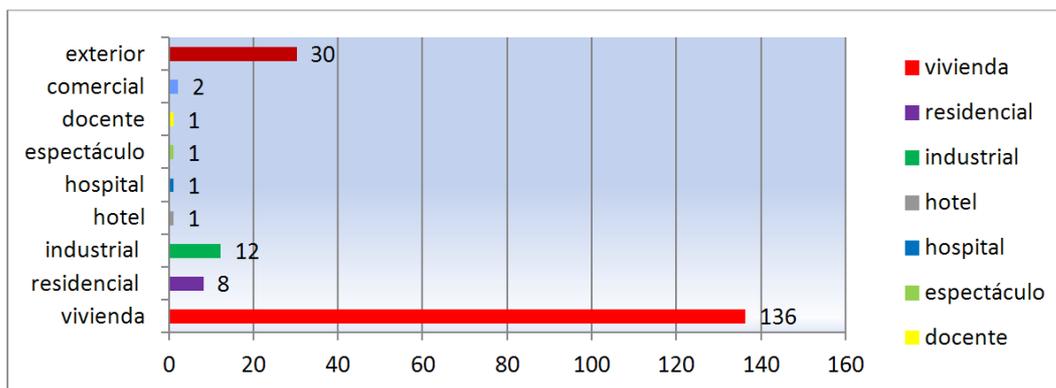
Resultan muy interesantes las circunstancias de las víctimas. Analizar cuáles son algunas de las circunstancias del incendio y de las que rodean a las víctimas mortales en la escena del incendio que les produjo la muerte. Se analizan las siguientes:

- Tipo de edificio,
- Planta del incendio en el que se produjo el incendio,
- Tipo de ocupante del edificio,
- Si la víctima vive sola.

A la hora de analizar el lugar donde se produjo el incendio se han considerado:

- Edificios, en este apartado se incluyen los siniestros que han tenido lugar en: viviendas, uso residencial (estudiantes, tercera edad,...), hotel, hospital, espectáculos, docente, comercio e industrial.
- Exterior, que incluyen los producidos en vía pública, en montes, campo...

Los datos obtenidos reflejan que se han producido 162 víctimas mortales en edificios, lo que suponen el 84,4% del total de las muertes. Dentro de esta categoría, las muertes en edificios de viviendas son las que mayor valor han registrado con 136, lo que supone el 71% de todas las muertes, y el 83,4% respecto el total de víctimas mortales producidas en edificios. Por su parte, en el exterior se han producido el 15,6% de los fallecidos, gráfica 12.

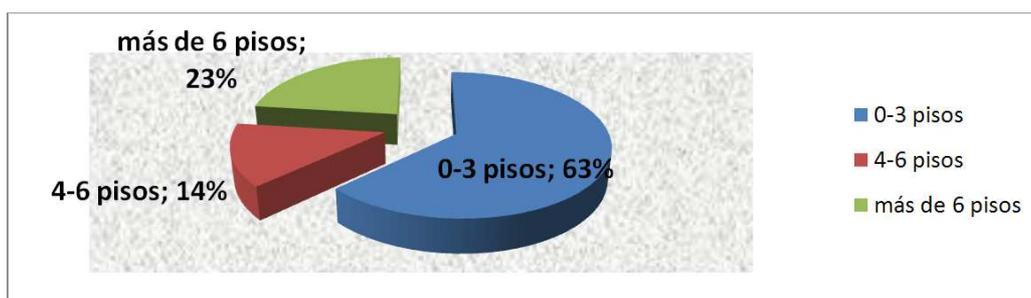


**Gráfica 12. Víctimas mortales por uso del edificio.**

La segunda categoría de edificación que ha arrojado más víctimas han sido los edificios de uso industrial con 12 muertes, es decir, el 7,6 de las muertes.

Se puede observar que los hogares son los lugares donde más incendios se producen, por ello se hace necesario reflexionar sobre el número de viviendas que, por su antigüedad, no tienen la obligación legal de ser adaptadas a las nuevas normativas.

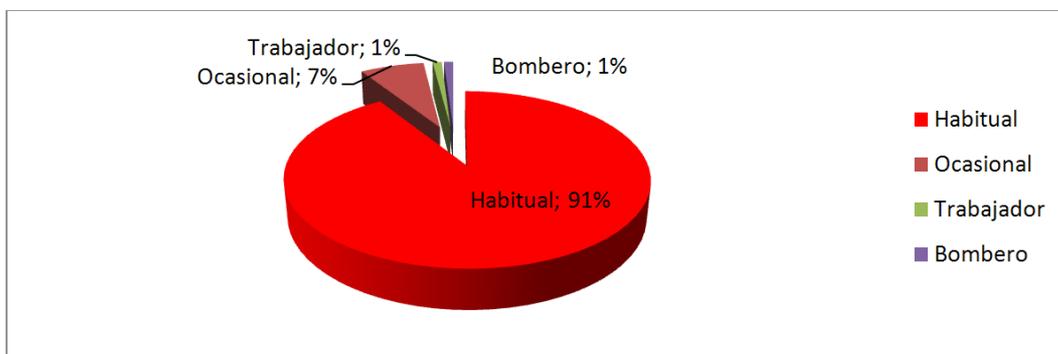
Para las muertes por planta de la vivienda, en la gráfica 13, se representa la distribución porcentual de víctimas mortales en edificios de viviendas en función de la planta del edificio en que se produce el incendio. A pesar de que popularmente se piensa que los pisos altos son más peligrosos desde el punto de vista de la seguridad contra incendios, el 63% de las víctimas se produce entre la planta baja y los tres primeros pisos, mientras que solo el 23% de las muertes se producen por encima de la sexta planta.



**Gráfica 13. Porcentaje de víctimas mortales por número de planta.**

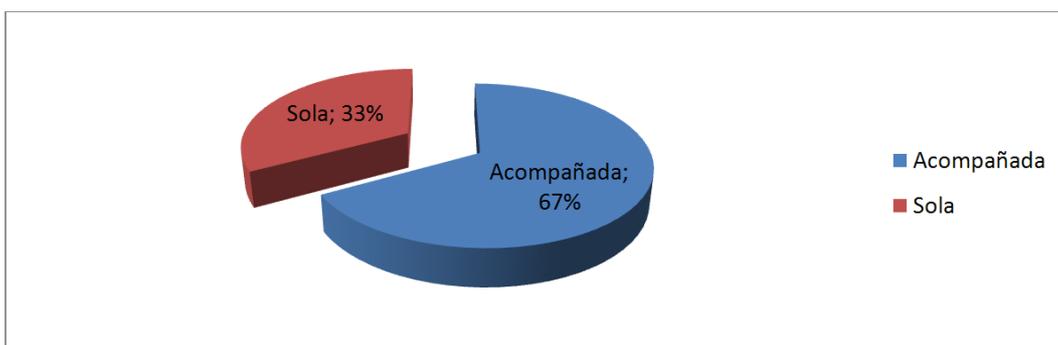
Para el tipo de ocupante del edificio se distingue entre dos características. La primera es su relación con la vivienda, es decir, si era habitante de la misma, si era un visitante u ocupante ocasional, si se trata de un trabajador o si es un bombero o rescatados. Y la segunda se la víctima vivía sola o en compañía de otras personas.

Analizando exclusivamente los 136 fallecimientos en edificios de vivienda nos encontramos, como parece lógico que la gran mayoría, el 91% de los fallecidos, eran ocupantes habituales de la vivienda, gráfica 14.



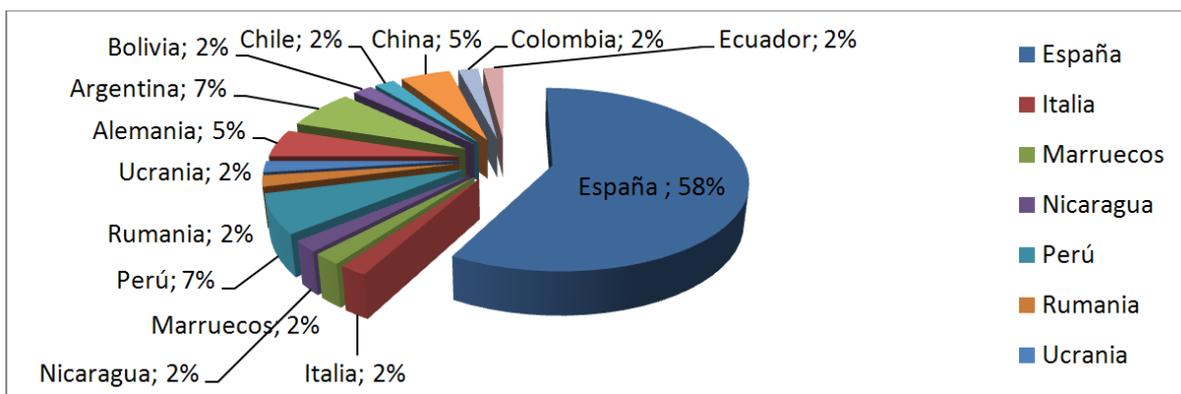
**Gráfica 14. Porcentaje según tipo de ocupantes de la vivienda.**

En el análisis del dato de si la víctima vivía sola o en compañía, se muestra que vivía sola en el 33% de los casos en lo que se ha conocido el número de ocupantes de la vivienda en la que se ha producido un fallecimiento, gráfica 15.



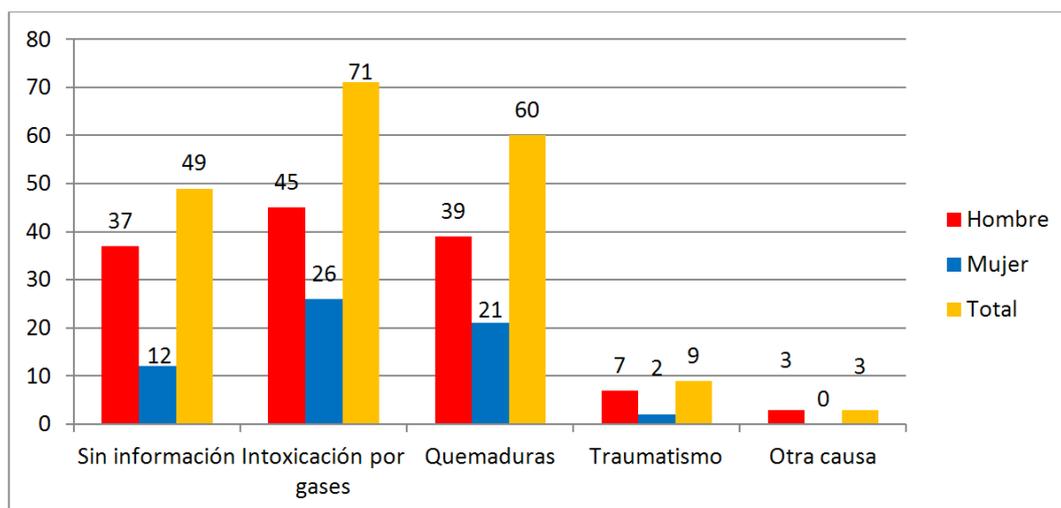
**Gráfica 15. Porcentaje según forma de vida familiar: sola o acompañada.**

En los casos en que ha conocido la nacionalidad de la víctima, se muestran los siguientes datos, el 58% de los fallecidos son de nacionalidad española, seguidos de un 7% de peruanos y de argentinos y de un 5% de alemanes y de chinos. El resultado de esta estadística pone de manifiesto que en los incendios en España mueren un gran número de ciudadanos de todas las nacionalidades que están residiendo en España, gráfica 16.



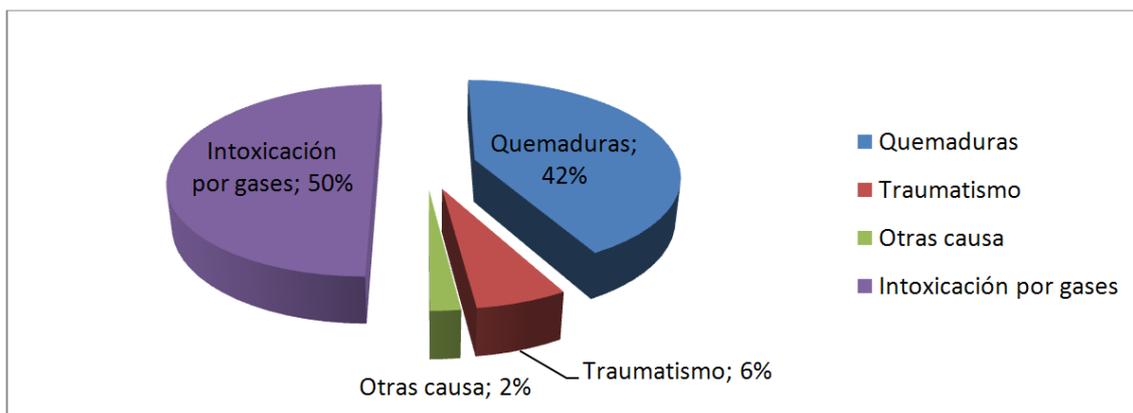
**Gráfica 16. Porcentaje según nacionalidades del ocupante.**

No se dispone de los datos fehacientes de la causa de la muerte. Hasta abril de 2012 el INE no ha proporcionado los datos referentes a los fallecidos en incendios en 2010, por lo representamos las causas probables de la muerte en valores absolutos, totales y por sexos, incluyendo el número de fallecimientos de los que no disponemos de datos de la causa, gráfica 17.



**Gráfica 17. Causa probable de la muerte.**

En los casos en los que se ha registrado la causa del fallecimiento, la causa más probable de muerte fue la intoxicación por gases que produce el 50% de las muertes. La segunda causa fueron las quemaduras en el 40% de los casos y la tercera los traumatismos en el 7% de los casos, gráfica 18.

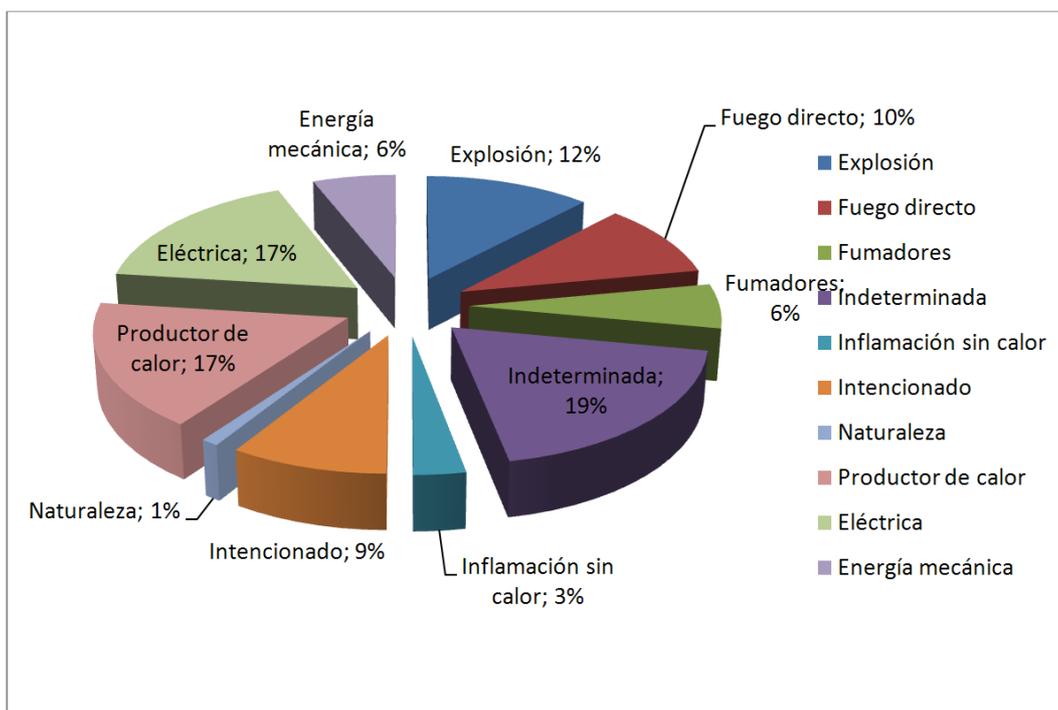


**Gráfica 18. Porcentaje causa probable de la muerte.**

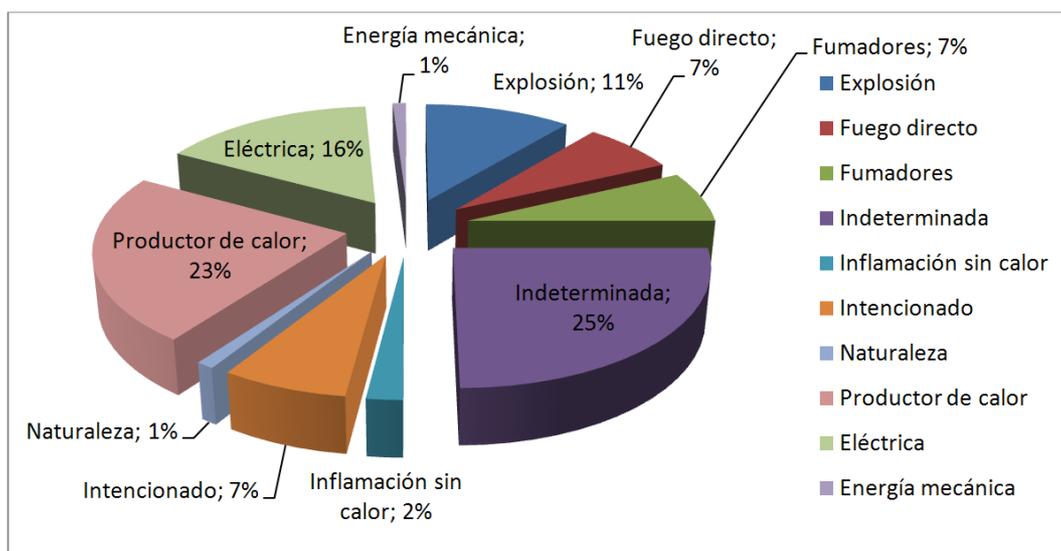
Se ha podido conocer de forma aproximada la causa del incendio en el 60% de los casos. Con estos datos podemos confeccionar los siguientes gráficos en los que se representan porcentualmente la

- Causa del origen de todos los incendios con víctimas mortales,
- La causa del origen de los incendios en el conjunto de edificios,
- La causa del origen de los incendios en viviendas.

Hay un gran número de incendios en los que la causa del incendio es indeterminada. En todos los casos la causa que ha provocado más incendios con muertes han sido los aparatos productores de calor y la segunda la electricidad, gráfica 19 y 20.

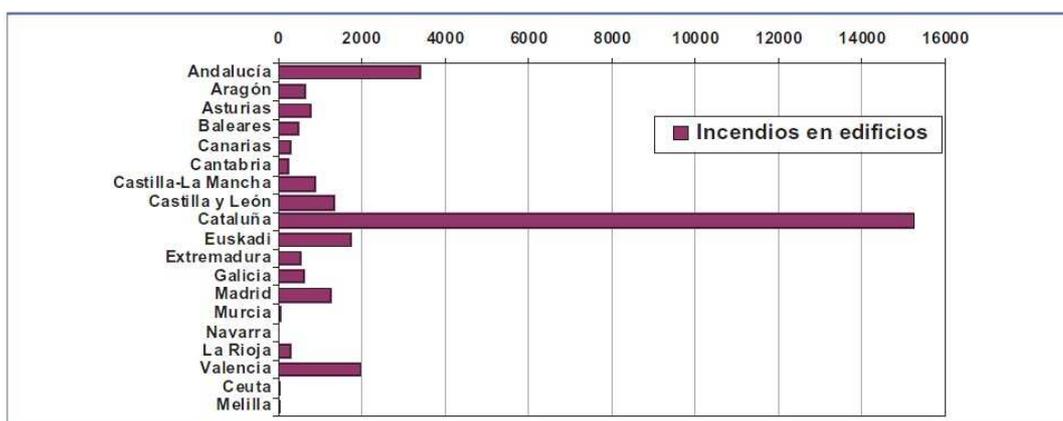


**Gráfica 19. Origen de los incendios con víctimas mortales.**



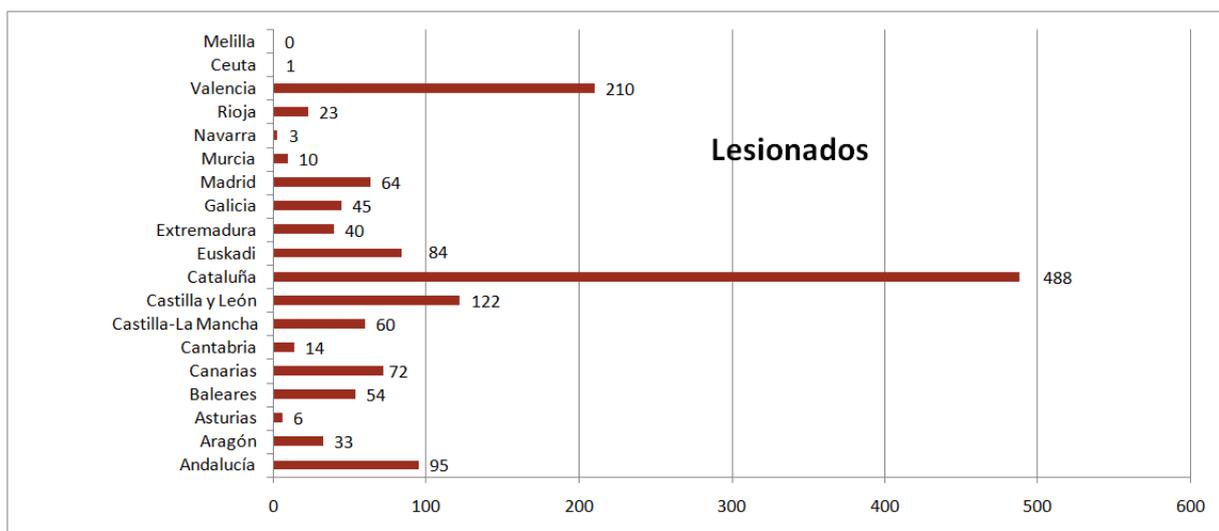
**Gráfica 20. Origen de los incendios con víctimas mortales en viviendas.**

Las Comunidades autónomas disponen de procedimientos de recogida de datos poco homogéneos por lo que a veces la comparación entre las distintas CCAA no resulta muy fiable. Se muestra como ejemplo el gráfico 21, 22, 23 y 24 que recoge los incendios en edificios por CCAA, si bien es cierto que, por ejemplo, Cataluña tan solo tiene 2 servicios de bomberos que cubren todo su territorio y Andalucía tiene 27 (el 20% de todos los servicios del Estado) con lo que se complica mucho más la recogida y tratamiento de datos. En los siguientes apartados se muestran gráficos y tablas de las CCAA con datos de los incendios y sus víctimas que aportan información más detallada en función de las distintas variables consideradas.

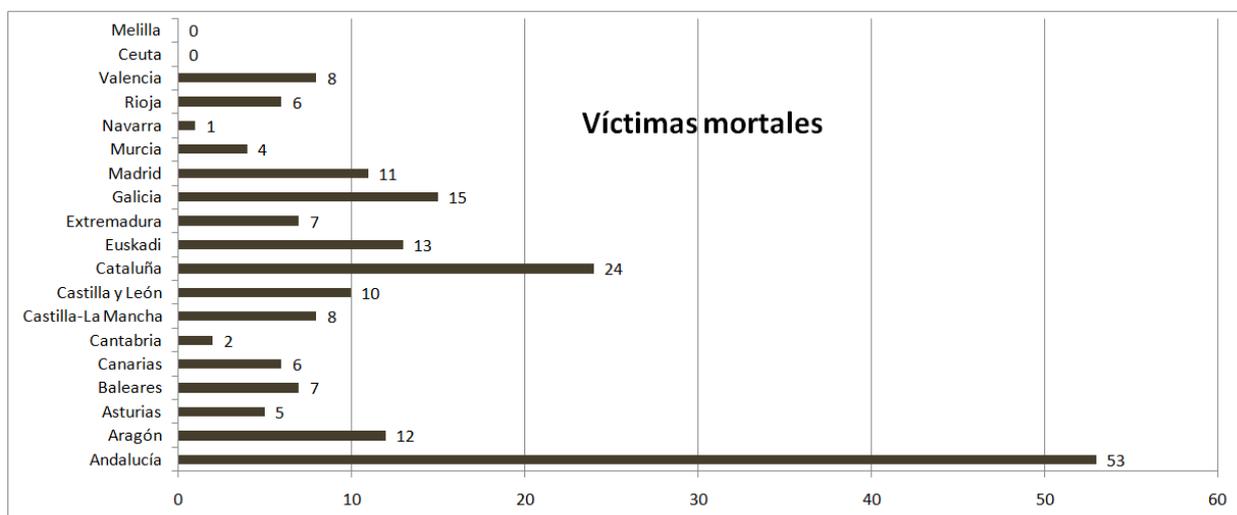


**Gráfica 21. Incendios en edificios por CCAA.**

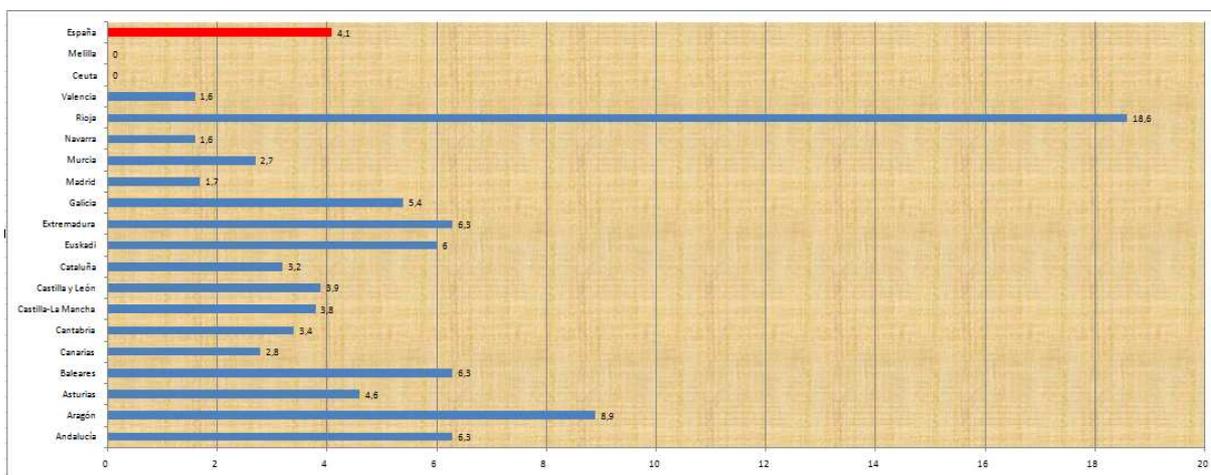
INTRODUCCIÓN



Gráfica 22. Víctimas lesionadas por CCAA.



Gráfica 23. Víctimas mortales por CCAA.



Gráfica 24. Víctimas mortales por millón de habitantes.

### 1.4.1.3. FUEGO REAL.

Según Collier [21], el fuego real en una edificación es muy complejo. Se define el incendio como la combustión no deseada de uno o varios materiales. Para poder entender el fenómeno del fuego y los procedimientos de prevención, control y extinción de los incendios es necesario conocer los principios básicos de la física y de la química. En particular hay que conocer las propiedades de la materia y los fenómenos físicos asociados al calentamiento de los elementos constructivos. En este apartado del trabajo se describe y se explican los conceptos y parámetros principales que sirven para una mejor comprensión de un incendio y de su análisis.

El fuego es una reacción química exotérmica de oxidación-reducción que necesita la unión de cuatro elementos: un combustible, un comburente, una fuente de calor y la existencia de una reacción en cadena. Las condiciones para que un fuego se produzca son las siguientes:

- Oxígeno suficiente para permitir la combustión,
- Calor para que el combustible alcance la temperatura de ignición,
- La presencia de un combustible.

Si falta alguno de estos elementos, el fuego se apaga.

#### 1.4.1.3.1. Fases del desarrollo.

En el desarrollo de un incendio pueden distinguirse varias fases:

1. Fase de ignición, según el aumento de temperatura, el combustible empieza a desprender partículas invisibles al ojo humano, marca el inicio del fuego.
2. Fase de propagación o crecimiento. La concentración de partículas ascendentes, que se desprenden del material, forma humos y vapores que ya son visibles. El combustible se quema creando gases calientes. Estos gases forman un penacho de humo y sube hasta el techo, dividiendo el compartimento en dos zonas, una zona alta de humos calientes y una zona baja, fría y clara de gases de combustión. Esta situación puede después evolucionar de dos formas diferentes:
  - a. La zona caliente va creciendo y su temperatura aumenta hasta la desaparición de la zona fría. En este caso la temperatura se considera como homogénea en todo el recinto y causa la ignición de la totalidad del combustible presente en el compartimento. Este fenómeno [22], se llama flash-over o fuego totalmente desarrollado.

- b. El aumento de temperatura es demasiado lenta para llevar al flash-over, porque la propagación es muy lenta o porque el combustible y el fuego queda localizado.
3. Fase de desarrollo, en presencia de la cantidad de oxígeno necesaria los vapores se transforman en llamas, con gran aumento de los humos y desprendimiento de calor.
4. Fase de crecimiento o enfriamiento. Durante esta fase la temperatura puede seguir siendo bastante elevada y afectar a la estructura.

La duración de cada una de estas fases depende de la clase de material y de las circunstancias en cada momento.

La velocidad de propagación del fuego viene determinada por la superficie de contacto del combustible con el comburente, por la propagación de ambos y por la temperatura.

Los gases combustibles y los vapores desprendidos de líquidos combustibles nos dan el mayor grado de mezcla con el aire. En determinadas proporciones pueden provocar explosiones, al igual que líquidos o sólidos combustibles pulverizados.

Las brasas son productos de combustiones incompletas de algunos sólidos de alta temperatura de oxidación, las cuales forman posteriormente las cenizas.

#### **1.4.1.3.2. Física y Química del fuego.**

Para poder entender el fenómeno del fuego y los procedimientos de prevención, control y extinción de los incendios es necesario conocer los principios básicos de la física y de la química. En particular hay que conocer las propiedades de la materia y los fenómenos físicos asociados al calentamiento de los elementos constructivos.

Durante la fase de pre-flash-over, el fuego puede representarse con este esquema simplificado,



**Figura 1. Elementos principales de un fuego real.**

Se desarrolla un fenómeno interdependiente en cada zona.

Se produce la descomposición y/o evaporación del combustible sólido, dando lugar a los gases combustibles a raíz del flujo de calor de la llama y del entorno inmediato del fuego. Este fenómeno es el que se denomina pirolisis. La reacción de estos gases con el oxígeno produce gases de combustión y calor. Este calor es el que mantiene el fenómeno. La llama ocupa la zona donde el combustible gaseoso y el oxígeno se encuentran mezclados. Los productos de la combustión forman un penacho y suben hasta el techo.

El calor de combustión,  $H_c$ , es la energía liberada por este proceso por una unidad másica de combustible.  $H_{c, net}$ , es la cantidad total de energía que puede liberar el combustible, considerando una combustión completa, para ejemplo el calorímetro bajo alta presión y en presencia de oxígeno puro. En fuegos reales, la energía liberada es más baja, dado que no todo el combustible se quema. El calor de combustión efectivo es el ratio entre el calor liberado y el ratio de pirolisis.

$$H_{c, \text{eff}}(t) = \frac{RHR(t)}{\dot{m}(t)} \quad [MJ/kg] \quad [E-1. 1]$$

La eficacia de la combustión se representa con el factor  $m$ :

$$m(t) = \frac{H_{c, \text{eff}}}{H_{c, net}} \quad [E-1. 2]$$

La velocidad de pirolisis  $\dot{m}(t)$ , representa la cantidad de combustible sólido que se transforma en combustible gaseoso por segundo, en [kg/s]. Es también el ratio de pérdida de masa del combustible. La Ecuación [E-1.1] solamente es válida cuando el oxígeno no limita la combustión. Es muy común de encontrar “velocidad de combustión” como sinónimo de velocidad de pirolisis, pero en condiciones de baja ventilación estas dos velocidades pueden no ser iguales.

En un fuego, cuando se desarrolla en un edificio, las fases de su desarrollo son controladas por diferentes parámetros dados por el entorno del fuego.

### **1.4.1.3.3. Elementos de un incendio.**

#### **1.4.1.3.3.1. . Carga de Fuego.**

La carga de fuego en un sector de incendio está definida como la energía total cedida en caso de incendio. Parte de esta energía sirve en calentar el recinto y el resto se pierde por las aperturas. Esta carga de fuego está constituida por el conjunto de todos los objetos posiblemente

combustibles presentes en el recinto. La carga de fuego se expresa en Julios, se obtiene sumando el producto del calor de combustión  $H_{c,i}$  por la masa  $H_i$  de cada producto. En algunos casos se utiliza la masa equivalente de madera, es decir la masa de madera que liberaría la misma energía que esta carga de fuego.

Divida por el área del suelo del recinto la carga de fuego no da la densidad de carga de fuego.

#### 1.4.1.3.3.2. Ignición.

Se llama ignición al comienzo del proceso de combustión (oxidación continua auto mantenida). Es uno de los campos más importantes de la lucha contra incendios. La prevención de los riesgos de ignición. La ignición requiere la reunión de tres elementos que son: combustible inflamable, calor de ignición y oxígeno.

En un gas, solo se produce la ignición en una mezcla de gas/aire cuya composición está dentro de los límites de inflamabilidad de esa sustancia.

En un líquido, se da la ignición cuando la superficie del líquido libera suficiente cantidad de vapores para que se forme una mezcla de vapor/aire dentro del rango de inflamabilidad.

En un sólido, la ignición se puede producir:

- Si el sólido es calentado hasta que se produzca una descomposición destructiva (pirólisis) que libere suficiente cantidad de vapores inflamables para que se forme una mezcla inflamable con el aire, o
- Si la superficie del sólido por efecto del calor y en contacto con el aire entre en un proceso de oxidación suficientemente energético para auto mantener la reacción.

La ignición es el primer signo visible de la combustión. El origen de la energía necesaria para la ignición de un combustible en presencia de comburente puede ser de tipo químico, eléctrico, mecánico o nuclear.

Existen tres temperaturas, características de cada sustancia en relación a su ignición.

Flash Point, traducido al castellano en la norma UNE-EN ISO 13943 [23], como “punto de encendido”, es la temperatura mínima a la que un material o producto debe ser calentado para que los vapores emitidos se inflamen momentáneamente en presencia de una fuente de ignición en condiciones específicas.

Fire point, traducido al castellano en la misma norma UNE como “punto de inflamación. Temperatura mínima a la que un material se inflama y continúa ardiendo tras la aplicación de una llama en unas condiciones determinadas.

Temperatura de ignición espontánea o de auto-ignición, es la mínima temperatura a la que se produce la ignición sin el aporte de una fuente de ignición.

El riesgo de ignición depende de los materiales presentes en el edificio, así como de los procesos y actividades que tienen lugar en este. Se trata de minimizar el potencial de ignición y así el riesgo de incendio. A la hora de evaluar el potencial de ignición, no existen métodos cuantitativos para predecir este peligro y se utilizan métodos probabilísticos.

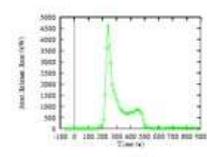
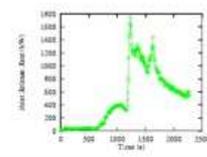
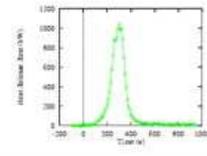
#### 1.4.1.3.3.3. Generación de Calor: RHR.

Con la carga de fuego determinada, es decir, la energía total potencialmente cedida por el incendio, se determina como se libera esta energía. La curva de generación de calor, RHR, cuyo término en inglés es "Heat Release Rate", representa la potencia del fuego en función del tiempo, *Figura 2.*

Es seguramente el factor más importante para describir un fuego. Puede ser visto como el motor que impulsa el fuego. Sucede porque se trata de una retroalimentación positiva, el calor general más calor. El RHR influye mucho en la fase de crecimiento del fuego, controlando en una cierta medida fenómenos como el tamaño de la zona de pirolisis, el flujo de gases calientes o la temperatura de la zona caliente. Este factor depende sobre todo del tipo y de la cantidad de combustible, de la cantidad de oxígeno disponible. Existen otros factores que influyen de una manera secundaria en el proceso. Estos son el tamaño del recinto y las propiedades térmicas de sus límites.

La experimentación es la única manera de estimar el RHR. Muchos experimentos de este tipo han sido realizados por varios laboratorios europeos y americanos. Los resultados de sus estudios están disponibles en varias bases de datos. Un límite muy importante es el tipo de productos presentados en los test: son por la mayoría de elementos que se encuentran en viviendas o habitaciones de hotel como sillones, sillas, sofás o televisiones. Algunos estudios presentan resultados sobre coches o varios vehículos.

La base de datos del laboratorio americano "Engineering Laboratory", del NIST, es una colección de recursos de la División de Edificios y Laboratorio de Investigación de Incendios. Proporcionan enlaces para disponer de los datos experimentales obtenidos en sus laboratorios. Las figuras, son un ejemplo de información que se puede encontrar.

Caso	Tasa de Liberación de calor	Comienzo	Pico	Final
Litera				
Quiosco				
Colchón				

**Figura 2. Curvas de Generación de Calor.**

El flujo de calor depende también de la fuente de ignición y del recinto donde se realizan las pruebas, hay que utilizar estos datos con cuidado. Se nota para ejemplo que todas estas pruebas se han realizado en condiciones de combustión libre, es decir, sin considerar ninguna influencia del recinto, como se estaba quemando fuera. Estudiando un incendio dentro de un edificio, hay que considerar factores como la temperatura ambiente o la aportación de oxígeno que influye mucho. En general, una misma carga de fuego se quema más rápidamente a dentro porque el fuego aprovecha el calor aportado por la capa de humos calientes.

#### 1.4.1.3.3.4. Flash-Over

Es un fenómeno que se produce en la transición entre un fuego localizado y la generalización del fuego a todas las superficies combustibles presentes en el recinto. Ocurre cuando la temperatura en el recinto alcanza la temperatura de ignición del combustible. El RHR alcanza de manera casi instantánea su valor máximo, la temperatura sube también de golpe y esta homogénea en todo el recinto. Es de primera importancia conocer y ser capaz de prever este fenómeno, ya que cuando ocurre, las oportunidades de sobrevivir son casi nulas. La estructura del edificio también sufre mucho en esta fase.

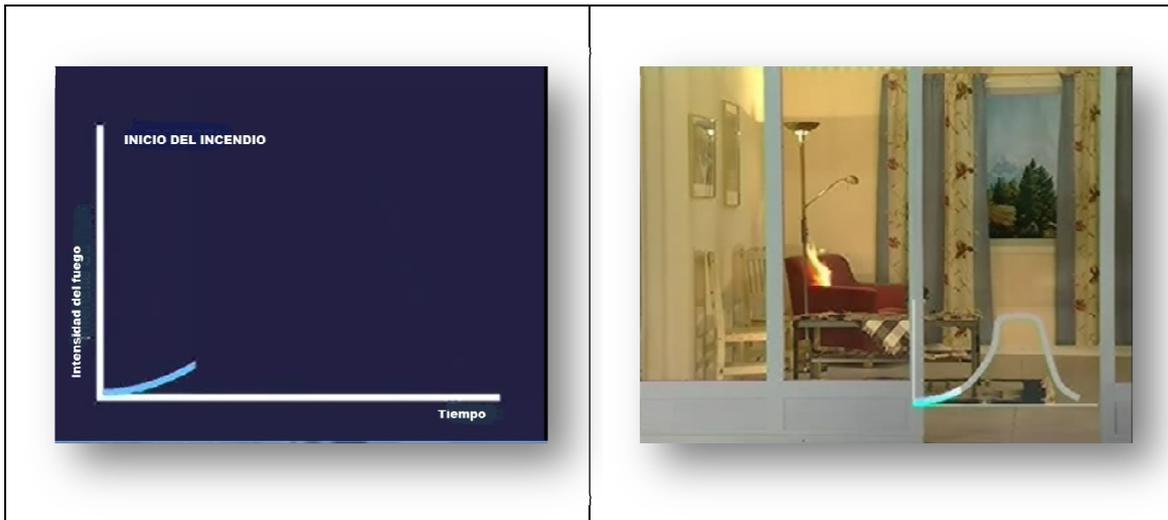


Figura 3. Fase del Flash-Over. Inicio del incendio.

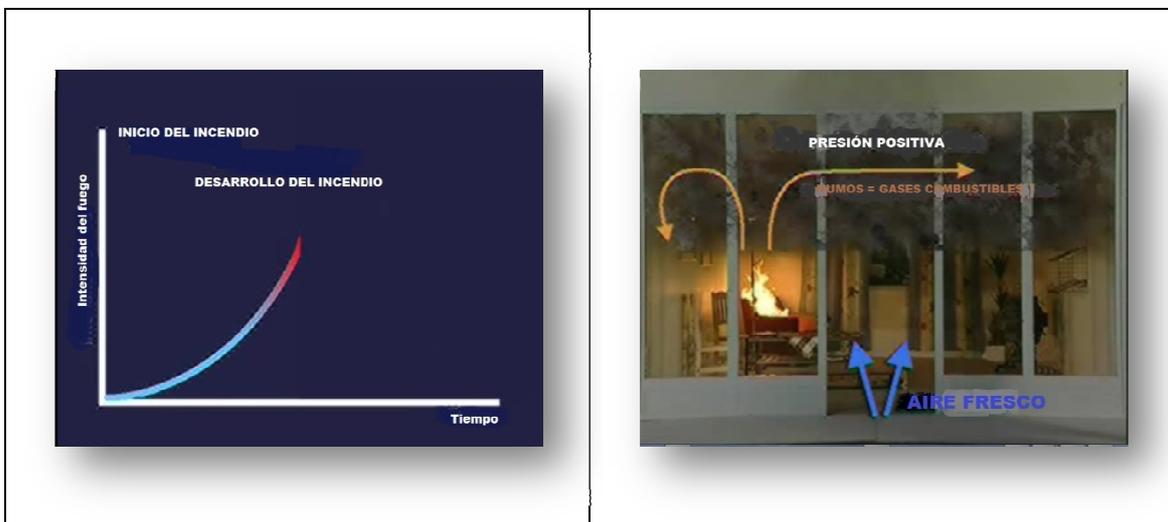


Figura 4. . Fase del Flash-Over. Desarrollo del incendio.



Figura 5. Fase del Flash-Over. Desarrollo generalizado.

De todas las pruebas realizadas para explicar el fenómeno, los dos parámetros más importantes que influyen son la temperatura y el flujo de calor recibido por el combustible todavía no quemado.

Para cálculo de la fase de Incendio Generalizado, se observa que existe un momento marcado por el punto crítico donde pasamos a la fase de incendio desarrollado o de flash-over, es posible calcular, en función del material y las condiciones estructurales del recinto, cual es la potencia o efecto térmico necesario para que este se produzca, así como el rango de temperaturas necesarias para ello.

Las expresiones que nos permite llegar a estos cálculos son las siguientes:

Para que se produzca el Flash-over, es necesario disponer de una cantidad mínima de energía, esta se puede calcular mediante la expresión:

$$Q = 7,8A_{TOT} + 378A\sqrt{h} \quad [E-1. 3]$$

Donde:

$Q =$  Efecto mínimo en Kw., para que se produzca el Flash – over.

$A\sqrt{h} =$  Índice de ventilación.

$A_{TOT} =$  Área total del recinto.

La cantidad de aire máxima que puede entrar en el recinto viene dada por la expresión:

$$m_{IN_{m\acute{a}x}} = 0,5 A\sqrt{h} \quad [E-1. 4]$$

Se puede considerar que un combustible sólido precisa de 6 Kg., de aire por cada Kg., de combustible en su combustión, así pues tendremos que el valor de la pérdida de más o caudal de masa será:

$$m_b = \frac{0,5A\sqrt{h}}{6} = 0,09A\sqrt{h} \quad [E-1. 5]$$

Mediante el cálculo de  $m_b$ , podemos conocer si el material que existe en el recinto va a ser suficiente para generar la potencia calorífica requerida para que se produzca el flash-over, mientras  $m_{IN}$ , nos permite saber si entrará el aire suficiente.

El efecto será pues:

$$Q_b = m_b \Delta H_c \quad [E-1. 6]$$

Realizando el cálculo de  $Q_b$ , sabremos si podemos alcanzar el valor calculado para  $Q$ .

Conocido el valor de  $Q_b$  podemos entonces calcular la temperatura crítica en el cojín de gases para que se produzca el flash-over, mediante la siguiente expresión:

$$T_g = \left( \frac{Q_b^2}{A\sqrt{h}A_{TOT}h_k} \right)^{\frac{1}{3}} + T_0 \quad [E-1. 7]$$

Donde:

$T_g$  = Temperatura que deseamos conocer en °C.

$Q_b$  = Efecto térmico necesario en Kw.

$A\sqrt{h}$  = Índice de ventilación en  $m^{5/2}$ .

$A_{TOT}$  = Área total del recinto en  $m^2$ .

$T_0$  = Temperatura inicial en °C.

$$h_k = \sqrt{\frac{K\rho C_p}{t}} =$$

Índice de transmisión de calor del cojín de gas a la estructura en  $Kw/m^2°C$ .

Donde a su vez:

$K$  = Índice de transmisión de calor de las estructuras en  $W/m$  °K.

$\rho$  = Densidad del material de construcción en  $Kg/m^3$ .

$C_p$  = Capacitividad del material (Cantidad de energía acumulable).

$t$  = Tiempo en seg.

El valor de la potencia del efecto térmico de radiación se desglosa del valor

Los valores promedios así obtenidos son los indicados de 12 a 20  $Kw/m^2$  y de 500 a 650° C.

1.4.1.3.3.5. Ventilación.

Constituye un parámetro muy importante el ventilación como factor que provee el oxígeno.

En la fase de ignición, el oxígeno está disponible y la evolución depende sobre todo del combustible y de la fuente de calor inicial. Existen dos posibilidades:

- Si hay bastante oxígeno, el fuego está controlado por el combustible.
- Si no, el fuego está controlado por el oxígeno que entra en el recinto mediante las aperturas.

La transición entre estos dos fenómenos lo explica el técnico José Miguel Basset. En la primera fase del desarrollo de un incendio el efecto térmico que se produce está controlado por el combustible, ya que es el factor que se encuentra en "minoría" en el proceso, y el que por tanto va a marcar la cantidad de reacción química que se va a producir, pudiéndose considerar la cantidad de oxígeno como infinita, en esta fase el valor del efecto térmico es el ya visto por la expresión:

$$q_c = \chi m \Delta H_c \quad [E-1. 8]$$

Si el incendio continúa, el efecto térmico que se va generando empieza a ser función del oxígeno que quede presente en el recinto, ya que este se va consumiendo y tan solo dispondremos del que penetra a través de las aberturas, en este momento el efecto térmico depende de la cantidad de oxígeno que puede entrar en el recinto incendiado y se calcula mediante la expresión:

$$q_{c \text{ máx}} = 1500 A \sqrt{h} \quad [E-1. 9]$$

Donde:

$A \sqrt{h}$  = *índice de ventilación.*

$A = \sum A_i$  = *Sumatorio de las áreas de las aberturas en m<sup>2</sup>.*

$h = \frac{\sum h_i A_i}{\sum A_i}$  = *altura promedio de las aberturas en m.*

Esta es una expresión empírica mediante la cual observamos que a mayor índice de abertura, mayor será el efecto térmico ya que la cantidad de oxígeno que penetra en el recinto es mayor.

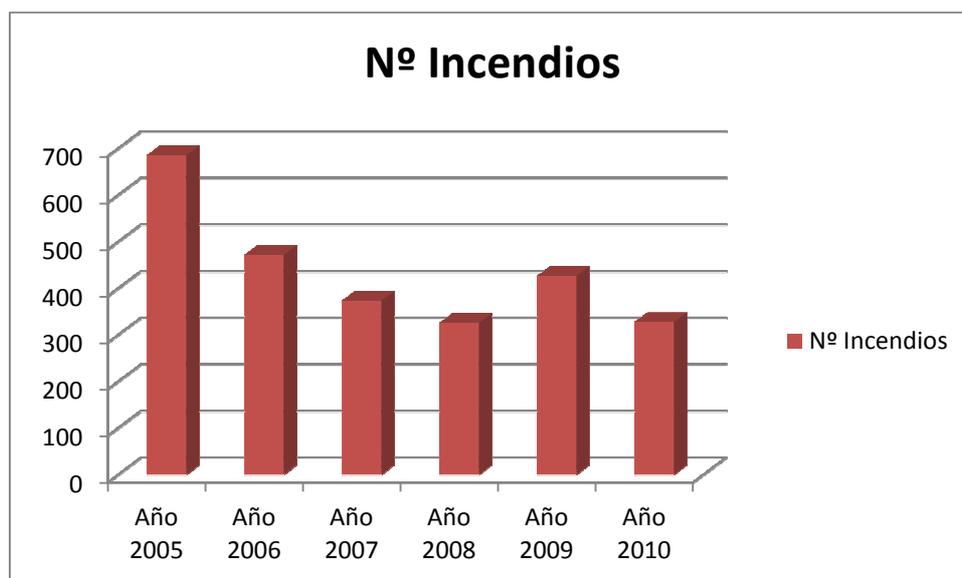
#### 1.4.1.4. EL PROBLEMA DEL INCENDIO FORESTAL.

El fenómeno de los incendios forestales se ha convertido en uno de los mayores problemas ecológicos que sufren los montes debido a la elevada frecuencia e intensidad que ha adquirido en las últimas décadas [24].

El fuego es un elemento natural que como cualquier otro fenómeno, forman parte del modelado del paisaje, especialmente en ambientes mediterráneos. Precisamente, gran parte de la vegetación está adaptada a la acción del fuego, con estrategias rebrotadoras o de germinación tras el incendio. Sin embargo, los incendios han dejado de ser una perturbación natural de modelo del paisaje, a ser una amenaza que en más de un 95% de los casos está ocasionada por el ser humano [24].

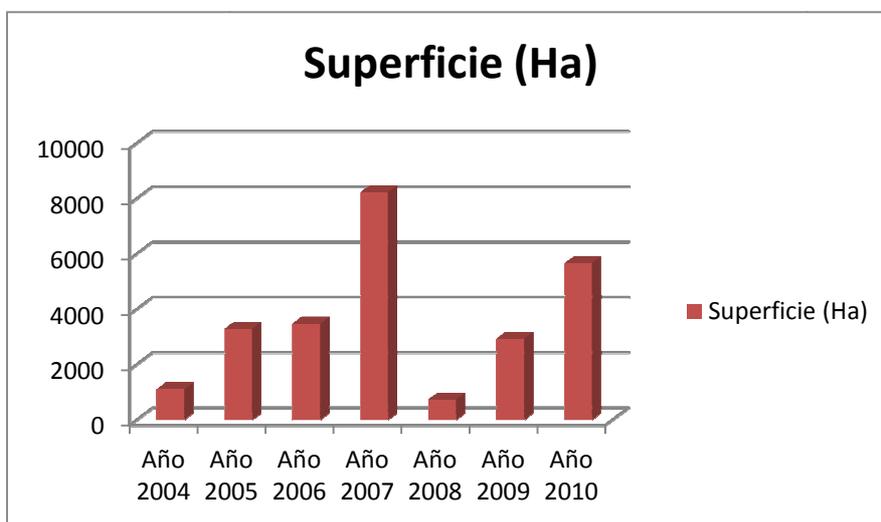
En una región como la Comunitat Valenciana, de clima mediterráneo, y muy castigada siempre por incendios forestales, desde hace tiempo se ha intentado avanzar lo máximo posible en esta materia, para así poder disminuir lo máximo posible el número de incendios y de hectáreas quemadas.

Si se habla de datos centrados en la Comunitat Valenciana, se puede observar en la Gráfica 1.25, que entre los años 2005 y 2010 el número de incendios ha ido descendiendo, y ha acabado por mantenerse (salvo la excepción del año 2009).



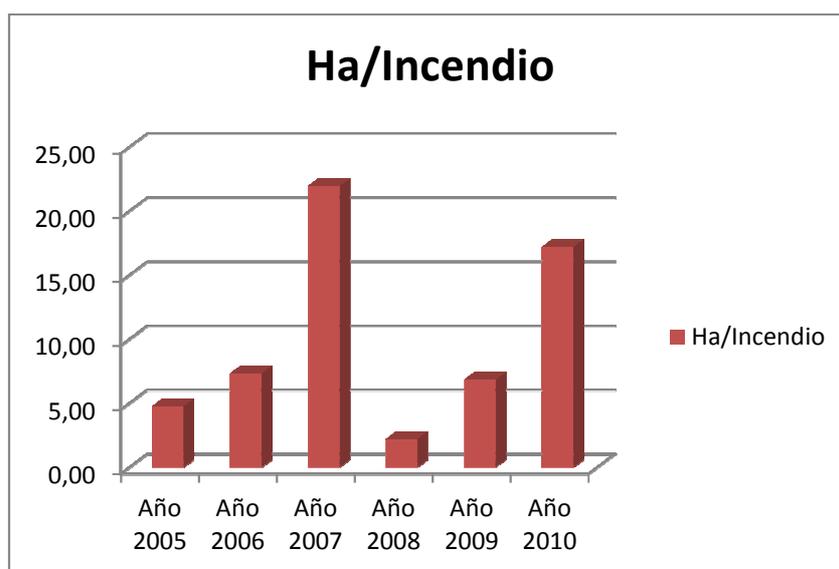
**Gráfica 25. Gráfico número incendios entre 2005-2010 en la C.V.**

Sin embargo, mientras el número de incendios descendía y se mantenía, el número de hectáreas quemadas sufría una fuerte subida en 2007 (debido al importante incendio que tuvo lugar en Les Useres, en Castellón), seguida de una fuerte bajada en 2008, y desde entonces el número de hectáreas ha sufrido un aumento del 100% cada año, gráfica 26.



**Gráfica 26. Gráfico número hectáreas quemadas entre 2004-2010 en la C. V.**

Por último, se muestra que el número de hectáreas quemadas de media en cada incendio se encuentra ligado con el número de hectáreas quemadas. Así pues, en los últimos tres años el número de hectáreas quemadas de media en cada incendio ha sufrido un aumento de más del 100% entre cada año.



**Gráfica 27. Gráfico número hectáreas quemadas de media 2005-2010 en la C. V.**

De estos gráficos se puede obtener que a pesar de que el número de incendios desciende, estos queman cada vez más hectáreas, por lo que son cada vez más importantes. Por lo que parece la gente está cada vez más concienciada y hay menos accidentes, pero los accidentes que hay son cada vez más importantes, lo que puede dar a pensar que los pirómanos son personas cada vez más preparadas y los incendios son más descontrolados.

También sorprende ver que a pesar de cómo avanza la tecnología, y se dispone de nuevos medios para paliar los incendios, estos siguen aumentando. Lo que daría a pensar que un incendio como los de ahora hace unos años tendría unos resultados mucho peores. Es por eso que se debe seguir investigando en esta materia con nuevas herramientas tecnológicas.

Es muy triste observar que un monte se quema y ver cómo quedará el paisaje tras el paso del fuego, pero más triste es todavía pensar que en estos incendios pueden fallecer seres humanos, ya sean habitantes de la zona o los que más peligro sufren: los brigadistas.

Uno de los objetivos perseguidos en esta tesis es observar a partir de condicionantes topográficos, forestales y meteorológicos, cómo se desarrollaría un incendio con esas condiciones, y poder estudiar desde dónde atacar ese incendio y en qué zonas intervenir primero, o incluso si hay que desalojar algunas zonas residenciales.

El programa utilizado también permite obtener una serie de datos como la temperatura, la cantidad de oxígeno, la humedad, etc. Con estos datos se pueden estudiar nuevas hipótesis y descubrir mejor por qué un incendio se propaga así, o averiguar si un incendio ha sido realmente intencionado o ha sido fruto de la naturaleza, ya que en muchos casos un incendio se declara como intencionado, cuando realmente no ha sido así. Sería como tener un laboratorio de pruebas pero dentro del ordenador.

Otra posible utilidad sería para enseñar a los nuevos brigadistas cómo reacciona un incendio en unas determinadas condiciones, y cómo deben actuar ellos.

Para todo ello se utiliza un simulador de incendios (tanto domésticos como forestales) llamado FDS (Fire Dynamics Simulator), pero que en su rama forestal es conocido como WFDS (Wildland Fire Dynamics Simulator). El estudio consistirá en utilizar herramientas de Sistemas de Información Geográfica, datos LiDAR (Light Detection and Ranging) e imágenes satélite, para poder modelar los modelos que serán utilizados en las simulaciones por el software ya mencionado.

Todo esto será presentado por medio de unas aplicaciones, de modo que para el usuario realizar los modelos y las simulaciones de los incendios forestales, sea lo más sencillo posible.

#### **1.4.2. LA SIMULACION COMO HERRAMIENTA EN LOS INCENDIOS.**

El último avance para el análisis de los incendios es un programa informático. El modelo Fire Dynamics Simulator (FDS), es una herramienta de última generación ideadas en el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) de Estados Unidos para mejorar la capacidad de estudio del fuego y su comportamiento. El programa es capaz de simular el comportamiento del fuego y el humo en un espacio virtual dado por el usuario a través de variables. De este modo, antes de acometer un plan de prevención contra incendios es posible observar cómo se va a comportar un fuego en el espacio que queremos proteger, lo cual posibilita que las medidas tomadas sean muchos más certeras.

##### **1.4.2.1. CARACTERÍSTICAS.**

El modelo del Fire Dynamics Simulator se crea en el NIST de estados Unidos. Es un modelo de campo que introduce una forma de las ecuaciones de número Mach bajo de Navier-Stokes desarrollada por Baum y Rehm. McGrattan desarrolló considerablemente el código informático y Forney diseño e implantó el software de visualización, el Smokeview.

En numerosos casos, los daños que conciernen a la ingeniería forense en la investigación de incendios no suponen únicamente el estudio del desarrollo de un incendio. A menudo, el origen de un incendio, e incluso su causa, pueden no determinarse, mientras que los daños constituyen la mayoría del análisis. Estos daños pueden desglosarse en dos componentes, entorno térmico y mitigación de los daños.

Entre las técnicas de mitigación de daños más habituales se encuentran la detección y la alarma de incendios, la mitigación de los efectos y la supresión de incendios. Con el FDS se pueden crear modelos de detección de incendios y también simular el crecimiento del fuego y los daños durante el periodo transcurrido desde la alarma hasta el inicio de la reacción al incendio. Muchos casos han rodeado a este punto concreto, a menudo denominados casos de daños diferenciales, debido a que una empresa de alarmas no transmitió una alarma o causo otros retrasos que provocaron una reacción tardía de los bomberos.

La mitigación de los efectos de un incendio puede incluir la ventilación del calor. La ventilación del calor y del humo permite que los gases calientes salgan de un edificio y en ocasiones se utiliza en almacenes o en espacios similares de gran tamaño. El FDS puede calcular cuándo se abre el conducto de ventilación y simular la apertura del mismo, de forma que se cree un modelo preciso previo a la ventilación y posterior a la misma en lo que respecta al comportamiento de los termos fluidos.

Con frecuencia, la supresión del incendio se logra por medio del uso de sistemas automáticos de rociadores. El FDS permite la introducción de rociadores simulados. Los modelos de rociadores simulan unas gotas que se esparcen por todo el ámbito y producen efectos realistas como la interacción del arrastre entre las gotas y la columna de fuego. Dichas gotas también simulan los efectos del enfriamiento por evaporación, y esas temperaturas predicen de forma real la activación de múltiples rociadores.

#### **1.4.2.2. LIMITACIONES.**

Como la mayoría de los modelos asistidos por ordenador, el FDS, hace algunas aproximaciones a las ecuaciones y a su implantación que conducen a posibles variaciones entre las predicciones calculadas y los resultados experimentales para su comparación. En general, la pregunta más importante es en qué medida se corresponden los métodos del modelo con los fenómenos físicos del problema sobre el que se plantea una pregunta.

Si calcula el FDS, con precisión, los flujos provocados por las diferencias de densidad resultantes del calentamiento, como en el caso del fuego, o bien como una propiedad inherente de un material, como en el caso del metano o el propano. En consecuencia, en el FDS puede examinar el flujo de gases resultantes de una liberación. Respecto al análisis de incendio, es una herramienta con una serie de capacidades y limitaciones. Con frecuencia, sin embargo, sólo un subconjunto de las limitaciones procede directamente del FDS, mientras que la incertidumbre de los datos representa una considerable incertidumbre potencial de los resultados. Por lo tanto, el mejor enfoque adoptado es el que suele implicar dos posibles caminos para reducir la incertidumbre.

### **1.4.2.3. INTERVALOS DE TRABAJO.**

El primer enfoque para reducir la incertidumbre en los resultados es utilizar unos intervalos razonables de valores de datos. En esta situación, la sensibilidad del modelo a unos datos concretos puede ser examinada para el escenario que se esté analizando. En el caso de que el modelo sea muy sensible a un dato en particular, ese dato puede investigarse con mayor intensidad con el fin de construir con certeza con respecto al valor del mismo o ampliar el intervalo de resultados de ese dato con el fin de garantizar razonablemente que los modelos resultantes cubran las condiciones reales. En ese caso, el investigador del modelo debe tener en cuenta las implicaciones de los resultados en la investigación global.

El segundo enfoque para abordar la incertidumbre hace uso de la calibración de los modelos. La calibración puede llevarse a cabo por medio del usuario o de algún modelo o fenómeno físico a una escala razonable, como la expansión de las llamas. En ese caso, el creador de modelos puede introducir la prueba realizada específicamente con una parrilla de datos de un tamaño determinado y unos parámetros apropiados hasta que los resultados simulados coincidan razonablemente con la prueba física. Utilizando los valores “calibrados”, el creador de modelos puede entonces ampliar la simulación a un ámbito mayor que cree el modelo del escenario completo. Distinguir entre determinados escenarios muy similares puede no ser posible utilizando el FDS. Por ejemplo, unos análisis que dependan en gran medida de la expansión de las llamas requerirían un estudio muy cuidadoso, ya que la creación de modelos de expansión de las llamas por parte del FS aún está en desarrollo. Las interacciones entre superficies y la información procedente de las radiaciones son dos ámbitos en los que existen dificultades considerables dentro de la creación de modelos y de las hipótesis de cálculo del FDS.

### **1.4.2.4. MATICES RELEVANTES.**

El FDS proporciona una capacidad de transmisión de conocimientos únicos para los problemas que conlleva el análisis de incendios. Con una o varias preguntas formuladas adecuadamente y los correspondientes datos, el modelo puede simular con precisión unos flujos de termo fluidos que ayuden a comprender el caso de incendio. La comprensión del entorno del incendio permite que el analista tenga en cuenta todas las implicaciones de dicho incendio, y en especial los componentes temporales. En ocasiones, dichos componentes son difíciles de comprender en su totalidad en la escena posterior al incendio, ya que en ese momento en el tiempo se muestran todos los daños provocados a lo largo de todo el caso. La simulación permite un mejor estudio

del incendio en puntos determinados del tiempo. En este aspecto temporal permite una comparación más fácil con las circunstancias específicas de cada momento, como la alarma o la activación de los rociadores, la ventilación del fuego o las observaciones de testigos.

#### **1.4.2.5. LA SIMULACION PARA EL INCENDIO FORESTAL.**

El mundo de las simulaciones hace años que dio un gran giro. Hace años si se quería ver cómo se comportaría un incendio en un valle se debería de haber realizado una maqueta con la topografía de la zona, introducir materiales de la misma combustibilidad que los presentes en la región, y lograr las condiciones meteorológicas que se deseasen. El problema era que los resultados no serían del todo fiables, y que cada vez se tendría que rehacer la vegetación, o la topografía para una zona diferente, por lo que el coste y el tiempo de trabajo aumentarían. Todo eso cambió desde el momento en el que empiezan a aparecer los simuladores. Un simulador es como tener un banco de pruebas propias pero dentro del ordenador.

Es cierto que programar un simulador no es sencillo, ya que es necesario fijarse en experimentos hechos en laboratorio, y después pasarlo al lenguaje de las matemáticas para poder programarlos. Pero desde el momento que esto está hecho y se comprueba su fiabilidad, el trabajo es mucho más fácil.

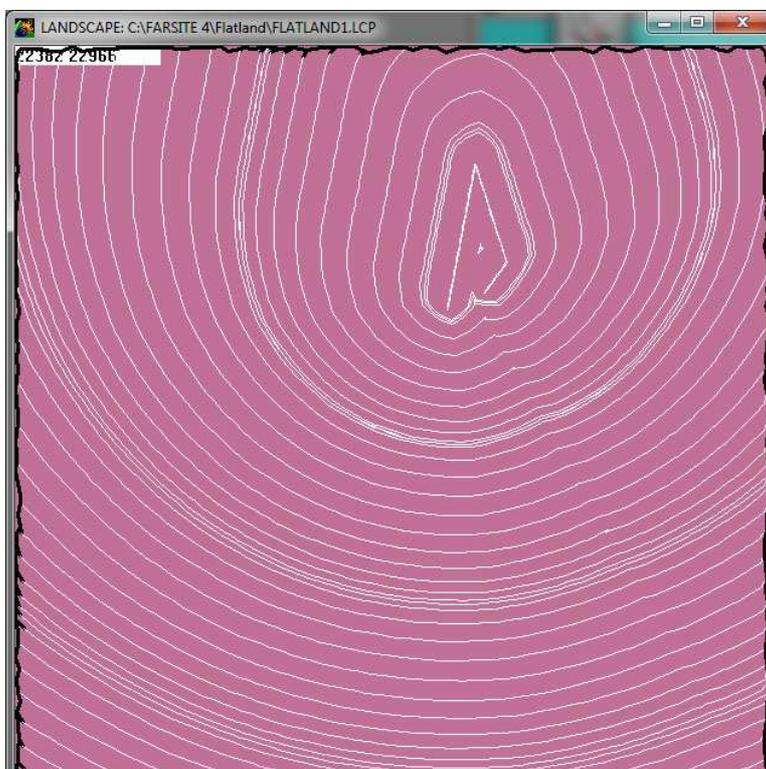
En el simulador se puede generar rápidamente la superficie topográfica de una zona, así como la vegetación con sus respectivas combustibilidades, e introducir sencillamente las condiciones meteorológicas. El tiempo de cálculo puede llegar a ser elevado, pero se reduce el tiempo de trabajo y el coste, y se puede aumentar la obtención de datos obtenidos del experimento, así como realizar el experimento en cualquier lugar con un simple ordenador.

En algunos países, sobre todo norteamericanos, se han hecho grandes esfuerzos por desarrollar simuladores de incendios. Aparte del software que se utilizará en este proyecto, alguno de los más conocidos son Behave, elaborado por el Servicio Forestal de Estados Unidos; y FBP (Fire Behavior Prediction), desarrollado por el Servicio Forestal de Canadá [25].

El sistema Behave presenta importantes limitaciones, que derivan esencialmente del hecho de no estar conectado a un Sistema de Información Geográfica, lo que le implica una condición estática.

A diferencia del sistema anterior, el FBP está conectado directamente a un predictor del grado de peligro, lo que le provee la mayor parte de la información requerida para la simulación. Este sistema también está conectado a un SIG, que le aporta la información sobre las condiciones del terreno.

Otro programa sobre la simulación de incendios forestales es FARSITE (Fire Área Simulator). Este programa fue desarrollado por el Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos [26]. FARSITE está conectado a un Sistema de Información Geográfica y utiliza esta información y otra como el clima, viento, y el combustible, para realizar las simulaciones. El tiempo de cálculo de este software es bastante rápido, el problema es que su visualización en 3D es algo pobre, y muestra únicamente la proyección del perímetro del frente de fuego [26].



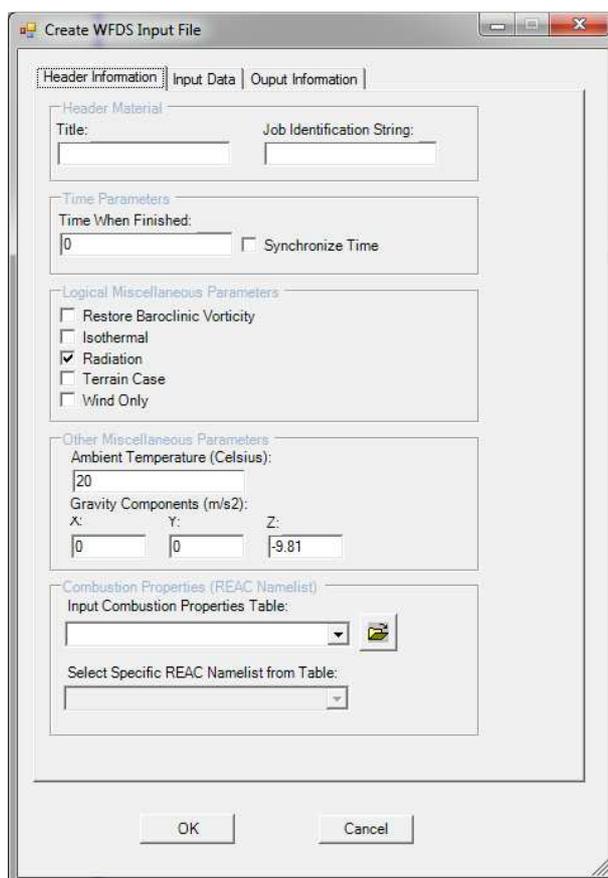
**Figura 6. Simulación FARSITE.**

En la Figura 6, se observa una captura de imagen del software FARSITE en la que se observan los anillos que corresponden dónde se situaría el frente del incendio cada "X" tiempo.

Usando este último software, el Instituto Técnico de Canarias junto con tres departamentos de la Universidad de las Palmas de Gran Canaria [27], han llevado a cabo un proyecto que consiste en el desarrollo de una herramienta software para la Gestión Virtual de Emergencias, con la finalidad de simular y prevenir el comportamiento del fuego en las Islas Canarias. La diferencia

es que este software utiliza diferentes servidores y programas que hacen que la introducción de parámetros sea mucho más rápida y los resultados se puedan mostrar en 3D, que era una de las grandes carencias del software FARSITE [28].

Aparte de lo que se ha realizado en otros software de simulación de incendios, desde el NIST (National Institute Standards and Technology) se ha realizado una aplicación para ArcGIS desde la cual se pueden generar los modelos para las simulaciones en el software WFDS, figura 7. Esta idea es similar a la que se ha desarrollado en esta tesis. Consiste en ir introduciendo información cartográfica para que la aplicación la traduzca al lenguaje del simulador, y después se pueda observar el modelo en el mismo. Pero existen una serie de problemas que serán los que se solucionarán en el trabajo. Como por ejemplo, esta aplicación carece de entrada de valores bastante importantes para la simulación de un incendio como son la humedad o el viento, la asignación de tipos de vegetación no es del todo clara, es necesario disponer del software ArcGIS, y la entrada de la información cartográfica únicamente se puede realizar a través de imágenes ráster.



**Figura 7. Aplicación GEO-WFDS para ArcGis.**

### 1.4.3. LA SEGURIDAD PARA TÚNELES.

En los últimos años hemos asistido en Europa a una serie de importantes incendios en túneles de carretera que han tenido como consecuencia la pérdida de un número elevado de vidas a la vez que grandes daños materiales [29].

Entre ellos se destacan por su gravedad el incendio del Túnel del Mont-Blanc, entre Francia e Italia, con 39 muertos (1999), el incendio del túnel de Tauern en Austria, con 12 muertos (1999) y el del túnel de St. Gottard en Suiza, con 11 muertos (2001), [30].

En todos los casos los túneles contaban con las medidas de seguridad exigidas por las normativas de sus respectivos países y sin embargo no consiguieron evitar que se produjeran las catástrofes [31].

Muchos otros incendios no tuvieron graves consecuencias y se pudieron extinguir de forma efectiva por los equipos de bomberos desplazados sin provocar ni víctimas ni daños considerables para las instalaciones y estructuras, [32].

El número de kilómetros de túnel en construcción sigue creciendo año tras año igual que el del tráfico que circula por ellos y aunque la incidencia de incendios en el interior de estas estructuras es pequeña es inevitable que se sigan produciendo cada vez con mayor frecuencia.

Las medidas de seguridad tienen que ir ampliándose y mejorando en este tipo de instalaciones de forma que las situaciones de riesgo generadas por los incendios se resuelvan cada vez con mayor seguridad para la integridad de los usuarios y de los equipos de emergencias.

Del estudio de las situaciones que favorecieron el desarrollo de los incendios catastróficos se han aprendido muchas lecciones que han permitido a los técnicos diseñar túneles nuevos más seguros y también mejorar la seguridad de los ya existentes.

También ha permitido identificar los factores que puntualmente pueden favorecer el desarrollo del fuego, de forma que se superen las medidas de seguridad diseñadas y provoquen situaciones de grave riesgo para la vida, con las trágicas consecuencias que resulte de ello.

Sin embargo, la influencia que alguno de esos factores puede tener en algunas situaciones no es bien conocida y puede llevar a infravalorar su peligrosidad. Elementos que en otras situaciones no representarían ningún riesgo, en el interior de un túnel, pueden contribuir a que las

condiciones empeoren de tal manera que la situación derive en una emergencia de consecuencias fatales, [33].

Los cuerpos de bomberos, como conocedores de los riesgos añadidos de los incendios en los túneles, llevan años adaptando y mejorando sus técnicas de intervención para abordar este tipo de emergencias de la forma más rápida y efectiva posible.

También los servicios de prevención que revisan y autorizan los proyectos de seguridad en los túneles han ido aumentando sus exigencias de forma que se limiten de forma significativa las situaciones de riesgo para las personas en cualquier tipo de emergencia.

Para los equipos de salvamento y extinción, aparte de conocer los sistemas de seguridad con los que cuentan los túneles, resulta fundamental tener un profundo conocimiento de la dinámica de los incendios en el interior de esas estructuras y de la influencia de los diferentes elementos que intervienen.

Uno de los factores que modifica el comportamiento del incendio en el interior de los túneles es el tipo de pavimento con el que cuenta [34]. En el presente estudio se justifica que un firme de hormigón será un elemento inerte que se limitará a absorber parte del calor generado mientras que un firme de mezclas bituminosas será un elemento activo en el incendio que aportará gases y calor y que incluso en algunas situaciones puede modificar la dinámica del fuego empeorando las condiciones de evacuación de los ocupantes y las de trabajo de los bomberos, [35].

En el capítulo tres, se explican las especiales características que tienen los incendios en el interior de los túneles y las ventajas que aporta contar con un pavimento de hormigón frente a uno a base de mezclas bituminosas.

Los expertos destacan la importancia de los ensayos y las simulaciones para una mejor PCI. Tres expertos en estrategias de seguridad, Mercedes Lago, de Efectis Ibérica, Magdalena Villegas, de AFITI, y Pablo Espina, de MSC, coinciden en resaltar la importancia de los ensayos y del conocimiento previo de las diferentes casuísticas, tanto del fuego como de los comportamientos humanos, para afrontar adecuada y eficazmente la Protección Contra Incendios (PCI) en instalaciones bajo rasante.

Para Mercedes Lago, el modelado y la simulación computacional y los ensayos con fuego real se retroalimentan y se complementan mutuamente. Una buena combinación de ambos garantiza una solución global eficaz de Protección Contra Incendios. Efectis participa activamente en

proyectos de investigación españoles e internacionales. Entre otros, ha intervenido en los proyectos de los túneles del Montblanc y de Fréjus.

«La tendencia actual en túneles e instalaciones subterráneas no es hacer lo imprescindible para cumplir con la reglamentación, sino hacer lo imprescindible para tener unas instalaciones seguras», afirma Magdalena Villegas, directora técnica de Servicios Tecnológicos de AFITI, empresa que participa en el diseño de productos orientados a determinar su eficacia contra incendios, incluyendo la reproducción de escenarios de incendios en sus laboratorios.

Pablo Espina, director técnico de la empresa Modelado y Simulación Computacional (MSC), considera que «las herramientas de modelado y simulación computacional hacen posible estudiar la influencia de determinadas variables que las normativas en vigor en España no las tienen presente o no las consideran en los procedimientos de cálculo y diseño

#### **1.4.4. EL LÁSER ESCÁNER PARA LA PREVENCIÓN DE INCENDIOS.**

En el estudio realizado se observa que existe alguna iniciativa referente a que esta herramienta se utilice en el tema de incendios. Se trata de una aplicación para la gestión del riesgo, la han bautizado con el nombre de “Orchestra” [36]. Se caracteriza por desarrollar modelos de referencia de arquitectura abierta. Controlar las cuencas de los ríos, las zonas forestales, para poder realizar seguimientos en caso de emergencia.

Las líneas de trabajo van por los análisis de los escenarios para poder tener un criterio de trabajo a la hora de tomar decisiones. En English\_Heritage [37], [38], se trabaja en los análisis de escenarios, para disponer de criterio para actuar en caso de emergencia.

Otros campos son los de la criminología y la investigación de los accidentes de circulación. La casa Trimble,[39], ha realizado estudios para enseñar las ventajas de su producto sobre el tema. Argumenta que los levantamientos tridimensionales por medio de escáneres láser 3D en escenas de crimen, de atentados o de accidentes, permiten obtener una documentación topográfica del lugar y de los objetos presentes de forma exhaustiva, incluyendo información métrica (3D) y de imágenes (2D) (estas últimas si la escena está iluminada o si el levantamiento se hace de día). Estos levantamientos se obtienen en un lapso extremadamente corto, lo que facilita la normalización de la circulación en caso de accidente, o el inicio de las reparaciones en tiempo récord.

La casa Leica, también se han especializado en presentar sus productos relacionados con estos temas. En España el "DIRAT" [40] (Departamento de Investigación y Reconstrucción de Accidentes de Tráfico) de la Guardia Civil, localizados en Madrid y Mérida, lleva investigados una decena de accidentes muy graves o de gran trascendencia social, entre los que destaca la reconstrucción del accidente del autobús en el que viajaban hinchas del Recreativo de Huelva, y en el que murieron cuatro personas, y 15 resultaron heridas graves.

Argumentan que cuando ocurre un accidente grave en la carretera, y los únicos testigos del desastre son los muertos o los heridos graves, la ciencia es el único recurso que queda para averiguar cómo pasó y por qué ocurrió.

Otra iniciativa relacionada con el mundo de las emergencias se ha realizado desde la Universidad Politécnica de Valencia, con la publicación de 3D RiskMapping, [41]. Una herramienta de aprendizaje para el levantamiento tridimensional avanzado en la conciencia del riesgo. Con un contenido basado en la investigación científica y experiencia en la aplicación del escaneado láser terrestre para la captura de nuestro entorno construido.

Este es el punto de partida para introducirlo en el terreno de la lucha contra incendios. Es de vital importancia para todo este tipo de estudio el poder disponer de la geometría exacta del terreno. Fausto Bernardini y Holly Rushmeier [42] nos comentan en su artículo que los sistemas de adquisición de imágenes se está convirtiendo rápidamente en más asequibles. Al mismo tiempo, los ordenadores personales con el hardware de gráficos capaces de mostrar complejos modelos 3D también se están convirtiendo económicamente para estar a disposición de gran parte de la población.

La parte económica, que es un elemento a valorar, ha sido estudiada por el Departamento de Proyectos e Ingeniería Rural de la Universidad Pública de Navarra [43]. Llegan a la conclusión que para un proyecto en concreto es necesario saber cuál va a ser el destino final del trabajo. Si se pretende proyectar elementos de ingeniería civil, va a ser difícil que cualquier software comercial clásico sea capaz de tratar millones de puntos que forman el modelo, si por el contrario se pretende dejar constancia del estado actual para cualquier proceso posterior el escáner es superior.

Matiza que teniendo claro el objetivo, en una aplicación de las trabajadas en este proyecto, cualquier método es viable, la rentabilidad del escáner se pone de manifiesto en tanto en cuanto se reduce el tiempo sensiblemente. La inversión será rentable en la medida de la empresa de

generar proyectos de forma continuada y en un futuro sin lugar a dudas una herramienta importante a aplicar en el conocimiento y estudio de nuestro entorno.

Las razones son muy variadas, como la rapidez con que se puede realizar una toma de datos y dejar el escenario libre para que se pueda volver a actuar con la mayor rapidez posible.

Otro matiz importante es la capacidad para poder captar todos los detalles del lugar. Elementos que en un primer momento no se observan porque no se ha relacionado la totalidad del incidente, se puede observar a posteriori, con las imágenes. Con ello, realizar importantes investigaciones, tanto en el tema urbano, industrial como el forestal.

La tercera y más importante es que se puede colocar el aparato en lugares con atmosferas contaminadas o con cierto grado de inestabilidad y conseguir unas imágenes que se pueden estar analizando desde un lugar seguro. Con ello poder valorar las incidencias y pensar en la solución adecuada en un tiempo corto. Eso en emergencias es muy importante.

El Escáner 3D es una herramienta de captura de la forma y características de cualquier tipo de volumen o ambiente. Mediante un software específico construye un modelo tridimensional del mismo. Hay diversas tecnología que se emplean para la captura en el escáner 3D, como son el toque físico, ópticos, ultrasonidos, etc.

Cada tipo de tecnología tiene sus ventajas, y se utiliza para diversos fines. Con todas ellas es necesario establecer un sistema de referencia entre el objeto y el escáner.

La información que obtiene el escáner laser 3D consiste en una nube de puntos, que posteriormente tiene que ser procesada, mediante lo que se conoce como reconstrucción, para determinar la forma en que están unidos esos puntos y obtener el modelo. Los escáneres 3D pueden ser muy precisos e incluso capturar la información sobre el color, por lo que los modelos obtenidos serán completamente realistas y proporcionados, siendo determinante el tipo de tecnología.

Normalmente la captura con un escáner laser 3D no producirá un modelo completo en el primer escaneo, sino que son necesarios múltiples escaneos desde direcciones diferentes, para obtener la información de todos los lados del objeto. Estos escaneos tienen que colocarse en un sistema común de referencia, proceso que se llama alineación, para así obtener el modelo completo.

## INTRODUCCIÓN

El escáner con el que se han realizado este trabajo es de los que utilizan tecnología sin contacto que funciona de manera que no es necesario llegar a tocar físicamente el objeto escaneado, utiliza una radiación laser emitida por el escáner.

Dentro de este tipo de tecnología se incluye dentro de los activos y es de los de tiempo de vuelo. Esta herramienta utiliza un laser para medir la distancia del dispositivo a cada punto del objeto. La manera de medir la distancia consiste en cronometrar el tiempo que tarde un pulso de luz emitido por el escáner en recorrer la distancia al objeto y volver. Como la velocidad de la luz es conocida (C), para obtener la distancia (D) al punto resolveremos la ecuación  $D=(C*T)/2$ , donde T es el tiempo cronometrado. Como se tiene en cuenta el tiempo para medir la distancia, la precisión de este tipo de escáner será dependiente de la capacidad del dispositivo para medir el tiempo, siendo 3.3 picosegundos el tiempo aproximado para que la luz recorra 1 milímetro. Se utiliza láseres visibles (verdes) o invisibles (infrarrojo cercano).

El distanciómetro láser sólo mide la distancia de un punto en su dirección de la escena. Para llevar a cabo la medida completa, el escáner va variando la dirección del distanciómetro tras cada medida, bien moviendo el distanciómetro o deflactando el haz mediante un sistema óptico. Este último método se usa comúnmente porque los pequeños elementos que lo componen pueden ser girados mucho más rápido y con una precisión mayor. Los escáneres de tiempo de vuelo típicos pueden medir la distancia de 10.000 – 100.000 puntos cada segundo.



**Imagen 2. Escáner Láser Leica.**

Se ha trabajado con el escáner Láser de Leica. Puede ser usado para edificios, formaciones rocosas, etc., y reproducir un modelo 3D. El equipo rota horizontalmente 360°, y un espejo deflacta el haz de media hacia arriba y hacia abajo. El rayo láser es usado para medir la distancia al primer objeto que encuentre en su trayectoria.

Un resumen de sus características es:

- Rápido muestreo.
- Dispone de un sistema de medición (contador) que reinicia al alcanzar el objetivo.
- Suelen ser equipos de alta precisión (submilimétrica).
- Apto para trabajos de alta precisión en monumentos o elementos constructivos (para el análisis de deformaciones).
- Generación de una alta densidad de puntos.
- Frecuencia oscilante entre los 10.000 – 100.000 puntos.

Algunos ejemplos de escáneres basados en el tiempo de vuelo:

- Callidus CP3200
- Leica ScanStation2
- Leica C10
- Mensi GS100/200 (ahora Trimble GX)
- Optech ILRIS
- Riegl (Toda la gama)

Está arraigado en la toma de decisiones en situaciones de riesgo. Por ello, será un referente saber cómo se ha tratado el tema para poder conseguir tener un establecimiento similar en la lucha contra los incendios.

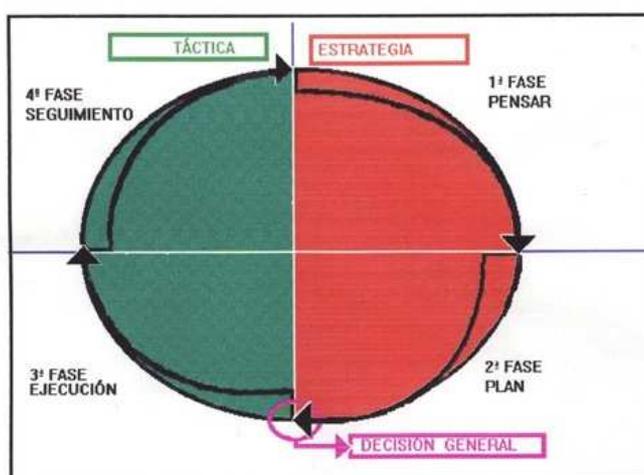
#### **1.4.4.1. EVALUACIÓN DE RIESGOS.**

La evaluación de riesgos es el proceso mediante el cual los riesgos asociados con ciertos azares se identifican, analizan y cuantifican para poderlos determinar y poderlos controlar. En la práctica, una evaluación de riesgos es una minuciosa mirada a un lugar, edificio o ambiente para identificar los elementos, situaciones, procesos, etc., que pueden causar daños, particularmente a los ciudadanos. Tras la identificación se realiza una evaluación de la probabilidad y gravedad del riesgo, lo que ayuda a decidir qué medidas se deben de tomar para prevenir o controlar los daños de forma efectiva.

La evaluación del riesgo puede resumirse como sigue:

- Identificación de riesgos y evaluación: determinación y análisis del potencial, origen, características y comportamiento del peligro (p.ej. período de frecuencia, magnitud de las consecuencias).
- Tratamiento del riesgo potencial:
  - Reducción: planificación y aplicación de intervenciones estructurales (p. ej., presas, diques) o medidas no estructurales como legislación anti catástrofes.
  - Advertencia temprana: provisión de información efectiva y a tiempo a través de las instituciones identificadas que permita a los individuos expuestos al peligro actuar para evitar o reducir el riesgo o prepararse para una respuesta efectiva.
  - Preparación ante catástrofes y gestión de emergencias: acciones y medidas tomadas con antelación para asegurar una respuesta efectiva al impacto del peligro, incluyendo medidas relacionadas con la advertencia efectiva y a tiempo así como planes de evacuación y emergencia.
- Recuperación/Reconstrucción: decisiones y acciones tomadas después de la catástrofe para restaurar las condiciones de vida de la población afectada.

Una evaluación de riesgos o gestión de riesgos adecuada requiere una información actualizada, una posible respuesta rápida, unos datos precisos y una posibilidad de comprobar los datos por si ha ocurrido algún cambio durante un lapso de tiempo, figura 8. Esta tarea es precisamente lo que mejor hace un láser escáner.



**Figura 8. . Ciclo de la Gestión de Riesgo.**

Los escáneres láser se utilizan en la evaluación de riesgos en una gran variedad de aplicaciones:

- Análisis del estado de la estructura de un edificio en peligro de colapso.
- Valoraciones de posibles deformaciones de estructuras con el paso del tiempo debido a fuerzas externas o internas.
- Detección de zonas potencialmente inundables mediante el análisis topográfico del terreno.
- Simulación de deslizamientos de laderas o terremotos.
- Evaluación de las condiciones y análisis de seguridad de carreteras y puentes.
- Documentación de zonas catastróficas, incluyendo colapsos de edificios, defectos en carreteras y fallos estructurales, vehículos dañados; áreas de colisión, incluyendo carreteras, puertos navales, aparcamientos y escaleras; restos de edificios incendiados; con nuevos diseños y bases de datos de escaneados as-built.
- Registro de escenas de crímenes (comparación de perfiles de los daños, ninguna alteración de las pruebas, incorporación del entorno, rápida evacuación de la escena).
- Levantamiento de áreas con gran densidad de tráfico sin tener que cerrarlas ni riesgo al personal.
- Realización de mediciones precisas y a distancia de taludes de rocas (con peligro de desprendimiento).
- Simulación de maremotos.
- Cartografía SIG: localización de población afectada e infraestructuras críticas tales como hospitales o parques de bomberos.

#### **1.4.4.2. CARACTERÍSTICAS DEL ESCÁNER LÁSER.**

El escaneado láser describe un método mediante el cual una superficie se muestrea o escanea usando tecnología láser. Se analiza un entorno u objeto real para tomar datos sobre su forma y, posiblemente, su apariencia (por ejemplo color). Los datos capturados pueden ser usados más tarde para realizar reconstrucciones digitales, planos bidimensionales o modelos tridimensionales útiles en una gran variedad de aplicaciones.

La ventaja del escaneado láser es el hecho de que puede tomar una gran cantidad de puntos con una alta precisión en un periodo de tiempo relativamente corto. Es como tomar una fotografía con información de profundidad. Y al igual que en el caso de la fotografía, los

escáneres láser son instrumentos de línea de vista. Por tanto, es necesario realizar múltiples capturas desde diferentes estaciones para garantizar una cobertura completa de una estructura.

En la actualidad la experiencia nos muestra las ventajas

#### **1.4.4.3. ESCANEADO LÁSER ESTÁTICO Y DINÁMICO.**

La tecnología actual de los escáneres láser se puede dividir en dos categorías, estático y dinámico.

Cuando el escáner se mantiene en una posición fija durante la toma de datos, se llama escaneados láser estático. Las ventajas de este método son la alta precisión y la relativa alta densidad de puntos. El láser escáner estático suele ser el método más extendido a la hora de realizar escaneados terrestres. Sin embargo, no todos los escaneados láser terrestres son estáticos.

En los casos de láser escáner dinámico, el escáner se suele montar en una plataforma móvil. Estos sistemas requieren otros sistemas de posicionamiento adicionales tales como INS O GPS, lo que hace que el sistema completo sea más complejo y caro. Ejemplos de láser escáner dinámico los encontramos en aviones (láser escáner aerotransportado), escáneres sobre vehículos o plataformas aéreas no tripuladas.

El trabajo de la tesis se realiza con el escaneado láser estático.

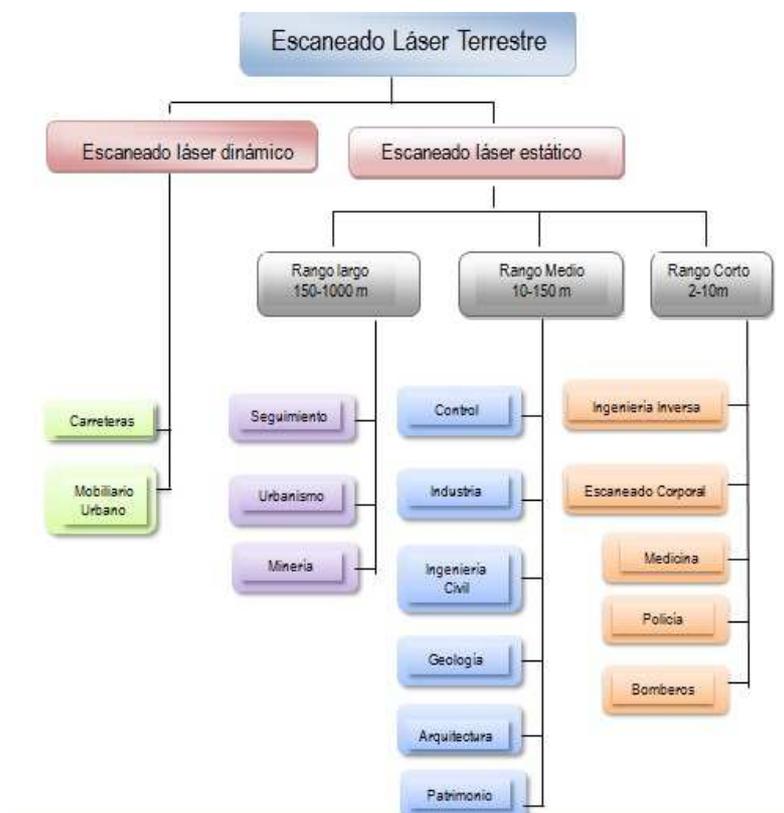
#### **1.4.4.4. APLICACIONES DEL ESCANEADO LÁSER.**

En un principio, los escáneres láser eran de corto alcance y se utilizaban principalmente en el diseño automatizado e industrial para facilitar el diseño Asistido por Ordenador (CAD). Esto ayudó a la producción en masa de productos de consumo.

Sin embargo, otros campos han sido explotados como consecuencia de la constante evolución tecnológica. Los escáneres láser de medio alcance fueron desarrollados para la industria petroquímica. Debido a la complejidad de sus plantas, que sólo estaban documentadas como planos en dos dimensiones, los escáneres láser permitieron la gestión completa en tres dimensiones.

Otras disciplinas como el patrimonio cultural, la arquitectura, el desarrollo urbanístico, la medicina forense y la industria del entretenimiento están empezando a adoptar esta tecnología

gracias a las ventajas obvias del láser escáner: la inexistencia de contacto en las mediciones, la alta precisión, el largo alcance, la rápida adquisición, etc., figura 9.



**Figura 9. Aplicaciones del Láser Escáner.**

#### 1.4.4.5. ESCÁNER LÁSER Y ANÁLISIS DE INCENDIO.

Una de las grandes dificultades que se encuentra el mando responsable de la intervención en un incendio es realizar una valoración del edificio. Controlar el estado de la estructura. Preparar la documentación para el informe. Transmitir la situación a su mando superior. Todo ello después de la actuación.

Esta situación se agrava si depende del responsable, que el edificio donde se ha producido el incidente, debe de ser habitado por los usuarios del mismo. Otro matiz importante suele ser que esta situación se produce normalmente por la noche o de madrugada. Con personas mayores y niños que lo que necesitan es volver a su vivienda.

Tras unas primeras pruebas realizadas con el Escáner Laser, se llegó a la conclusión, que esta herramienta es de gran utilidad para trabajar en la obtención de la geometría exacta del lugar.

Además la herramienta se puede colocar inmediatamente después del momento en que ha sido controlado el incidente, tanto sea un incendio como un derrumbamiento. Incluso antes de que puedan entrar los técnicos.

Se puede colocar el equipo por personal de intervención en la zona afectada y comenzar a trabajar. Aun con atmosferas enrarecidas. Para clarificar la situación, indicar que el laser se coloca en la zona caliente y el ordenador donde se reciben los datos se ubica en una zona templada o fuera de peligro. En esta zona ya pueden estar trabajando personal técnico con las imágenes obtenidas. Valorar la estructura y algún incidente digno de tener en cuenta.

Otra tarea para la que tiene utilidad la herramienta es la obtención de la geometría en poco tiempo. Permite que se pueda comenzar a rehabilitar de manera inmediata. Con esta maniobra todos los datos quedan para análisis posteriores, sin necesidad de volver al lugar del siniestro.

Después de realizar las primeras tomas, se han detectado que manejar esas nubes de puntos tan grandes dificultan y ralentizan enormemente la maniobra que intentamos conseguir. Por lo que investigando para poder conseguir aligerar la nube de puntos, buscamos que métodos hay en la actualidad.

Woo, H.[44] en un estudio realizado, propone un algoritmo donde utiliza un método 3D de la red basada en un octal para manejar una gran cantidad de conjuntos desordenados de puntos de datos. Las rejillas de 3D finales se construyen a través de un proceso de refinamiento y subdivisión interactivo de celdas usando los valores normales de puntos.

Richard J. Campbell, [45] ha trabajado sobre la necesidad de datos necesarios que hacen falta para describir los volumen de los escenarios. Revisa todos los artículos publicados sobre este tipo de procesos, tanto la construcción de modelos 3D como las técnicas utilizadas para detectar e identificar los objetos de forma libre a partir de imágenes.

Vieira, M. [46] realiza un proyecto para la compartimentación de una extensión amplia de terreno y prepara un algoritmo que calcula la cantidad de puntos y a continuación remarca las curvaturas del escenario. A continuación, filtra las curvaturas y las líneas de partición de los terrenos donde se produce el estudio. De esta forma, agiliza el trabajo de manera significativa.

Pingbo T. [47], realizan una aplicación informática para poder aligerar la creación de figuras geométricas con las nubes de puntos recogidas. Subdividen el proceso en tres operaciones básicas.

Una vez valorado los distintos estudios para aligerar la nube de puntos, el tutor del trabajo, D. José Herráez, propone la búsqueda de un método más sencillo para simplificar parte de los puntos de la nube. Este es uno de los objetivos del trabajo. Vamos a buscar un procedimiento para aligerar las nubes de puntos mediante dos métodos distintos. Un primer método mediante "Momentos de Inercia", el otro mediante mínimos cuadrados y controlando los factores residuales que quedan. Con ello, construiremos una rutina informática que nos permita introducir los datos en un programa informático y con ello trataremos de analizar la problemática de los incendios en una primera fase post-incidente. Posteriormente y con más calma, una segunda fase de investigación y análisis de los incendios para poder estudiar nuevos fenómenos que aparecen en el proceso de combustión y que interesa dar solución.

#### **1.4.4.6. EXPERIENCIA EN OTRO CAMPOS.**

##### ***1.4.4.6.1. Investigación en accidentes de circulación.***

En la actualidad, la tecnología láser ayuda al equipo forense de investigación de tráfico a reconstruir los siniestros más graves con exactitud y en triple dimensión.

Cuando ocurre un accidente grave en la carretera, y los únicos testigos del desastre son los muertos o los heridos graves, la ciencia es el único recurso que queda para averiguar cómo pasó y por qué ocurrió.

Este par de cuestiones son las preguntas fundamentales que se plantean ante cualquier caso los dos únicos equipos forenses de investigación de accidentes de la Guardia Civil que existen en España: el de Mérida, fundado en 1998, y el de Madrid, creado en 2003.

Ante esta situación disponen con esta tecnología que les permite reconstruir los siniestros más complicados con total precisión y en tres dimensiones.

El equipo le permite hacer reconstrucciones virtuales y exactas de las escenas de los accidentes en tres dimensiones, incluyendo las medidas y distancias que antes tenían que ser recogidas por los especialistas con cintas y otros sistemas de medición. El margen de error máximo para las mediciones realizadas con esta tecnología es de aproximadamente seis milímetros.



**Imagen 3. Equipo de la Guardia Civil en el escenario del accidente.**

El trabajo, que antes podía costar un mes de trabajo, entre la toma de fotografías, mediciones, reproducción de la topografía y orografía del escenario, ahora se puede realizar en una mañana, y ni siquiera es necesario que los especialistas tengan que cortar el tráfico en la vía para trabajar sobre la calzada, ya que se puede hacer a distancia.

Después hay que interpretar toda la información recogida por el escáner láser, y recrear las escenas del accidente y las diferentes hipótesis de lo que pudo ocurrir con la ayuda de programas informáticos de simulación y reconstrucción. La labor posterior de reconstrucción, y la elaboración y pruebas de diversas hipótesis con sistemas de simulación, puede prolongarse durante más de un mes, por lo que no es extraño que el cuerpo de la Guardia Civil, que se encarga de estos trabajos, no se ocupe de más de 20 casos a lo largo de un año. Otra ventaja del nuevo equipo es que no importa lo complicado que resulte el caso, o que el número de vehículos implicados en el accidente sea elevado.

#### **1.4.4.6.2. Investigación de criminología.**

Cuando los investigadores de la escena del crimen procesan una escena para hacer un diagrama en 2D, es inevitable que se toman muchas decisiones subjetivas acerca de lo que se encuentra (medida). Los cuerpos, casquillos de bala, armas de fuego y manchas de sangre son obvias y siempre va a estar ubicada. Pero cuando se trata de objetos secundarios, estos se recuerdan durante los primeros momentos, luego se olvidan. Los investigadores rara vez son capaces de identificar de manera concluyente que todo lo importante para determinar con precisión lo que ocurrió. Existe una circunstancia clara y es que con la tecnología laser, la geometría del siniestro nunca se perderá.

Con el escáner láser que es de largo alcance y de alta precisión, se puede trabajar a pleno sol o en la oscuridad total, en interiores o exteriores. La cámara digital integrada permite que los datos de medición en 3D (conocido como "nube de puntos") se puedan asignar de forma automática en los datos de producción de un renderizado en 3D visualmente impresionante de la escena.

Hay que matizar que los datos obtenidos del escáner no son una reconstrucción en 3D o la interpretación de un profesional de la escena. Son los datos de la escena.

El escaneo láser 3D de Leica ofrece la posibilidad de volver, incluso años más tarde, para explorar imágenes detalladas y mediciones exactas de la escena original. Se puede revisar el análisis espacial y generar nuevas hipótesis basadas en la alta resolución. Se puede navegar a través de la escena, zoom dentro y fuera para escudriñar cada detalle.

Con los datos del escáner láser 3D ScanStation se puede crear todo, desde un diagrama de la escena 2D sencilla de un jurado preparado para la reconstrucción totalmente animada basada en la evidencia precisa y análisis de los expertos.

ScanStation permite a los investigadores a la escena del crimen:

- Precisión de exploración, fotografía y escenas de evaluar la delincuencia de hasta 300 metros
- Captura de datos y crear la escena del crimen para su posterior examen y la recreación
- Crear diagramas en 2D muy precisos escena
- Crear exposiciones jurado visualmente atractivas y 3D "mosca de throughs"
- Importar datos de nube de puntos en 3<sup>o</sup> programas de los partidos de animación

#### **1.4.5. BIBLIOGRAFÍA.**

[1] González, R., García, E.M., Orlando, C. "Manual Curso de Extinción en Interiores, Flash-Over". Diputación de Badajoz, 2004.

[2] García, E.M., Navarrete, J. "Manual del Curso Dirección en Situación de Emergencia". Diputación de Badajoz. 2002.

[ 3 ] García, E.M., Loma-Ossorio, E. "La Simulación Computacional aplicada al Estudio de los Edificios de Gran Altura". VIII Congreso de los Servicios de Emergencia. Asociación Profesional de Técnicos de Bomberos. Octubre 2077.

[4] García, E.M., Navarrete, J. "Manual del Curso de Intervención en Incendios Forestales". Diputación de Badajoz. 2006.

[5] García, E.M. "Manual del Curso de Investigación de Siniestros". Diputación de Badajoz. 2004.

[6] García E.M. y otros. "Dirección de Equipos de Trabajo para Jefes de Dotación y Jefes de Grupo (Niveles 3 y 4)". Ediciones GPS. Julio 2011.

[7] García, E.M. y otros. "Estrategias de Diseño en Edificios: accesibilidad y seguridad frente a incendios". Monografías CAT, Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España. Febrero 2008.

[8] Varios, "Seguridad y Medio Ambiente. Especial Prevención de Incendios 2008. Fundación Mapfre. 2008.

[9] <http://www.insht.es>.

[10] LEY 4/2004, de 30 de junio, de Ordenación del Territorio y Protección del Paisaje. BOE 174/2004 de 20-07.2004, pág. 26294.

[11] REAL DECRETO 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el código Técnico de la Edificación. BOE núm. 74 de 28-03-2006, pág. 11816.

[12] REAL DECRETO 2267/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de Seguridad Contra Incendios en los Establecimientos Industriales. BOE núm.303. Viernes 17 de diciembre de 2004.

[13] Orden de 16 de abril de 1998 sobre normas de procedimiento y desarrollo del Real Decreto 1942/1993, de 5 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones de Protección Contra Incendios. BOE 101/1998 de 28-04--1998, pág. 14109.

[14] Vega, L. "Adecuación del CTE a la intervención en edificios existentes". Jornada sobre CTE y la rehabilitación de edificios. CONSTRUMAT 2011. 20 de mayo de 2011.

[15] Notarianni, KA, "la incertidumbre", Capítulo 4, Sección 5, Manual de Ingeniería de Protección contra Incendios, 3<sup>a</sup> edición, DiNenno, PJ, editor de la Sociedad de Ingenieros de Protección contra Incendios, de 2002.

[16] Kodur, V., Garlock, M., Iwankiw, N. "Structures in Fire: State-of-the-Art, Research and Training Needs". Fire Technology. October 2011.

[17] Utiskul, Y. "Theoretical and Experimental Study on Fully-Developed Compartment Fires". Building and Fire Research Laboratory. National Institute of Standards and Technology. February 2007.

[18] Imamura, T. Sugawa, O. y otros. "Flame Height of a Turbulent Diffusion Jet Flame with a Comparatively High Initial Discharging Velocity. Fire Science and Technology. Vol. 29 No. 1 (2010), pág. 15-26.

[19] Ota, M., Kuwana, Y., y otros. "A Study on Smoke Behavior in a Compartment with Sprinkler System Activation - Simple Predictive Method on Mass Flow Rates Based on Experimental Study-. Fire Science and Technology, Vol. 28, N° 3 (2009), pág. 88-105.

[20] "Víctimas de incendios en España 2010". Instituto de Prevención, Salud y Medio Ambiente. Fundación Mapfre. Octubre 2011.

[21] Collier, P. "Fire in a residential building. Comparisons between experimental data and a fire zone model.

[22] Francis, J., Chen, A.P. "Observable characteristics of flashover". Fire Safety Journal 51. 2012. Pág., 42-52.

[23] UNE-EN ISO 13943:2001. Seguridad contra incendios. Vocabulario. AENOR.

[24] [www.greenpeace.org](http://www.greenpeace.org)

[25] <http://146.83.41.82/articulos/Dise%C3%B1o%20Funcional%20de%20un%20Simulador%20de%20Incendios.pdf>

[26] <http://www.recercat.net/bitstream/handle/2072/5208/TreballDeRecerca.pdf?sequence=1>

[27] Castrillón M.; Jorge P.A.; López I.J.; Macías A.; Martín D.; Nebot R.J.; Sabbagh I.; Sánchez J.; Sánchez A.J.; Suárez J.P.; Trujillo A., “Aplicación para la gestión de emergencias en la comunidad canaria: el caso de predicción y simulación de incendios.

[28] M<sup>a</sup> Victoria Noguero Planas, “Integración de Farsite en el entorno de simulación para UAS”, Universitat Politècnica de Catalunya.

[29] Romana Ruiz, M.: “Incendios en túneles”. Curso teórico-práctico sobre incendios en túneles. San Pedro de Anes (Asturias), 6, 7 and 8 May 2009. Organized by Servicios Técnicos de Mecánica de Rocas S. L. (STMR), Madrid

[30] Lacroix, D. “The Mont Blanc Tunnel Fire: what happened and what has been learned” Proc. 4th Int. Conf. on Safety in Road and Rail Tunnels, Madrid, Spain, 2-6th April 2001, pp. 3-16.

[31] Secretariat du Grand Conseil de la République et canton de Genève: “Rapport M 1375-A de la Commission des affaires communales, régionales et internationales chargée d’étudier la proposition de motion pour un tunnel du Mont-Blanc moins dangereux et moins polluant”. Geneva, 18 September 2001. Downloadable from [www.ge.ch/grandconseil/data/texte/M01375A.pdf](http://www.ge.ch/grandconseil/data/texte/M01375A.pdf).

[32] “Les feux de tunnel”. Soldats du Feu, Paris, 8 December 2009.

[33] Carvel, R.O. and Torero, J.L.: “The contribution of asphalt road surfaces to fire risk in tunnel fires: preliminary findings”. Proceedings Int. Conf. Risk and Fire Engineering for Tunnels, Stations and Linked Underground Spaces, 19-20 April 2006, Hong Kong. Organized by Tunnel Management International, Tenbury Wells, Worcs., United Kingdom. Downloadable from <http://www.era.lib.ed.ac.uk/bitstream/1842/895/1/Carvel%20Torero%20Hong%20Kong%202006b.pdf>.

[34] Demouge, F.: “Comportement au feu des chaussées bitume en cas d’incendie en tunnel routier. Rapport d’étude bibliographique” Centre Scientifique et Technique du Batiment (CSTB), Paris, September 2004.

[35] Romana Ruiz, M.: “El comportamiento del hormigón de los túneles frente al fuego”. IV Simposio de Túneles, Andorra, 26 to 28 October 2005. Organized by Asociación Técnica de Carreteras, Madrid.

[36] Caballero, D., Esteban, J., Izquierdo, B. "ORCHESTRA a Unified an Open Architecture for Risk Management Applications". Geophysical Research Abstrats, Vol. 9, 08557, 2007.

[37] WWW, English\_Heritage. 3D Laser Scanning for Heritage, Advice and Guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture: 2007. <http://www.heritage3d.org/downloads/3dscanning.pdf>.

[38] WWW, English\_Heritage. An addendum to the metric survey specifications for English heritage – the collection and archiving of point cloud data obtained by terrestrial laser scanning or other methods. 2006. <http://www.ceg.ncl.ac.uk/heritage3d/downloads%5Caddendum2006.pdf>.

[39] Soubra O.P., Lorenzo, A. "Aplicaciones de láser escáner 3D Trimble-MENSI en estudios de accidentes y de criminología (forensics). VIII Congreso Nacional de Topografía y Cartografía. TOPCART 2004. Madrid, 19-22 Octubre 2004.

[40] WWW.HOY.es. Accidente mortal en tres dimensiones. Comentado en tres dimensiones. <http://www.hoy.es/20071024/regional/accidente-mortal-tres-dimensiones-20071024.html>.

[41] Lerma, J.L., Biosca, J.M., 3D RiskMapping. Teoría y práctica del Escaneado Láser Terrestre. Vlaams Leonardo Da Vinci Agentschap, Versión 5, Septiembre 2008.

[42] Bernardini, F., Rushmeier, H. "The 3D Model Acquisition Pipeline". Computer Graphics forum. Volumen 21, number 2, 2002, pp. 149-172.

[43] García, B., Díaz de Apodaca, L., Seco, A. "Comparativa en coste y rendimiento entre las "Tecnologías Clásicas" y el Escáner Láser 3D de largo alcance en un proyecto concreto". Universidad Pública de Navarra. Ponencia impartida en la IV jornadas, Aplicaciones GPS, Navarra, enero de 2006.

[44] Woo, H., Kang, E., Wang, S., Lee, K.H. "A new segmentation method for point cloud data. International Journal of Machine Tools & Manufacture 42 (2002) 167-178.

[45] Campbell, R.J., Flynn, P.J. "A Survey of Free-Form Object Representation and Recognition Techniques". Computer Vision and Image Understanding 81, 2001, pág. 166-210.

[46] Vieira, M., Shimada, K. "Surface mesh segmentation and smooth surface extraction through region growing. Computer Aided Geometric Design 22, 2005, pág. 771-792.

[47] Tang, P., Huber, D., Akinci, B., Lipman, R., Lytle, A. "Automatic reconstruction of as-building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques". Automatic in Construction 19 (2010), pp. 829-843.

## ÍNDICE DEL CAPÍTULO 2

2.	MÉTODOS.....	74
2.1.	OBTENCIÓN DE DESCRIPTORES GEOMÉTRICOS.....	78
2.1.1.	Obtención de datos crudos mediante láser escáner.....	78
2.1.1.1.	Registro de la Nube de Puntos.....	79
2.1.1.2.	Base de datos.....	79
2.1.2.	Pre-procesado de los puntos.....	80
2.1.2.1.	<i>Tratamiento de puntos</i> .....	80
2.1.2.2.	<i>Indexado espacial</i> .....	80
2.1.3.	Parámetros descriptores de la geometría.....	81
2.1.3.1.	<i>Estimador de la Varianza</i> .....	82
2.1.3.1.1.	<i>Fundamentos matemáticos</i> .....	83
2.1.3.1.2.	<i>Aplicación del Fundamento</i> .....	86
2.1.3.1.3.	<i>Interpretación</i> .....	87
2.1.3.2.	<i>Momentos de Inercia</i> .....	89
2.1.3.2.1.	<i>Fundamento Matemático</i> .....	89
2.1.3.2.2.	<i>Resolución del Polinomio Asociado</i> .....	91
2.1.3.2.3.	<i>Aplicación de Rotaciones Sucesivas</i> .....	92
2.1.3.2.4.	<i>Interpretación de Autovalores</i> .....	94
2.1.3.3.	Resultados obtenidos.....	98
2.1.3.3.1.	<i>Resultados para el estimador de la varianza</i> .....	99
2.1.3.3.2.	<i>Resultados para los momentos de inercia</i> .....	103
2.2.	SOFTWARE DESARROLLADO.....	109
2.2.1.	APLICACIÓN DESARROLLADA EN ArcGIS.....	110
2.2.2.	APLICACIÓN DESARROLLADA EN LENGUAJE DE PROGRAMACION JAVA... ..	121

## CAPITULO 2

---

### 2. MÉTODOS.

En el presente capítulo se aborda el traslado de los datos obtenidos con la tecnología láser a la programación informática de incendios. Durante la elaboración del trabajo se ha observado que en esta maniobra podemos extraer del lugar donde se ha producido el incendio unos datos de vital importancia para el equipo que se encuentra trabajando.

En el programa realizado para poder buscar los parámetros que nos sirven para marcar las esquinas y los lugares señalados para anclar los datos, se observa que aparecen zonas que no guardan una regularidad característica de los parámetros lisos. Estos lugares suelen ser zonas donde hay patologías en construcción.

Con estos datos, podemos ampliar las zonas de seguridad de los intervinientes. De igual manera valorar medidas de recuperación de los edificios dañados.

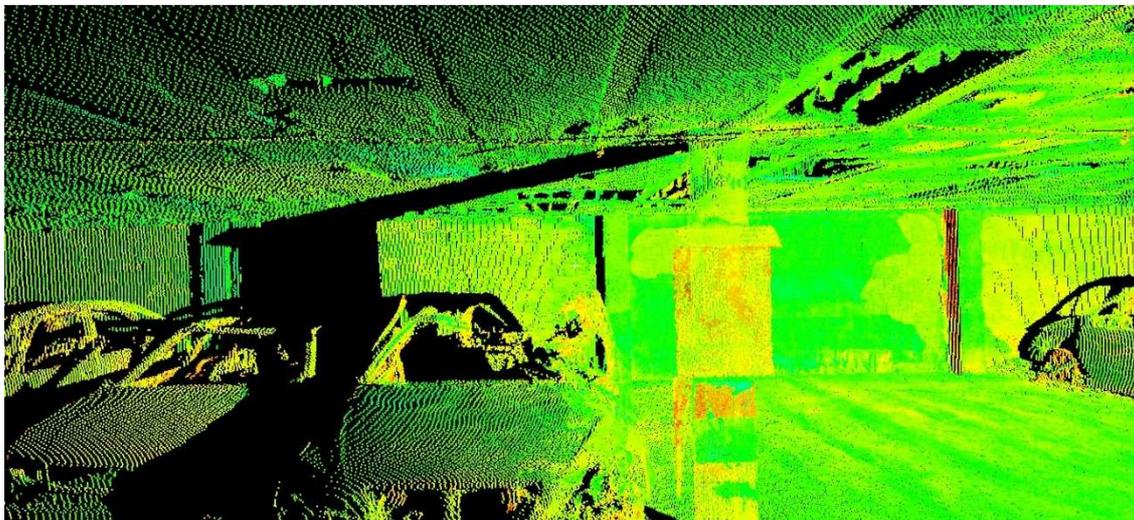
Para poder analizar estos parámetros de partida se han tenido que realizar unas pruebas. La experiencia se ha realizado en tres de los últimos incendios de envergadura de la ciudad de Valencia.

El 7 de febrero se produjo un incendio en un garaje de la calle Martín el Humano. Fue de gran magnitud. No se han tenido que lamentar pérdidas de vidas humanas pero si bienes materiales. Un total de 21 coches y dos motos resultaron dañados por el fuego. La intensa humareda afecto a otros 30 vehículos más.

La actuación fue difícil debido a la gran magnitud del aparcamiento y por la cantidad de aire que soplaba ese día. Como denominador común se desarrollo durante la noche.

Al poco de terminar la actuación se presento el equipo de trabajo y se tomó la geometría del recinto. Una de las primeras observaciones realizadas es la que se podía trabajar con el escáner en el interior del lugar afectado y el personal técnico se encontraba fuera y podía valorar las imágenes obtenidas sin ningún peligro, al no tener que respirar gases contaminados ni riesgo de colapso por problemas en la estructura.

Desde el momento que se tiene la geometría, Figura 10, se busco los puntos más delicados de la estructura.



**Figura 10. Imagen de la nube de puntos de la zona afectada.**

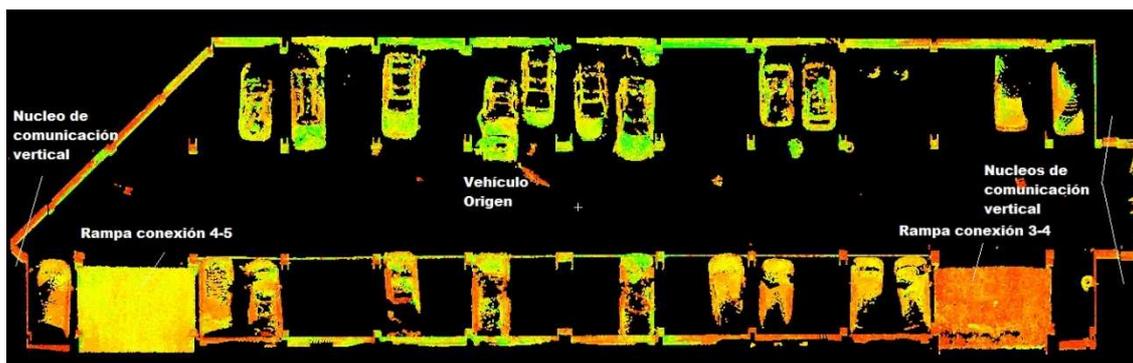
Estos puntos se obtuvieron con una revisión más detallada de las imágenes obtenidas, Figura 11.



**Figura 11. . Detalle de patología en estructura.**

Con estas imágenes se puede cuantificar de forma veraz la situación de la estructura y las características de los apuntalamientos necesarios. Con la nube de puntos se puede tomar las medidas necesarias para valorar distancia de vanos y superficies para apuntalar.

Con la geometría del lugar ya se puede realizar un informe detallado del incidente. El número de vehículos y la posición de los mismos. También puede servir por si hay que mandar nuestro informe al juzgado. Se cuenta con una imagen muy identificativa del siniestro, Figura 12.



**Figura 12. Posicionamiento de los vehículos tras el incendio.**

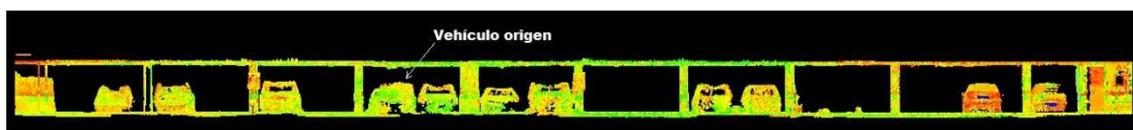
Pero lo más importante para el cuerpo de bomberos es el análisis del siniestro. Su importancia radica en dos matices. Uno la seguridad del personal que trabaja en el interior. Dos, valorar si la actuación ha sido la correcta.

Para llevarla a cabo se necesita saber lo que ha pasado. Con las imágenes se puede hacer una puesta en común de los actuantes. Se extraen unas conclusiones necesarias.

Otra circunstancia poder informar a los medios de comunicación de cuál es la actuación del Servicio de Bomberos. El hecho de que los vehículos afectados ascendieran hasta medio centenar hizo saltar la alarma entre los responsables de los propios Bomberos.

No se suelen realizar análisis de los incendios sin tener buenos datos. La experiencia demuestra que sin una buena geometría no se puede realizar una buena investigación. Es fácil haber comenzado una revisión del siniestro y entre los actuantes estar en desacuerdo.

Con las imágenes que brinda el escáner láser, las dudas de los escenarios se reducen de manera significativa. La puesta en común y la investigación resultan más eficaces, figura 13.

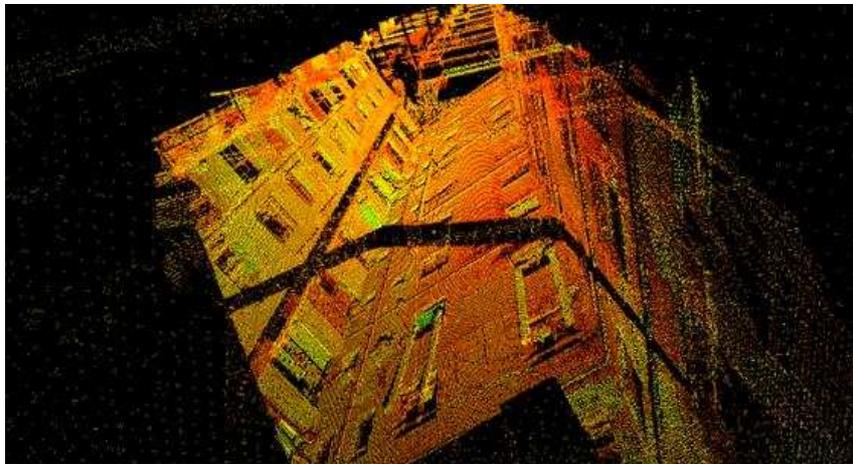


**Figura 13. Alzado de la zona del incendio con la posición de los vehículos afectados.**

Otro servicio que sirvió para poner a prueba las ventajas de poder trabajar con la tecnología láser ha sido el incendio en vivienda que sucedió en la calle Doctor Waksman nº 33. Se trata de un incendio en vivienda de una gran virulencia. Gracias esta herramienta se ha podido extraer unas conclusiones muy importantes sobre las patologías observadas. De igual manera, se han extraído los datos necesarios para poder trasladarlos al programa de simulación y realizar los análisis necesarios para poder ver como se comporta el incendio en situaciones extremas.



*Figura 14. Zona de máxima afección por parte del incendio.*



*Figura 15. Parte del edificio por donde se desarrolla la combustión.*



*Figura 16. Zona del interior donde se encuentra el foco de inicio.*

## **2.1. OBTENCIÓN DE DESCRIPTORES GEOMÉTRICOS.**

En el presente apartado se van a analizar y describir dos métodos con el objetivo de obtener parámetros que describan la geometría de nubes de puntos obtenidas a partir de mediciones con láser escáner.

En primer lugar se explicará de qué manera se obtienen los conjuntos de datos láser escáner en un proceso de análisis de riesgos a través de simulaciones de incendios. Seguidamente se procederá a justificar la necesidad de un proceso de filtrado y en último lugar se procederá al desarrollo de los descriptores geométricos para las nubes de puntos obtenidos en los procesos de medición en campo.

### **2.1.1. Obtención de datos crudos mediante láser escáner.**

Paso imprescindible que se debe realizar previo a cualquier toma de datos es la planificación. Dado que los volúmenes de información que se obtienen a partir de una campaña de medición con éste tipo de dispositivos son tan grandes es vital realizar una correcta planificación de la localización idónea de los puntos de estacionamiento del dispositivo láser escáner para minimizar la toma de información redundante, teniendo en cuenta que no se deben dejar zonas de sombra (zonas en las que no se disponga de información espacial y por lo tanto no se pueda modelar) y procurando una densidad de puntos lo más uniforme posible con tal de evitar comportamientos extraños en los parámetros descriptores a causa de demasiada heterogeneidad en las muestras de datos espaciales.

Una vez estudiadas las posiciones idóneas para colocar el instrumental se procede a realizar la toma de datos. Se deben tomar ciertas precauciones con tal de evitar los errores groseros (equivocaciones), antes, durante y después del proceso de medida. Comprobando (entre otras cosas) que exactamente se está estacionando en el punto adecuado, que la densidad de puntos es adecuada a la distancia del objetivo, que se han guardado correctamente los datos en el equipo, que los solapes entre escaneados son adecuados y suficientes o que, en caso de que sea necesario, se han medido suficientes referencias para hacer el encaje espacial. Estas precauciones son básicas y comunes a muchos trabajos de carácter topográfico y de sentido común, sin embargo es básico obtener correctamente los datos base sobre los que se va a trabajar para evitar complicaciones futuras.

### **2.1.1.1. Registro de la Nube de Puntos.**

Una vez obtenidos los puntos en campo se ha obtenido una base de datos en la que hay almacenadas en tablas todos los puntos que el dispositivo ha registrado de los diferentes escaneados. Cada tabla representa un escaneado distinto, y cada tabla (conjunto de puntos particular en el espacio) está en su propio sistema de coordenadas orientado particularmente en el espacio y cuyo origen es el centro del láser escáner. Lo más habitual es trabajar desorientado con tal de evitar errores innecesarios, lo que significa que estas tablas no están registradas en ningún sistema útil para el usuario, es necesario poner todo estos “modelos” con sistemas de referencia particulares en un sistema de referencia espacial común. Éste proceso se suele llamar “Registro”.

Para realizar el registro de las nubes de puntos se buscan puntos comunes en nubes vecinas, lo que permite encontrar geometrías comunes en ambas nubes y conseguir orientarlas. Aunque el proceso más recomendable es utilizar referencias en un sistema de coordenadas local y ajustar las nubes a esas referencias. Es un proceso en el que recomendablemente se deben trabajar con más referencias de las necesarias, para poder obtener grados de libertad y resolver mediante mínimos cuadrados, con tal de tener información acerca de la calidad del ajuste. Ya que al fin y al cabo se están calculando parámetros para trasladar y girar puntos en el espacio, por lo que por cada nube se necesitarán al menos 6 coordenadas para poder ajustar (3 traslaciones y 3 giros).

### **2.1.1.2. Base de datos.**

Tras el proceso de registro se obtiene una base de datos con todos los puntos medidos por el láser escáner en un mismo sistema de coordenadas espacial, listo para empezar a trabajar. Como curiosidad, una vez registrada la nube se tiene la posibilidad de combinar todas las tablas de los distintos escaneados en una única tabla o mantenerlos en tablas distintas, de modo que se puede saber qué punto pertenece a qué escaneado, y que será la opción con la que se trabaje en un principio en ésta tesis. Ya que en un mismo entorno espacial los algoritmos en desarrollo pueden tomar puntos de escaneados distintos, con distancias al objetivo muy dispares y por lo tanto de precisiones dispares, lo que puede afectar al comportamiento y la calidad de la discriminación posterior, con lo que si se mantienen los escaneados (también llamados en algunos casos “Bloques”) por separado podremos acceder a entornos espaciales medidos en las mismas circunstancias y distancia al objetivo, lo que permitirá evitar comportamientos extraños en el proceso de extracción de información geométrica.

## **2.1.2. Pre-procesado de los puntos.**

### **2.1.2.1. Tratamiento de puntos.**

Habitualmente el software específico que se utiliza para el manejo de los puntos obtenidos a partir de un láser escáner son programas diseñados con el fin de manejar fácilmente enormes cantidades de puntos a una gran velocidad, haciendo uso de bases de datos y modos de visualización avanzados. Pero debido a que los trabajos de investigación se están realizando en un software propio en el que no se utilizan los avanzados *engines* de software comercial se deberán hacer unas consideraciones previas para mejorar el rendimiento.

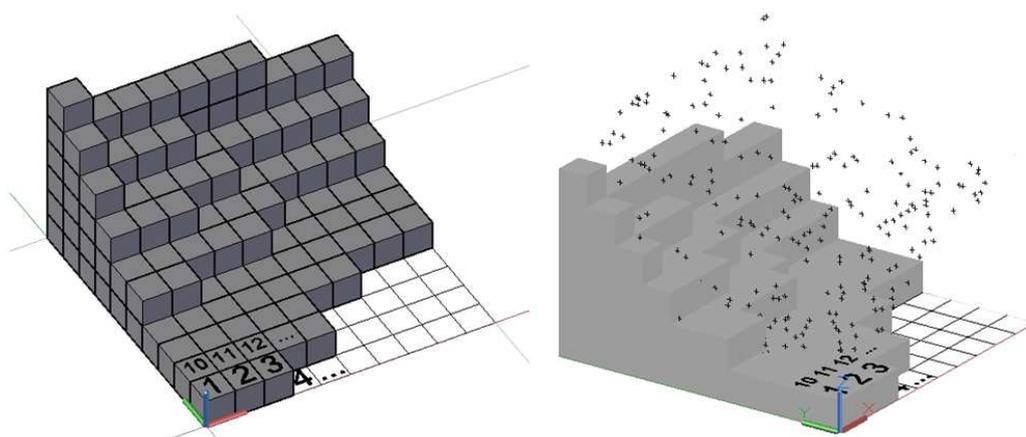
En primer lugar se extrae la información de la base de datos espacial (los puntos) y se exportan a un fichero de texto, mucho más fácil de acceder desde programación.

Dicho fichero tendrá un tamaño bastante grande, con una estructura en columnas separadas por espacios que contendrán las coordenadas espaciales en el sistema común (ya registrado) conteniendo también la intensidad y las coordenadas en el espacio de color RGB del retorno del láser. Apenas 7 columnas pero millones de filas (una fila por cada punto medido).

### **2.1.2.2. Indexado espacial.**

Debido al tamaño de estos ficheros de texto, es poco eficiente programar rutinas que busquen secuencialmente los puntos que se necesitan para construir los entornos sobre los que se van a extraer las propiedades geométricas, por lo que se creará un índice espacial una vez se ha estudiado las características de la nube de puntos.

Concretamente se obtendrá la envergadura del modelo escaneado y se subdividirá el espacio ocupado en cubos, de tamaño a definir por el usuario (aunque los estudios realizados hasta la fecha sugieren valores entre 2 y 5 centímetros de arista), de modo que cada punto del modelo quede dentro de algún cubo, siendo esta información conocida y almacenada en una tabla. Gráficamente el índice espacial creado sería similar al que se puede encontrar en la Figura 17. Se puede observar también cómo se numera secuencialmente los cubos por planos, empezando desde el nivel inferior, pudiendo existir cubos vacíos.



**Figura 17. Vista en perspectiva de la subdivisión del espacio.**

De ésta manera se conoce qué cubo contiene qué puntos y se puede acceder a un punto en concreto y obtener sus vecinos fácilmente.

Además, se combinan técnicas de búsqueda avanzadas para mejorar el proceso de búsqueda de puntos al construir los entornos, lo que mejora aún más el rendimiento.

### **2.1.3. Parámetros descriptores de la geometría.**

Una vez los datos están listos para su tratamiento se va a proceder a extraer la información que proporcione de qué manera está distribuida la nube de puntos para poder determinar las geometrías que conforman el objeto escaneado.

Para ello, secuencialmente, se van a ir seleccionando puntos de la nube y se analizará su entorno (puntos vecinos) con tal de determinar la distribución espacial de los puntos y ver si se asemeja a alguna forma para poder definirlo como una superficie y filtrar o simplificar la nube de un modo *semántico*, atendiendo a la naturaleza y no a las densidades. De este modo se eliminarán los puntos innecesarios y que no aportan información alguna, conservando aquellos que sirven para configurar los bordes o esquinas de paredes, ventanas o puertas entre otros.

En un primer momento se tratará de discriminar los bordes y esquinas, como elementos límite de los planos que configuran la mayoría de las construcciones humanas. De modo que, por ejemplo, en una muestra se podría utilizar el indicador de la distancia de los puntos al centro de masas de la muestra, de modo que si estuviera muy desplazado podríamos afirmar que probablemente se esté tratando con una muestra configurada a partir de puntos del marco de una puerta o una ventana.

Hay muchos indicadores con los que se podría extraer información, pero concretamente se va a trabajar con el estimador de la varianza de peso unidad a posteriori y desglosar completamente la información que proporciona el momento de inercia de la muestra.

### **2.1.3.1. Estimador de la Varianza.**

Este método se basa en observar el ajuste de la nube de puntos a un plano, de modo que si el ajuste es muy bueno u óptimo, probablemente estemos ante una muestra de una pared o elemento plano, como la hoja de una puerta o una mesa en sus partes centrales.

Para determinar el grado de ajuste se utiliza la técnica de los mínimos cuadrados, utilizando el valor de la varianza a posteriori como estadístico representativo del ajuste.

Cada observación particular del láser escáner construye una ecuación, planteando un sistema sobredimensionado con tantas ecuaciones como observables. El número de puntos a tomar en el ajuste dependerá de dos factores, la distancia al punto (habrá una distancia límite que no deberá ser sobrepasada en la búsqueda de puntos a introducir al cálculo porque puede perder significado si se toman puntos demasiado alejados del punto a analizar a causa de haber pocos vecinos). El otro factor será el número de puntos, se tomará un umbral a partir del cual ya no se seguirán buscando puntos a introducir en el entorno de cálculo por considerarse suficientes (esto suele ocurrir en zonas cercanas a la estación del escáner ya que la densidad de puntos es mucho más elevada puesto que el dispositivo trabaja de un modo polar).

Para las pruebas de funcionamiento realizadas los umbrales están abiertos y se han podido modificar, utilizando valores de 49 puntos máximo y 9 de mínimo. La distancia mínima de búsqueda era 27 bloques y el máximo el cubo de un número predeterminado, en nuestro caso 5, es decir, 125 cubos de búsqueda, que habría que multiplicar por la dimensión de la arista que se define para obtener el valor en distancia.

La ecuación del plano utilizada por todos y más conocida:

$$ax + by + cz = 1 \quad [E-2. 1]$$

En la que se observan 3 incógnitas y, generalmente, el sistema está formado por 49 ecuaciones, lo que produce un sistema con 46 grados de libertad o redundancias.

Para resolver dicho sistema se utilizará el método de los mínimos cuadrados que ahora se pasará a comentar de un modo superficial, para profundizar en el método se recomiendan los trabajos de (Chueca Pazos, y otros, 1996) o (Chueca Pazos, y otros, 1996) entre otros muchos.

**2.1.3.1.1. Fundamentos matemáticos.**

El método de mínimos cuadrados se basa en un modelo matemático y un modelo estadístico. El modelo matemático exige el cumplimiento de la condición que la suma de los residuos al cuadrado sea mínima, [E-2.2].

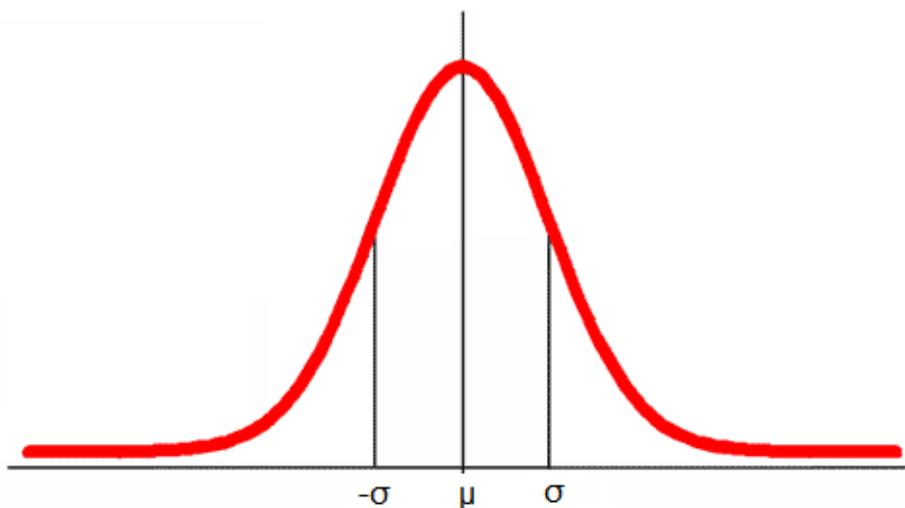
[E-2. 2]

En este caso los residuos serán las distancias de los puntos observados con láser escáner al plano calculado, por lo tanto, cumpliendo ésta condición se asegura que el plano obtenido sea el que tenga el mejor ajuste.

El modelo estadístico es que todos los residuos siguen una distribución normal de media 0 y desviación típica la unidad [E-2.3].

[E-2. 3]

El modelo estadístico encaja con la naturaleza de las observaciones que realiza el láser escáner, puesto que la teoría de errores indica que los errores son igualmente probables tanto positivos como negativos siempre que sean del mismo módulo. Errores menores (módulo más pequeño) serán más probables que errores mayores (siempre que el instrumento esté libre de sistematismos y que únicamente se esté trabajando con errores accidentales, no hayan errores groseros en el espacio muestral). Todo ello le da la forma característica de campana a la distribución que modeliza los errores accidentales en éste tipo de instrumentos.



**Figura 18. . Campana de distribución de errores accidentales.**

La función de probabilidad, que define la campana de Gauss es:

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}z^2}$$

Donde

$$z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

Que es la llamada variable normal tipificada, y se la representa con  $N(0,1)$ .

El área bajo la curva es igual a la totalidad de los eventos, que se expresa como:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$$

Una vez establecidas las premisas sobre las que se basa mínimos cuadrados se presentan dos caminos para resolver el sistema en función del planteamiento.

*Ecuaciones de condición* es el planteamiento más sencillo de comprender para las personas pero más complicado de programar, por lo que se utiliza poco actualmente pese a ser muy didáctico ya que se basa en condiciones de obligado cumplimiento de los observables (como por ejemplo que los lados de un triángulo plano deben sumar  $180^\circ$  o que un anillo cerrado de nivelación topográfica debe sumar desnivel 0).

La forma característica del sistema matricial de un sistema que se resuelve por mínimos cuadrados por ecuaciones de condición es:

$$\mathbf{BR} - \mathbf{K} = \mathbf{0} \quad [\text{E-2. 4}]$$

Siendo "B" La matriz de diseño (la que contiene los coeficientes), "R" el vector de los residuos y "K" el vector de términos independientes.

Las ecuaciones de condición conforman un sistema matricial de pocas filas y muchas columnas, construyéndose una fila por cada condición. Es importante conocer el número de grados de libertad, ya que coinciden el número de condiciones con el de grados de libertad y no se debe olvidar ninguna puesto que entonces el sistema proporcionará resultados erróneos.

Éste método proporciona las correcciones a los observables originales para obtener los observables compensados, con lo que la solución no es directa, requiere de un proceso posterior, aplicando las correcciones a los observables originales para poder trabajar con los

compensados que sí cumplirán las condiciones requeridas (por ejemplo que cierren a 0 las nivelaciones o que los triángulos estén compuestos por ángulos que sumen perfectamente 180°). Donde las correcciones a aplicar se obtienen como  $-1 \cdot r_{\text{residuo}}$  del observable tras el ajuste según se observa en [E-2.5].

$$O_{\text{Observado}} + C_{\text{Corrección}} = O_{\text{Compensado}} + \text{residuo} \quad [\text{E-2. 5}]$$

Como apunte final es importante destacar que las condiciones no deben ser linealmente independientes en ningún caso puesto que entonces no aportan información y es como omitir condiciones que sí deberían aparecer.

La dificultad en la construcción del sistema de ecuaciones y la implementación en software para resolver por ecuaciones de condición hacen que el método de *variación de coordenadas* (también llamado *observaciones indirectas*) sea el más utilizado a día de hoy y el que se utilizará en ésta tesis para resolver los sistemas de mínimos cuadrados.

Observaciones indirectas genera una ecuación por observable, y tiene tantas columnas como incógnitas, lo que produce un sistema matricial con muchas filas pero pocas columnas.

$$Ax = K \quad [\text{E-2. 6}]$$

Como se puede observar en [E-2.6], en observaciones indirectas se puede obtener directamente el vector de las incógnitas, que está premultiplicado por la matriz de diseño "A" o también llamada matriz de coeficientes. "K" tiene el mismo significado que en ecuaciones de condición.

Aplicando las multiplicaciones matriciales adecuadas podemos obtener la ecuación matricial para obtener las incógnitas directamente [E-2.7] (siempre que la matriz de diseño no contenga filas o columnas combinación lineal unas de otras ya que si no se produciría un defecto de rango y habrían problemas al invertir, por lo que se tendría que utilizar una pseudoinversa en vez de una inversa, quedando este aspecto fuera del alcance de la investigación).

$$x = (A^t A)^{-1} A^t K \quad [\text{E-2. 7}]$$

Pero la gran ventaja de mínimos cuadrados es, que al tener un modelo estadístico asociado, se puede tener información de la calidad del ajuste y la precisión en la resolución de las incógnitas.

Se pueden calcular directamente las matrices varianza-covarianza de las incógnitas (a diferencia de ecuaciones de condición que requeriría de la aplicación de las leyes de propagación de varianzas sobre las varianzas de los observables), pero en nuestro caso no se utilizará más que

el estadístico de la varianza a posteriori, que representa de un modo global la calidad del ajuste mínimo-cuadrático.

$$\sigma^2 = \frac{R^t R}{m-n} \quad [\text{E-2. 8}]$$

Donde "R" es el vector de los residuos una vez realizado el cálculo, "m" es el número de ecuaciones y "n" el número de incógnitas, la resta representan las redundancias del sistema (grados de libertad).

La interpretación del estimador es sencilla, a residuos mayores estimador más alto, y aumentando las redundancias disminuiríamos el módulo del estimador. Conviene por lo tanto, estimadores pequeños.

### 2.1.3.1.2. Aplicación del Fundamento.

A grandes rasgos se trata de montar el sistema matricial para resolver el plano en un punto y estudiar el estadístico. Se construye un bucle que recorrerá todos los puntos de la nube medida, seleccionando un punto y construyendo un entorno con sus puntos vecinos que se buscarán gracias al indexado espacial desarrollado. Cuando se tienen los puntos se construye un sistema de ecuaciones en forma matricial.

Se trata de obtener los parámetros que definen el plano que cumple la condición de mínimos cuadrados para ese conjunto de puntos, configurando cada punto en el espacio una ecuación, ya que proporciona una terna de coordenadas que son directamente asimilables en la ecuación del plano utilizada [E-2.1].

$$\begin{array}{ccc} x & y & z \\ \left[ \begin{array}{ccc} 3.21 & 5.52 & -0.45 \\ 5.67 & 5.76 & -0.22 \\ 3.46 & 6.03 & 0.17 \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{array} \right] & \xrightarrow{\text{Generan:}} & \begin{array}{l} 3.21a + 5.52b - 0.45c - 1 = 0 \\ 5.67a + 5.76b - 0.22c - 1 = 0 \\ 3.46a + 6.03b + 0.17c - 1 = 0 \\ \vdots \end{array} \end{array}$$

$$\begin{pmatrix} 3.21 & 5.52 & -0.45 \\ 5.67 & 5.76 & -0.22 \\ 3.46 & 6.03 & 0.17 \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ \vdots \end{pmatrix} \quad [\text{E-2. 9}]$$

En las ecuaciones presentes en [E-2.9] se puede comprobar el montaje manual del sistema con 3 puntos cualquiera. Obteniéndose al final un sistema  $Ax = K+R$  que es el que se resolverá.

Realmente los parámetros del plano calculado no son de mucha utilidad en éste caso, por lo que básicamente se calculan para obtener los residuos que proporcionen el estimador de la varianza.

Curiosamente la resolución del sistema matricial plantea una operación de la matriz de coeficientes por su traspuesta, teniendo en cuenta que la matriz de coeficientes contiene coordenadas en el espacio acaba resultando es la expresión siguiente.

$$A^t A = \begin{pmatrix} \sum_0^n x_i x_i & \sum_0^n x_i y_i & \sum_0^n x_i z_i \\ \sum_0^n y_i x_i & \sum_0^n y_i y_i & \sum_0^n y_i z_i \\ \sum_0^n z_i x_i & \sum_0^n z_i y_i & \sum_0^n z_i z_i \end{pmatrix}$$

Conteniendo además el vector de términos independientes todos sus términos iguales a la unidad, al multiplicar la traspuesta de la matriz de diseño por el vector de términos independientes se obtiene la expresión siguiente.

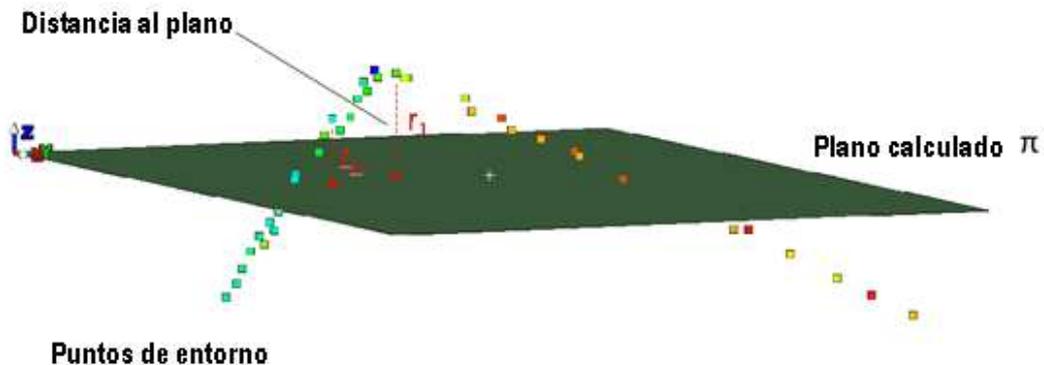
$$A^t K = \begin{pmatrix} \sum_0^n x_i \\ \sum_0^n y_i \\ \sum_0^n z_i \end{pmatrix}$$

Una vez obtenido el estimador de la varianza para el punto se pasa a repetir el cálculo con el siguiente punto con su propio entorno y así sucesivamente hasta obtener los estimadores para toda la nube de puntos.

Almacenando el valor del estimador en una nueva columna en las tablas de los ficheros de texto con los que se trabaja.

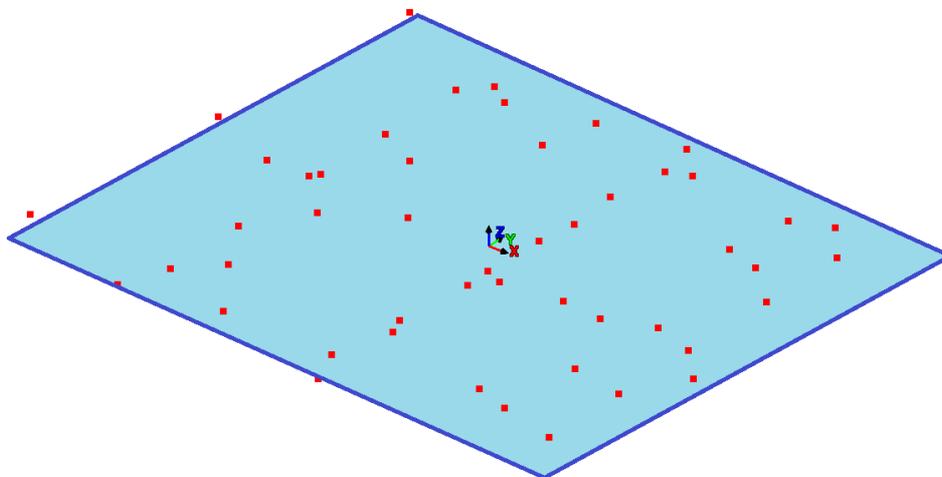
### 2.1.3.1.3. Interpretación.

El estimador sirve para establecer unos umbrales de aceptación de una hipótesis, la hipótesis de si el punto del cual se analiza su entorno pertenece a un plano o no. Cuanto menor sea el valor del estimador más se acerca la distribución de puntos al plano teórico, puesto que los residuales tienen que ser necesariamente menores.



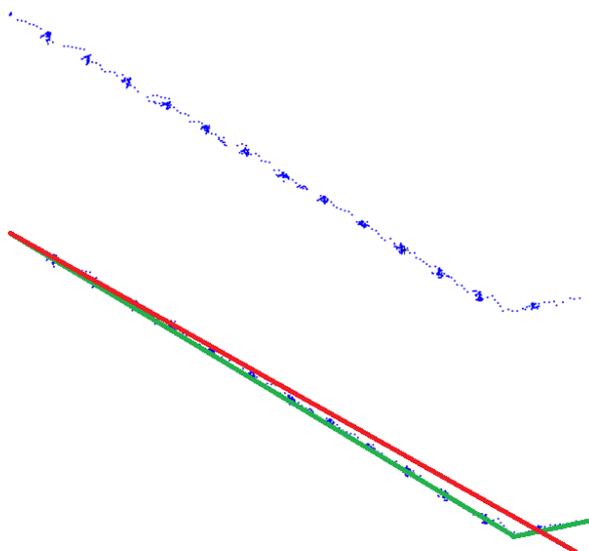
**Figura 19. Esquema del plano MMCC ajustado en un entorno de puntos que definen una esquina.**

La Figura 19, muestra como un conjunto de puntos que modelan una esquina ajusta pésimamente al plano, lo que dispara el estimador. Mientras que en la Figura 20, cuyos puntos pertenecen claramente a un mismo plano apenas se desvían del plano que proporciona mínimos cuadrados. En éste caso el estimador es un valor muy pequeño.



**Figura 20. Plano que ajusta perfectamente a un entorno que modela un trozo de acera. El plano MMCC está en azul.**

Con lo que se demuestra la capacidad de éste parámetro como descriptor de la naturaleza geométrica de la nube de puntos. El caso se complica cuando en el entorno aparecen puntos de plano y esquina pero en una cantidad suficiente como para no desviar tanto el plano y variar el estimador. Éste caso concreto se muestra en la Figura 21.



**Figura 21. Vista en planta de un entorno de puntos "contaminado" por un conjunto perteneciente a una esquina, lo que produce el plano erróneo (Rojo) en lugar de los teóricos correctos (Verde).**

### **2.1.3.2. Momentos de Inercia.**

Otra estrategia distinta para obtener información de la configuración geométrica es a través de los momentos de inercia. Los momentos bien utilizados proporcionan distinta información acerca de la distribución de masas.

Se pueden tratar los puntos obtenidos mediante el dispositivo láser escáner como elementos de masa unidad que añadirán, discretamente, su pequeño aporte al momento de inercia a calcular en función de su posición espacial respecto al centro de masas.

La información de partida será, otra vez, un punto y su entorno cercano. Pero esta vez se aplicará otra estrategia para obtener otro parámetro.

#### **2.1.3.2.1. Fundamento Matemático.**

En primer lugar se calculará el centro de masas y posteriormente se construirá la matriz de inercia para el punto, recordando que la matriz de inercia tiene la forma:

[E-2. 10]

Siendo sus elementos:

$$\begin{aligned}
 I_{xx} &= \sum_{i=0}^n (x_i - x_g) \cdot (x_i - x_g) \\
 I_{xy} &= \sum_{i=0}^n (x_i - x_g) \cdot (y_i - y_g) \\
 I_{xz} &= \sum_{i=0}^n (x_i - x_g) \cdot (z_i - z_g) \\
 I_{yy} &= \sum_{i=0}^n (y_i - y_g) \cdot (y_i - y_g) \\
 I_{yz} &= \sum_{i=0}^n (y_i - y_g) \cdot (z_i - z_g) \\
 I_{zz} &= \sum_{i=0}^n (z_i - z_g) \cdot (z_i - z_g)
 \end{aligned}
 \tag{E-2. 11}$$

Que desarrollando los términos de la ecuación para poder obtenerlos a partir de la información de la que se dispone y aplicando el teorema de Steiner [E-2.12] queda (para un miembro) la expresión [E-2.13]:

$$I_p = I_g + d^2 m \tag{E-2. 12}$$

Que en nuestro caso, al tomar masas unitarias la masa ( $m$ ) será el número de puntos del entorno de cálculo. Es decir:

$$I_p = I_g + d^2 n$$

Mientras que si seguimos con el cálculo del elemento 1,3 se tiene que:

$$x_i z_i - x_g z_i - x_i z_g + x_g z_g \tag{E-2. 13}$$

Siendo fácilmente demostrable que

$$-x_i z_g + x_g z_g = 0$$

Por lo que queda:

$$x_i z_i - x_g z_i$$

Donde le primer elemento hace referencia a [E-2.14], la misma que en el método anterior. Mientras que el segundo miembro dependiendo del valor del centro de masas será el mismo o habrá que calcularlo.

$$M_I = \begin{pmatrix} \sum_0^n x_i x_i & \sum_0^n x_i y_i & \sum_0^n x_i z_i \\ \sum_0^n y_i x_i & \sum_0^n y_i y_i & \sum_0^n y_i z_i \\ \sum_0^n z_i x_i & \sum_0^n z_i y_i & \sum_0^n z_i z_i \end{pmatrix}
 \tag{E-2. 14}$$

Que como se puede comprobar coincide con la expresión anteriormente obtenida en uno de los pasos para la obtención del vector de incógnitas en el sistema de mínimos cuadrados. Resulta curiosa la manera en la que se ha llegado a una misma expresión desde dos planteamientos distintos.

En un principio no es de ningún interés obtener los elementos de la matriz de inercia como tal, sino que se construye la matriz para diagonalizarla, ya que los parámetros descriptores se obtendrán del proceso de diagonalización y de la matriz diagonalizada.

Para diagonalizar la matriz se han probado dos métodos distintos, la resolución del polinomio y la aplicación de rotaciones sucesivas.

### 2.1.3.2.2. Resolución del Polinomio Asociado.

Los autovalores son las soluciones que se obtienen al resolver la ecuación de tercer grado que se forma a partir del polinomio.

$$a\lambda^3 + b\lambda^2 + c\lambda + d = 0 \quad [\text{E-2. 15}]$$

Donde a, b y c se obtienen de [E-2.15], siendo  $\lambda$  un autovalor cualquiera.

Las expresiones para resolver el polinomio y obtener los valores de  $\lambda$  en [E-2.16] son:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= -\frac{b}{3a} - \frac{2^{\frac{1}{3}}(-b^2 + 3ac)}{3a \left( -2b^3 + 9abc - 27a^2d + \sqrt{4(-b^2 + 3ac)^3 + (-2b^3 + 9abc - 27a^2d)^2} \right)^{\frac{1}{3}}} + \\ &\quad \frac{\left( -2b^3 + 9abc - 27a^2d + \sqrt{4(-b^2 + 3ac)^3 + (-2b^3 + 9abc - 27a^2d)^2} \right)^{\frac{1}{3}}}{32^{\frac{1}{3}}a} \\ \lambda_2 &= -\frac{b}{3a} + \frac{(1 + i\sqrt{3})(-b^2 + 3ac)}{32^{\frac{2}{3}}a \left( -2b^3 + 9abc - 27a^2d + \sqrt{4(-b^2 + 3ac)^3 + (-2b^3 + 9abc - 27a^2d)^2} \right)^{\frac{1}{3}}} - \\ &\quad \frac{(1 - i\sqrt{3}) \left( -2b^3 + 9abc - 27a^2d + \sqrt{4(-b^2 + 3ac)^3 + (-2b^3 + 9abc - 27a^2d)^2} \right)^{\frac{1}{3}}}{62^{\frac{1}{3}}a} \\ \lambda_3 &= -\frac{b}{3a} + \frac{(1 - i\sqrt{3})(-b^2 + 3ac)}{32^{\frac{2}{3}}a \left( -2b^3 + 9abc - 27a^2d + \sqrt{4(-b^2 + 3ac)^3 + (-2b^3 + 9abc - 27a^2d)^2} \right)^{\frac{1}{3}}} - \\ &\quad \frac{(1 + i\sqrt{3}) \left( -2b^3 + 9abc - 27a^2d + \sqrt{4(-b^2 + 3ac)^3 + (-2b^3 + 9abc - 27a^2d)^2} \right)^{\frac{1}{3}}}{62^{\frac{1}{3}}a} \end{aligned} \quad [\text{E. 2.16}]$$

Una vez resueltos los polinomios se han obtenido los autovalores, configurando una matriz de inercia diagonalizada con momentos cruzados nulos, tal como se ve en [E-2.17], que era el objetivo y que proporciona información de la configuración geométrica de los puntos.

$$\begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix} \quad [\text{E. 2.17}]$$

### 2.1.3.2.3. *Aplicación de Rotaciones Sucesivas.*

El método anterior tiene el hándicap de que resulta complicado de automatizar (mediante programación) y que, además, requiere de muchas operaciones matemáticas complejas, lo que implica un alto coste computacional.

Sin embargo el método de aplicar sucesivas rotaciones hasta llevar los vectores de la matriz a espacios ortogonales entre sí es más eficiente. Pese que al número de iteraciones necesarias puede llegar a ser alto requerirá mucho menos coste computacional puesto que se trata de realizar sumas y aplicar funciones trigonométricas sencillas.

Otra de las ventajas que tiene éste métodos es el de proporcionar una matriz de autovectores, obtenidos a la vez que los autovalores en el proceso de diagonalización.

Los autovectores representan la base sobre la que se disponen los autovalores, es decir, representan el sistema de coordenadas (la tríada ortogonal), mientras que los autovalores serán los módulos de los vectores siguiendo las direcciones de los citados autovectores. En la *Figura 23*, se observa la tríada ortogonal de los autovectores y la longitud de los mismos viene al multiplicar el autovalor por el autovector correspondiente.

El proceso es sencillo, se parte de la matriz identidad  $I$  y de la matriz de inercia  $M_i$ . La idea es obtener una matriz diagonal, por lo que en un primer paso se debe obtener el valor del ángulo que hace nulo el elemento (2,1) de  $M_i$ . Tras conocer el ángulo se construye una matriz de rotación que se aplicará traspuesta por la izquierda a  $M_i$ , y sin trasponer por la derecha. Obteniéndose así una matriz que denominaremos  $M_i'$ .

De este modo se obtienen valores nulos en el elemento (2,1) y (1,2) ya que por su naturaleza, la matriz  $M_i$  es simétrica.

Paralelamente se aplicará la misma rotación (es decir, la matriz de rotación traspuesta por la izquierda y sin trasponear por la derecha a la matriz identidad). De modo que vaya “almacenando” en sí misma todas las rotaciones que se apliquen.

En segundo lugar se planteará una ecuación para obtener qué ángulo vuelve nulo el elemento (3,1) de la matriz  $M_i'$ . Una vez conocido se vuelve a proceder, aplicando la matriz de rotación adecuada por la izquierda y derecha (ya que  $M_i'$  sigue siendo simétrica) para obtener la matriz  $M_i''$  que tendrá los elementos (3,1) y (1,3) nulos pero que al aplicar la transformación (2,1) y (1,2) que anteriormente eran nulos ahora probablemente no lo sean.

Se procede de idéntica manera para el elemento (3,2) de la matriz de inercia y se aplican las rotaciones correspondientes a la matriz de identidad que poco a poco se va transformando hasta tornarse casi “irreconocible”.

Se ha concluido el primer paso, tras lo que se ha obtenido una matriz  $M_i'''$  que tiene como elementos nulos únicamente (3,2) y (2,3), pero cuya suma de los elementos fuera de la diagonal es menor a la suma de los elementos fuera de la diagonal antes de empezar el proceso. Obteniéndose también la matriz  $I'''$  que poco se parece a la  $I$  original.

Es el momento de acometer otra iteración, empezando otra vez por averiguar el ángulo que hace nulo el elemento (2,1) y aplicando las matrices de rotaciones adecuadas a las matrices que se van obteniendo. Repitiendo el proceso hasta que los elementos fuera de la diagonal son nulos (o se pueden considerar nulos debido a la precisión de los cálculos en procesos computacionales).

Las expresiones que resumen el proceso aparecen a continuación. Para la matriz  $M_i$  será:

$$\begin{pmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad [2.2.18]$$

$$\prod_{i=n}^1 R_{xi}^T R_{yi}^T R_{zi}^T \cdot IM \cdot \prod_{i=n}^n R_{zi} R_{yi} R_{xi} = \begin{pmatrix} I_{Max} & 0 & 0 \\ 0 & I_{Med} & 0 \\ 0 & 0 & I_{Min} \end{pmatrix}$$

Mientras que para  $I$ :

$$\prod_{i=n}^1 R_{xi}^T R_{yi}^T R_{zi}^T \cdot IM \cdot \prod_{i=n}^n R_{zi} R_{yi} R_{xi} = \begin{pmatrix} I_{Max} & 0 & 0 \\ 0 & I_{Med} & 0 \\ 0 & 0 & I_{Min} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} I_{Max} & 0 & 0 \\ 0 & I_{Med} & 0 \\ 0 & 0 & I_{Min} \end{pmatrix} = \quad [2.2.19]$$

$$\begin{pmatrix} v_{xMax} & v_{yMax} & v_{zMax} \\ v_{xMed} & v_{yMed} & v_{zMed} \\ v_{xMin} & v_{yMin} & v_{zMin} \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_{xMax} & v_{yMax} & v_{zMax} \\ v_{xMed} & v_{yMed} & v_{zMed} \\ v_{xMin} & v_{yMin} & v_{zMin} \end{pmatrix}$$

Como se puede observar, la matriz resultante de la aplicación de todas las rotaciones es la matriz diagonalizada, con sus autovalores ordenados de mayor a menor (gracias al proceso seguido) y todos los demás valores nulos.

Mientras que la matriz identidad se ha tomado en la matriz de autovectores que representa el sistema sobre el que se deben “colocar” los autovalores en el espacio. Y cuyo origen se encuentra en el centro de masas del entorno seleccionado para el cálculo si así se tomó a la hora del cálculo de los momentos.

También es posible obtener la matriz de autovalores como la matriz de inercia original por la matriz de autovectores.

#### 2.1.3.2.4. Interpretación de Autovalores.

Los autovalores representan los momentos de inercia en las direcciones principales, en la matriz que se ha obtenido los elementos cruzados son nulos (por eso es diagonal), lo que significa que son independientes entre sí.

Cada autovalor representa la distribución de masas en el espacio, ya que se deriva de la matriz de inercia, y serán los momentos de inercia para cada eje (definido por los autovectores).

Si se trata de discriminar superficies planas de las que no lo son, mediante estos parámetros se puede determinar el grado de “ondulación” o diferencia respecto a un plano teniendo en cuenta la relación existente entre los tres autovalores.

No se debe caer en la tentación de tratar de establecer valores límite o umbrales de discriminación para los autovalores por separado, deben tomarse como información conjuntamente, ya que el módulo del autovalor dependerá de la distancia de los puntos (a mayor

distancia mayor aporte discreto al momento) y a mayor número de puntos tomados en el cálculo mayor será el sumatorio. (Hay que recordar el apartado correspondiente, en el que se hace mención al tamaño de los cubos y las dimensiones del entorno de búsqueda, lo que influye en el número de puntos que se toman en el cálculo).

La distribución espacial de los puntos en un plano (medido con el dispositivo láser escáner) está repartida en dos de las tres dimensiones del espacio. Las únicas fluctuaciones en la tercera dimensión se deben a los errores accidentales a causa de la imposible perfección en la medida de los puntos que definen el plano.

Esta situación en la distribución de los puntos hace que los momentos de inercia (autovalores) máximo y medio sean desproporcionadamente mucho mayores que el momento de inercia mínimo. Ya que éste representa la distribución de puntos en el "grosor" del plano y las únicas variaciones de éste respecto del plano se deben a los mencionados errores accidentales inherentes a la medición.

Debido a las características técnicas del instrumento utilizado<sup>2</sup> el dispositivo de medida tiene una precisión de 6 milímetros (en desviación típica) en la medida de un punto simple en el espacio. Aunque el plano estará mucho mejor definido gracias a la alta densidad de puntos en la toma, ya que, como se comentaba en algunas referencias anteriores a la teoría de errores tienden a compensarse en ausencia de sistematismos.

En la Figura 22 y la Figura 23, se puede observar unos ejemplos aclaradores sobre el comportamiento de los momentos de inercia en función de la posición espacial de los puntos que configuran su entorno.

En primer lugar se trata del caso más favorable, en el que el entorno del punto se asemeja mucho a una superficie plana, de modo que se observan los puntos medidos (cuadrados rojos) fluctuando ligeramente por encima y por debajo de la superficie plana de color azul.

En este caso los autovalores, al diagonalizarse, han ido rotando hasta adoptar las direcciones en las que la distribución de masas es mayor. Como se trata de una superficie plana lógicamente están prácticamente contenidos en el plano. Mientras que el último momento, el más pequeño,

---

<sup>2</sup> Se utilizó un láser escáner Leica Scan Station II, se trata de un dispositivo de láser pulsado de alta velocidad, dotado de compensador de doble eje que proporciona coordenadas con una desviación estándar de 6 milímetros y distancias con 4 milímetros a una distancia media de trabajo de 50 metros.

ha tenido que ser exagerado para poder aparecer en la imagen, ya que su módulo era muy pequeño.

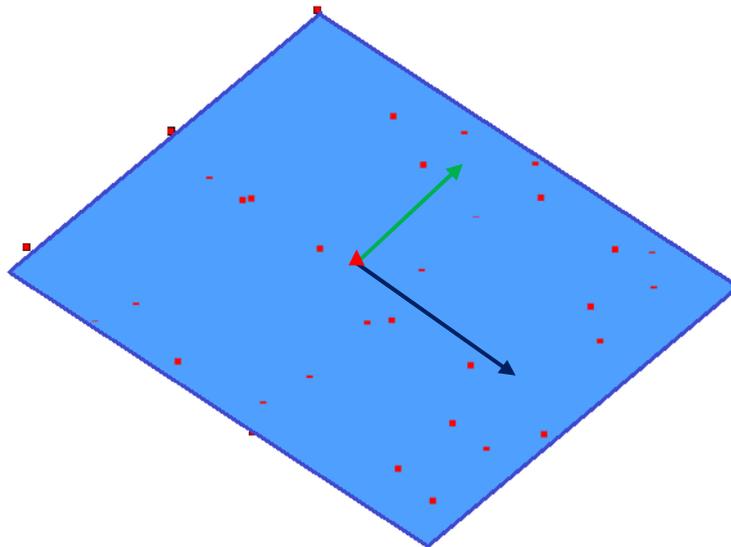
En el segundo caso los puntos que configuran el entorno pertenecen a una esquina, por lo que la distribución espacial de los elementos puntuales hace que los momentos de inercia sean mucho más homogéneos y la diferencia entre máximo y mínimo es mucho menos acusada.

Por otra parte hay que tener en cuenta que los momentos de inercia, ya hayan sido diagonalizados o no, presentan unidades de superficie, es decir, m<sup>2</sup>. Lo cual dificulta la interpretación intuitiva de los resultados. Ya que se está asemejando el desplazamiento a un área.

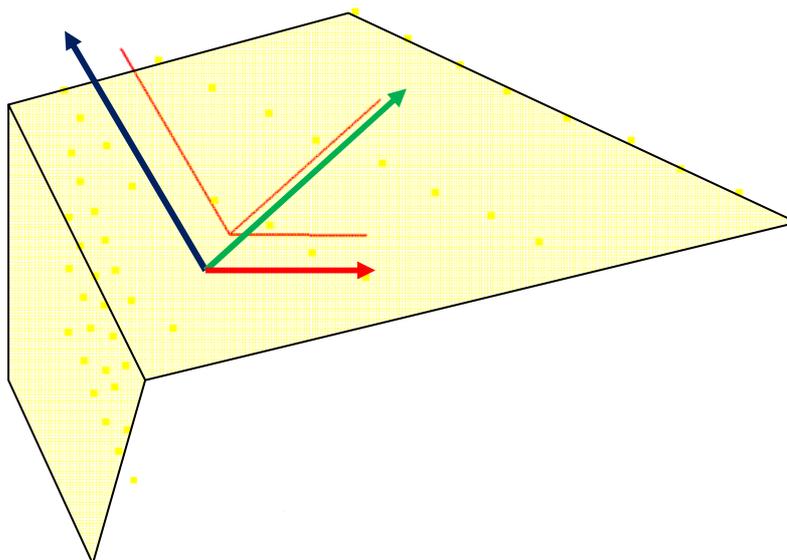
Para mejorar la interpretación se ha decidido obtener la raíz cuadrada de los momentos de inercia, de modo que representen longitudes, y así ser mucho más intuitivos. Por lo tanto en vez de trabajar con el vector diagonalizado lo que se hace es:

$$M_{Resultados} = \begin{pmatrix} \sqrt{I_{Max}} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{I_{Med}} & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{I_{Min}} \end{pmatrix} \quad [2.2.20]$$

Para obtener unidades lineales.



**Figura 22. Representación de los momentos de inercia calculados en puntos pertenecientes a un entorno plano. El momento de inercia máximo está representado en azul oscuro, el medio en verde y el mínimo en rojo (exagerado para poder apreciar su representación).**

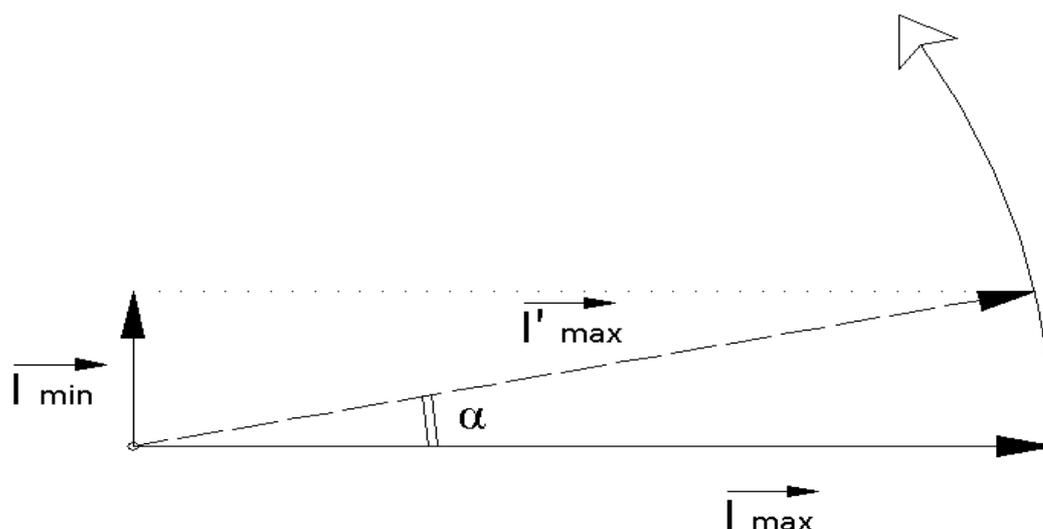


**Figura 23. Representación de los momentos de inercia calculados en puntos pertenecientes a un entorno que forma una esquina. El momento de inercia máximo está representado en azul oscuro, el medio en verde y el mínimo en rojo. El escalado es uniforme.**

Una vez obtenidos los momentos lo que se hace es compararlos, para obtener una información sobre el conjunto en sí más que de cada uno individualmente. Para compararlos lo que se hace es medir un ángulo entre la dirección en el espacio de los vectores del autovalor máximo y mínimo.

En un principio al ser ortogonales entre sí el ángulo es de  $90^\circ$ , sin embargo nosotros medimos el ángulo que es necesario girar el autovalor máximo para que su proyección sobre el mínimo sea el módulo del autovector mínimo, véase el esquema aclaratorio en la Figura 24.

De este modo todos aquellos entornos pertenecientes a un plano tendrán un autovalor mucho mayor que el mínimo, lo que se traduce en un giro extremadamente pequeño, del orden de segundos sexagesimales, mientras que en entornos con geometrías no planas los vectores serán mucho más homogéneos, lo que se traducirá en giros mucho mayores, normalmente del orden de grados sexagesimales, lo que facilita enormemente la detección del comportamiento de los autovectores.



**Figura 24. Esquema del método utilizado para medir homogeneidad en las tríadas de autovalores.**

Por lo que la expresión que nos servirá para obtener los valores a umbralizar será tan sencilla como:

$$3600 \cdot \left( 90 - \arccos \left( \frac{I_{min}}{I_{max}} \right) \frac{180}{\pi} \right) \quad [2.2.21]$$

Lo que nos proporcionará el ángulo en segundos.

### 2.1.3.3. Resultados obtenidos.

Para realizar las primeras pruebas de rendimiento a los parámetros descritos se han ido seleccionando una serie de muestras de 49 puntos como entornos en los que se han obtenido los parámetros para ese vecindario tomando como punto analizado el más cercano al centro de masas, dichos resultados se tomaron como base para mejorar el algoritmo y como primer paquete de valores para calibrar los umbrales.

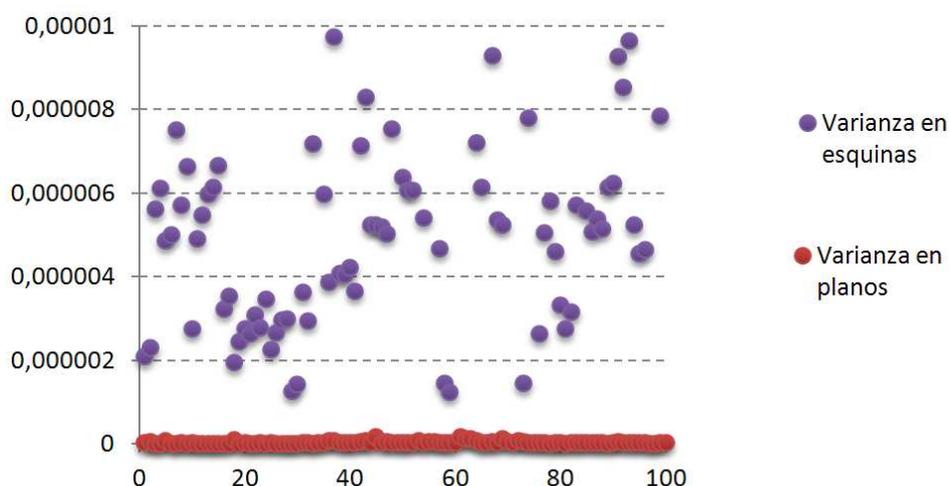
En una segunda fase, con el algoritmo más maduro, se han tomado 100 muestras de entornos que se podían considerar planos y otras 100 de entornos en los que claramente había una esquina o algún elemento distinguible de un plano, no necesariamente en ángulo recto y no necesariamente en planta, sino que podía estar girada respecto a otro plano, como alféizar o ser (por ejemplo) conducciones cilíndricas de gas ciudad.

Los 200 entornos serán la información de partida y han sido almacenados en ficheros de texto como listados de coordenadas x, y, z que serán entradas de los software utilizados.

Para asegurar que no hay errores en los cálculos se ha trabajado paralelamente con software de distinta procedencia para garantizar unos resultados fiables, concretamente se ha utilizado Microsoft Excel, Matlab y software de elaboración propia bajo Basic

### 2.1.3.3.1. Resultados para el estimador de la varianza.

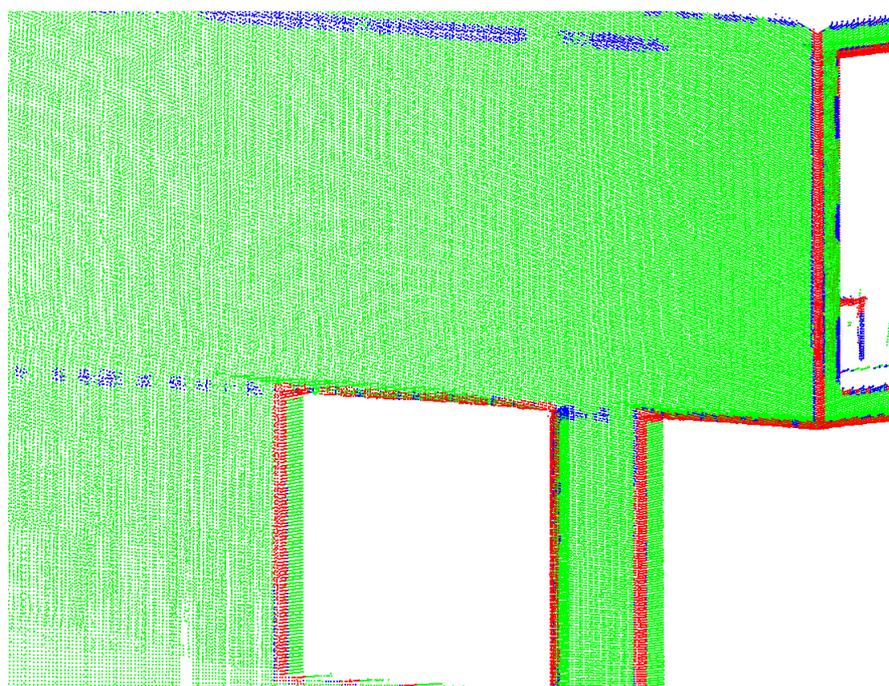
Los resultados obtenidos en la discriminación mediante el estimador de la varianza son positivos, siendo capaz de determinar con garantías aquellas geometrías con forma de plano. Los resultados del cálculo se plasman en la gráfica a continuación:



**Figura 25. Gráfico de los valores de la varianza después de calcular Mínimos Cuadrados para las 200 muestras del conjunto de entrenamiento. Se han sesgado los valores superiores a  $1 \cdot 10^4$  para mejorar la interpretación.**

En el gráfico se observa perfectamente la diferencia de comportamiento respecto a este valor para determinar la naturaleza del punto según su entorno. Utilizando una paleta de colores básica (rojo a las esquinas, azul a los planos no definidos perfectamente y verde a los planos perfectamente definidos) se observa la capacidad de discriminación a simple vista en geometrías comunes.

Un buen ejemplo sería uno de los edificios del campus de Vera de la Universidad Politécnica de Valencia (la estructura real es la que se observa en la *Figura 28*, mientras que el modelo una vez procesado se corresponde a la *Figura 26*, en el que se observa claramente la estructura plana en verde, las esquinas en rojo, y los puntos cuyo entorno considera algún punto perteneciente a otro plano han incrementado el valor de la varianza y por lo tanto se colorea en azul. El algoritmo es capaz de detectar pequeñas imperfecciones en el forjado si la densidad de puntos es adecuada y el entorno utilizado no es excesivamente grande.



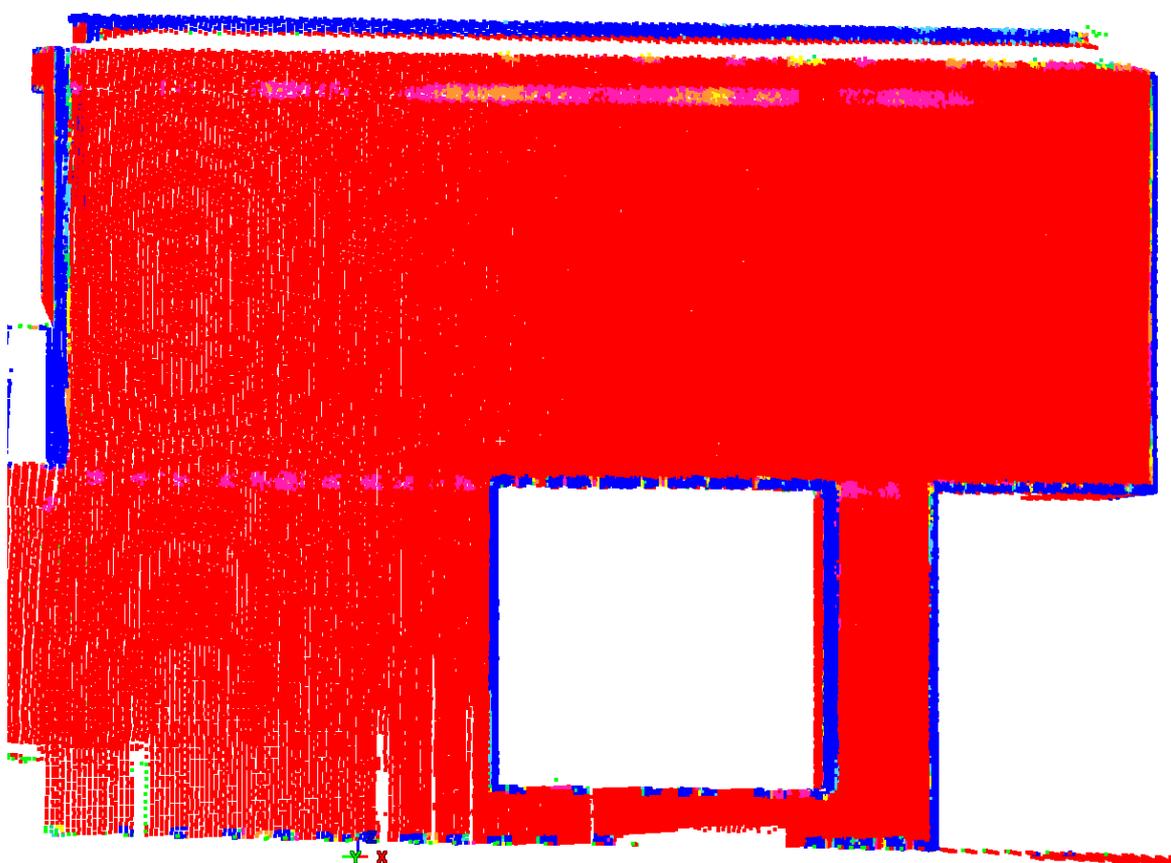
**Figura 26. Imagen con colores modificados para resaltar la capacidad de discriminación de geometrías del algoritmo utilizado, rojo las esquinas y azul los elementos que no son planos pero no se puede determinar con seguridad que sean esquinas.**

Modificando ligeramente los umbrales se ha construido una rampa de color basada en colores fríos y calientes (fríos asociados a esquinas y cálidos a los planos) de modo que todo aquello que antes agrupábamos en indefinido ahora se matiza más gracias a los tonos intermedios.

Geometría	Color	R	V	A	Muestra
Plano	Rojo	255	0	0	
Plano indefinido grado1	Morado	255	30	175	
Plano indefinido grado2	Naranja	255	150	50	
Geometría indefinida	Amarillo	255	255	0	
Esquina indefinida grado2	Verde	0	200	100	
Esquina indefinida grado1	Cian	80	210	255	
Esquina	Azul	0	0	255	

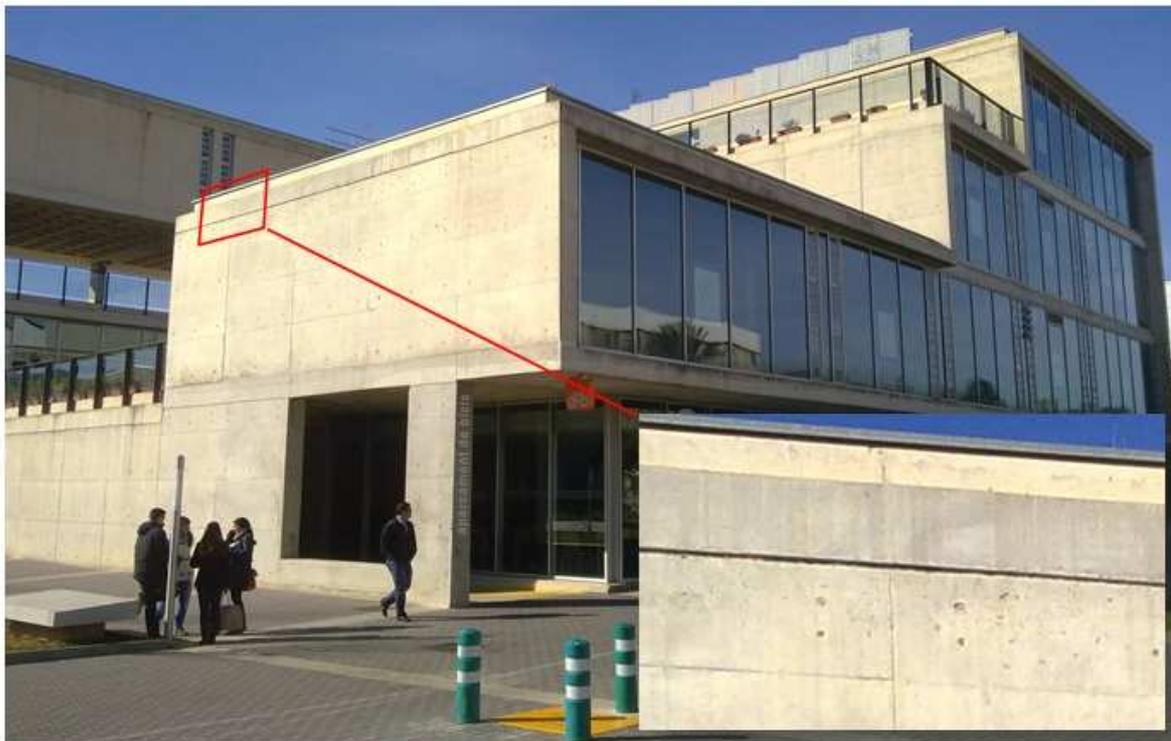
**Tabla 2. Rampa de color temática para las nubes procesadas en función de su geometría.**

Resultado de la clasificación anterior es la captura siguiente, que representa la misma zona y a la que se le ha movido el punto de vista y el tamaño de los puntos para facilitar la visualización, ahora se observa cómo una pequeña muesca lineal “enfria” la nube de puntos proporcionalmente a la diferencia respecto a la superficie plana que debería ser, vemos que para la sensibilidad utilizada se llegan a tener puntos en los que la clasificación ha determinado geometría indefinida, lo cual indica que la diferencia respecto a un plano es demasiado elevada como para ignorarse y no convendría clasificar estos puntos automáticamente como planos.



**Figura 27. . Modelo tridimensional procesado con la gradación estándar. Se aprecian los desconchados en el forjado y el comportamiento en la línea de suelo con baja densidad.**

Para un mejor entendimiento se han realizado toma fotográfica de la fachada y se observan la capacidad de discriminación con nubes de puntos de densidad suficiente.

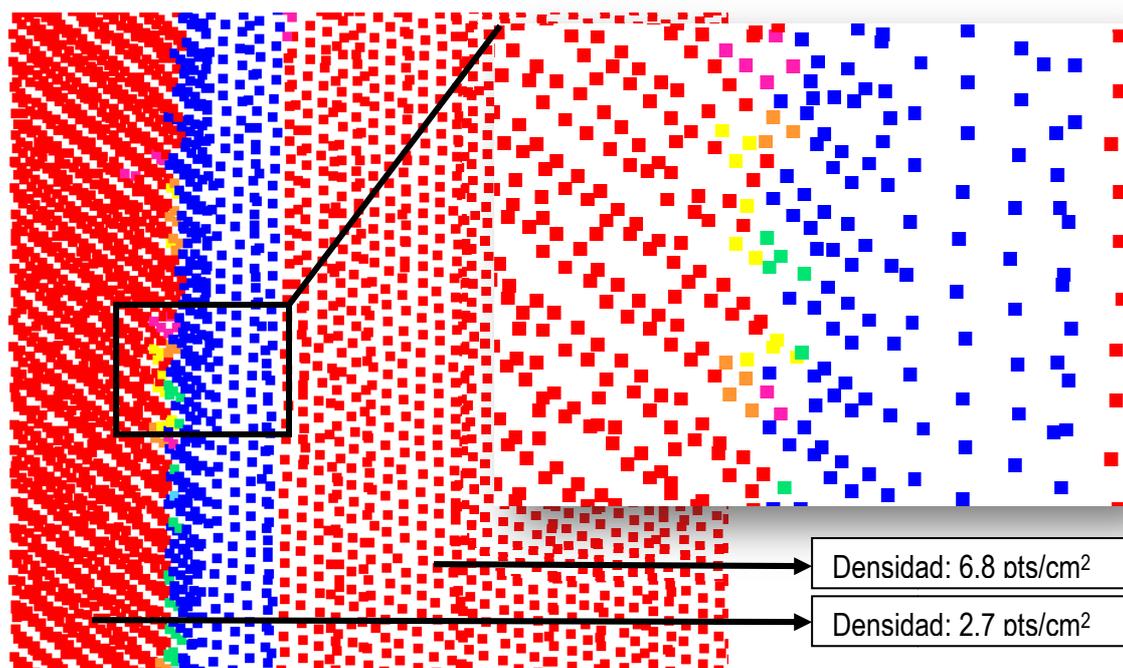


**Figura 28. Fotografía del edificio escaneado, con detalle del forjado. Se observa la franja horizontal e incluso algunas de las hendiduras que hay en la fachada.**

Tras un estudio de las densidades de puntos se confirma la dependencia de la densidad en la detección de esquinas siempre y cuando la distribución de puntos sea más o menos homogénea.

Presentando una densidad media de 4.4 puntos/cm<sup>2</sup> el algoritmo no ha sido capaz de detectar esa línea, sin embargo, las zonas cuya densidad media para el entorno de búsqueda rondaban los 6.7 puntos/cm<sup>2</sup> sí que han detectado esa pequeña forma.

Un detalle de la esquina del pilar muestra la diferencia de comportamiento en función de la densidad de la nube en la fachada. Cada arista cuenta con distinta densidad (aproximadamente 6.8 puntos/cm<sup>2</sup> y 2.7 puntos/cm<sup>2</sup>) lo que hace que en una cara aparezcan niveles intermedios y en la otra no.



**Figura 29. Detalle de la diferencia de densidades en el pilar noreste debido a la orientación de las caras respecto a las posiciones del scanner y su influencia sobre la discriminación.**

Los umbrales obtenidos para determinar las geometrías se resumen en la tabla a continuación.

Geometría	$\sigma$ Mínimo	$\sigma$ Máximo
Plano	0,0000	0,0025
Plano indefinido grado 1	0,0025	0,0035
Plano indefinido grado 2	0,0035	0,0045
Indefinido	0,0045	0,0055
Esquina indefinida grado 2	0,0055	0,0065
Esquina indefinida grado 1	0,0065	0,0075
Esquina	0,0075	$\infty$

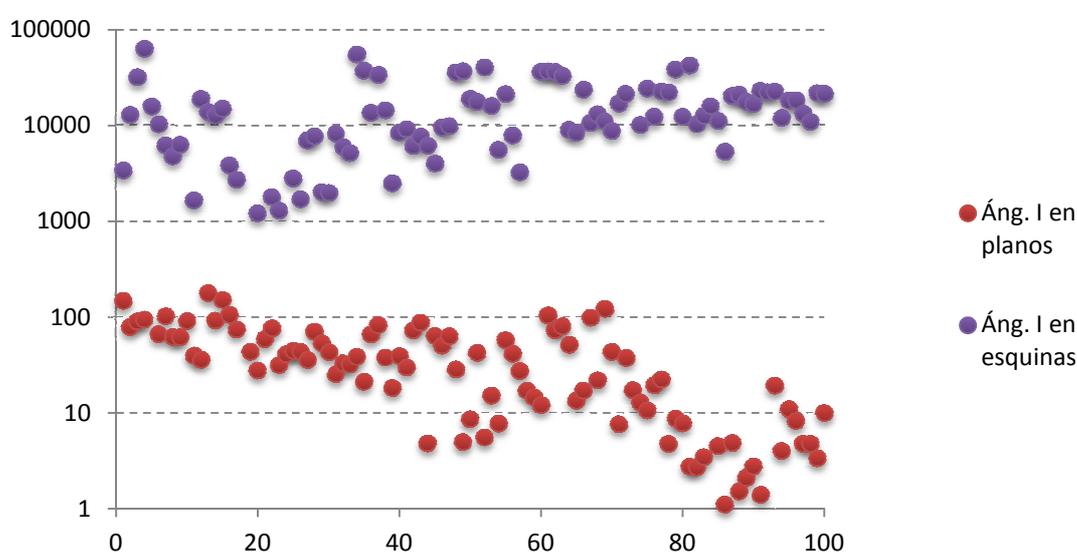
**Tabla 3. Umbrales de varianza para el método del ajuste a planos en función de la geometría.**

#### 2.1.3.3.2. Resultados para los momentos de inercia.

Para el método de los momentos de inercia se ha trabajado de un modo similar, sin embargo los resultados son ligeramente diferentes a los anteriores.

Los umbrales utilizados han sido extraídos a partir de la información del comportamiento de las nubes en las muestras de entrenamiento, en la gráfica siguiente se muestran los distintos valores en función del giro aplicado para la proyección para los entornos de test utilizando una escala logarítmica para poder mostrar los resultados.

Analizando el gráfico se observa una clara distinción entre el comportamiento de las muestras utilizadas, donde los giros alcanzados llegan a superar los  $25^\circ$  en el caso de las esquinas. Mientras que para los planos no llegan a alcanzar los  $10'$ . Puesto que el muestrario utilizado contenía 200 muestras y se apreciaba un comportamiento claramente distinto en los dos grupos de muestras se partía de una base razonable para establecer los primeros umbrales.



**Figura 30. Gráfico de las diferencias de comportamiento entre momentos máximos y mínimos en las muestras del conjunto de entrenamiento utilizando una escala logarítmica.**

Sin embargo el comportamiento en el conjunto de test ha sido distinto y ha habido que modificar los umbrales para adaptarse al comportamiento. Básicamente debido a que las geometrías que han entrado en el entrenamiento han sido “puras” mientras que en el modelo de test había todo tipo de configuraciones distintas en cuanto a que la esquina no entraba completamente en el entorno como sucedió en las muestras de entrenamiento, por lo que ha habido que reajustar los umbrales.

Los umbrales utilizados para establecer las clases son los que se recogen en la tabla 4, (en el caso de que prevalezca la detección clara de esquinas):

<b>Geometría</b>	<b>Giro min. “</b>	<b>Giro máx. “</b>
Plano	0	8000
Plano indefinido grado 1	8000	9200
Plano indefinido grado 2	9200	10400
Indefinido	10400	11600
Esquina indefinida grado 2	11600	12800
Esquina indefinida grado 1	12800	14000
Esquina	14000	$\infty$

**Tabla 4. Umbrales giro para el método del momento de inercia en el caso general de estudio.**

En el caso de que el objeto posea gran cantidad de superficies planas y se busque un mayor detalle en estas geometrías, se puede utilizar el mismo método pero con otro umbralizado con tal de obtener una clasificación más informativa ya que realza las zonas más conflictivas en estos entornos, véase la tabla 5.

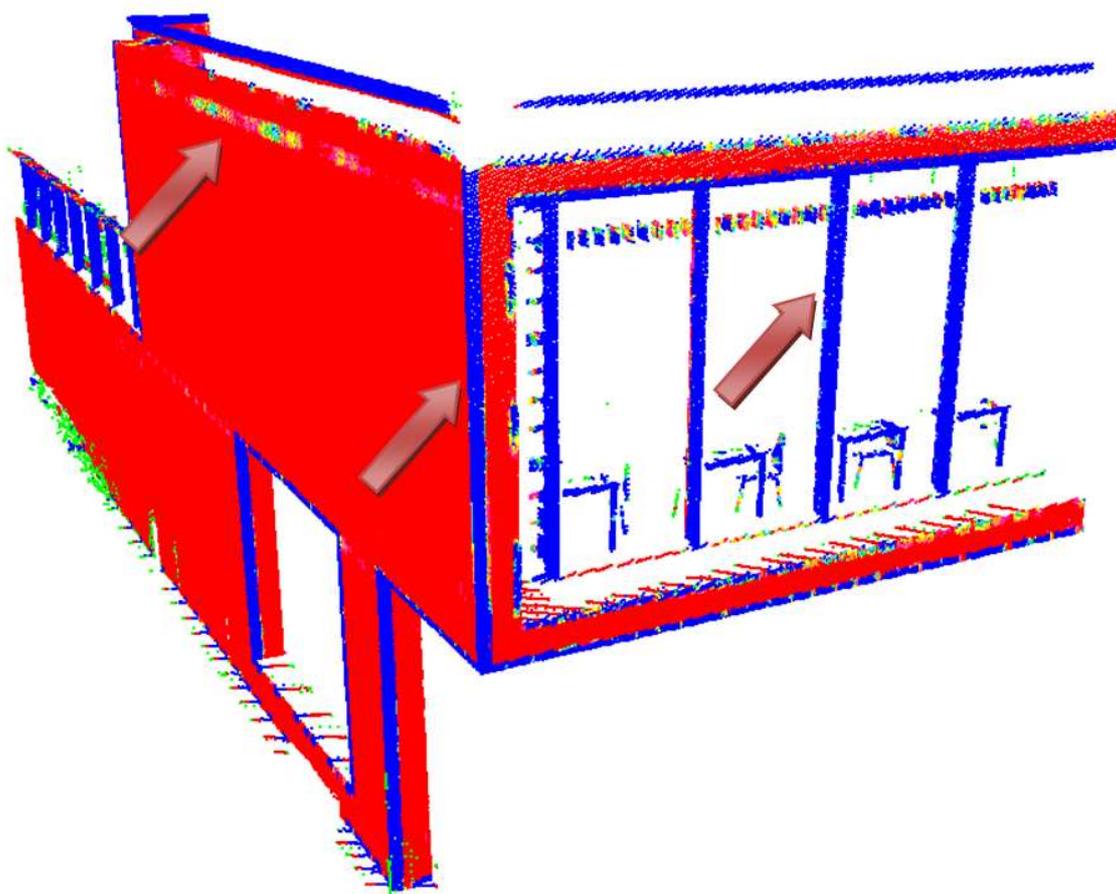
<b>Geometría</b>	<b>Giro min. “</b>	<b>Giro máx. “</b>
Plano	0	1500
Plano indefinido grado 1	1500	2800
Plano indefinido grado 2	2800	4100
Indefinido	4100	5400
Esquina indefinida grado 2	5400	6700
Esquina indefinida grado 1	6700	8000
Esquina	8000	$\infty$

**Tabla 5. Umbrales giro para el método del momento de inercia en el caso de predominio de geometrías planas.**

En cuanto a los resultados obtenidos en las clasificaciones el momento de inercia ha resultado ser ligeramente más sensible que la desviación típica y sin embargo más resolutivo, en el sentido de que cuando se acerca a la arista el método “no duda” y clasifica con mucha mayor claridad

esas geometrías diferentes al plano, evitando en mayor medida las clasificaciones intermedias obtenidas por el estimador de la varianza a posteriori.

El método, cuando el entorno no es suficientemente grande clasifica los puntos como esquina puesto que el valor del momento se eleva. Se puede comprobar en la figura 31 en la que se muestra el mismo objeto y la misma nube según la clasificación del momento de inercia.

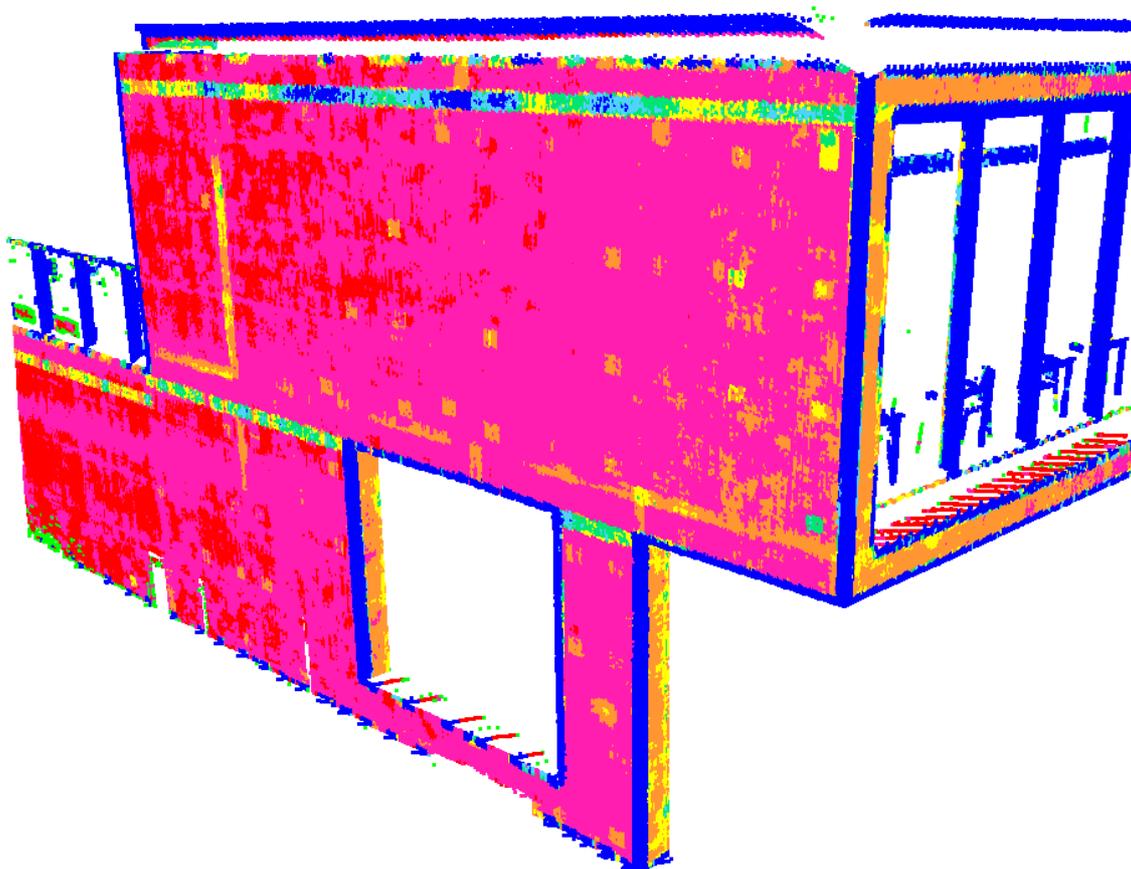


**Figura 31. Modelo coloreado utilizando la clasificación más general para los momentos de inercia con detalles de comportamiento, la de la Tabla 3.**

Sin embargo este método ha resultado ser más sensible a la cantidad de puntos. Es decir, a muy bajas densidades el método no es capaz de determinar adecuadamente las geometrías.

En la geometría que nos ocupa se puede observar en la imagen fotográfica de la Figura 28 cómo hay pequeños defectos en el hormigón y marcas del encofrado, que el método, con la densidad utilizada, es capaz de detectar, simplemente se modificará la clasificación de los puntos siguiendo la Tabla 5 el resultado es la figura 32.

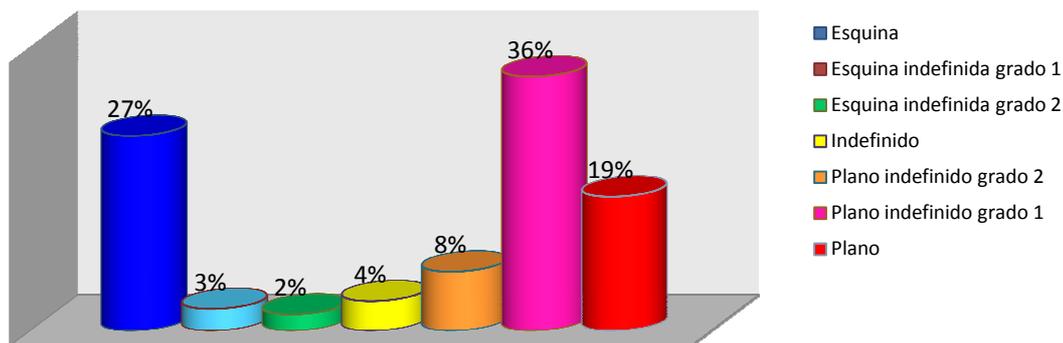
A continuación se observa una captura del mismo modelo coloreado utilizando la clasificación que afina más en las geometrías planas, observándose con mucho mayor detalle las diferencias de textura en las superficies de la fachada de hormigón.



**Figura 32. Modelo de estudio clasificado según la tabla más sensible en planos, donde se puede apreciar la capacidad de discriminación del método en estos entornos.**

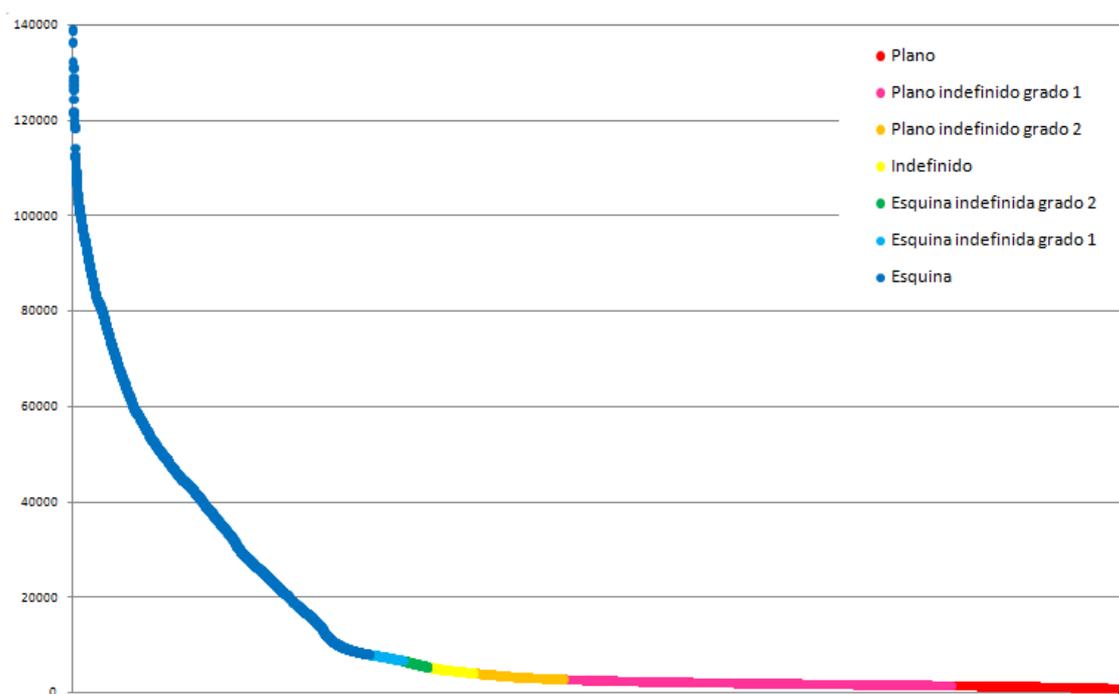
Generalmente los puntos con clasificaciones intermedias no son muy frecuentes y corresponden a puntos cercanos a diferentes configuraciones geométricas, lo que conlleva una modificación del valor del momento a unos estados que no son muy determinados, pero en el entorno de estos puntos suelen estar los demás valores y representan parte de una transición de una configuración geométrica fuerte (ya sea esquina o plano) a otra configuración fuerte pero de distinta naturaleza.

Se puede apreciar en el gráfico siguiente, en el que se muestra un histograma escueto de los puntos de la muestra de la casa del alumno una vez clasificados, en la que se puede apreciar la proporción de cada una de las clasificaciones establecidas en el conjunto.



**Figura 33. Histograma de puntos según su naturaleza, representando la proporción respecto al total una vez clasificados.**

También se ha configurado un gráfico con los valores de los momentos de inercia (según el ángulo de giro en segundos sexagesimales) de todos los puntos de la casa del alumno ya clasificados (según nuestra primera clasificación, que es la más general).



**Figura 34. Ejemplo en un entorno real de la clasificación del método, donde se observan los rangos que toman los puntos una vez clasificados según la clasificación más general.**

El método del segundo momento de inercia, en principio, no es el más adecuado para configuraciones geométricas curvas, sin embargo se podría extender, buscando momentos de inercia de orden superior, para ajustarse a esas configuraciones más complejas. Dejamos pues abierta la puerta para la investigación en ese camino.

Pero cuando predominan las superficies planas y aristas marcadas, que es lo más habitual en las construcciones de hoy en día, y si se ha preparado una toma de datos planificada correctamente para obtener densidades suficientes y homogéneas el método es capaz de determinar geometrías de plano y borde, clasificándolas con gran calidad.

## **2.2. SOFTWARE DESARROLLADO.**

El software desarrollado sirve para poder generar los ficheros de entrada que debe leer el software WFDS para calcular la simulación de un incendio, y posteriormente mostrar su visualización por medio de Smokeview.

Al carecer de interfaz gráfica, si se quisiese generar el fichero de entrada, la tarea sería muy costosa, y se podrían cometer errores fácilmente.

Si se imagina que se quiere generar una superficie topográfica para la simulación, si la superficie fuese completamente plana no habría ningún problema, pero si se tuviese una superficie irregular, que es lo normal, se debería de escribir en código ASCII cada una de las elevaciones de los píxeles que conforman la zona, mientras que con el programa todo esto se hace de manera automática al ir leyendo un Modelo Digital de Elevaciones.

Con el software desarrollado, toda la información se introduce por medio de un formulario, para resultar más sencillo a la vista del usuario. Como está conectado con un Sistema de Información Geográfica, toda la información cartográfica, datos LiDAR, o usos del suelo extraídos por técnicas de teledetección, se transformarán de forma rápida y sencilla al lenguaje del software WFDS, para que se pueda visualizar desde éste.

La aplicación se encuentra separada en dos programas: por un lado se tiene una aplicación programada en ArcGIS, y por otro una aplicación programada en lenguaje de programación JAVA. Se decidió separarlo en dos programas ya que la programación de herramientas SIG es muy complicada si no se hace desde un software específico como ArcGIS, y la otra parte corresponde con la introducción de elementos que pueden variar en el tiempo (como información meteorológica), y al ser una aplicación que no necesita de otro software, puede ser ejecutada desde cualquier ordenador sin necesidad de nada más.

La aplicación programada en ArcGIS sirve para generar la superficie topográfica, tratar los datos LiDAR, y modelar la masa arbórea con sus respectivos parámetros de combustibilidad, es decir, aquellos elementos que no varían o se mantienen fijos durante un largo periodo de tiempo.

La salida de esta aplicación genera unos ficheros de entrada para el software WFDS, que si se abriesen con el programa, mostraría la superficie topográfica y la vegetación presente en 3D.

Con esto se crearía una librería con la topografía y la vegetación de las diferentes zonas que se deseen estudiar para realizar las simulaciones de los incendios forestales.

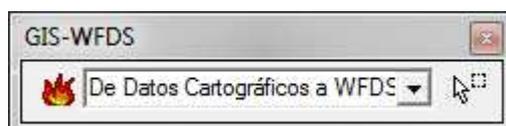
Con la segunda aplicación sería posible introducir datos meteorológicos, introducir opciones a la hora de efectuar el cálculo, introducir dónde se inicia el fuego, qué información se quiere que aparezca en la visualización, e incluso que lance directamente el cálculo y la visualización sin necesidad de introducir comandos MS-DOS. Todo ello lo haría cargando las zonas que se deseasen, las cuales se han guardado anteriormente en la librería, y escribiendo estos nuevos datos en los ficheros de entrada del simulador.

Los datos pueden variar y es por eso por lo que se ha diseñado esta aplicación, puede interesar probar con un viento del Sur y posteriormente con uno del Este, o probar iniciando un fuego desde una posición y después desde otra. Esta aplicación se ha desarrollado para poder ser utilizada sin disponer de un software propietario.

### 2.2.1. APLICACIÓN DESARROLLADA EN ArcGIS.

En primer lugar se describe la aplicación desarrollada en el software ArcGIS; en el siguiente punto de explicará el código de programación de dicha aplicación.

Como se puede observar en la Figura 35, la barra de herramientas de la aplicación conocida como "GIS-WFDS" se divide en 2 botones y un menú desplegable. El menú desplegable sirve para realizar uno de los tres procedimientos posibles para su conversión al fichero WFDS: a partir de datos cartográficos (ficheros de tipo Shapefile); a partir de un TIN (malla de triángulos irregulares); o a partir de un Modelo Digital de Elevaciones. El botón de la izquierda sirve para ejecutar el procedimiento seleccionado, y el botón de la derecha para seleccionar el área de trabajo e iniciar el procedimiento escogido.



**Figura 35. Barra de herramientas de la aplicación "GIS-WFDS".**

## MÉTODOS

Los tres procedimientos se basan en el mismo principio, el único cambio es la procedencia y formato de los datos topográficos. El primer procedimiento es el que más datos requiere ya que va a transformar datos cartográficos al fichero WFDS.

En la siguiente imagen, figura 36, se puede observar cómo se divide la aplicación desarrollada en ArcGIS. Ésta se compone de 5 pestañas: Datos WFDS, Cálculo Topografía, Capas Usos, Asignación Usos, y Datos LiDAR.

En la primera pestaña, se introducen los datos necesarios para la identificación del fichero WFDS, los cuales son: el identificador (ID), y el título. También se introduce el tamaño del píxel para la simulación, el tamaño de píxel en la coordenada Z, y la altura que se le dará al modelo de la visualización a partir de la cota más alta del terreno (para poder observar el comportamiento del humo o del viento), todos ellos en metros.

Por último, ha programado un botón para poder indicar la salida donde se guardará el fichero WFDS y su nombre, y otro botón "Transformar" para realizar todos los cálculos, que se habilitará una vez estén todos los datos completados.

Conversión de Datos Cartográficos a WFDS

Datos WFDS | Cálculo Topografía | Capas Usos | Asignación Usos | Datos LiDAR

ID

Título

Altura Atmósfera desde la Cota más Alta  m

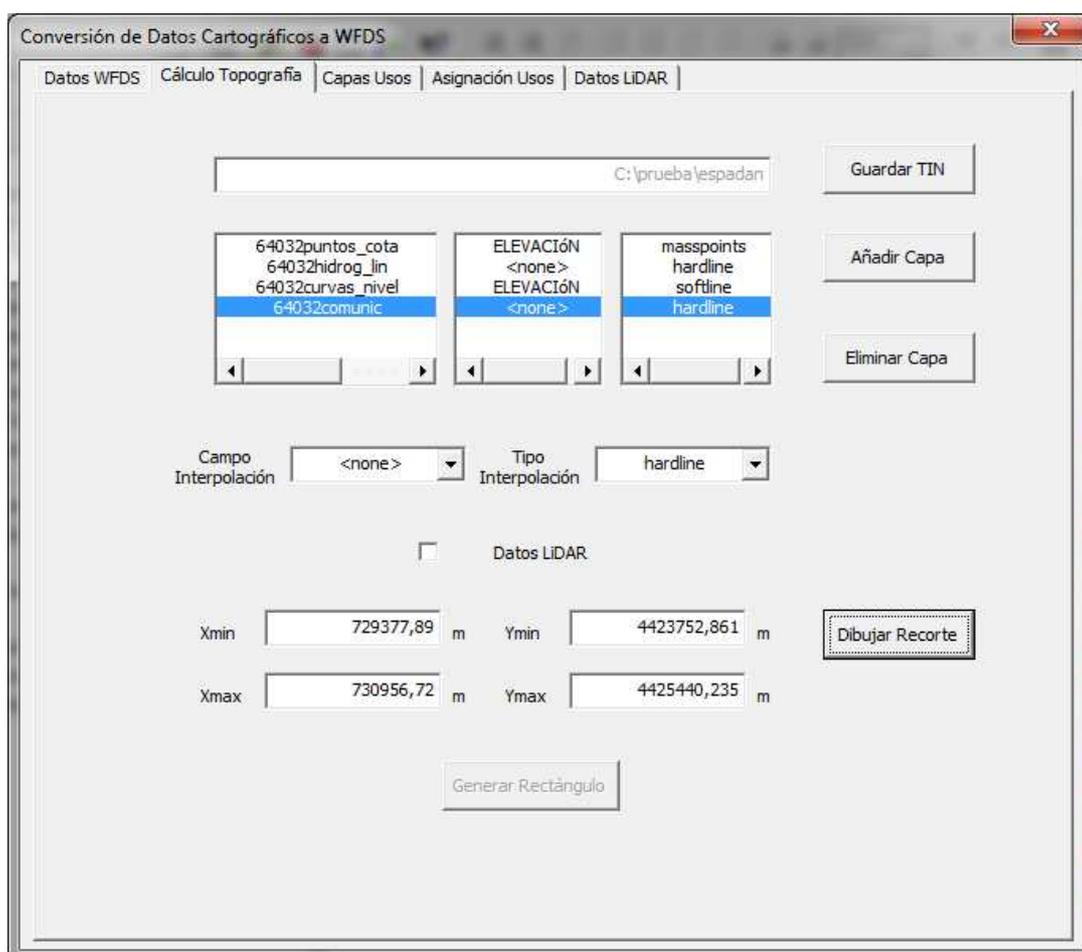
Tamaño Píxel  m    Precisión Z  m

**Figura 36. Datos WFDS, aplicación ArcGIS.**

En la siguiente pestaña, que se puede observar en la figura 37, se lleva a cabo el cálculo de la superficie topográfica y la selección de la zona de trabajo, si no se ha seleccionado anteriormente.

El primer botón sirve para indicar el lugar y el nombre donde se guardará la superficie generada. Dicha superficie se generará a partir de los datos de entrada que se introduzcan. Para ello se deben de añadir capas de tipo Shapefile e indicar cuál es el campo que sirve para la interpolación, y cómo se utilizarán para la misma.

Por ejemplo, con unos puntos de cota se utilizará el campo que contenga su cota para la interpolación, y ésta será de tipo “masspoints”. Mientras que una capa con información hidrográfica servirá como línea de ruptura (“hardline”), ya que un elemento hidrográfico nunca puede ser cruzado por un triángulo de los que forman un TIN y debe coincidir con la arista de los triángulos.



**Figura 37. Cálculo topografía, aplicación ArcGIS.**

Al lado de estas listas se observan los botones para añadir y eliminar cualquier capa de esta lista, y debajo de ellas hay unos desplegables para indicar el campo que servirá para el cálculo de la interpolación, y el tipo de interpolación.

La lista con los campos para la interpolación se carga con los campos que sean de tipo numérico de la capa seleccionada, y el desplegable con el tipo de interpolación se carga a partir del tipo de geometría de la capa.

Como se verá a continuación, también se pueden utilizar datos LiDAR clasificados para calcular la superficie topográfica, por lo que si se dispone de ellos, no será necesario introducir capas en esta lista. Para ello se deberá seleccionar la casilla de datos LiDAR y efectuar el resto de pasos que se verán más tarde.

El último comando en esta pestaña es el de la selección del área de trabajo. Esta tarea se puede realizar dibujando el propio rectángulo, clicando sobre “Dibujar Recorte” y seleccionar el área; o antes de iniciar el formulario (como se ha visto al principio de este apartado); o introduciendo manualmente sus coordenadas. De la manera que lo se efectúe será necesario presionar sobre “Generar Rectángulo” para poder continuar, ya que de esta manera se generará el rectángulo que recortará todos los datos que se vayan introduciendo a continuación.

Una vez ya se han introducido los datos para generar la superficie topográfica, el siguiente paso será introducir los datos para la obtención de los usos del suelo, y para ello habrá que desplazarse hasta la tercera pestaña titulada “Capas Usos”, figura 39.

Lo primero será cargar una base de datos con extensión .dbf en la que se encuentran los diferentes usos del suelo con sus parámetros para la simulación del incendio y otras propiedades. Para ello utilizaremos la opción de “Abrir Tabla Vegetación”.

En la figura 38, se puede seleccionar en el primer desplegable uno de los elementos presentes en la base de datos y ver sus características y modificarlas, o eliminar directamente el elemento, o introducir un nuevo elemento que por ejemplo se acaban de obtener sus parámetros en laboratorio. De esta manera es mucho más fácil el tratamiento de la base de datos, y si se introduce algún nuevo elemento, éste puede ser rápidamente utilizado en la próxima simulación.

Base de Datos de los Parámetros de la Vegetación

Elemento:

ID:  Nombre:  Tipo:

Altura:  Genera Sedimentos:  Tree:

Density:  Bulk Density:  Moisture:

Char Fraction:  Drag Coefficient:

Burning Rate:  Dehydration Rate:

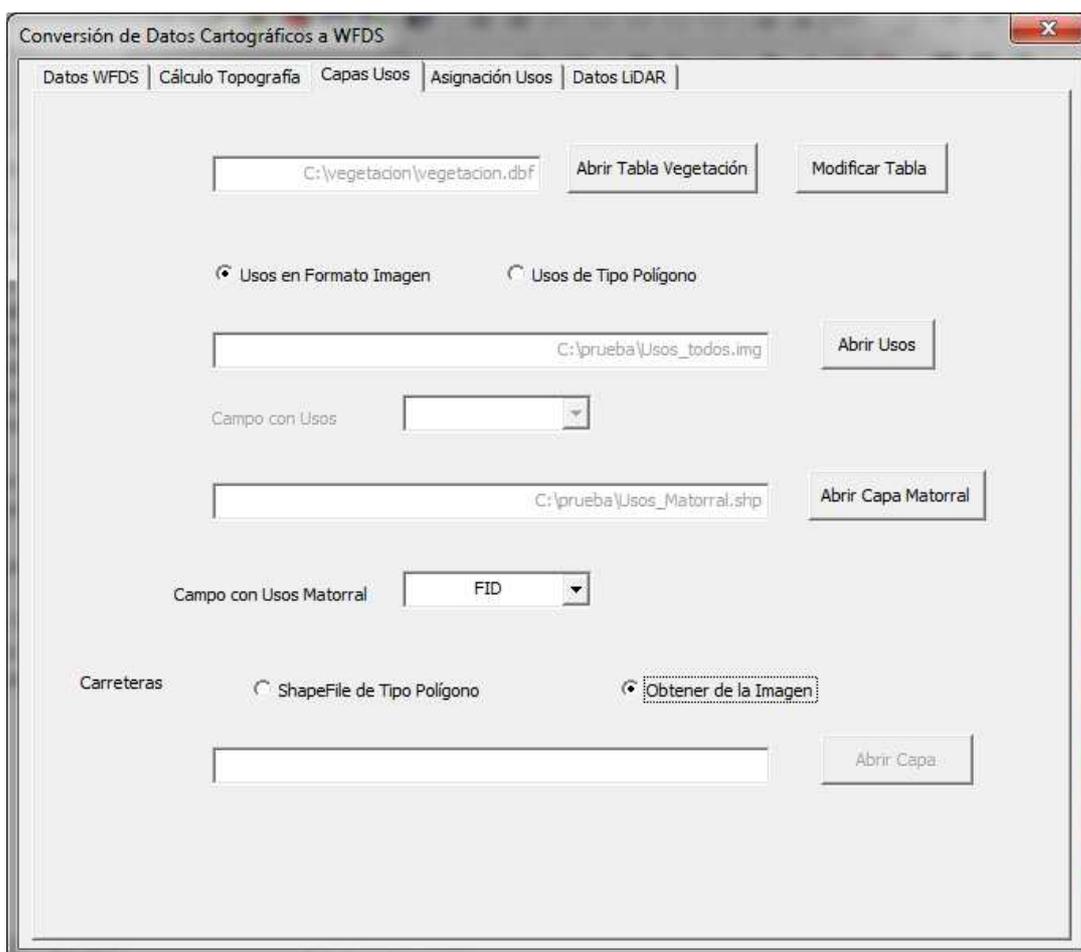
SV:  R:  G:  B:

**Figura 38. Base de datos de los parámetros de la vegetación, aplicación ArcGIS.**

Una vez indicada la ruta de la base de datos, se introducirá la imagen o el Shapefile de tipo polígono que contienen los usos del suelo.

La introducción de los usos en formato imagen está sobre todo pensada por si estos han sido obtenidos a partir de técnicas de teledetección, ya que el resultado de la clasificación se tiene en formato imagen.

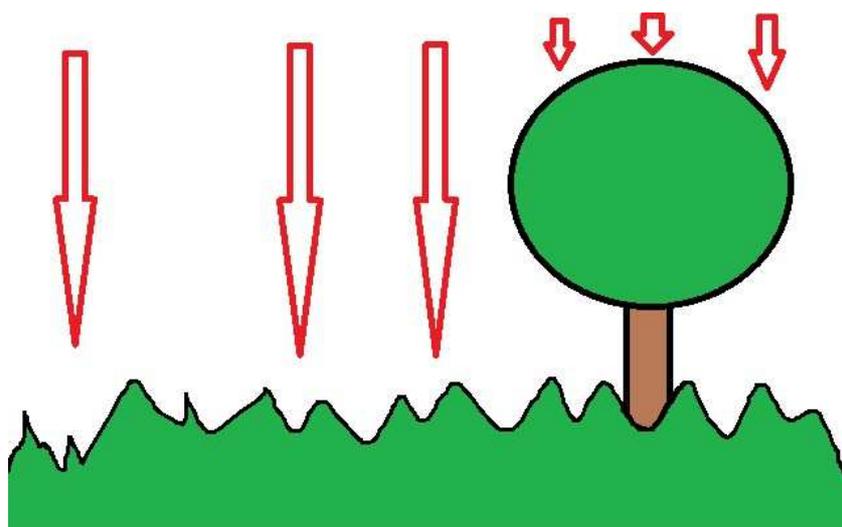
Si los usos se tienen por el contrario en un fichero Shapefile, se deberá seleccionar cuál es el campo que contiene la información sobre los diferentes usos, para poder efectuar *a posteriori* una asignación de los usos.



**Figura 39.. Capas usos, aplicación ArcGIS.**

Seguidamente se puede observar cómo también aparece la posibilidad de introducir una capa de usos de matorral de tipo polígono. Esto es debido a que los usos del suelo se suelen obtener por medio de técnicas de teledetección o fotogrametría. Lo que significa que únicamente aparecen plasmados los usos del suelo que se encuentran más cerca de la toma de la imagen, y por ejemplo la vegetación de monte bajo que queda por debajo de los árboles de un bosque no saldría representada, siendo ésta muy importante para la simulación de un incendio, ya que la vegetación de monte bajo es la mayor fuente de propagación de un incendio forestal.

En la figura 40, se muestra una explicación gráfica, siendo las flechas rojas lo que se vería en las imágenes aéreas y por lo tanto lo que saldría representado en la capa de usos del suelo. Es por eso que se pensó el poder introducir una capa con toda la información de la vegetación de monte bajo, aunque ésta quedase bajo los árboles de un denso bosque.



**Figura 40. Explicación capa matorral.**

Para finalizar esta pestaña, también se tiene la opción de introducir datos sobre las carreteras, ya que éstas son importantes a la hora de simular un incendio forestal, ya que pueden hacer de cortafuegos.

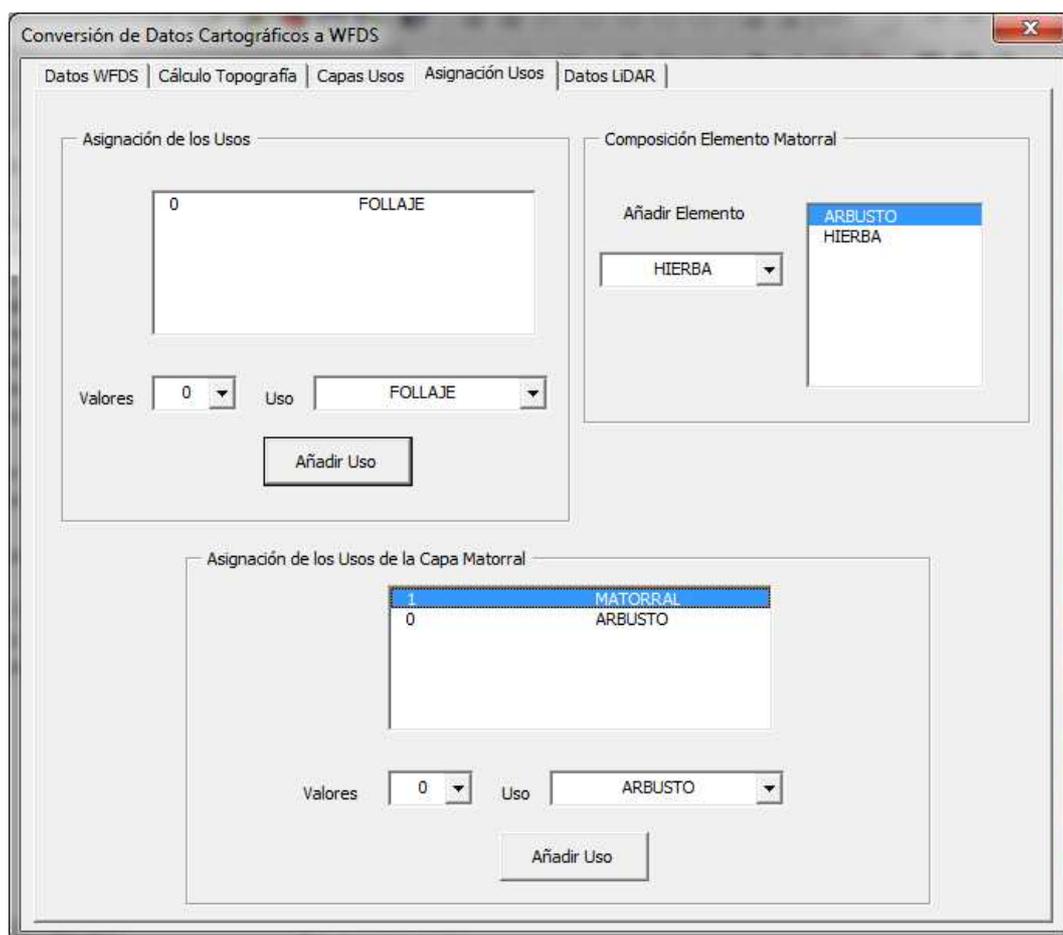
Los datos referidos a las carreteras se pueden leer de la propia información de usos del suelo, o introducir un fichero Shapefile de tipo polígono que contenga a las mismas.

Ya se dispone por un lado de una base de datos con una serie de usos y sus respectivos parámetros, y por otro lado se dispone de una cartografía con usos del suelo.

El siguiente paso será asignar a cada uno de los usos del suelo de la cartografía, qué uso de la base de datos le corresponde, para que así se le puedan asignar sus respectivos parámetros.

Cómo se observa en la figura 41, la cuarta pestaña se divide en tres partes: una con los usos del suelo; otra con los usos del suelo de la capa matorral; y otra con la composición del elemento "Matorral".

En las dos primeras se realizan las asignaciones para la capa de usos del suelo y la capa de usos de suelo de matorral, respectivamente. En la tercera se introducen los elementos de monte bajo que componen el elemento "Matorral". Esto es debido a que si en una asignación se introduce el uso "Matorral", significará que este uso puede estar compuesto por varios tipos de vegetación, por ejemplo, en la figura 41, aparecen "Arbusto" y "Hierba". Si no estuviese compuesto de varios elementos, la asignación se podría efectuar a sólo un elemento, por ejemplo, "Arbusto", o por ejemplo, "Hierba".



**Figura 41. Asignación usos, aplicación ArcGIS.**

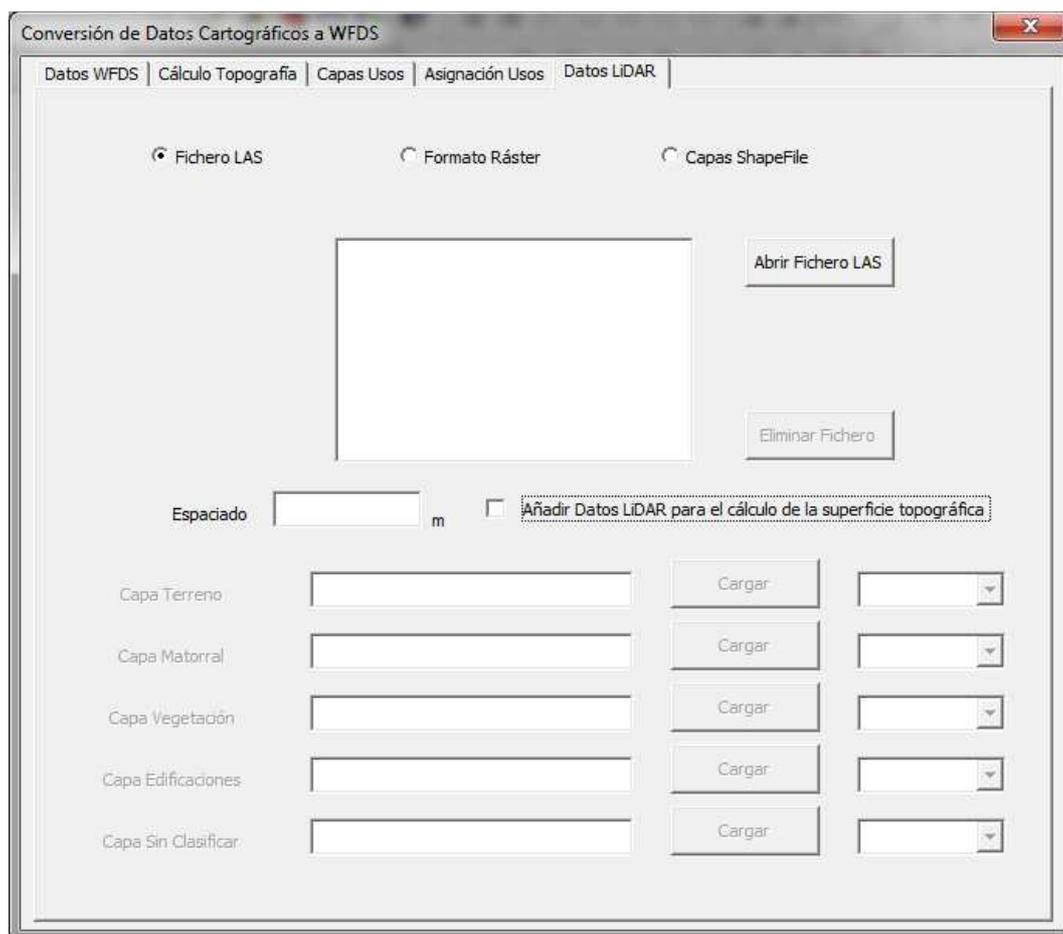
La última pestaña corresponde con los datos LiDAR. En la figura 42, se observa que los datos se pueden introducir por medio de un/os fichero/s formato LAS, por capas Shapefile de tipo punto o multipunto, o en formato ráster.

Los datos LiDAR provenientes de un fichero LAS pueden haber sido clasificados a partir de la utilización de diferentes algoritmos. A partir de esta clasificación y dependiendo del uso que se quiera extraer, se tomarán y desecharán unos pulsos u otros. Por ejemplo, si se quiere extraer el terreno, se utilizará cualquier retorno; y si lo que se quiere es obtener la superficie arbórea, se cogerá el primer pulso. De esta manera se podrán extraer datos LiDAR del suelo, de la vegetación baja, y de la alta, etc.

Si se introducen ficheros LAS éste será el procedimiento a seguir para su separación según usos. Dicho procedimiento se explicará de manera más detallada en la descripción del código.

Si por el contrario los datos no se hubiesen tratado y no se encontrasen clasificados, el software se apoyaría en las capas de usos del suelo para obtener su clasificación, y en los datos LiDAR para obtener su cota.

Una vez introducidos los ficheros LAS, se debe indicar cuál es el espaciado de los datos LiDAR. Este dato se puede obtener calculando las estadísticas de las zonas de las que se dispone de datos LiDAR, y obtener el espaciado medio entre puntos.



**Figura 42. Datos LiDAR, aplicación ArcGIS.**

Si en lugar de usar datos LAS se utilizan capas en formato Shapefile, éstas se introducirán ya clasificadas o sin clasificar, y si su geometría es de tipo punto, y no multipunto; se le indicará el campo de la capa que contiene los datos altimétricos. Esto es debido a que la geometría de tipo multipunto ya viene con la cota asociada, y por lo tanto no se necesita indicar qué campo contiene la misma; pero en una capa de tipo punto, sólo se dispone de información 2D, así que su cota debe indicarse en uno de sus campos.

Si por el contrario los datos introducidos se encuentran en formato ráster, se seguirán los mismos pasos que si fuesen capas Shapefile, salvo que no se activará el desplegable con los campos.

Tanto para la introducción de capas, como de ficheros LAS, se puede indicar que se desea que los datos LiDAR referentes al terreno se utilicen para el cálculo de la superficie topográfica. Este proceso no se podría llevar a cabo si los datos se encontrasen sin clasificar, por lo que se deberían de añadir las capas correspondientes para el cálculo de la superficie en la segunda pestaña.

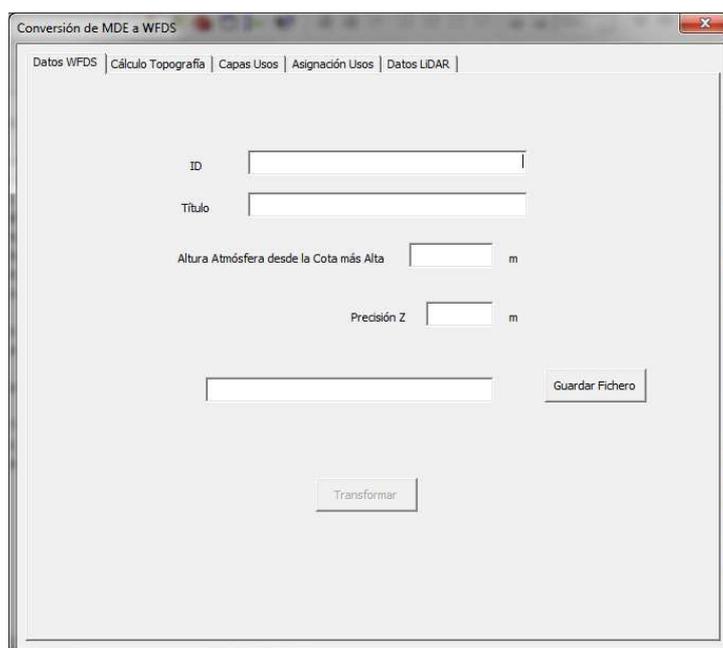
El segundo tipo de conversión (de TIN a WFDS) es muy parecido al que se acaba de explicar. Los formularios presentan los mismos comandos y las mismas distribuciones, la diferencia es que ya se parte de una malla de triángulos irregulares (TIN) creada, por lo que se puede utilizar ésta misma para obtener la superficie topográfica, o añadirle más información para hacerla más parecida a la realidad.

En este caso no será necesario que se introduzcan datos cartográficos para el cálculo de la superficie, o añadir datos LiDAR para la obtención de la misma, ya que ésta ya estará creada. Esto supondrá que a la hora del cálculo no se lleve a cabo ni la creación ni la edición del TIN, aunque la edición del TIN si que se llevaría a cabo si se añadiesen datos para la remodelación de la superficie.

En el tercer tipo de conversión (de Modelo Digital del Terreno a WFDS) aparecen algunas diferencias con respecto al primer tipo, aunque éstas no son muy numerosas.

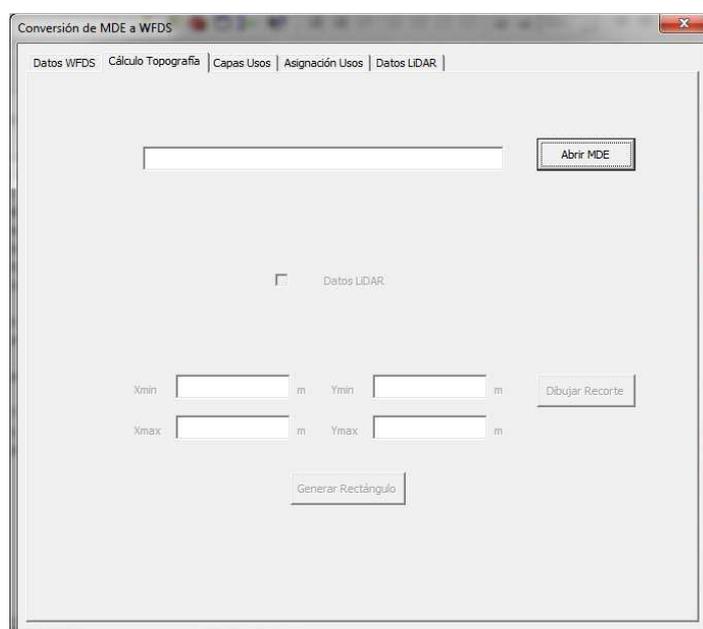
El proceso de cálculo será parecido al primer ejemplo, salvo que en este caso ya se dispone de la superficie topográfica y por lo tanto no es necesario calcular el TIN y su conversión a MDE. Los pasos realizados para la conversión y la diferencia entre tipos de conversión se explicarán de manera más detallada en el código de programación.

Como se puede ver en la figura 43, una de las diferencias es que ya no se introduce el tamaño de píxel que se desea para la simulación del incendio forestal, ya que éste viene ya determinado por el tamaño de píxel del MDE.



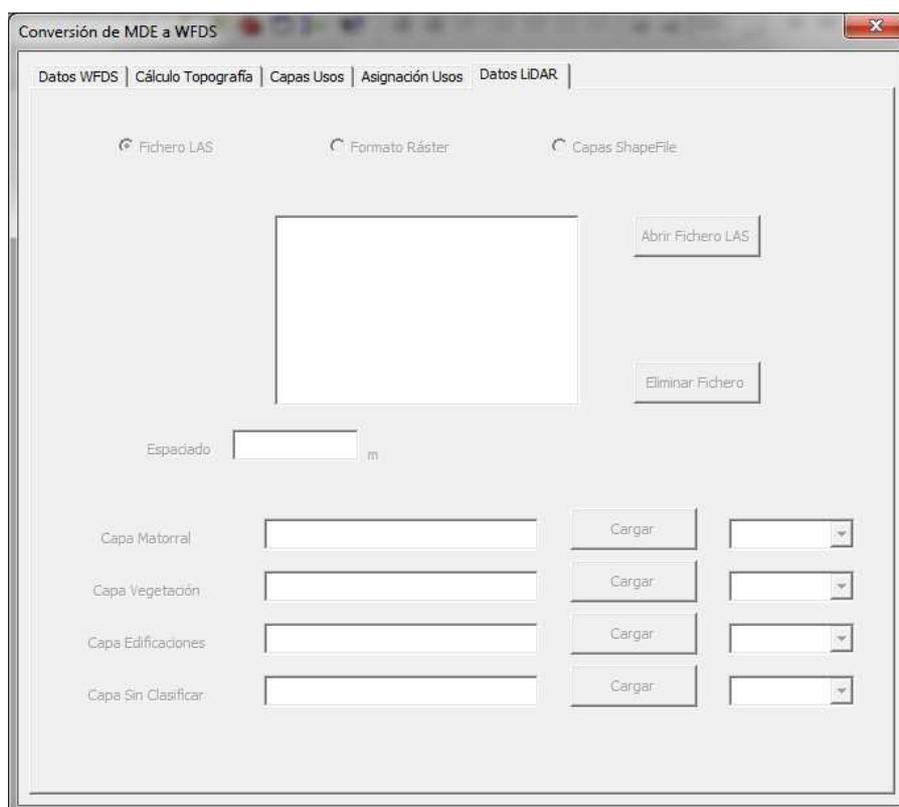
**Figura 43. Datos WFDS, de MDE a WFDS, aplicación ArcGIS.**

En la siguiente imagen se observa cómo no aparecen los comandos para la creación y edición del TIN, y se sustituye por la apertura de la imagen MDE en la que la superficie topográfica ya se encuentra modelada.



**Figura 44. Cálculo topografía, de MDE a WFDS, aplicación ArcGIS.**

Por último, en la Imagen 45, se observa que ya no se trabajan con los datos LiDAR referidos al terreno, y que ha desaparecido la opción de utilizarlos para el cálculo de la superficie topográfica, ya que ésta ya se encuentra calculada en el Modelo Digital de Elevaciones.



**Figura 45. Datos LiDAR, de MDE a WFDS, aplicación ArcGIS.**

## 2.2.2. APLICACIÓN EN LENGUAJE DE PROGRAMACION JAVA.

En este apartado se hará una explicación de la segunda aplicación, la cual ha sido desarrollada en el lenguaje de programación JAVA.

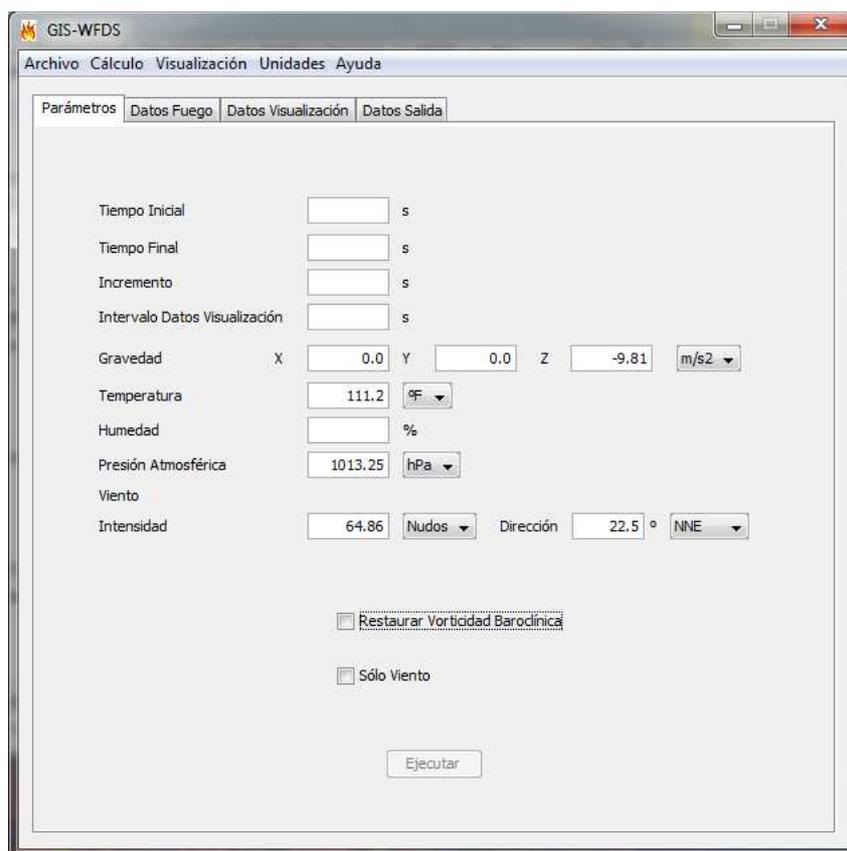
Como ya se ha comentado, esta aplicación sirve para abrir un fichero .fds creado con la aplicación anterior y que contendrá la superficie topográfica y la masa arbórea con sus respectivos parámetros, para poder añadirle datos meteorológicos, puntos de inicio del fuego, y datos de salida para la visualización, así como lanzar los cálculos y la visualización de la simulación con los softwares WFDS y Smokeview respectivamente.

La aplicación se compone de 4 pestañas: Parámetros, Datos Fuego, Datos Visualización, y Datos Salida.

Aparte de estas pestañas, también dispone de un menú de herramientas desde el que se pueden realizar acciones que también se pueden realizar desde cada una de las pestañas, o nuevas acciones como por ejemplo acceder al menú de ayuda.

En la Imagen 46, se puede observar que desde el menú “Archivo” se pueden reiniciar todas las opciones, como si se abriese nuevamente la aplicación, o bien apretando Ctrl + N. Desde este menú, o haciendo Ctrl + S, también se puede salir de ésta.

En la Imagen 46, se observa que en la primera pestaña se introducen los datos referentes al tiempo de simulación, datos sobre la gravedad y meteorológicos, así como añadir o no unas opciones a la hora del cálculo.



**Figura 46. Parámetros, aplicación JAVA.**

En los datos del tiempo de simulación se puede introducir el tiempo en el que se desea iniciar la simulación, el tiempo en el que finalizará, la duración de cada fotograma, y la duración de cada fotograma para los datos que se visualizarán; y todos estos datos se introducirán en segundos. De estos datos únicamente el de tiempo final de la simulación es obligatorio, el resto son opcionales.

Seguidamente se puede observar que también se pueden introducir los valores de la gravedad para cada uno de los ejes. Esto es debido a que también se pueden hacer simulaciones para incendios en transbordadores espaciales; o como se venía utilizando hasta ahora: para crear un plano inclinado a partir de los valores de la gravedad. Como con este proyecto se tiene creada la

superficie topográfica, estos datos ya no será necesario utilizarlos, pero desde el Consorcio Provincial de Bomberos de Valencia se pidió que se dejara por si era necesario en algún momento. Por lo tanto, cabe la posibilidad de cambiar los valores de la gravedad, que por defecto tiene un valor de  $-9,81 \text{ m/s}^2$  en el eje de las Z. También se puede cambiar la unidad de medida, por lo que está la posibilidad de introducir los datos en Gal o en  $\text{m/s}^2$ , simplemente cambiando el valor en el menú desplegable. Cuando se cambie este valor, se observará que se realizará la conversión para los valores introducidos.

Los siguientes datos a introducir son datos meteorológicos, que serán muy importantes a la hora de realizar la simulación del incendio forestal.

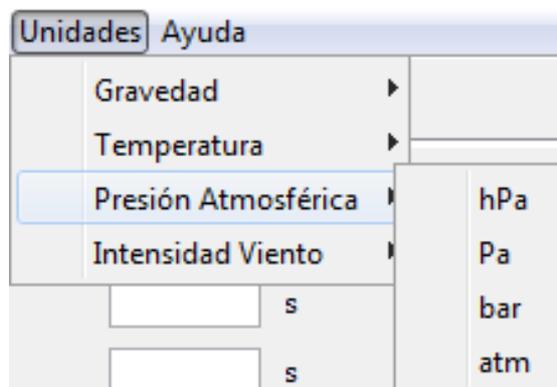
En primer lugar se tiene la temperatura ambiente. Este valor se puede introducir tanto en  $^{\circ}\text{C}$  como en  $^{\circ}\text{F}$ , indicando la unidad en el menú desplegable, y haciendo una conversión como sucedía con la gravedad si se modifican las unidades.

A continuación se introduce la humedad relativa en %. Este dato es muy importante para sobre todo conocer si la vegetación se encuentra húmeda o muy seca tras un fuerte día de poniente en Valencia.

La presión atmosférica será el siguiente dato a introducir, el cual se podrá introducir en hPa, Pa, bar, o atm. Este dato será importante para el transporte de calor o el comportamiento del humo en las diferentes capas de la atmósfera.

Tal vez el elemento meteorológico más importante en un incendio forestal es el viento. Seguidamente se puede introducir la intensidad del viento en  $\text{m/s}$ ,  $\text{km/h}$ , o nudos. También se puede introducir su dirección manualmente, o seleccionando una de las orientaciones principales en el menú desplegable.

En la imagen 47, también se observa que las diferentes unidades se pueden modificar por medio del menú "Unidades".

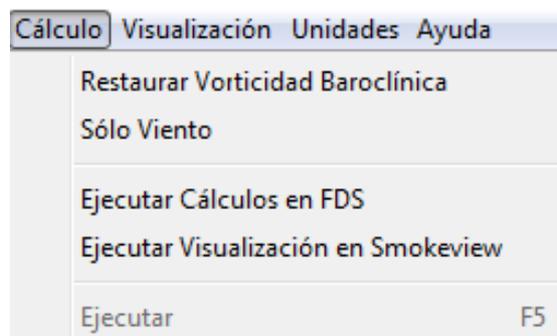


**Figura 47. Menú Unidades, aplicación JAVA.**

En la primera pestaña también aparecen dos casillas que servirán para restaurar la vorticidad baroclínica a la hora del cálculo, y la segunda pestaña servirá para estudiar el comportamiento del viento en esa zona, sin llevar a cabo una simulación del incendio.

Por último, cuando todos los datos sean introducidos, se habilitará el botón “Ejecutar” y se podrá hacer clic sobre él para realizar el cálculo y la simulación.

Como se observa en la Imagen 48, las opciones de “Restaurar Vorticidad Baroclínica” y “Sólo Viento”, también se pueden marcar desde el menú “Cálculo”, así como ejecutar el cálculo desde el programa o pulsando F5.



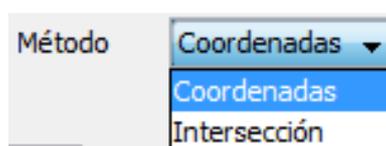
**Figura 48. Menú Unidades, aplicación JAVA.**

Esta segunda pestaña, figura 49, servirá para introducir los datos del fuego, y dónde comienza éste.

**Figura 49. Datos Fuego, aplicación JAVA.**

La primera casilla con el título “HRRPUA” indica el calor ejercido por unidad de área en kW/m<sup>2</sup>. Ésta será la potencia que se le ejerza al principio, cuando da comienzo el incendio forestal.

A continuación se debe indicar dónde empieza el fuego. Para ello se puede declarar el punto de dos maneras, figura 50: introduciendo directamente las coordenadas del incendio forestal, o bien por medio de la intersección de dos visuales.



**Figura 50. Método de introducción de coordenadas, aplicación JAVA.**

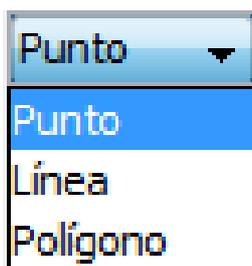
Declarar un incendio por medio de intersección de dos visuales es debido a que un incendio se suele declarar a partir de las lecturas angulares de brújulas desde dos puntos diferentes, los cuales suelen ser puestos de vigilancia. Por lo que con las coordenadas de los dos puestos de vigilancia y las lecturas realizadas desde estos, se puede obtener la intersección, que es el punto donde comienza el incendio.

Para la orientación se pensó si sería necesario aplicarle una corrección por la declinación magnética y la convergencia de meridianos, pero teniendo claro que estas lecturas se realizarían con brújulas, un fuego es igual declararlo con unos metros de error, y estas correcciones serían muy bajas, entonces se desestimó aplicar estas correcciones y se realiza el cálculo directamente con las lecturas realizadas.

El siguiente punto será el tipo de fuego a declarar figura 51. Los fuegos se podrán declarar como focos (puntos), frentes (línea), o zonas quemadas (polígono). Se podrán declarar tantos como se desee.

Para declarar un foco únicamente será necesario un punto; para la línea dos como mínimo, y para el polígono tres como mínimo.

Si el tipo elegido es línea o polígono, entonces se deberá introducir su identificador junto a las coordenadas, para saber cada punto a qué elemento corresponde y poder así crear la geometría a posteriori.



**Figura 51. Tipo declaración fuego, aplicación JAVA.**

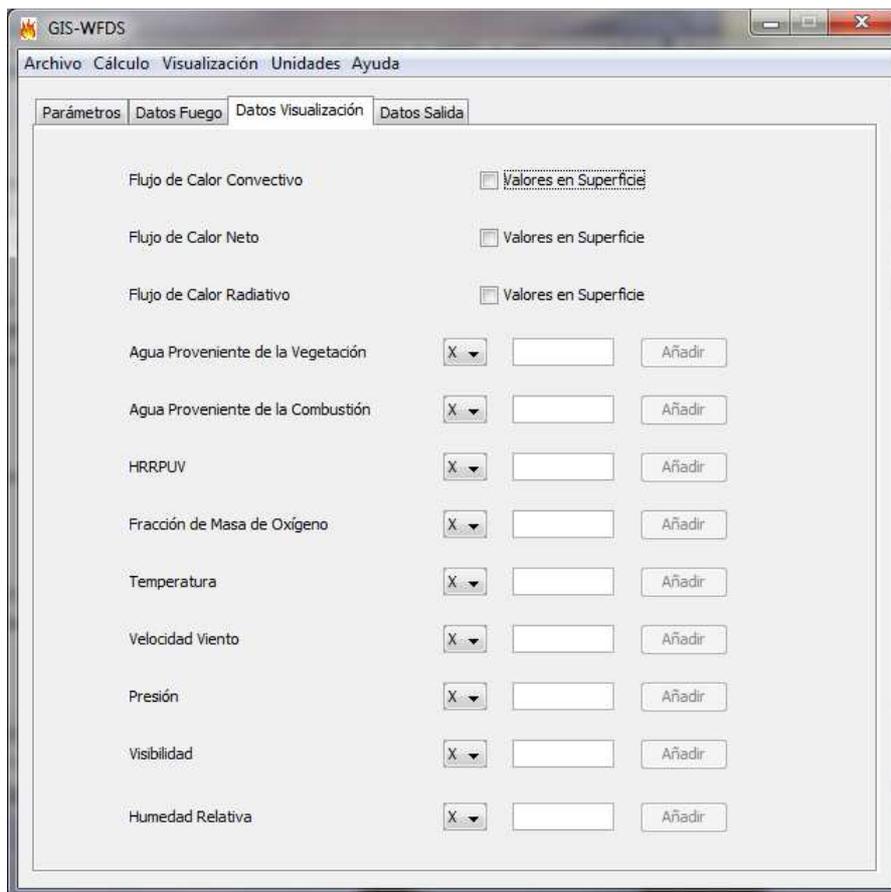
Cuando ya se hayan introducido las coordenadas del inicio del fuego o se hayan obtenido por medio de intersección, se deberá añadir ese punto a la lista con el botón “Añadir a la Lista”. Esta lista estará compuesta por las coordenadas, tipo de geometría, e identificador de todos los puntos declarados. Cualquier de estos puntos podrá ser eliminado de la lista con el botón “Borrar Elemento”.

En la tercera pestaña, la cual se puede observar en la Imagen 52, se seleccionarán todos aquellos datos que se deseen visualizar en la simulación, y se quieran obtener datos de salida con la información de estos.

Existen dos tipos de datos: aquellos que pueden obtener sus valores en la superficie, y aquellos que se representan en un plano.

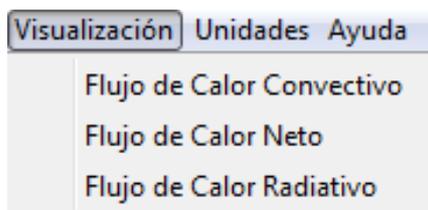
Para los valores en superficie únicamente se deberá seleccionar la casilla, y la representación de estos se realizará sobre la superficie de la zona.

Si los datos son representados en un plano, entonces se deberá seleccionar en qué plano se quiere representar y en qué coordenada, y entonces darle a “Añadir” para que se añada a la lista. Se pueden añadir todos los planos que se deseen.



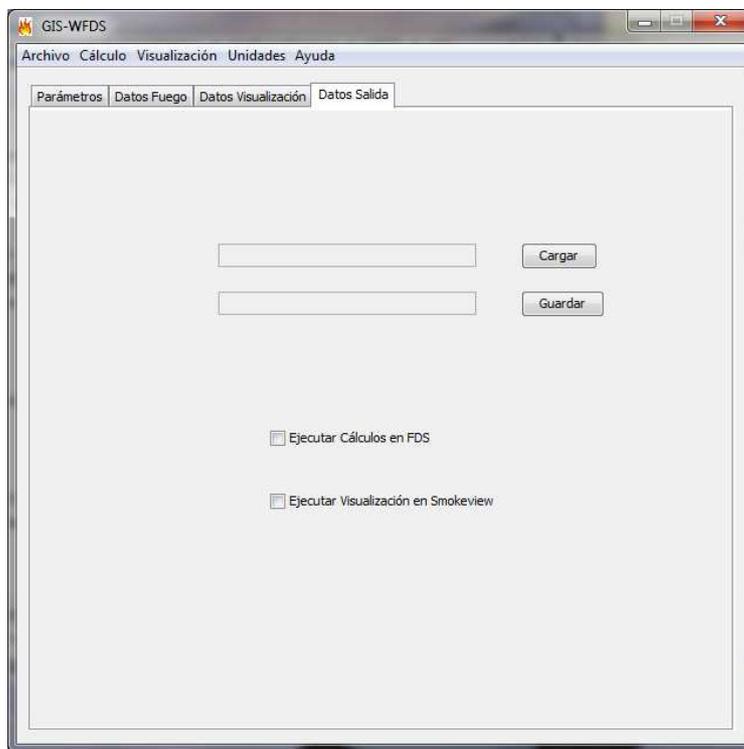
**Figura 52. Datos Visualización, aplicación JAVA.**

También se podrán añadir las visualizaciones de las representaciones que se hagan sobre la superficie a partir del menú visualización, figura 53.



**Figura 53. Datos Visualización, aplicación JAVA.**

La última pestaña de “Datos Salida”, figura 54, servirá para indicar cuál es el fichero .fds de entrada, dónde se quiere almacenar el nuevo, y qué opciones se quieren ejecutar a la hora de lanzar la aplicación.



**Figura 54. Datos Salida, aplicación JAVA 55.**

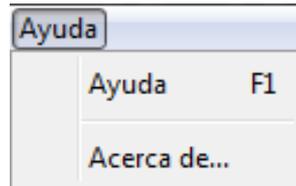
Como se ha comentado, lo primero será indicar cuál es el fichero de tipo .fds creado anteriormente con la superficie topográfica y la masa arbórea.

A continuación se indicará dónde se desea guardar el nuevo fichero que se creará tras ejecutar esta aplicación. Se recomienda que la ubicación sea diferente a la del fichero de entrada.

Seguidamente se indicará marcando las casillas si se desean ejecutar los cálculos pero no la simulación, los cálculos y la simulación, o únicamente crear el nuevo fichero .fds (en cuyo caso no se seleccionaría ninguna casilla).

Estas opciones a la hora de ejecutar la aplicación también se pueden marcar desde el menú “Cálculo”, figura 48.

Para finalizar, desde el menú “Ayuda” se puede acceder a una ayuda sobre el programa, para poder utilizarlo si se tiene alguna duda, figura 55.



*Figura 55. Menú Ayuda, aplicación JAVA.*

## ÍNDICE DEL CAPÍTULO 3

3.	ESTUDIOS Y RESULTADOS.....	131
3.1.	INCENDIOS DOMINADOS POR EL VIENTO.....	131
3.1.1.	AREA DE ESTUDIO. ....	131
3.1.2.	RESULTADOS OBTENIDOS.....	133
3.1.2.1.	<i>Resultados mediante la simulación informática de incendios. ....</i>	133
3.1.2.2.	<i>Resultados en experimento de laboratorio.....</i>	140
3.2.	APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA AL INCENDIO FORESTAL. ....	145
3.2.1.	VARIABLES DE SALIDA. ....	146
3.2.2.	EJEMPLOS DE APLICACIÓN. ....	148
3.3.	ESTUDIO DE TÚNELES CON DIFERENTES TIPOS DE PAVIMENTO. ....	171
3.3.1.	<i>Sistemas de seguridad en túneles. ....</i>	171
3.3.2.	<i>Desarrollo de los incendios en túneles.....</i>	175
3.3.3.	<i>Comportamiento del pavimento. ....</i>	180
3.3.4.	<i>Condiciones para los equipos de intervención. ....</i>	184
3.3.5.	<i>Condiciones de evacuación. ....</i>	192
3.3.6.	<i>Daños en instalaciones e infraestructuras. ....</i>	196
3.3.7.	<i>Medidas a adoptar en caso de incendio.....</i>	197

## CAPITULO 3

---

### 3. ESTUDIOS Y RESULTADOS.

#### 3.1. INCENDIOS DOMINADOS POR EL VIENTO.

Existe un fenómeno en el desarrollo de los incendios que es muy peligroso para la actuación de los bomberos. Es un tipo de siniestro que nunca se ha estudiado en nuestro entorno. Se sabe que se ha producido porque se ha comentado de forma ocasional entre el personal veterano del Servicio de Bomberos. En EEUU se comienza a estudiar también debido a la cantidad de heridos y muertes que ha causado entre los intervinientes. Es un tema que cada vez preocupa más a los Responsables de Bomberos. Existe un denominador común en este tipo de desgracias. Se trata de la geometría de la edificación y el desconocimiento por parte de los intervinientes en el momento de actuar en el interior.

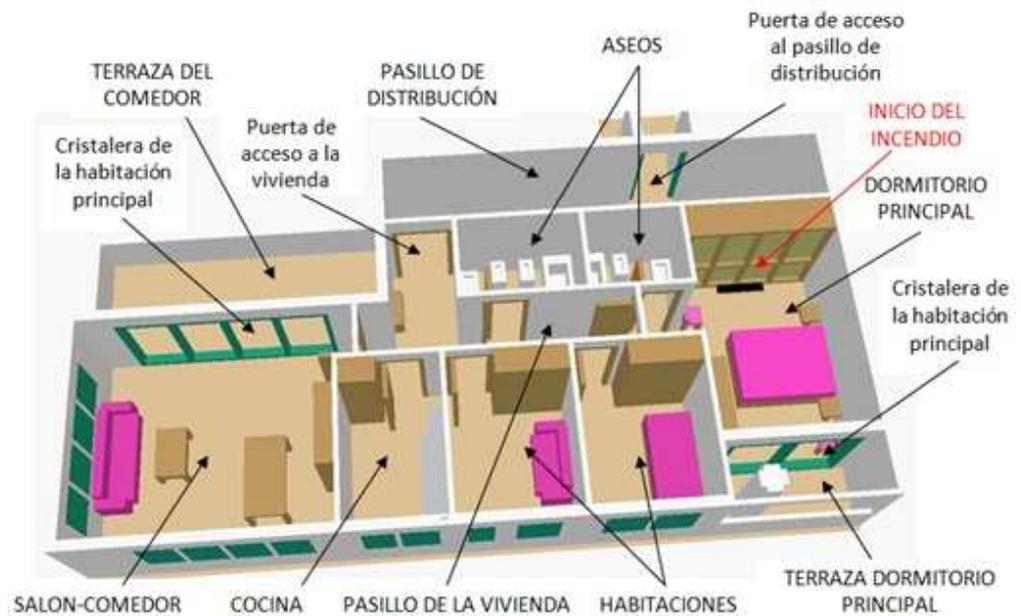
Se pretende conseguir unos resultados con los que explicar que sucede en un incendio cuando aparecen unas aperturas de huecos en el interior del escenario. Con un análisis científico que permita una mejor comprensión del fenómeno. Es un tema desconocido y no incluido en la formación de los Servicios de Bomberos españoles.

El siniestro que se analiza es el ocurrido el 17 de Febrero de 2011. Miembros del servicio de bomberos, quedan atrapados en la terraza de una vivienda en la planta decimonovena, tratando de huir de las llamas en un incendio que se había desarrollado en la habitación principal a varios metros de distancia de la zona donde se produce el inicio del mismo.

##### 3.1.1. AREA DE ESTUDIO.

La vivienda tiene una distribución rectangular. Con un pasillo central que comunica la zona de día con la zona de noche. Compuesta por un dormitorio principal, dos dormitorios, dos cuartos de baño, una cocina, un salón-comedor y dos terrazas. Las paredes son de ladrillo cerámico del siete, revestido con enlucido de yeso. Las zonas húmedas (baños y cocina), al igual que el pasillo, se encuentran con un falso techo de escayola, por donde circulan las conducciones de agua y electricidad. El resto de la vivienda se encuentra con el forjado recubierto con un centímetro de yeso. La carpintería interior de las puertas es realizada en madera de Pino silvestre, de grano fino y fácil de trabajar. Con una densidad real de 1,56 Kg/dm<sup>3</sup>. La carpintería

del exterior está realizada en aluminio anodizado, coloreado en color verde. La distribución se puede observar en la siguiente ilustración, figura 56.



**Figura 56. Perspectiva de la vivienda motivo del análisis.**

Los materiales que se queman se definen en un archivo del programa FDS. El modelo se introduce con las propiedades físicas y térmicas. El ordenador calcula la relación entre los materiales y el entorno.

La conductividad térmica, la densidad y el grosor definen la transferencia del calor. La temperatura de ignición, el calor de combustión, el calor de vaporización y la tasa máxima de generación de calor completan las condiciones del entorno.

Los materiales utilizados en la simulación se muestran en el artículo. Las propiedades físicas y térmicas se definen en la tabla 6. La temperatura de ignición es una de las propiedades más importante. Los materiales que tienen esta temperatura, se consideran combustibles en el modelo.

Materiales	Temp. de Ignición (°C)	Velocidad de liberación de calor- por unidad de área, (kW/m <sup>2</sup> )	El calor de combustión (kJ / kg)	Conduct. térmica a 20 C (W / (m • K))	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico a 20° C. (kJ/(kg·K))
Ladrillo [30]	N/A	N/A	N/A	0.69	1600	0.84
Alfombra [31]	N/A	N/A	N/A	0.16	750	4.50
Algodón	260 [32]	180 [33]	15,600 [34]	0.11 [35]	36.4 <sup>3</sup>	1.29 [35]
Madera [36]	384	181.40	13,000 [37]	0.13	502	1.8 [38]
Vidrio [30]	N/A	N/A	N/A	0.76	2700	0.84
Yeso [41]	400 [42]	224 [43]	5,600 [37]	0.17	930	1.09

**Tabla 6. Propiedades Termo-Físicas de los materiales utilizados en la simulación.**

### 3.1.2. RESULTADOS OBTENIDOS.

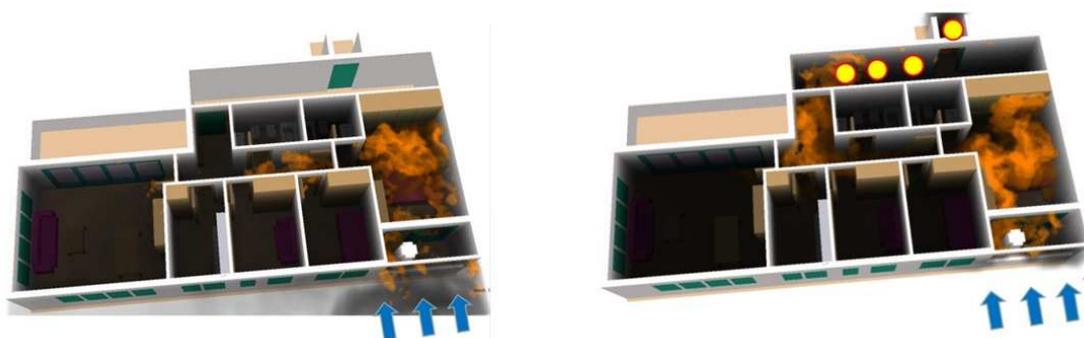
#### 3.1.2.1. Resultados mediante la simulación informática.



**Figura 57. Foco inicial y desarrollo en fase de Flash-Over.**

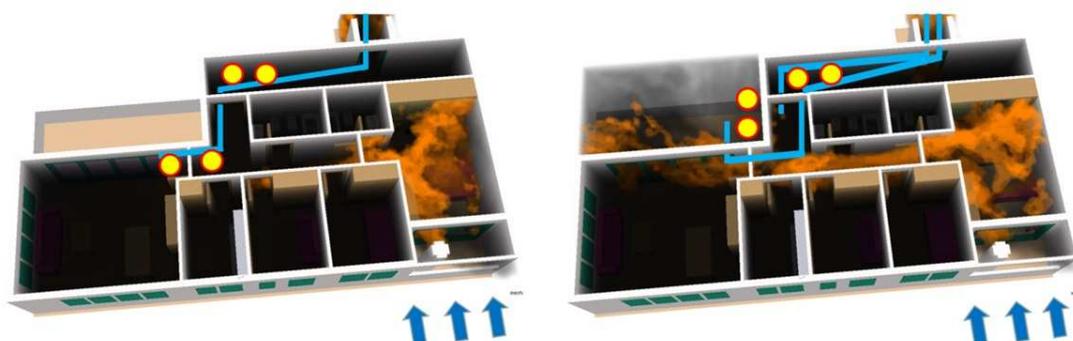
El resultado de la simulación ha sido decisivo para comprender el desarrollo del incendio. Las imágenes permiten realizar una evolución de la dinámica de la combustión. El inicio del incendio se produce en el armario de la habitación principal debido a un fallo eléctrico, (Figura 57. Foco inicial y desarrollo en fase de Flash-Over.

57). El fenómeno evoluciona hasta alcanzar la fase de flash-over. Los elementos que favorecen este proceso son la propia geometría de la habitación, la composición de los materiales y de la altura del forjado. Esta evolución es el proceso normal en el desarrollo de los siniestros que actúan los bomberos en la actualidad.



**Figura 58. Rotura de cristales y apertura de puerta de entrada.**

El proceso continúa con la rotura del ventanal de la habitación principal. Esta nueva apertura permite el direccionamiento del flujo de aire hacia el interior de la vivienda, figura 58. Los bomberos acceden al pasillo de distribución dejando abierta la puerta, para permitir el paso de las mangueras. Estos abren la puerta de entrada. Un gran flujo de fuego invade la zona de acceso donde ellos se encuentran en ese momento. El paso es muy difícil y muy peligroso. Ellos deben de abandonar la maniobra y volver a cerrar la puerta.



**Figura 59. Maniobra de penetración y de refugio exterior.**

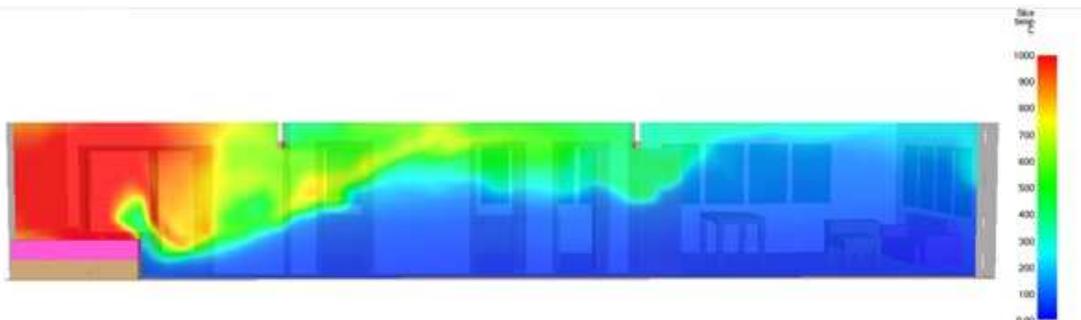
Los intervinientes cierran la puerta de acceso y cortan el flujo. Estos penetran en el interior y realizan el rastreo de víctimas en la vivienda, figura 59. Un segundo equipo de apoyo abre las puertas del pasillo y provocan otra vez el flujo del incendio, elevando las temperaturas del escenario. El primer equipo no puede soportar la radiación y se tienen que refugiar en la terraza. El flujo del incendio se canaliza a través de los ventanales por donde se ha producido la apertura.

Los bomberos son reforzados por el segundo equipo y realizan un nuevo ataque. La operación resulta eficaz y se consigue controlar el incendio. La situación resulto ser muy peligrosa. La lectura de los daños se pueden observar en las imágenes 4. Estas nos muestran el grado de afección de la vivienda.



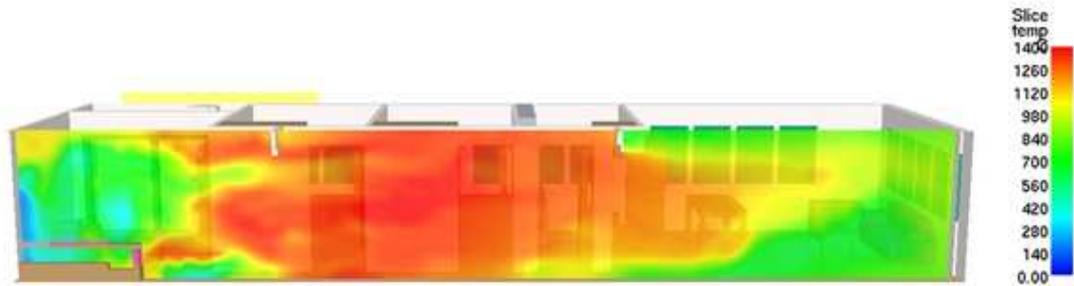
**Imagen 4. Estado de la habitación principal y del pasillo.**

El estudio compara un incendio tipo con el incendio analizado. La secuencia del primer caso se desarrolla con un flash-over en la habitación en la que comienza el incendio. El humo y los gases calientes recorren la parte superior de la vivienda, figura 60. Los bomberos pueden acceder por la parte inferior y enfriar los gases de la combustión y controlar el incendio. Las temperaturas por la parte inferior varían entre 100 y 200 °C. La temperatura por la parte superior oscila entre 600 y 700° C.



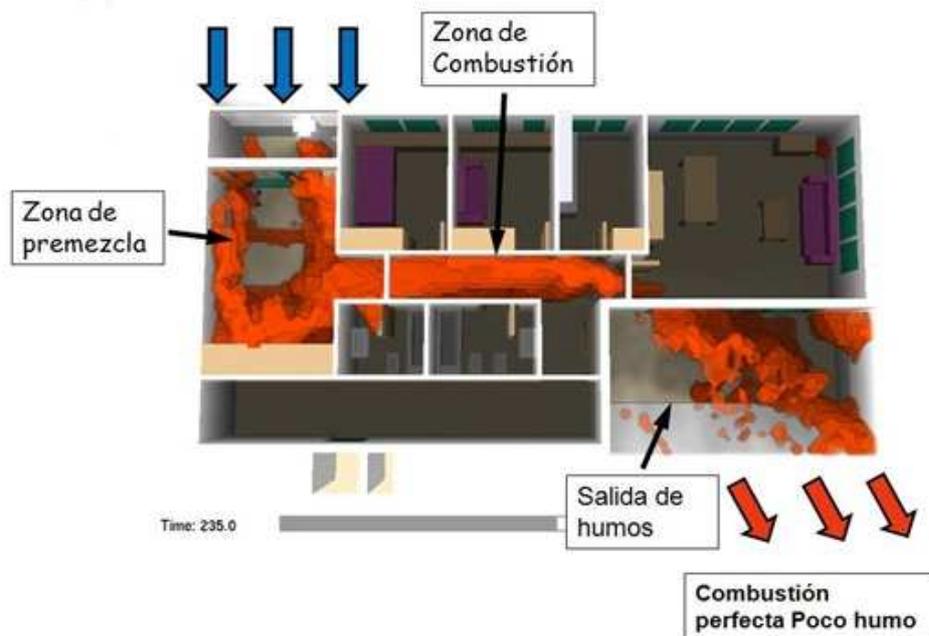
**Figura 60. Sección del desarrollo de un incendio considerado normal.**

El incendio analizado comienza igual pero se diferencia en la evolución. El flujo del incendio se desarrolla a lo largo de toda la vivienda. El fenómeno carece de zona superior y de una zona inferior. El desarrollo es completo y ocupa toda la zona de paso. Las temperaturas como se puede observar superan los 1000° C, figura 61. Las posibilidades de permanecer en este lugar son nulas.



**Figura 61. Sección del desarrollo del incendio estudiado.**

El fenómeno es similar al que se produce en una caldera industrial. Existe una cámara de pre mezcla, una cámara de combustión y una zona de escape. El fenómeno aparece en la figura 62. Existe una diferencia entre el incendio normal producido por el flash-over, donde nos encontramos con una combustión por difusión y un incendio dominado por el viento que donde aparece una combustión por pre mezcla.



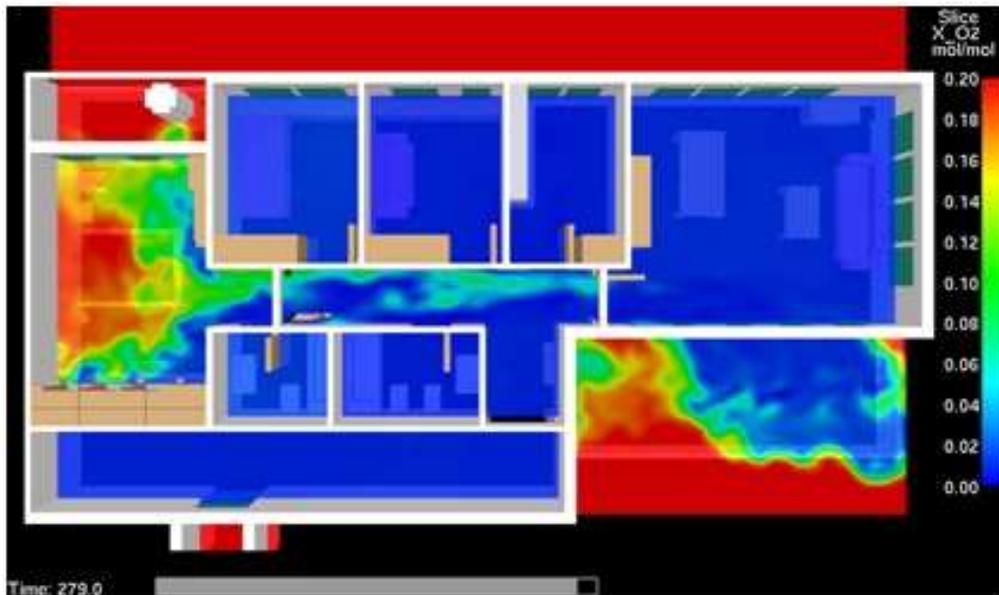
**Figura 62. Esquema del desarrollo de un incendio dominado por el viento.**

La influencia del viento queda reseñada en la figura 63. Esta muestra los vectores de velocidad que se alcanza en el interior y que ha sido contrastada con las conversaciones del mando que actuó en el siniestro. El responsable destacó la alta velocidad del aire alcanzada en el interior del escenario. El aire entra a 6 m/s, pero los gases circulan por el interior a más de 15 m/s.



*Figura 63. Vectores indicando la velocidad del viento en el interior del escenario.*

Otro factor que se observa, es el “Efecto Venturi” que se desarrolla en el interior. El resto de las habitaciones se quedan sin oxígeno. Esta situación se comprueba porque los muebles no llegan a quemarse, figura 64.

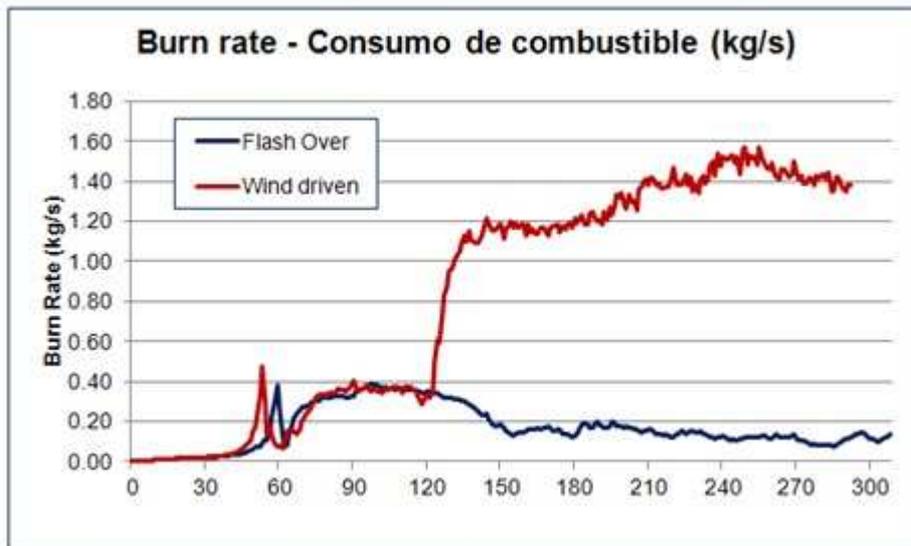


*Figura 64. Distribución de oxígeno en el interior del escenario.*

La herramienta permite comparar las curvas de emisión de calor y la de tasa de consumo de combustible. La primera se multiplica por 8, como se puede observar en la gráfica 28. La segunda, se multiplica por 10, gráfica 29.



**Gráfica 28. TASA DE GENERACIÓN DE CALOR**

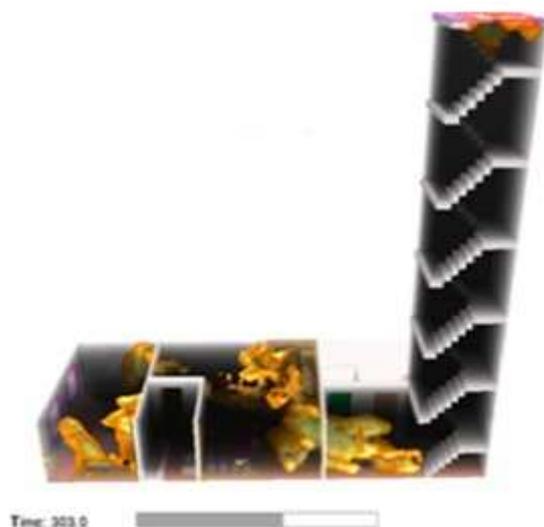


**Gráfica 29. TASA DE CONSUMO DE MATERIALES**

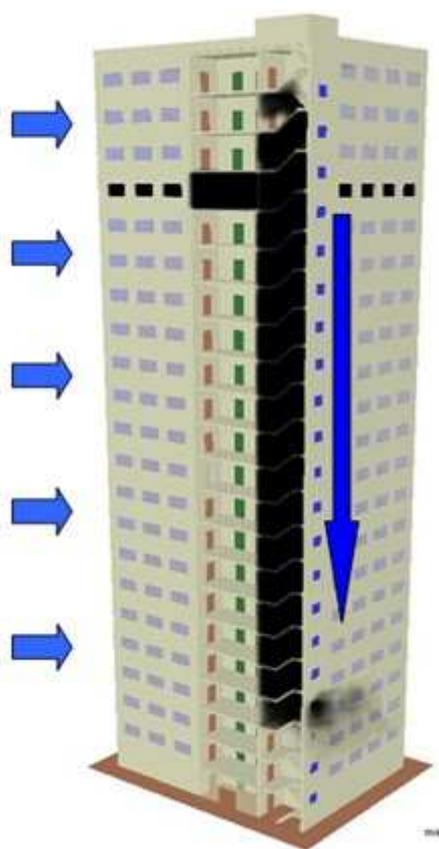
El flujo de desarrolla a lo largo de la vivienda, pero puede llegar a invadir la caja de escalera o incluso los pasillos de distribución de los edificios. Este factor depende del lugar donde se encuentre la apertura. Esta trayectoria será por donde se dirija el flujo del incendio.

El estudio demuestra que el incendio se puede dirigir en un núcleo de comunicación vertical hacia la parte superior, figura 65. El recorrido es hacia abajo si la apertura se encuentra en la

parte inferior, figura 66. Este fenómeno tiene otras aplicaciones importantes en el tema de la prevención. Las escaleras son núcleos de comunicación vertical por donde evacuan las personas. Una invasión del flujo del incendio en la escalera es muy peligrosa.



**Figura 65. Flujo del incendio ascendente por la caja de escalera.**



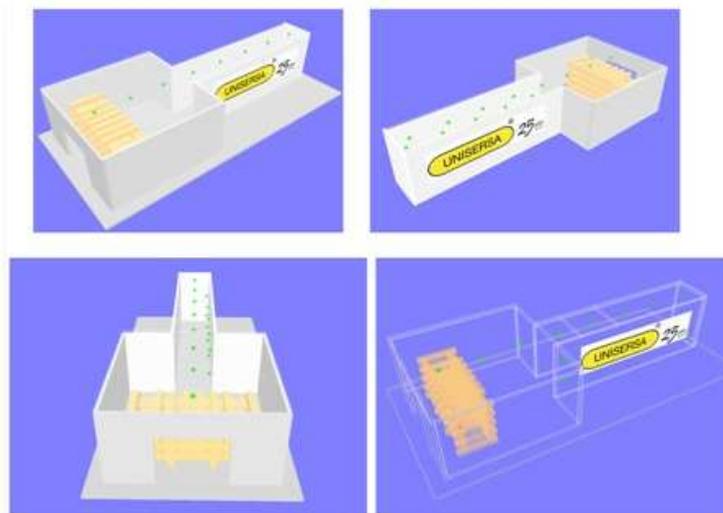
**Figura 66. Flujo del incendio ascendente por la caja de escalera.**

### 3.1.2.2. Resultados en experimento de laboratorio.

Un elemento que sirve para verificar el comportamiento del flujo es una maqueta. El proceso se puede observar de una forma veraz. El fenómeno se puede cuantificar y comparar con los resultados obtenidos en la simulación informática de incendios.

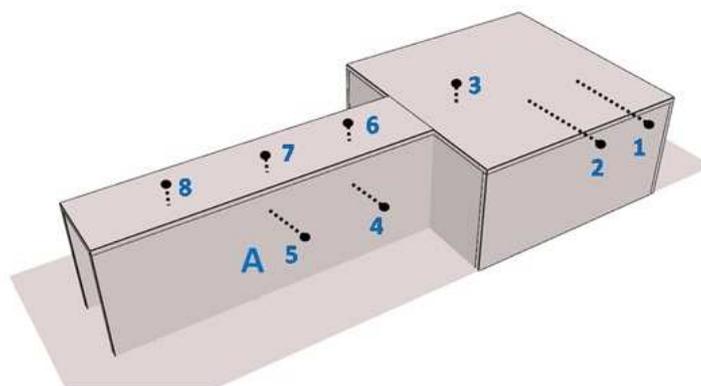
Se ha realizado una maqueta para poder demostrar el aumento de temperaturas y la diferencia del desarrollo del proceso de combustión. Pretendemos demostrar que el proceso que se produce se debe a la geometría del edificio y a la influencia del aire.

Previamente se realizó una simulación en una maqueta para observar las características y el comportamiento de la combustión, figura 67.



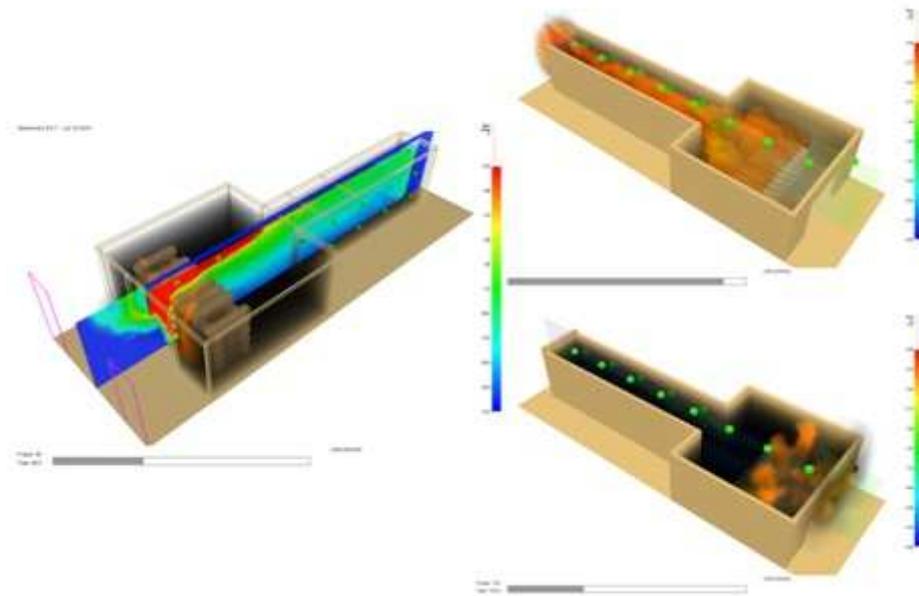
**Figura 67. Maqueta virtual para la simulación.**

Se realizaron pruebas para ver la colocación más precisa de los termopares, figura 68.



**Figura 68. Colocación virtual de la situación más óptima en el escenario.**

Nos permitió visualizar lo que pasaría en el interior de forma que seguimos en la línea de estudio porque se producía, figura 69.



**Figura 69. Simulación del efecto Wind Driven Fire. Optimización de la carga.**

El material adquirido es una placa de material de fibrosilicato. Se realiza una distribución similar a la de una vivienda, figura 70. Unos termopares se colocan para controlar la temperatura que se alcanzan en el interior, figura 71. Una carga de madera se introduce en el interior de la maqueta para desarrollar la combustión figura 72. Un ventilador es el elemento que sirve para aplicar el flujo de aire figura 73.



**Figura 70. . Distribución de la maqueta.**



**Figura 71. Colocación de termopares por todo el escenario.**



**Figura 72. Carga de fuego.**



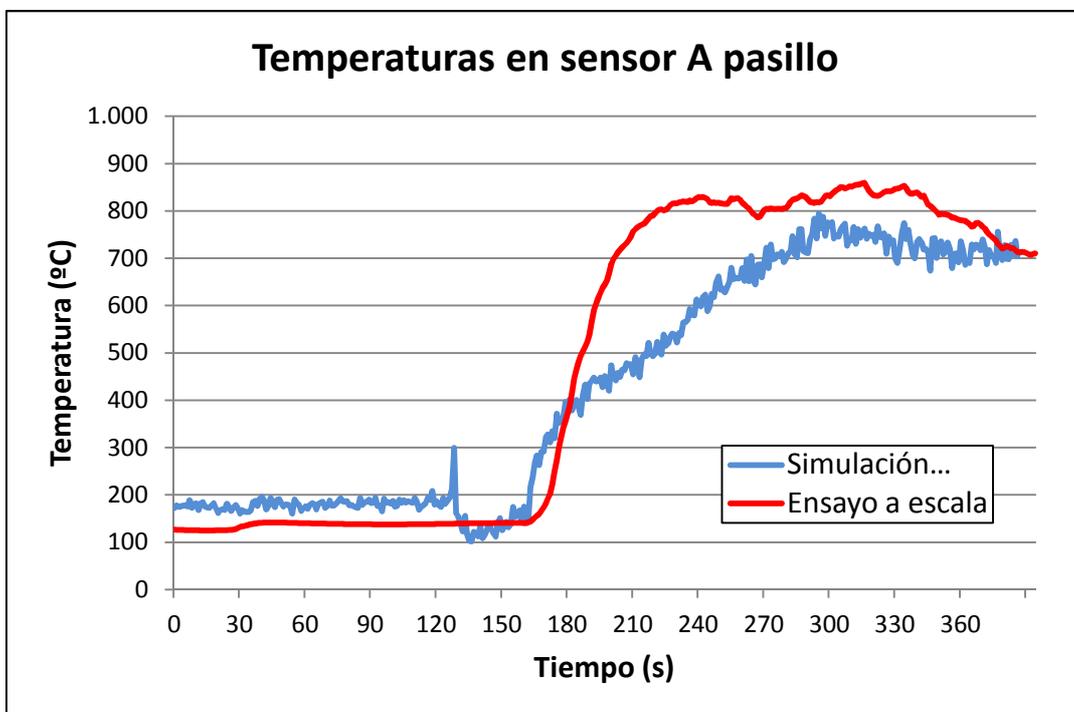
**Figura 73. Aplicación de flujo de aire.**

Los resultados obtenidos son parecidos a los obtenidos por la simulación. Las graficas muestran un aumento de temperatura que varía de 200 a 800° C. El desarrollo del flujo del incendio ocupa la totalidad del escenario, figura 74.



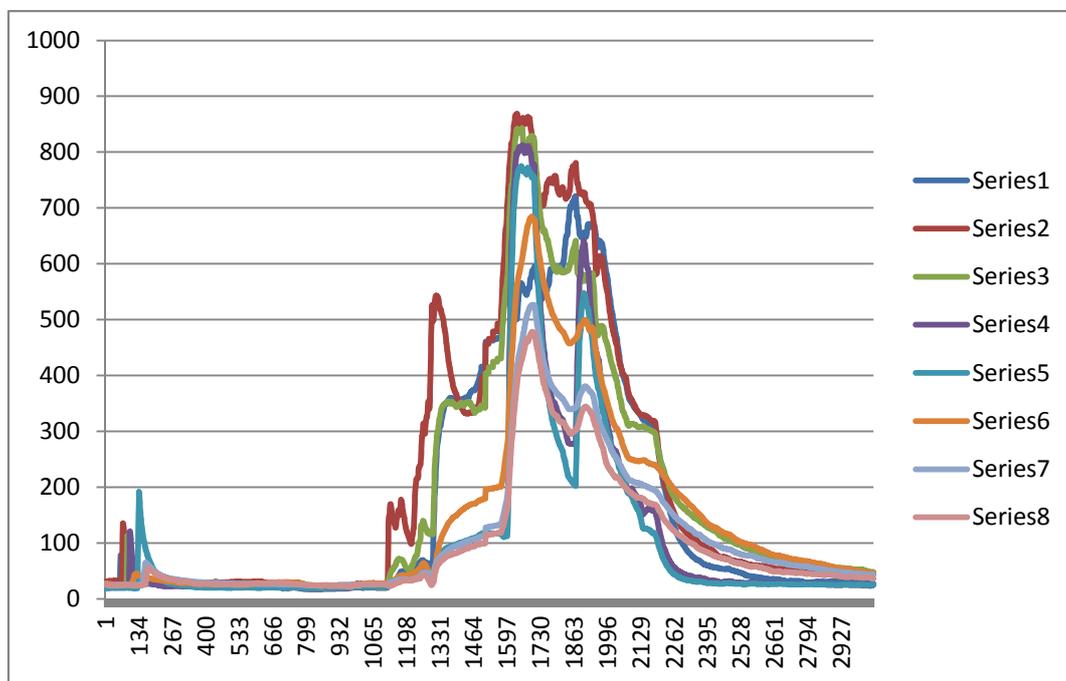
**Figura 74. Desarrollo del incendio.**

Los datos obtenidos en comparación con los datos de la simulación tienen un desarrollo similar, gráfica 30.



**Gráfica 30.- Temperaturas en el sensor "A" del pasillo.**

Se realizaron dos experimentos. Se pueden observar las graficas de los resultados obtenidos. Se aprecia que el aumento es significativo y que confirma la peligrosidad a la que se hace referencia durante el desarrollo del artículo, gráfica 31.



**Gráfica 31. Gráfico de las temperaturas obtenidas por los termopares en los ensayos realizados**

Con el análisis se aclara la falta de formación que disponen los servicios de bomberos en este tipo de incendios. Es un inconveniente que aparece en la actualidad con más virulencia por la propia geometría de los edificios. Los edificios son más altos y no suelen estar resguardados por los edificios de alrededor. Por lo que el viento tiene más facilidad de llegar a los paramentos exteriores.

Es muy importante matizar que en los lugares cercanos al litoral, nos encontramos con brisas importantes, que nos debe de hacer reflexionar ante este tipo de siniestro y su aumento en la frecuencia de aparición.

Los diseñadores de los edificios los hacen más esbeltos. Más altos y los núcleos de comunicación más estrechos. Esta situación permite que los gases de la combustión puedan recorrer estos lugares con mayor facilidad. Es tan virulento el desarrollo del fuego que el bombero queda sin protección, por lo que lo convierte en un elemento muy vulnerable. Es un tema que debe de incluirse en el conocimiento del personal que interviene en los incendios.

### 3.2. APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA AL INCENDIO FORESTAL.

Se presentan numerosos ejemplos de aplicación con la intención de comprobar la capacidad de análisis de dicha aplicación informática. Como colofón, se muestra un estudio realizado del incendio de Millares de 1994 en el que fallecieron 7 personas.

Entender cómo se comportan los incendios resulta fundamental para los profesionales y técnicos que trabajan en su prevención y extinción. Por mucha experiencia y conocimientos que acumulemos siempre hay fenómenos que por su complejidad no podemos comprender. La gran cantidad de factores que influyen en la dinámica del fuego hacen que los modelos matemáticos de los que disponemos no reproduzcan de forma efectiva la dinámica del fuego en todas las situaciones.

Estas técnicas requieren una alta capacidad de almacenamiento y de procesado de datos y que hasta hace pocos años únicamente tenían los grandes centros de cálculo. En la actualidad, y gracias al avance de la informática, cualquier particular puede disponer de ordenadores con suficiente memoria y potencia para modelar incendios con una alta fiabilidad y precisión de los resultados.

La calidad de los resultados que se obtengan de las simulaciones dependerá de la cantidad de parámetros de entrada mediante los que definimos los combustibles y los factores ambientales del entorno.

#### Variables ambientales o de entorno

- Temperatura ambiente, humedad relativa y presión atmosférica
- Densidad y viscosidad del aire
- Disminución de la temperatura con la altitud
- Vector gravedad
- Dirección y velocidad inicial del viento
- Definición de la curva de viento sobre el terreno.
- Características físico-térmicas del terreno donde se desarrolla el incendio. Etc....

Todos estos parámetros se pueden hacer variables a lo largo del tiempo de simulación.

Como se observa la cantidad de parámetros de entrada que hay que utilizar nos da una idea de la complejidad del modelo así como de la precisión que se puede tener a la hora de definir un entorno forestal.

### 3.2.1.VARIABLES DE SALIDA.

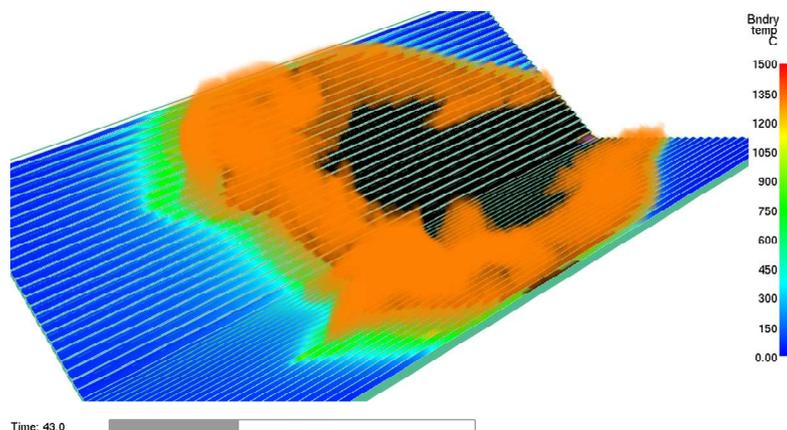
Para la visualización de los resultados obtenidos tras el procesado del modelo se utiliza una aplicación llamada SMOKEVIEW que también se descarga junto al FDS. Las posibilidades gráficas de esta aplicación son muy grandes permitiendo visualizar la información mediante planos de lectura, isosuperficies, valores superficiales, valores puntuales, vectores etc.

Estos valores se representarán de forma secuencial a lo largo de todo el tiempo de simulación de forma que se puede observar la evolución de los parámetros de forma transitoria en 3D y desde cualquier dirección.

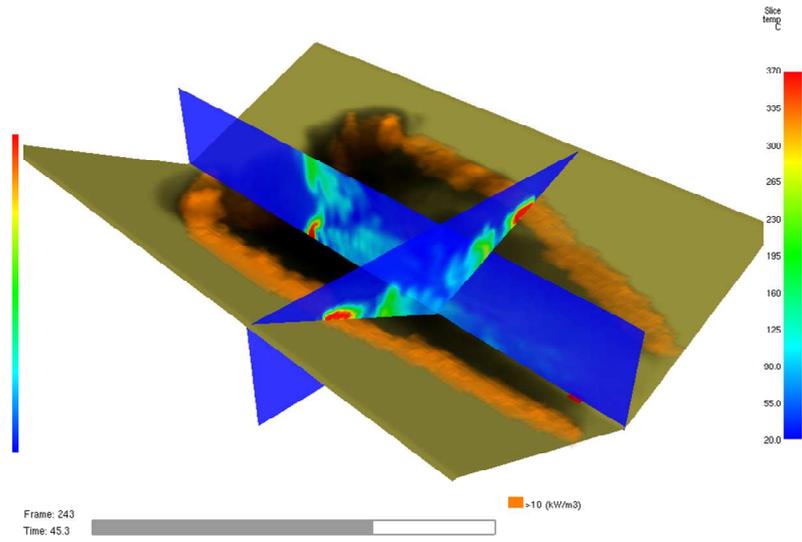
Algunos de los parámetros que se pueden representar son:

- Concentración de gases (fuel, oxígeno, nitrógeno, vapor de agua, dióxido de carbono, monóxido de carbono, humo y otros que queramos definir)
- Temperatura de gases y sólidos
- Temperatura adiabática de las superficies
- Temperatura interior de los elementos sólidos
- Velocidad, presión, humedad, densidad y viscosidad de los gases.
- Visibilidad de los humos
- Tasa de combustión de los sólidos combustibles
- Flujo de calor por convección y por radiación
- Flujo másico y volumétrico a través de superficies y volúmenes
- Etc...

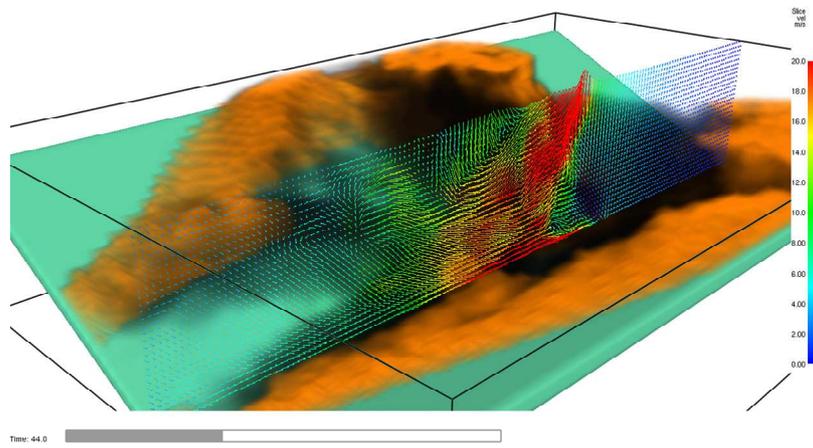
En las siguientes imágenes se muestran algunos ejemplos de la capacidad de análisis que se tiene con el Smokeview, figura 75, 76, 77 y 78.



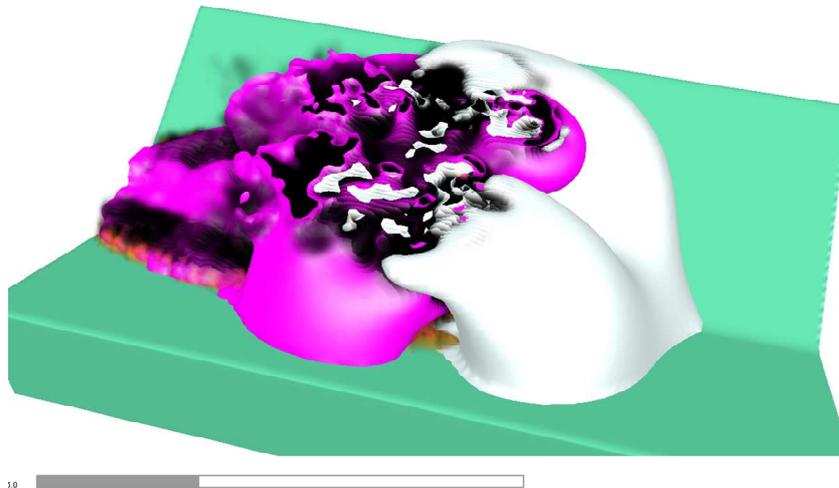
**Figura 75. Representación de las temperaturas en las superficies.**



**Figura 76. Representación de planos de temperatura de gases.**



**Figura 77. Plano de vectores de velocidad de flujos.**



**Figura 78. Plano de isosuperficies de presiones y succiones programadas.**

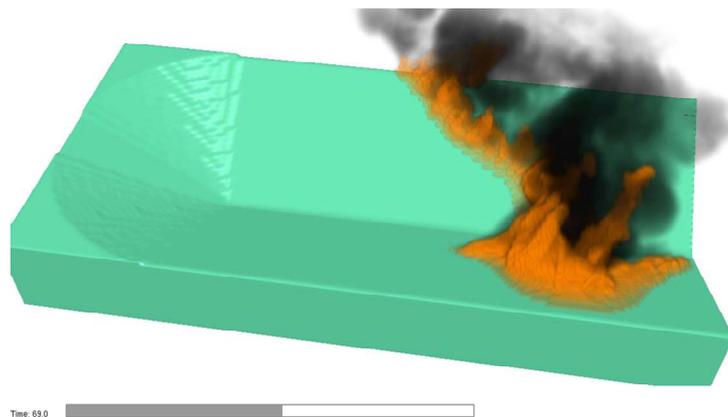
### 3.2.2. EJEMPLOS DE APLICACIÓN.

Mediante una serie de ejemplos se puede comprobar las posibilidades que brinda esta aplicación así como la capacidad de análisis de la que se dispone.

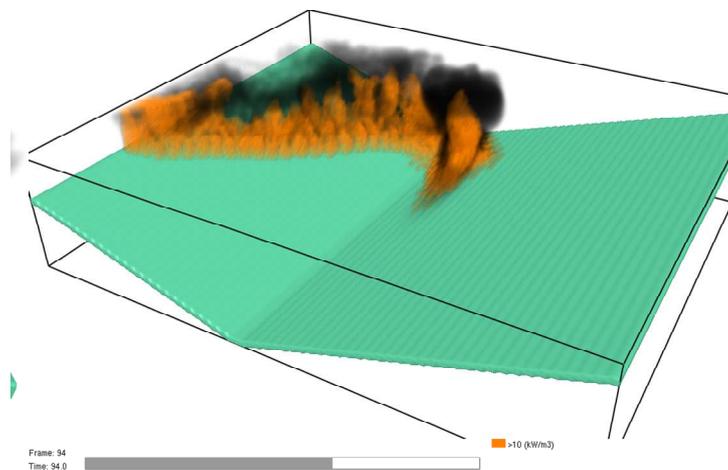
#### Diseño del terreno y del combustible

Para realizar estudios sobre la dinámica del fuego, y asegurarse que los resultados no resultan alterados por factores distorsionadores, en ocasiones es interesante realizar simulaciones sobre geometrías regulares. En esos casos el WFDS permite modelar el terreno sobre el que se encuentra el combustible a voluntad. Incluso en el caso de reproducir incendios reales ya ocurridos la eliminación del factor aleatorio que introduce el perfil del terreno puede resultar interesante.

En las siguientes imágenes se muestran diferentes geometrías simples utilizadas por el autor en el análisis de incendios forestales.

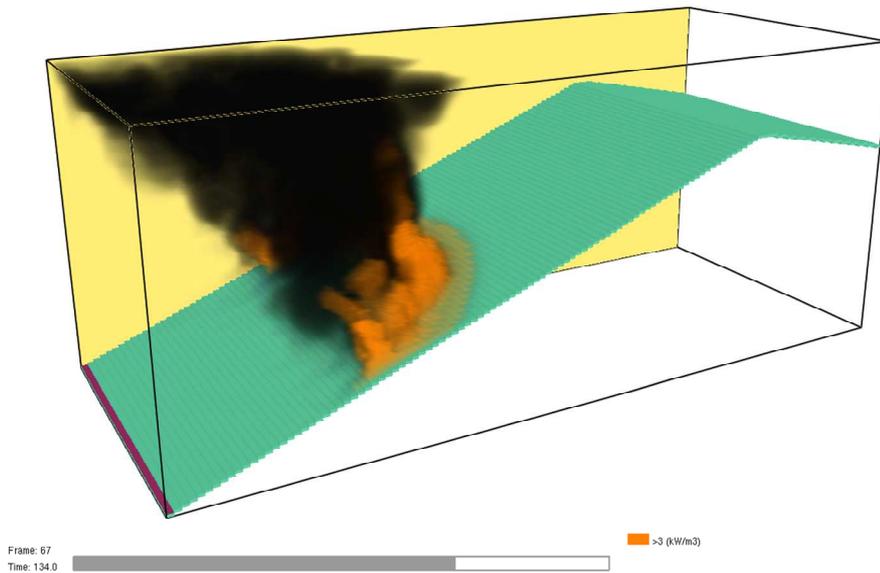


**Figura 79. Análisis simplificado del incendio eruptivo de ThirtyMile en EEUU.**



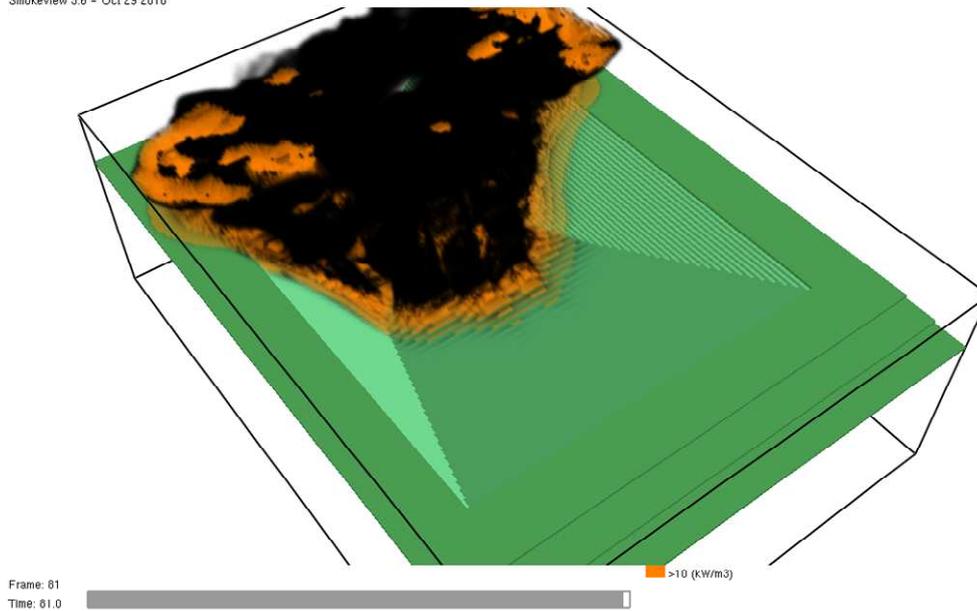
**Figura 80. Análisis simplificado del incendio fuegos eruptivos de Kornati en Croacia.**

Smokeview 5.5.6 - Jun 22 2010



**Figura 81. Velocidad de avance de llamas, Millares, (4 Julio 1994).**

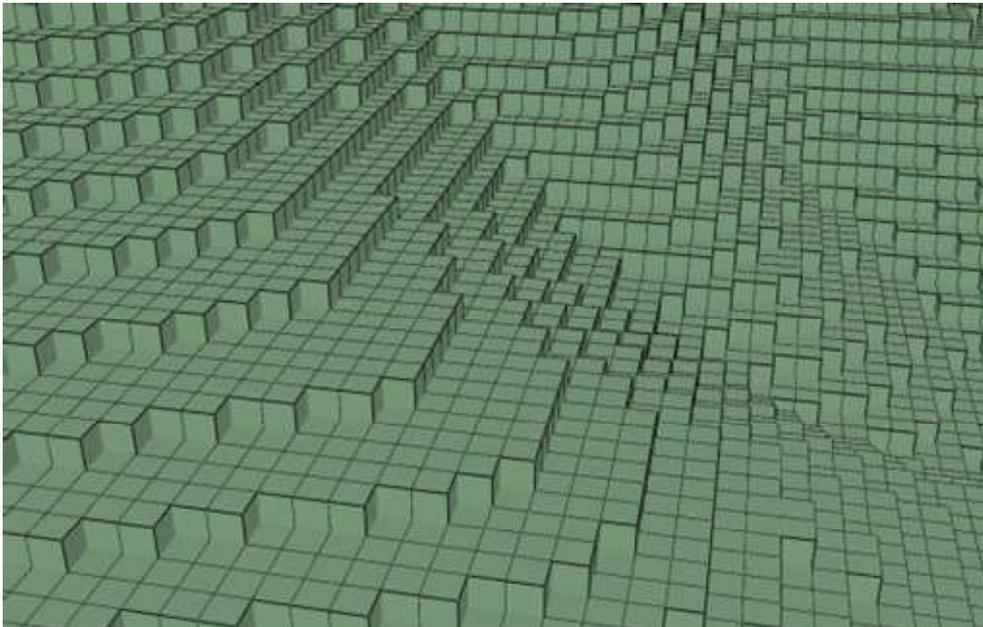
Smokeview 5.6 - Oct 29 2010



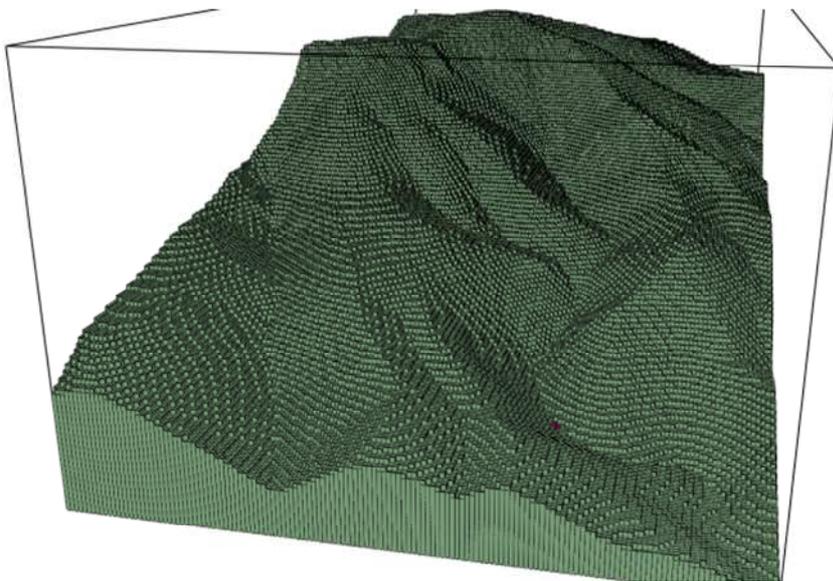
**Figura 82. Análisis de la velocidad de avance del frente de llamas en el incendio de Riba de Saelices (17 Julio 2005).**

Si queremos realizar estos estudios de forma más precisa y tener en cuenta muchos más aspectos podemos introducir en las simulaciones el terreno tal y como lo encontramos en la realidad. También se podrán incorporar los vientos dominantes y las temperaturas de las superficies de forma que se generen corrientes de ladera.

Lo que precisaremos en este caso es un modelo de coordenadas digitales del terreno que se podrá conseguir por diferentes vías: mediante ficheros cartográficos, mediante vuelos de fotometría digital, mediante escaneados laser o bien capturándolo del Google Earth, figuras 83 y 84.

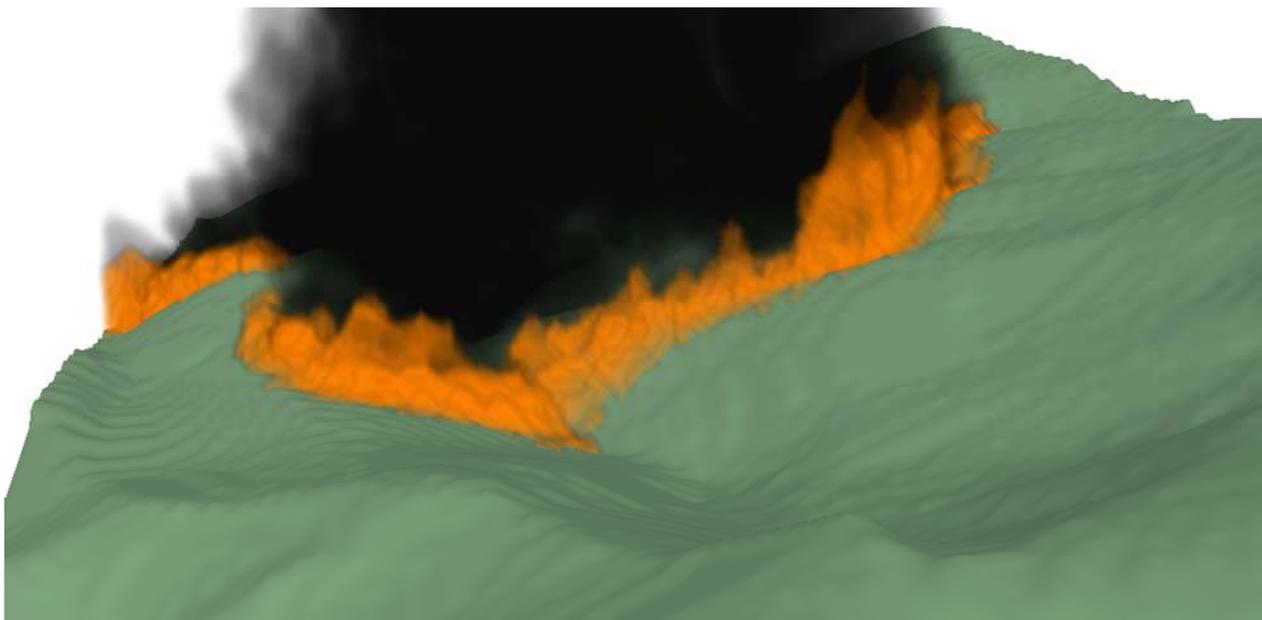


**Figura 83. Terreno introducido de forma automática con una perspectiva cercana.**

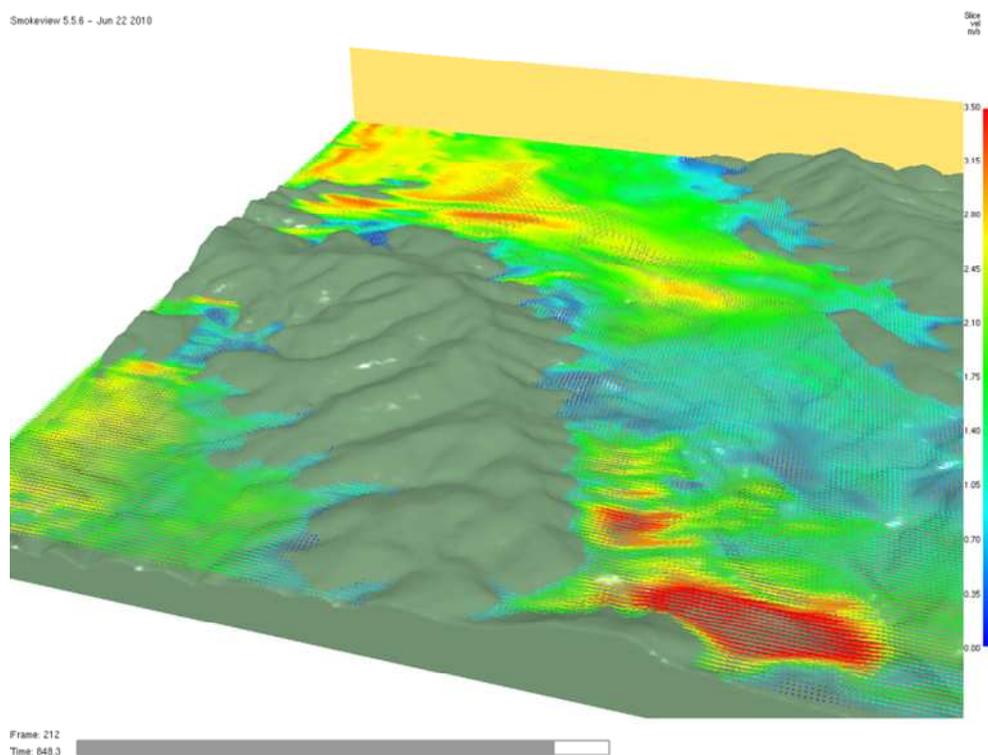


**Figura 84. Terreno introducido de forma automática con una perspectiva alejada.**

Las coordenadas se introducen en el programa mediante unas rutinas desarrolladas por el autor. También habrá que adjuntar los diferentes modelos de combustible presentes, figuras 85 y 86.

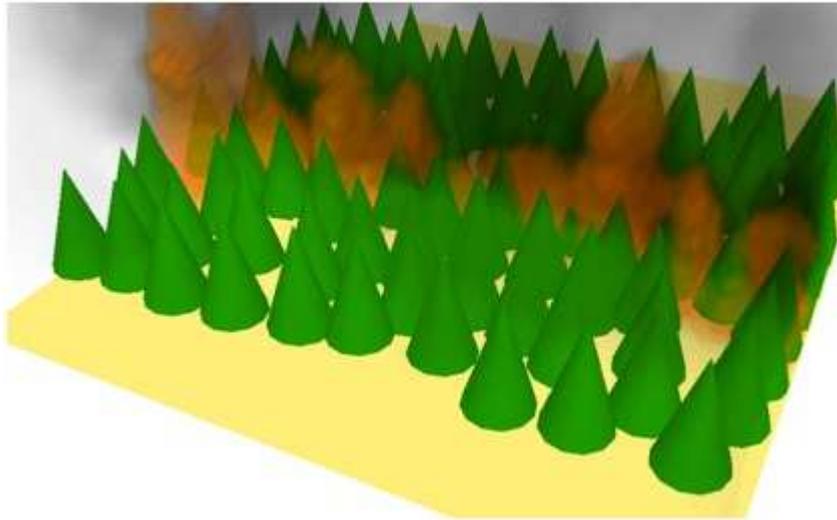


**Figura 85. Incendio sobre modelo digital del terreno.**

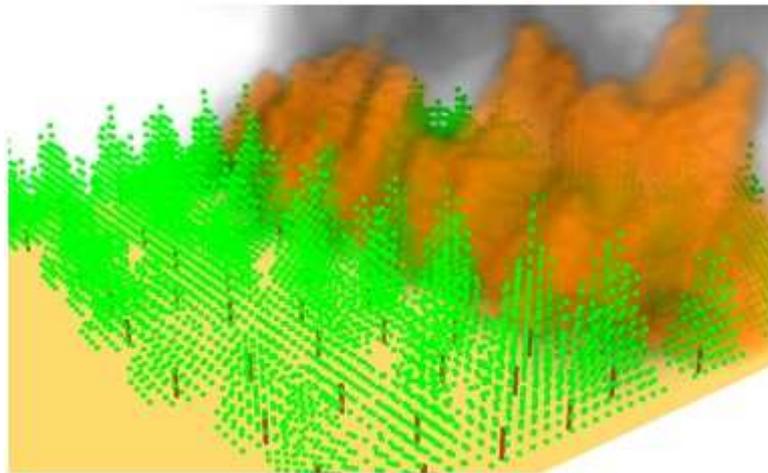


**Figura 86. Estudio del viento en una superficie de 10 x 15 km.**

El combustible vegetal se puede definir de diferentes formas bien como formas geométricas, figura 87, o bien en forma de sustrato combustible sobre el propio terreno 88.



**Figura 87. Combustible vegetal en formas geométricas.**



**Figura 88. Combustible vegetal en forma de sustrato combustible sobre el propio terreno.**

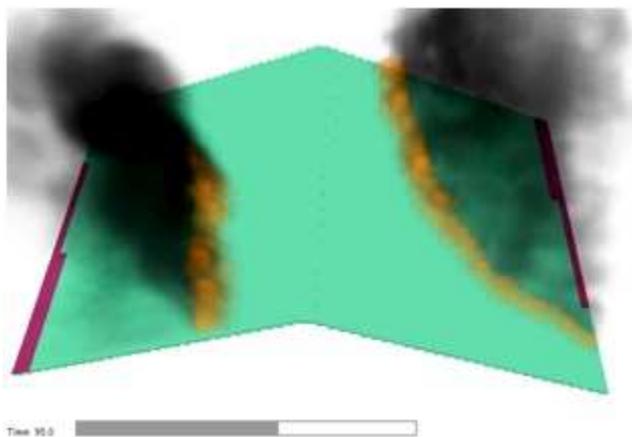
#### Aceleración del incendio por coincidencia de frentes de llama

En primer lugar se analizará una situación que se da en algunos incendios forestales y que de forma habitual han sido utilizada para explicar accidentes y evoluciones rápidas de los incendios forestales, la aceleración del incendio por coincidencia de frentes.

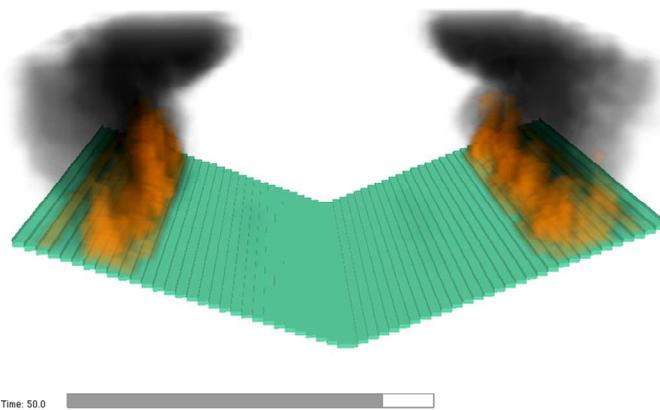
Para estudiar este efecto se han simulado 12 incendios sobre cuatro superficies geométricas diferentes de forma que los frentes coincidan en zonas distintas. El combustible y las condiciones ambientales son las mismas de forma que las variaciones obtenidas correspondan únicamente a la disposición del terreno.

Se estudiarán las tasas de generación de calor (o las tasas de combustión) con frentes independientes y con choque de frentes en las cuatro configuraciones del terreno.

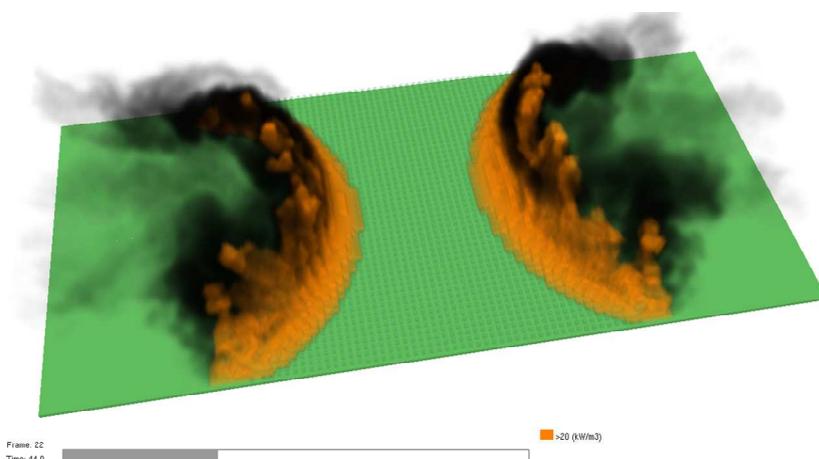
En las siguientes imágenes se observan los cuatro escenarios utilizados para el análisis, figuras 89, 90, 91 y 92.



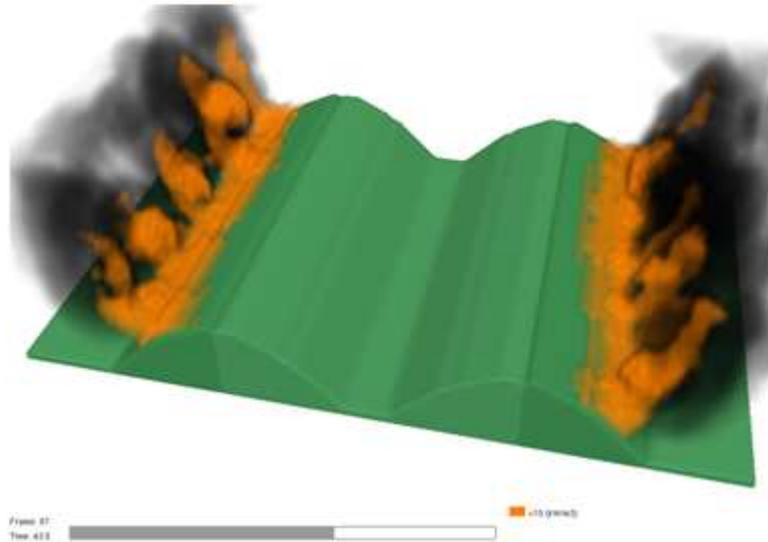
**Figura 89. Configuración de frente en busca de la cima.**



**Figura 90. Configuración de frente en coincidencia en valle.**



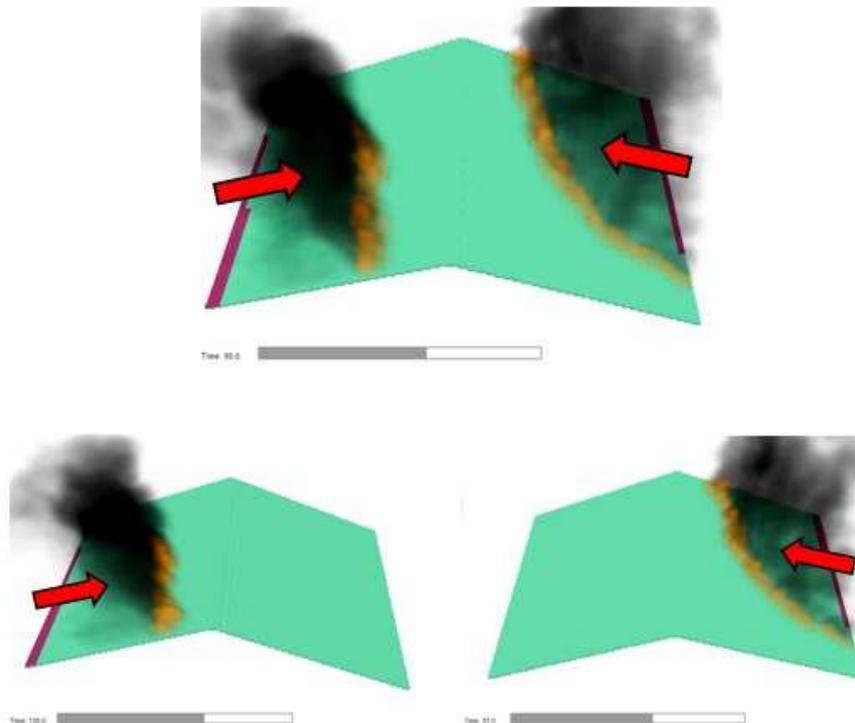
**Figura 91. Configuración de frente en llano.**



**Figura 92. Configuración de frente en laderas opuestas.**

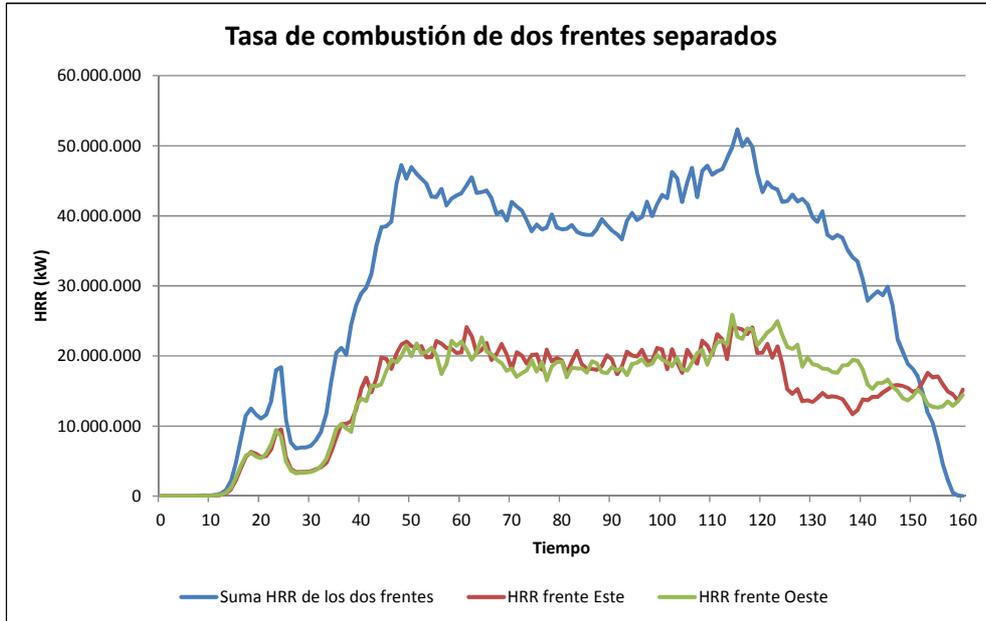
Se comparan las curvas de intensidad del incendio cuando los frentes progresan por separado y cuando lo hacen simultáneamente. De haber aceleración de los frentes se observaría un incremento significativo en el instante de coincidencia de los frentes.

En las siguientes imágenes se observan las tres simulaciones realizadas en uno de los escenarios.

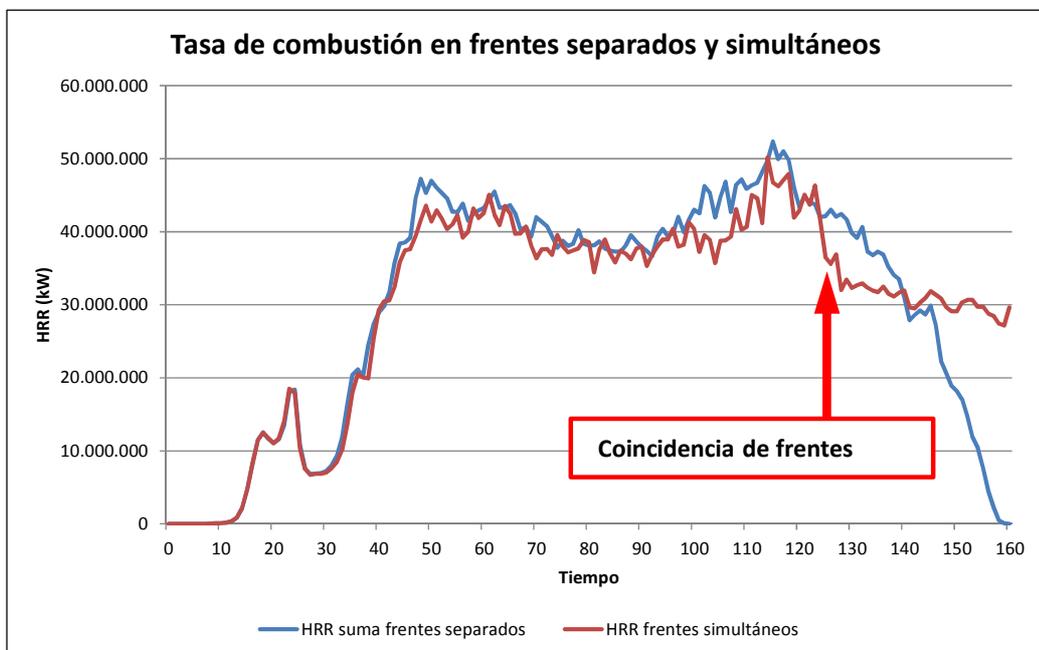


**Figura 93. Configuraciones de una de las simulaciones estudiadas.**

Observando las curvas de generación de calor se comprueba que no hay aumento de la energía en el instante en que coinciden los frentes.



Gráfica 32.-Tasa de combustión de dos frentes separados.

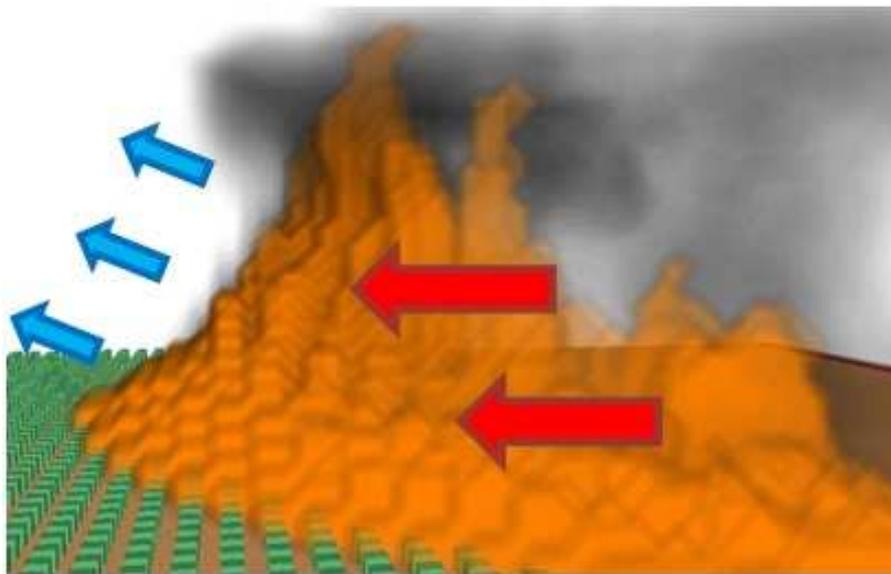


Gráfica 33.-Tasa de combustión en frentes separados y simultáneos.

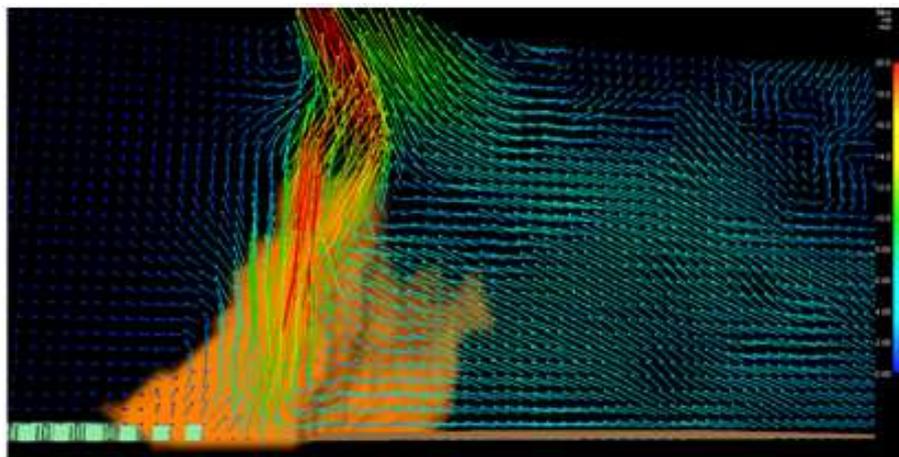
Al contrario de lo que cabría esperar, en las condiciones del ensayo, no se observan incrementos significativos en la velocidad de avance de los frentes ni tampoco en la tasa de calor emitido por el incendio. Únicamente a corta distancia (15 o 20m) hay una leve atracción de los frentes.

El motivo puede ser que en un frente que avanza no se produce succión por la parte que delantera debido a dos efectos: La expansión del aire y de los gases de incendio produce una sobrepresión en esa zona y a que el penacho recibe suficiente aire en su avance para alimentar las llamas.

En las siguientes imágenes se observa el efecto anteriormente descrito.



**Figura 94. Mediante la imagen no se observa incremento de velocidad.**

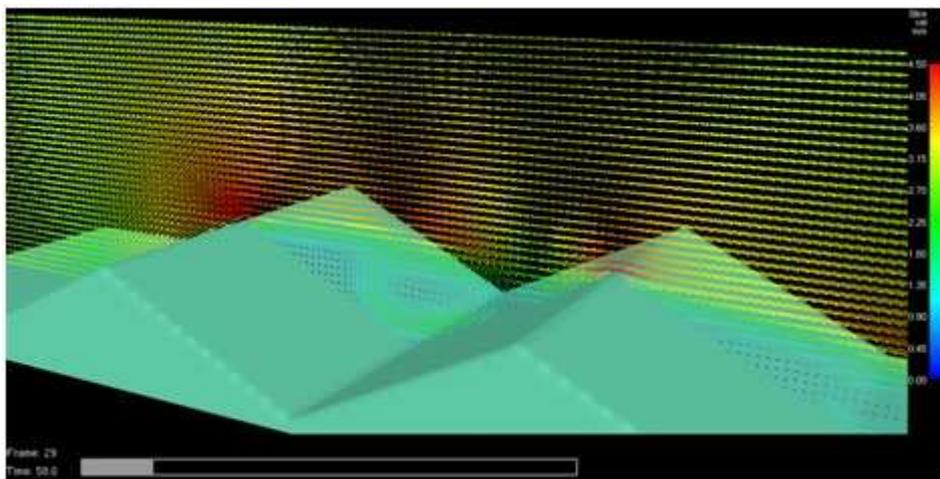


**Figura 95. Los vectores de velocidad no muestran variación.**

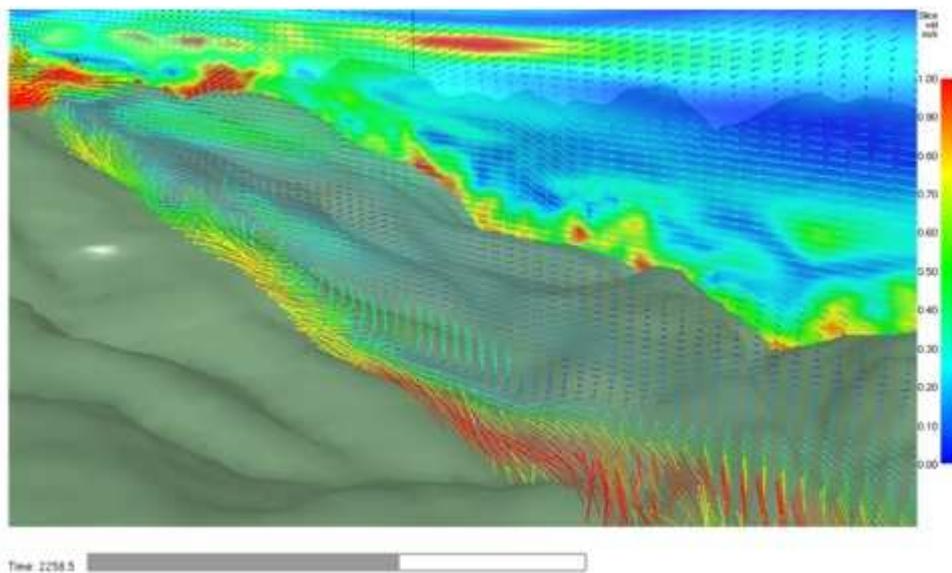
Este mismo estudio se podría realizar sobre un modelo del terreno real y con las condiciones de viento presentes en el lugar para comprobar si con esas variaciones hay aceleración del incendio.

Estudio de los efectos de los vientos locales y de ladera en la evolución del fuego

Un aspecto fundamental para la seguridad el personal que está realizando la extinción de un incendio forestal es saber interpretar el comportamiento del viento según la configuración del terreno, figura 96, y la fuerza y dirección de éste. También es importante observar la influencia que tienen sobre el incendio los cambios de velocidad y dirección en el viento.

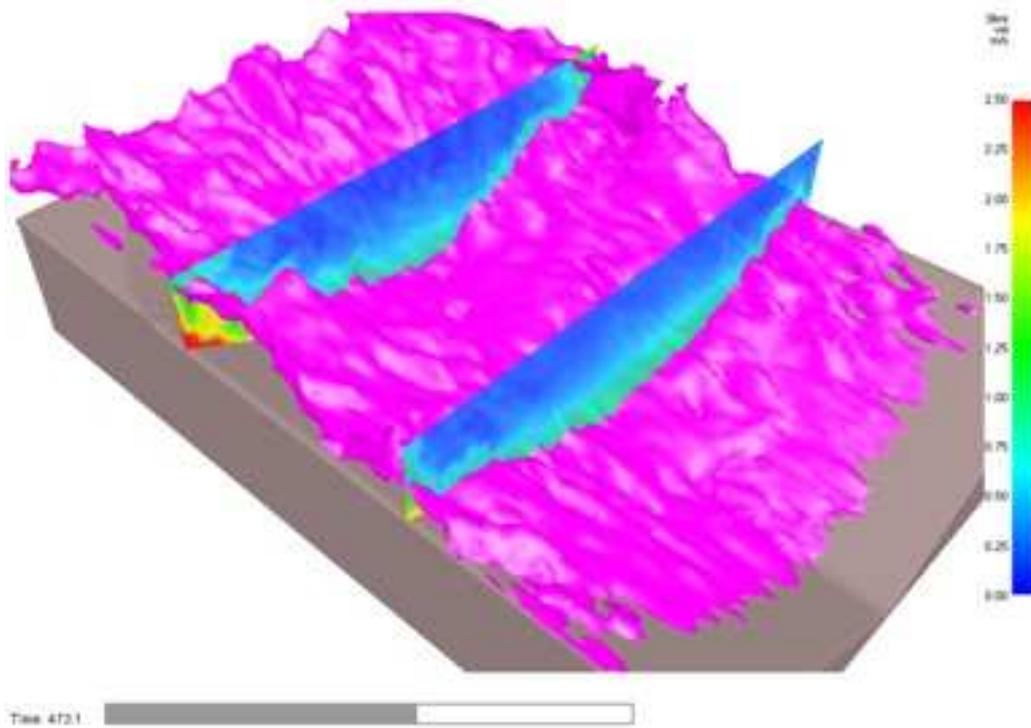


**Figura 96. Comportamiento del viento según la configuración del terreno.**

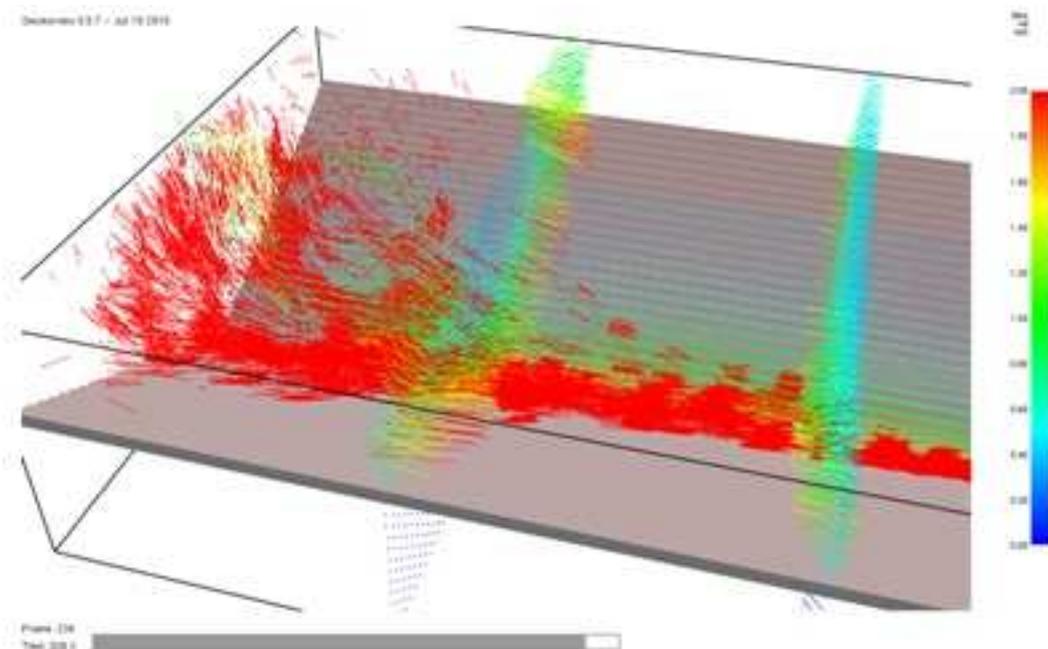


**Figura 97. Comportamiento del viento según fuerza y dirección.**

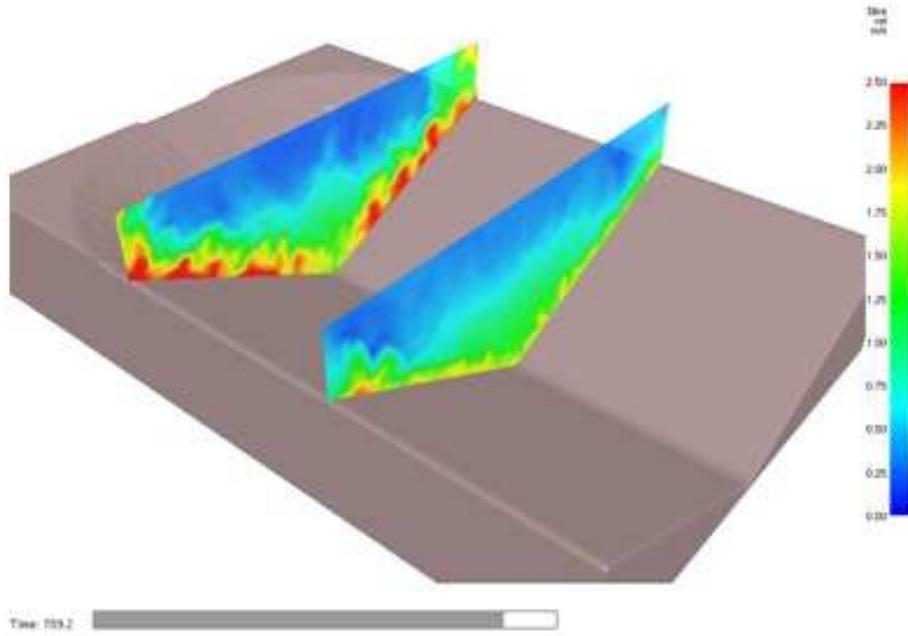
En las simulaciones se podrá observar el efecto del viento sobre los frentes de llamas y realizar variaciones para comprobar su influencia, figuras, 98, 99, 100 y 101.



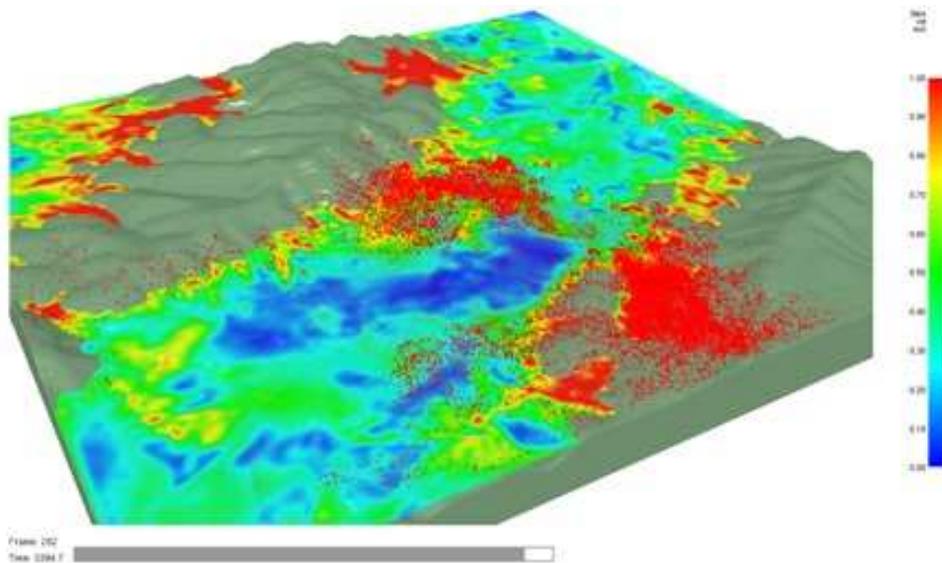
**Figura 98.** *.-Isosuperficie del efecto de viento sobre el terreno.*



**Figura 99.** *Vectores de velocidad del viento sobre valle.*



**Figura 100. Plano de vectores de velocidad del viento sobre el terreno.**



**Figura 101. Trazas puntuales para el estudio de los vientos locales.**

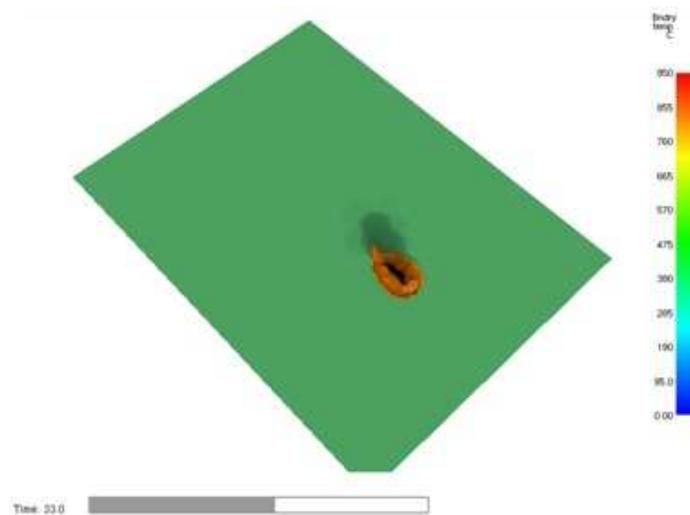
En las anteriores imágenes se observaban dos análisis realizados en geometrías diferentes para observar la interacción de los vientos de ladera con los frentes de llamas.

Se puede comprobar que los vientos térmicos de ladera no tienen casi influencia sobre los frentes de llama mientras que las variaciones de velocidad y dirección de los vientos locales pueden producir cambios drásticos en la velocidad y dirección de los incendios.

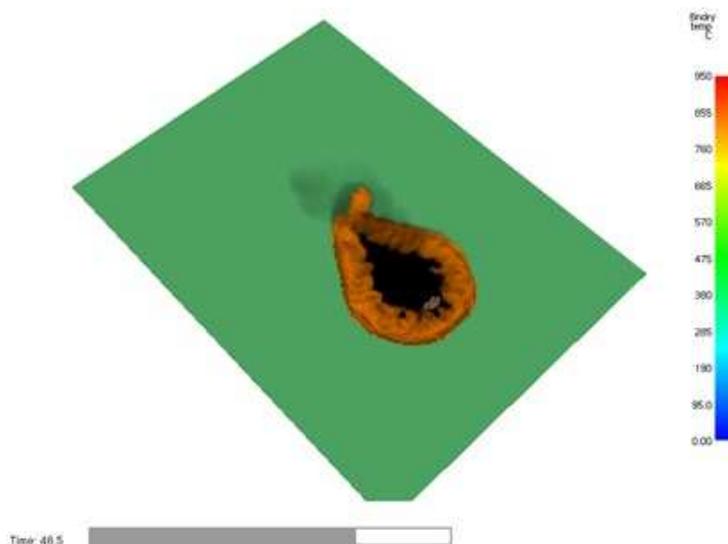
Estudio de los frentes de llama

Diferentes estudios han propuesto modelos matemáticos para reproducir diferentes características de los frentes de llama. La temperatura, velocidad y altura de las llamas, la energía desprendida y la forma según la pendiente y el viento son algunos factores que se pueden obtener de forma matemática. Mediante el WFDS estos parámetros se obtienen de forma conjunta y automática si se introducen los parámetros adecuados en la simulación.

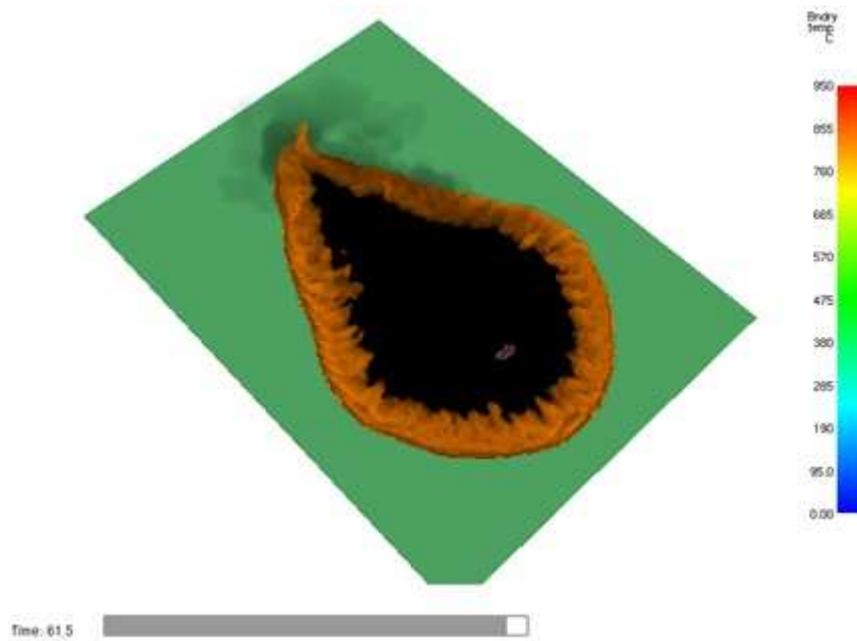
En las siguientes imágenes 102, 103 y 104, se puede observar algunos aspectos interesantes de los incendios forestales en lo referente a su forma y comportamiento.



**Figura 102. Inicio de frente de llama en incendio de matorral con pendiente del 35%.**



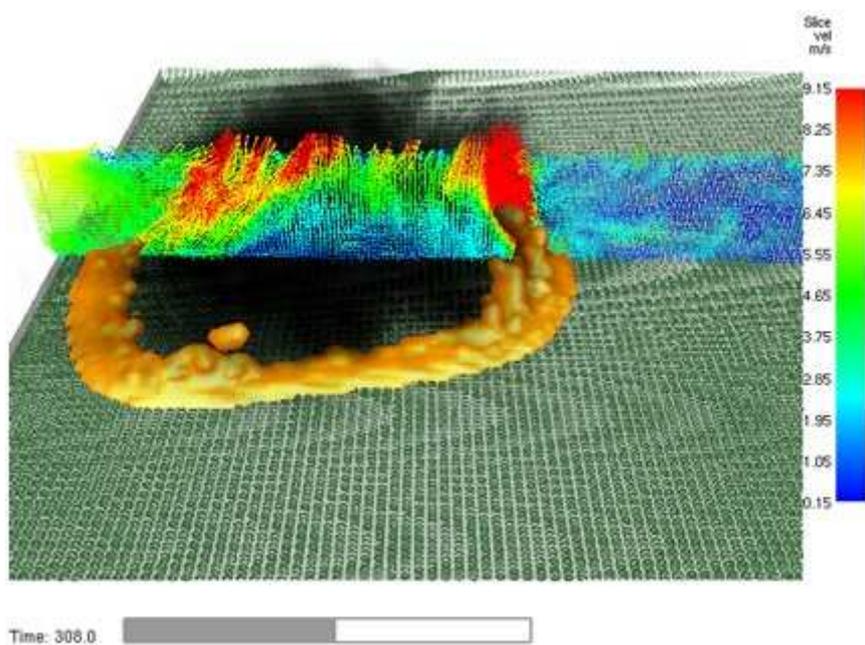
**Figura 103. Desarrollo de frente de llama en una fase intermedia de incendio de matorral con pendiente del 35%.**



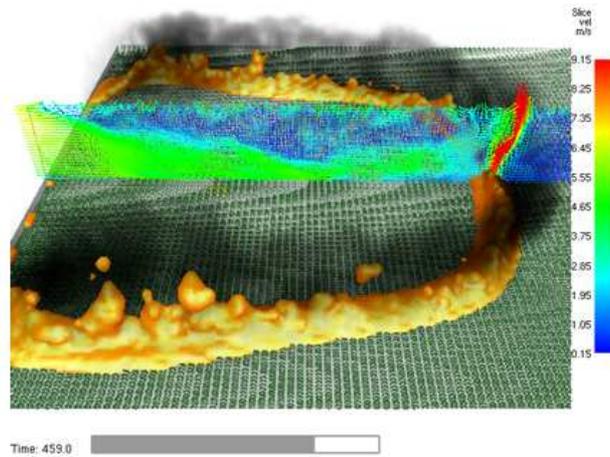
**Figura 104. Frente de llama de un incendio desarrollado de matorral con pendiente del 35%.**

En un foco inicial el viento tiene poca importancia sobre la velocidad del incendio por las corrientes de convección de los frentes de llama que convergen hacia el centro del incendio.

Si se realiza una extinción de la cola del incendio permitimos que el aire entre y alimente el frente por su zona interior lo que se traduce en una aceleración drástica de la velocidad del frente de llamas. Se dice que “le hemos abierto la puerta” al viento.



**Figura 105. Convección en un foco inicial del desarrollo de un incendio forestal.**

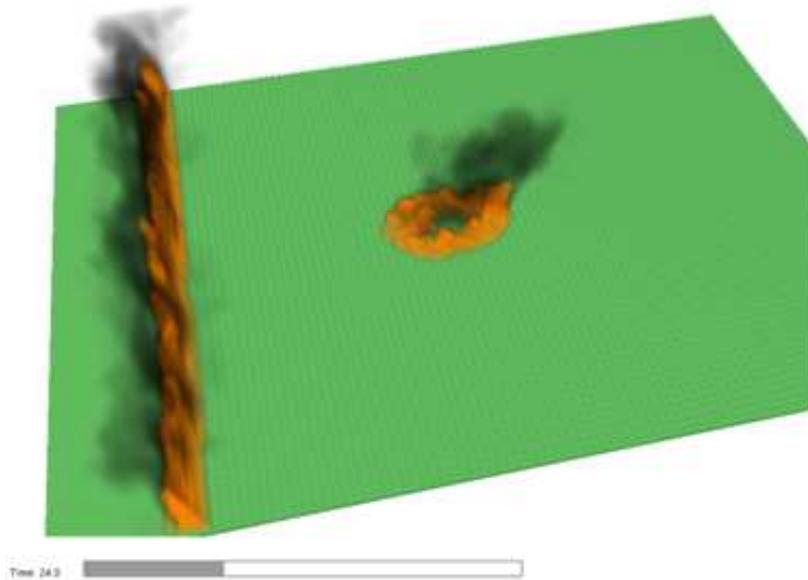


**Figura 106. Efecto de aceleración por la entrada del viento hasta el frente.**

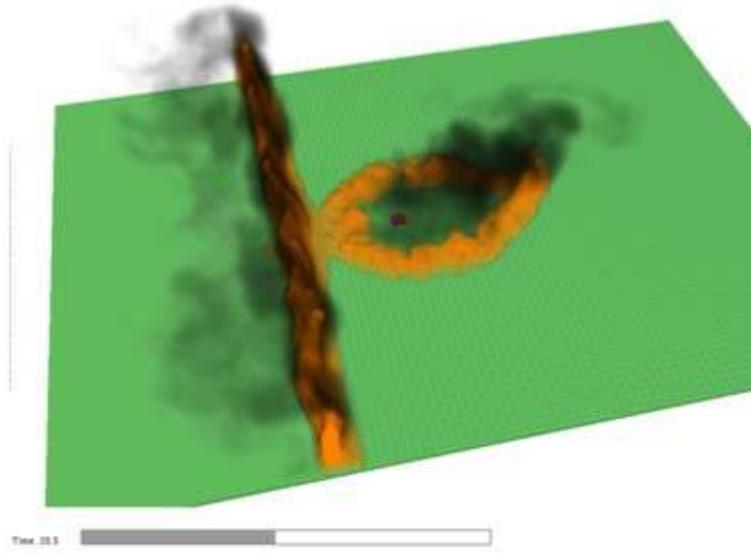
Quema selectiva como protección

Una de las formas que tenemos de protegernos de la llegada de un frente de llamas es realizar un fuego controlado para meternos en la zona quemada y esperar allí la llegada del incendio. Comprobar la efectividad de dicha medida extrema no parece objetivo sencillo sobre todo si confluyen diferentes factores como la pendiente y el viento.

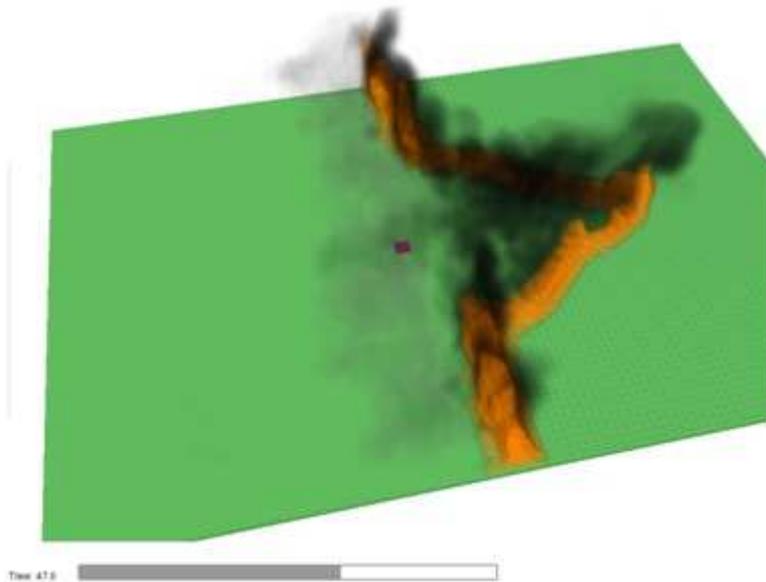
Mediante diferentes simulaciones computacionales hemos analizado esta maniobra de forma que podemos hacernos una idea de las temperaturas que soportaríamos en el interior de dicha zona quemada.



**Figura 107. Secuencia de quema de protección y avance del frente de llama en fase inicial.**



**Figura 108.- Secuencia de quema de protección y avance del frente de llama en fase intermedia.**



**Figura 109. Secuencia de quema de protección y avance del frente de llama en fase final.**

Se ha programado un combustible correspondiente con un arbusto de 1,5 m de altura y un terreno con el 30% de inclinación sin viento.

Se han ubicado 200 sensores puntuales a lo largo de todo el modelo de forma que registrarán las temperaturas en las diferentes zonas a 1m de altura sobre el terreno.

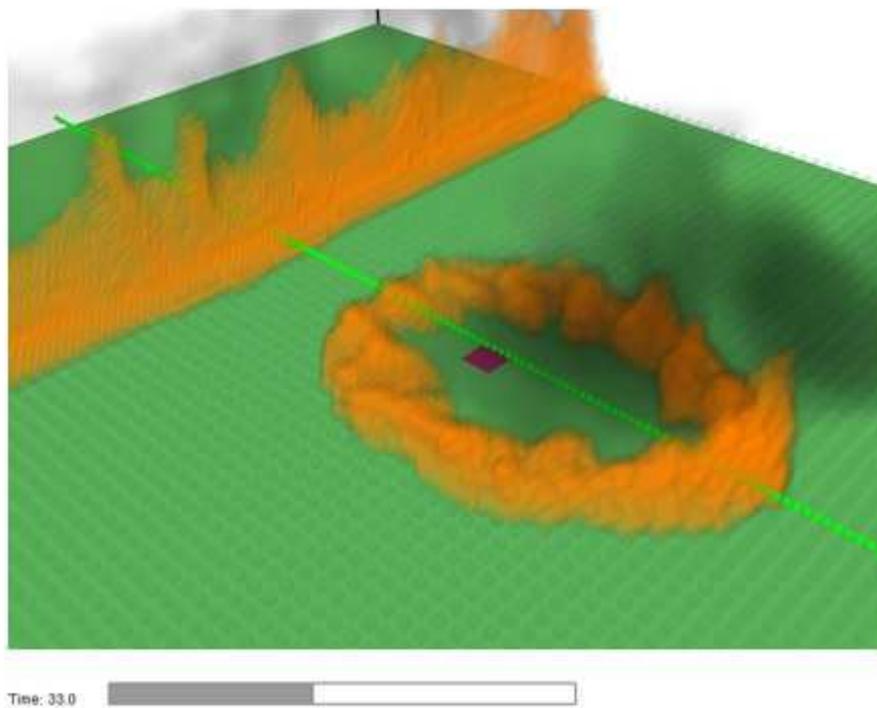


Figura 110. Ubicación de sensores de temperatura (color verde).

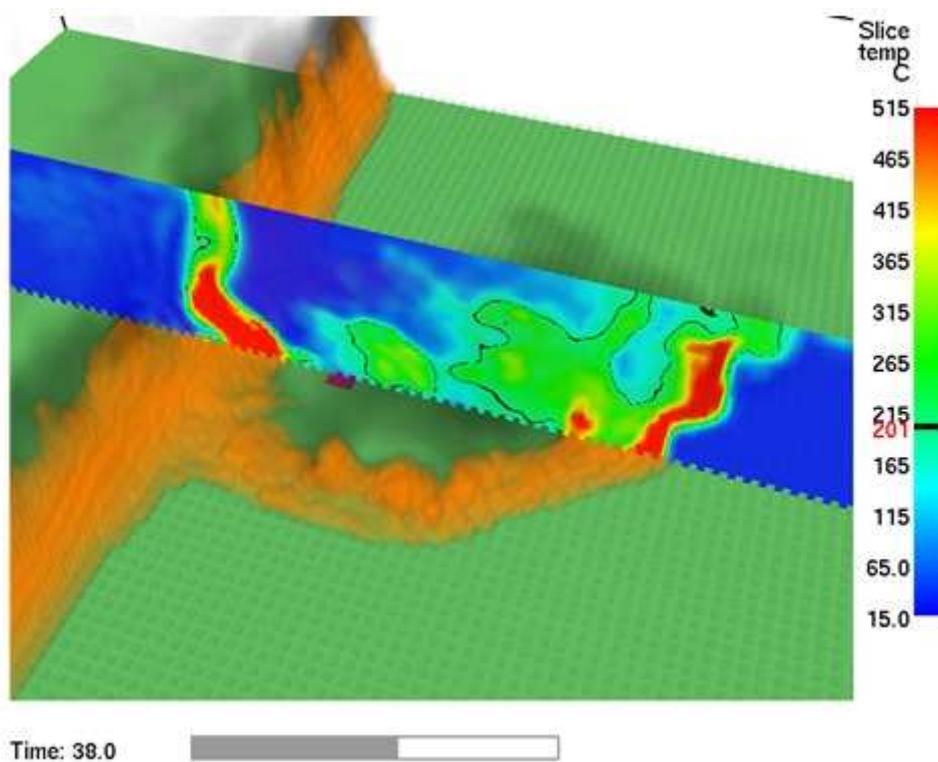
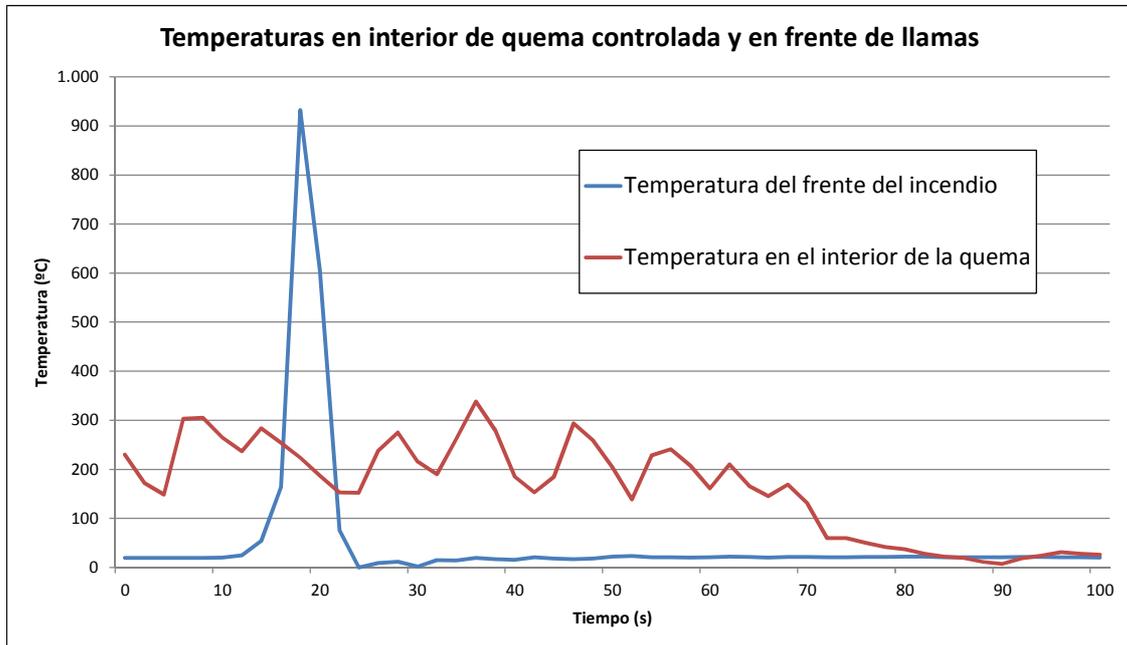


Figura 111. .- Plano de temperaturas en el interior de la quema.

Mediante una gráfica se pueden comprobar las temperaturas en el exterior e interior de la quema controlada.



**Gráfica 34.-Temperaturas en el exterior e interior de la quema controlada.**

Se comprueba que la temperatura en el interior de la zona de seguridad rondará los 200°C durante 60 segundos mientras que el frente de llamas del incendio nos expondría durante 10 segundos a una temperatura de alrededor de 900°C.

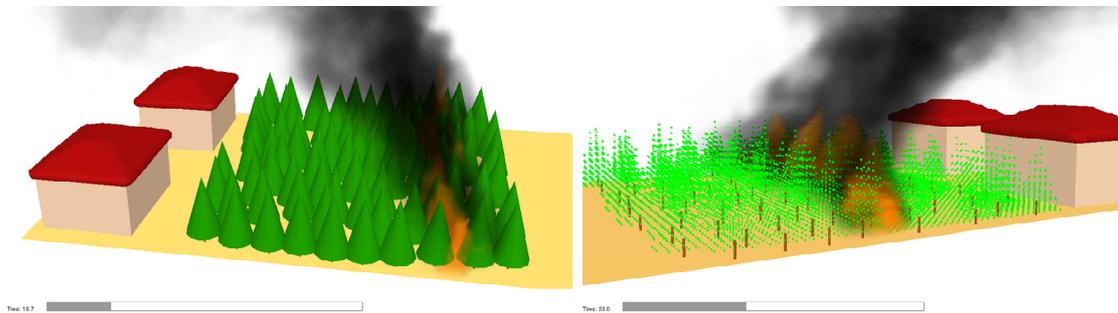
Deberemos de entrar en la zona quemada lo más tarde posible para, de esa forma, conseguir temperaturas más bajas y tiempos de exposición menores.

Se entiende que este ensayo es únicamente una demostración de las posibilidades del programa y no un estudio completo en el que se analizan todos los aspectos de esta maniobra.

#### Estudio de la interface urbano-forestal

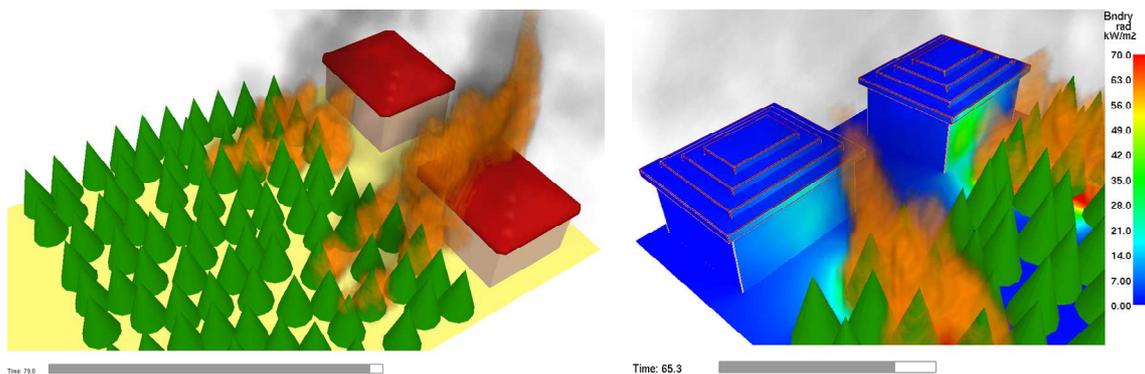
Entendiendo por interface urbano-forestal la zona donde una masa forestal se encuentra con una zona urbana el WFDS permite estudiar el riesgo de incendio de las viviendas limítrofes únicamente por efecto de la convección y radiación y no del salto de partículas incendiadas.

En las siguientes imágenes se observa la zona de encuentro de un frente de llamas con una zona de viviendas. En este caso las viviendas se han programado de madera y se ha introducido un viento a favor de 4 m/s (14.4 km/h) con distribución constante.



**Figura 112. Zona de encuentro de llama con una zona de viviendas.**

En las siguientes imágenes se observa cómo la cabaña que queda más cercana a la zona forestal se incendia mientras que la que está retirada 4 metros más no entra en ignición.



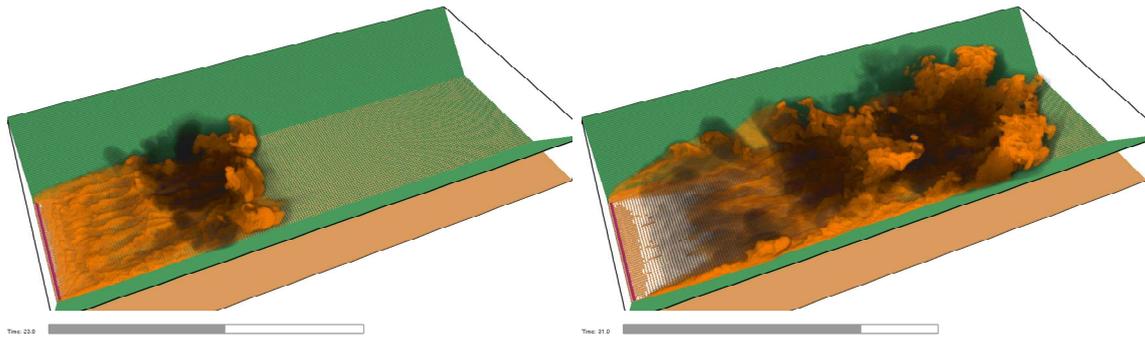
**Figura 113. Comportamiento de las cabañas.**

Se comprueba que la radiación térmica es la que hace que la construcción entre en combustión ya que se superan los 35 Kw/m<sup>2</sup> mientras que en la otra cabaña no se alcanzan los 20 Kw/m<sup>2</sup>.

Comportamiento eruptivo de un incendio forestal

Para comprobar este fenómeno se pueden plantear diferentes simulaciones donde se analicen diferentes combustibles, pendientes y vientos.

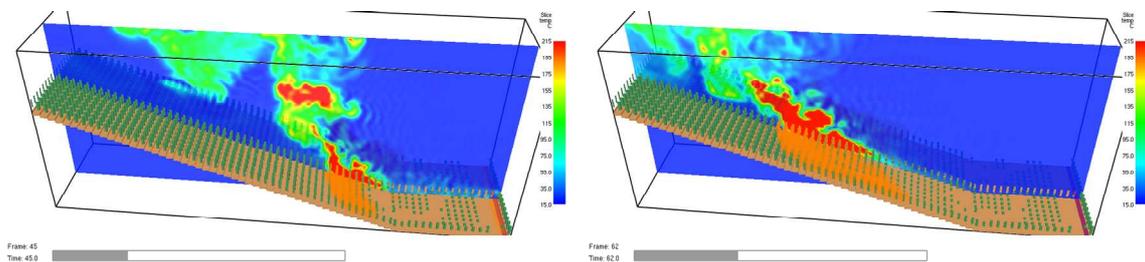
Se realizan ensayos con diferentes pendientes, combustibles y vientos.



**Figura 114. Reconstrucción de un fuego eruptivo desencadenado por el efecto trinchera sobre el combustible.**

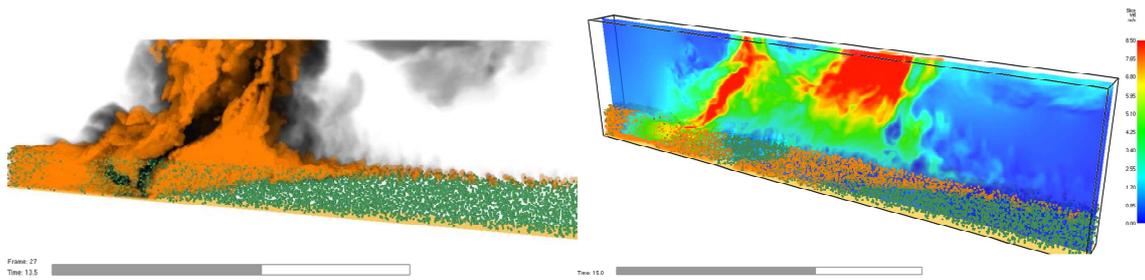
En este caso se ha conseguido el efecto eruptivo de un incendio con pendiente del 35%. La velocidad máxima alcanzada es de 13.3 m/s (48 km/h). En este caso se comprueba que el viento no tiene casi influencia sobre todo una vez establecido el fuego eruptivo.

La pendiente del terreno se puede variar de forma sencilla modificando únicamente el vector gravedad a la hora de programar la simulación. De esa forma se pueden realizar múltiples simulaciones con idénticas condiciones de combustible y condiciones ambientales y evaluar la influencia de la pendiente en la formación del efecto eruptivo del fuego.



**Figura 115. Estudio de la formación de fuegos eruptivos con pendiente y combustible uniformemente distribuido.**

Se han identificado tres situaciones que desencadenan fuegos eruptivos. En una de ellas es determinante la presencia de viento, en otra es el efecto trinchera (efecto Coanda) el que desencadena el fuego eruptivo y en la tercera lo fundamental es la sequedad y disposición del combustible.



**Figura 116. Estudio de la importancia de la disposición de combustible y de la incidencia de la radiación térmica.**

Comparación de imágenes de incendios eruptivos con las obtenidas de las simulaciones.

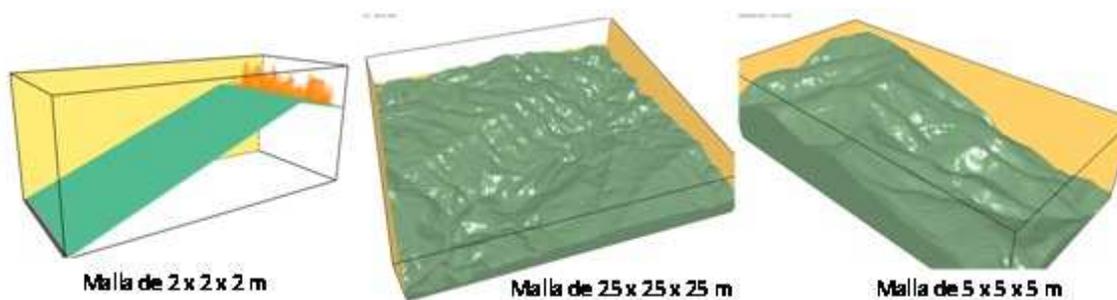


**Figura 117. Comparación de fotografías con imágenes simuladas.**

Se comprueba que en este caso la velocidad de avance del frente de llamas es superior al tiempo de combustión lineal por lo que se forma una amplia superficie en combustión.

Incendio de Millares – 4 Julio de 1994

7 personas pertenecientes a una cuadrilla de extinción fallecieron al verse sorprendidas por un fuego eruptivo que ascendió por la ladera Este de la cola del pantano de Tous. En 8 días arrasó 25430 hectáreas. No hay publicado ningún informe ni estudio sobre dicho suceso.



**Figura 118. Diferentes geometrías para la reconstrucción informática.**

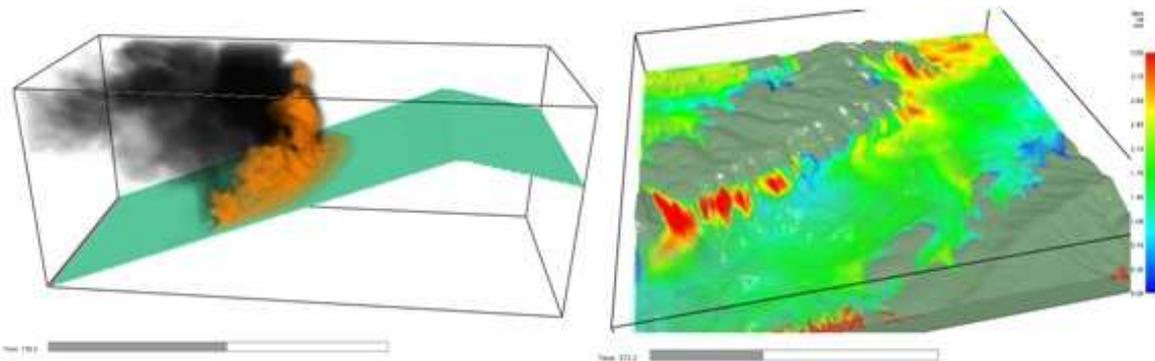
Para la reconstrucción informática del incendio se implementaron tres geometrías diferentes, Figura 118. En la geometría simplificada (2 x 2 x 2 m) se estudia el combustible y la velocidad máxima posible del incendio eruptivo.



**Figura 119. Ladera en la se formó el fuego eruptivo. Combustible compuesto principalmente de romero y aliaga.**

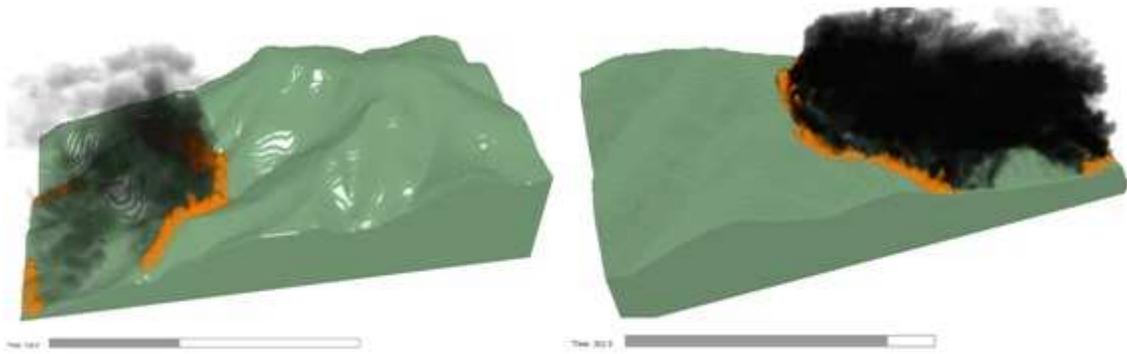
En la segunda reconstrucción del terreno (25 x 25 x 25 m) se estudia la influencia de los vientos reinantes ese día y su interacción con los vientos térmicos de ladera.

Por último, en la tercera geometría (5 x 5 x 5 m), se reproduce el incendio introduciendo todos los factores estudiados en las anteriores simulaciones.



**Figura 120. Simulaciones para el estudio de la influencia del combustible y los factores ambientales.**

En las siguientes imágenes se observa el resultado de la simulación final. Para su ejecución se utilizaron 16 ordenadores conectados en paralelo con un tiempo de procesado de 109 horas.



**Figura 121. Imágenes de la reconstrucción informática del incendio de Millares.**

Las principales conclusiones del anterior estudio son las siguientes:

- Se produjo un fuego eruptivo que en 180 segundos recorrió 900 metros de ladera con 360 m de desnivel.
- La máxima velocidad que alcanzó el fuego se produjo en el último tercio de la ladera donde las llamas alcanzaron una altura de 20 m.
- Los saltos que daba el fuego conforme ascendía se debieron a la radiación térmica que incendiaba el combustible antes de que llegara el frente de llamas. (Efecto presenciado por diferentes testigos).
- El fuego eruptivo no se vio influido de forma significativa por el viento.

Los resultados obtenidos muestran que la aplicación de la simulación informática en incendios forestales mediante el WFDS complementa los métodos de estudio existentes y permite analizar de forma conjunta los factores más importantes que intervienen y su interacción con el fuego.

### 3.3. ESTUDIO DE TÚNELES CON DIFERENTES TIPOS DE PAVIMENTO.

#### 3.3.1. *Sistemas de seguridad en túneles.*

En caso de incendio en el interior de un túnel, juega un papel fundamental para la seguridad de los usuarios los sistemas de emergencia con los que éste cuenta. Estos sistemas han ido perfeccionándose tras las experiencias sucedidas en los últimos años y por el progreso de la normativa. El hecho de que todos los países de nuestro entorno, dada su orografía, tengan que enfrentarse a este reto de mejora continua en la seguridad de los túneles, ha supuesto la aparición de una normativa a nivel europeo mucho más exigente, con cambios importantes y mejoras en los equipos y dotaciones.

Las medidas de seguridad aplicadas van a depender, entre otros factores, de la geometría del túnel, de su longitud, de la carga de tráfico y del tipo de mercancías que vayan a circular por el interior. En este estudio vamos a clasificar las medidas de seguridad en: pasiva o instalaciones generales y sistemas de ventilación.

#### *Instalaciones generales.*

Como instalaciones generales se pueden clasificar las que están integradas en la obra civil:

- Apartaderos.
- Aceras.
- Drenajes y recogida de vertidos.
- Refugios para los usuarios.
- Galerías de evacuación y salidas de emergencia.
- Redes de aguas contra incendios.
- Accesos para los servicios de emergencias.

Otro grupo de instalaciones son las conocidas como tecnológicas:

- Sistemas de detección de humo y CO.
- Sistemas de detección de incendios por temperatura.
- Equipos de iluminación de emergencia, semáforos y paneles informativos.
- Equipos de megafonía y comunicación.
- Circuitos cerrados de TV.
- Estaciones SOS de comunicación de emergencias.
- Equipos de bombeo, estaciones eléctricas y equipos de gestión centralizados.

### Sistemas de extracción de humos.

Un aspecto fundamental en caso de incendio en el interior de un túnel lo constituye la extracción de los gases y humos que se generan. Su función es triple, en primer lugar extraer el humo permitiendo la visibilidad en la zona baja del túnel y evitando que se alcancen concentraciones peligrosas de gases tóxicos y hollín, logrando así confinarlos en el área adecuada para su extracción segura; en segundo lugar controlar las temperaturas de los gases evitando que se dañen las instalaciones por el contacto directo con las llamas y por la radiación emitida; y en tercer lugar confinar el incendio de forma que se evite su extensión a otros vehículos.

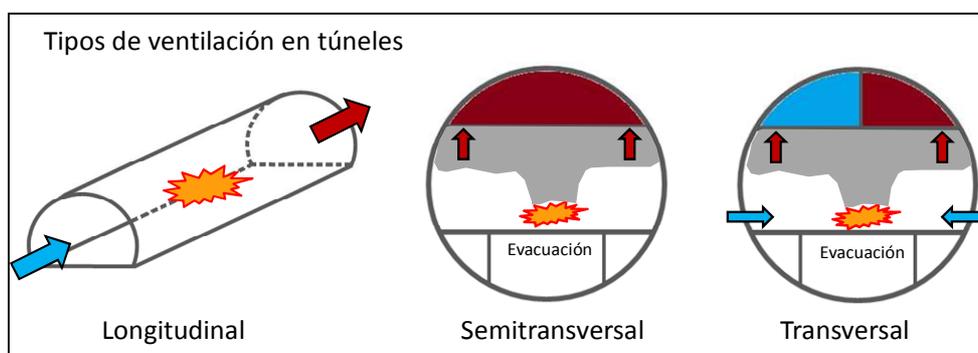
El mayor riesgo para la vida en caso de incendio lo representan los gases de la combustión y el humo que se acumulan en la parte superior del túnel. El control y extracción de estos productos es, por lo tanto, de vital importancia:

- Para que no se produzca la extensión del incendio
- Para que las condiciones de evacuación sean las adecuadas
- Para que la actuación de los servicios de emergencia sean efectivas

Los túneles de carretera cuentan con diferentes sistemas de evacuación de humos que se aplican según las características de cada una de las instalaciones. Los cuatro tipos fundamentales de ventilación son:

- Ventilación natural
- Ventilación longitudinal
- Ventilación semitransversal
- Ventilación transversal

En las siguientes imágenes se muestran las tres configuraciones fundamentales de ventilación forzadas existentes y tenidas en cuenta en los análisis posteriores.



**Figura 122. Esquemas de las configuraciones fundamentales de la ventilación forzada**

### Ventilación natural.

El RD 635/2006 (que es la transposición en España de la Directiva Europea) establece como requisito necesario la ventilación forzada para los túneles de más de 500 m. en las carreteras de la red del estado y para los túneles urbanos de entre 200 y 500 m. Por debajo de estas dimensiones, la salida de los humos se realiza de forma natural por la propia densidad de los gases, por la parte superior, hasta su salida al exterior por las bocas. Por la zona inferior se produce una entrada de aire fresco que mantiene las condiciones de evacuación dentro de unos valores de seguridad.

En este sistema de ventilación tiene gran importancia la pendiente del túnel, así como las condiciones climatológicas en el exterior (viento, presión atmosférica y temperatura).

### Ventilación longitudinal.

En las instalaciones con este tipo de ventilación se distribuyen una serie de ventiladores axiales a lo largo del túnel de forma que se impulsan los humos en dirección a una de las bocas, mientras que por la contraria se produce la entrada de aire de renovación. Este sistema de ventilación está indicado para túneles de sentido de circulación único o en bidireccionales cortos ya que todo el humo es impulsado en una sola dirección haciendo imposible la permanencia aguas arriba del incendio y poniendo en riesgo las vidas de los usuarios que hayan quedado retenidos en sus vehículos. Tanto la evacuación como la intervención de los bomberos se realizarán por la zona de entrada de aire.

El sentido de la ventilación puede ser modificado ya que los ventiladores son reversibles, aunque hay que considerar el tiempo necesario para romper la inercia del sistema y lograr el cambio de sentido. Su efectividad depende, en parte, de las condiciones ambientales exteriores ya que las diferencias de presión atmosférica entre las bocas y los vientos pueden restar efectividad al sistema.

### Ventilación semitransversal

Este sistema de ventilación consiste en extraer los humos en la zona del incendio por la parte superior mediante rejillas y conducirlo al exterior por conductos o galerías independientes. El aire de renovación entra de forma natural por las bocas del túnel en ambos sentidos y en dirección al incendio consiguiendo dejar libres las dos bocas para realizar tanto la evacuación como el acceso de los equipos de emergencias. Se utiliza para túneles bidireccionales ya que, aunque

haya retención de vehículos a ambos lados del incidente, todos se encontrarán en zona de circulación de aire limpio.

También se consigue reducir la capa de gases y humos al mínimo ya que éstos son extraídos en el mismo lugar del incendio, no teniendo que circular por grandes tramos de la instalación.

La complejidad y los costes de este tipo de sistemas de ventilación son altos ya que requieren de galerías auxiliares y de potentes sistemas de extracción, así como de sistemas de detección y localización de incendio y de centros de control.

### Ventilación transversal

Es el sistema más complejo y avanzado. Este sistema intenta mantener la zona del incendio lo más libre posible de humo y contaminantes. La extracción de humo se realiza al igual que en los sistemas semitransversales, en el lugar del incendio por la zona alta de la galería, inyectando el aire de renovación a la altura de la calzada mediante unas rejillas distribuidas a lo largo de todo el túnel. El resto de la galería mantiene las condiciones normales permitiendo la salida de los usuarios en perfectas condiciones.

La circulación formada por la entrada inferior de aire y por la salida superior del humo consigue una dilución óptima de los gases en la zona cercana al incendio.

Tanto las rejillas de extracción como las de impulsión pueden estar telecomandadas de manera que se activen de forma localizada en la zona del incendio, consiguiendo la mayor efectividad en el control del colchón de gases.

La salida del humo y la entrada del aire fresco se realizan a través de galerías que forman parte de la sección del túnel o de conductos paralelos a dicha sección, pudiendo contar, en algunos casos, con pozos verticales al exterior que permiten reducir la potencia de los equipos de extracción.

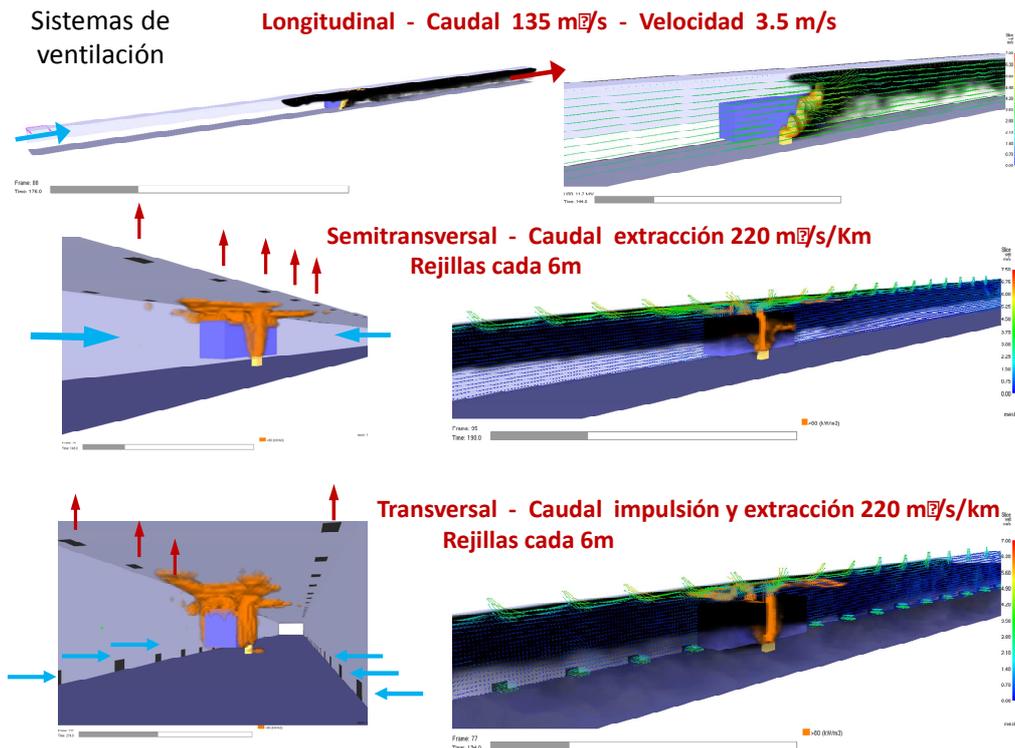
Cada sistema de ventilación tiene sus ventajas y sus inconvenientes, debiendo ser diseñados según las dimensiones y características del túnel.

Los flujos utilizados en las tres configuraciones de túnel con ventilación son las que se muestran en la tabla siguiente y se han fijado ajustándose a valores comúnmente utilizados en este tipo de instalaciones.

Tipo de ventilación	Volumen de ventilación
Longitudinal	135 m <sup>3</sup> /s
Semitransversal	220 m <sup>3</sup> /s/km (Impulsión y extracción)
Transversal	220 m <sup>3</sup> /s/km (Impulsión)

**Tabla 7. Relación entre el tipo y el volumen de ventilación**

En las siguientes imágenes se muestra el funcionamiento de los tres sistemas de ventilación utilizados en el estudio.



**Figura 123. Funcionamiento de los sistemas de ventilación utilizados**

### 3.3.2. Desarrollo de los incendios en túneles.

El comportamiento de los incendios en el interior de los edificios o estructuras cerradas es muy diferente al de los incendios al aire libre. Mientras que al exterior, más del 80% del calor generado por las llamas sube a la atmósfera y no contribuye a la extensión del incendio, en un recinto cerrado, el calor permanece en el interior calentando los combustibles y acelerando la combustión.

Un elemento clave en toda combustión es la presencia de aire que suministre su oxígeno al fuego. En un incendio de interior el aporte de aire se realiza de forma natural a través de las aberturas existentes, lo que en la mayoría de los casos dificulta la alimentación del fuego. Sin embargo en los túneles que cuentan con sistemas de ventilación forzada este inconveniente no

lo encontramos, pudiendo desarrollarse la combustión sin limitación, con potencias de emisión de calor superiores a las que se alcanzarían con ventilación natural.

Otro factor que contribuye a aumentar la violencia del fuego es la distribución del combustible en el interior del local. Si la materia inflamable está distribuida en una zona amplia y además está expuesta a la radiación que emiten las llamas arderá de forma mucho más rápida. De esa manera, materiales que al aire libre tendrían una combustión incompleta o lenta, en el interior de una estructura, pueden arder completamente y de forma mucho más violentas.

Sin embargo el factor que representará mayor riesgo para la vida de los ocupantes será el humo que dificultará la visión y producirá la asfixia tanto por las partículas que contiene como por los gases tóxicos que transporta.

### **Características del combustible**

Si analizamos los incendios en túneles ocurridos en los últimos años comprobamos que todos los que han tenido consecuencias catastróficas se han iniciado en vehículos pesados y no en automóviles o vehículos ligeros.

Los incendios en túnel más importantes ocurridos en Europa en la última década son:

<b>Túnel</b>	<b>Fecha</b>	<b>Fallecidos</b>	<b>Vehículos implicados</b>
Túnel del Mont-Blanc	24 de Marzo de 1999	39	23 camiones y 11 coches
Túnel de Tauern	29 de Mayo de 1999	12	16 camiones y 24 coches
Túnel de St. Gottard	24 de Octubre de 2001	11	13 camiones y 10 coches

Las mercancías que transportaban los camiones en los que se iniciaron los incendios de los túneles citados fueron:

- Túnel del Mont-Blanc, un camión cargado con 9 t de margarina y 11 t de harina, así como unos 550 litros de gasoil que llevaba en el depósito del combustible.
- Túnel de Tauern, un camión cargado con botes de aerosol y otras mercancías peligrosas. Además, en este caso hubo una contribución del combustible de los depósitos de los vehículos ligeros que quedaron atrapados en el impacto que provocó el fuego.

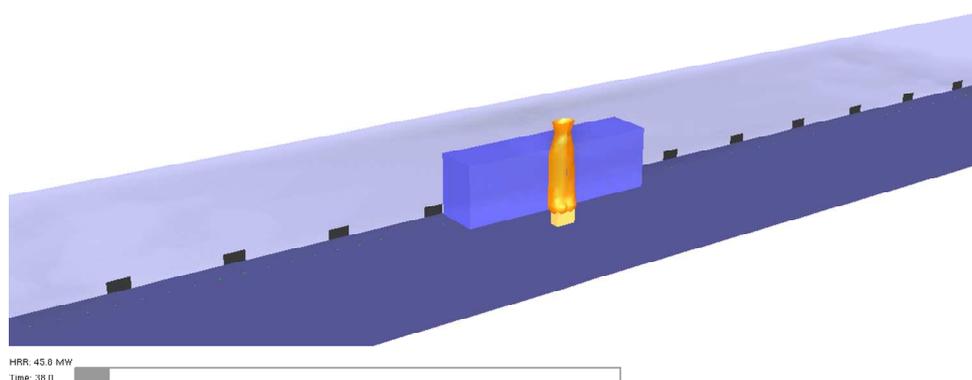
- Túnel de St. Gottard, colisión frontal de dos vehículos pesados, uno de ellos cargado con neumáticos y lonas y el otro cargado con carretes fotográficos.

Se comprueba que eran cargas habitualmente transportadas y que no se pueden clasificar como mercancías peligrosas ni con riesgo elevado y sin embargo fueron suficientes para desencadenar incendios con consecuencias catastróficas.

### **Evolución del incendio**

Los incendios de vehículos pesados en el interior de un túnel tienen un comportamiento característico en los que se pueden diferenciar una serie de fases comunes independientemente de las dimensiones de la instalación y del tipo de ventilación de que disponga.

La primera fase es la de crecimiento en la que el fuego progresa a partir de un foco inicial extendiéndose por el vehículo de forma ascendente como lo haría en un incendio al exterior. Su evolución es lenta comparada con las fases posteriores. En esta primera etapa el incendio se puede controlar por los medios propios mediante extintores o bocas de incendio equipadas. El humo generado o la temperatura son suficientes para activar los detectores de humo o fuego, en caso de existir, y la radiación generada permite acceder hasta el mismo incendio a una persona sin equipamiento especial y realizar la extinción.

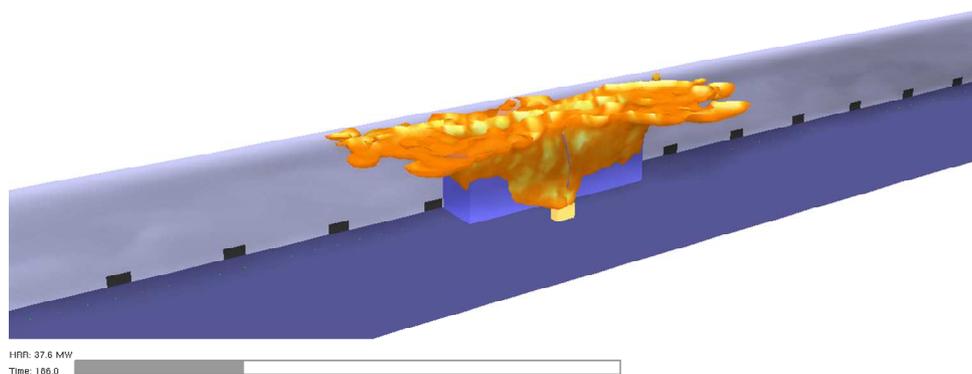


**Figura 124. Primera fase o fase de crecimiento**

Los gases generados por el fuego ascienden hasta la parte superior circulando en ambos sentidos y manteniéndose la zona inferior libre de humo y calor por la que puede comenzarse la evacuación. Las llamas apenas alcanzan la cubierta y la potencia desarrollada está por debajo de 1 MW. Esta fase puede durar entre 5 y 10 minutos dependiendo de la ubicación del foco y de la combustibilidad de la zona incendiada.

En esta primera fase el humo puede extenderse a lo largo de decenas de metros pero siempre por la parte superior dejando la zona inferior en condiciones adecuadas para la evacuación de los ocupantes y para las tareas de extinción de los bomberos. Si los sistemas de ventilación se activan en esta etapa deben proceder de forma efectiva la extracción del humo.

Si el fuego no se controla en esta primera etapa y si la disposición del combustible permite que el incendio progrese, se entrará en la fase de crecimiento exponencial. Las llamas alcanzan la cubierta empezando a circular por debajo de ésta y calentando el resto del combustible que poco a poco comenzará su ignición. Se empieza a producir el efecto horno por la radiación de los gases y llamas que se van extendiendo por la parte superior. En esta fase la transmisión de calor por convección deja de ser la predominante para pasar a serlo por radiación.



**Figura 125. Segunda fase o fase de crecimiento exponencial**

El humo habrá recorrido cientos de metros enfriándose y descendiendo conforme se aleja de la zona del incendio, dificultando la evacuación y el acceso de los equipos de bomberos. Las llamas pueden extenderse a su vez decenas de metros a ambos lados del foco inicial.

La potencia desarrollada por el incendio irá aumentando de forma que sobre los 30 MW se alcanza el límite de lo que pueden controlar los equipos de extinción con los medios que se desplazan para una primera intervención. La radiación generada por las llamas únicamente permitirá que los bomberos se acerquen a unos 10 m del incendio y durante un plazo corto de tiempo por lo que las posibilidades de extinción se reducen.

Dos aspectos que favorecen el desarrollo rápido de un incendio en un túnel son la cercanía de otros vehículos, sobretodo vehículos pesados, y el tipo de foco inicial. Si el inicio del incendio se produce por un fallo mecánico o eléctrico, el desarrollo inicial es lento y permite tiempos de reacción mucho más largos que cuando el incendio se inicia por un accidente entre varios vehículos. En este último caso, el fuego puede estar desarrollando energías altas en tiempos

muy cortos que harán que las condiciones sean extremas en pocos minutos como ocurrió en los incendios del túnel de Tauern en Austria y en el de St. Gottard en Suiza.

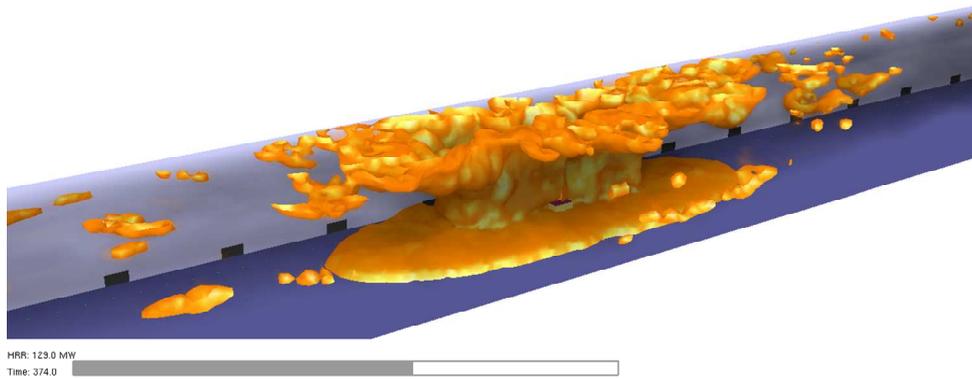
El control del humo y del calor por parte de los sistemas de ventilación resulta fundamental en esta etapa para mantener las condiciones que permitan el trabajo de los equipos de extinción. También es fundamental para permitir que la evacuación se termine de realizar en buenas condiciones de visibilidad.

Si se dan las circunstancias adecuadas para que el incendio siga creciendo se alcanzará la potencia máxima de incendio para la que ha sido diseñada la instalación de extracción de humos lo que provocará el colapso de la misma. Esto ocurrió en el túnel de Tauern donde los sistemas de extracción de humos funcionaron correctamente durante 20 minutos para dejar de hacerlo posteriormente, permitiendo que el incendio se desarrollara de forma libre y que las condiciones de evacuación empeoraran de forma drástica. La extinción llegó a ser imposible debido a las condiciones extremas que se alcanzaron cerca del incendio.

La tercera fase de los incendios en los túneles se alcanza cuando las potencias superan los 40 MW y los sistemas de ventilación forzada llegan a su límite de extracción de forma que el calor se empieza a acumular y es cuestión de tiempo que las instalaciones empiezan a colapsar por las altas temperaturas. Esta fase no es habitual que se produzca pero se puede alcanzar por la coincidencia de diferentes factores como la presencia de mercancías altamente inflamables (harina y margarina en el túnel del Mont-Blanc) o la proximidad de otros vehículos pesados con mercancías inflamables. Las condiciones geométricas del túnel así como los materiales de los que está compuesto juegan un papel fundamental para que el incendio no supere las potencias para las que ha sido diseñado el sistema de protección contra incendios.

Si las instalaciones están correctamente diseñadas serán capaces de conducir o extraer la mayoría de los gases generados de forma que la situación quede estabilizada permitiendo terminar la evacuación de los pasajeros con seguridad y permitiendo también la intervención segura de los equipos de extinción.

Otra característica de esta tercera fase es el aumento de la velocidad de los gases que circulan por la zona superior del túnel, llegando a alcanzar los 4 m/s, de forma que sobrepasará a los ocupantes que evacúan la zona a pie.



**Figura 126. Tercera fase o fase de desarrollo**

Los sistemas de ventilación transversal y semitransversal resultan ser los más efectivos y por lo tanto los que mayor tiempo de seguridad proporcionan.

En esta fase es cuando el tipo de pavimento resulta fundamental para el desarrollo del incendio. Como se ha explicado la radiación que emiten los gases y las llamas que recorren la galería por la zona superior alcanza el pavimento aumentando su temperatura.

Los pavimentos de hormigón absorberán parte del calor irradiado no contribuyendo ni a la extensión del incendio ni al aporte de gases ni humos.

Por el contrario, los pavimentos de mezclas bituminosas tendrán un comportamiento activo en el desarrollo del incendio pudiendo ser determinantes para que se pase a una tercera etapa en la que el incendio quedará fuera de control con consecuencias catastróficas como ocurrió en los incendios del túnel del Mont-Blanc y en el de Tauern.

### **3.3.3. Comportamiento del pavimento.**

Cuando la potencia del incendio supera los 30 MW las llamas pueden comenzar a extenderse a ambos lados del vehículo por debajo de la bóveda si el sistema de evacuación de humos no puede absorber el volumen de gases generados. Las llamas pueden alcanzar varias decenas de metros en ambas direcciones.

Como consecuencia la radiación emitida por las llamas aumentará alcanzando a nivel del suelo los 40 Kw/m<sup>2</sup> y conseguirá en pocos segundos que la temperatura del pavimento llegue a los 300°C. A partir de esas temperaturas es cuando los dos tipos de pavimento empiezan a comportarse de maneras muy diferentes.

Los pavimentos de hormigón debido a su comportamiento no reactivo únicamente actuarán como acumuladores de calor. En una primera fase el calor hace que se evapore el agua que

contiene para posteriormente comenzar un calentamiento superficial que irá penetrando en el material debido a su conductividad térmica.

Su buen comportamiento a las altas temperaturas hará que no pierda resistencia ni sufra deterioro tal que dificulte el tránsito de los equipos y medios de extinción por las superficies expuestas a la radiación del incendio.

El único factor negativo que se achaca al pavimento de hormigón es el desconchado o spalling, pero debido al progresivo calentamiento del firme, a su menor temperatura máxima y a su resistencia moderada, este efecto no se suele producir en los pavimentos, pudiendo ser mayor su influencia en otras partes del túnel como las bóvedas y los hastiales, que suelen contar con hormigones de mayor resistencia.

Por todo lo anterior se puede concluir que un pavimento de hormigón es un elemento que no empeora de ninguna manera las condiciones de seguridad durante un incendio ni para los ocupantes que evacuan ni para los miembros de los equipos de intervención que realicen el salvamento y la extinción.

Los pavimentos a base de mezclas bituminosas por tener un componente combustible como es el betún tendrán un comportamiento diferente durante un incendio.

Cuando las temperaturas se aproximan a los 300°C las mezclas bituminosas comienzan a desprender humo y gases pero no comienzan su ignición hasta que la temperatura no llega a los 485°C. En ese instante el pavimento empieza a emitir unas llamas que se mantendrán mientras quede betún por quemar y mientras la radiación sea superior a los 40 Kw/m<sup>2</sup>.

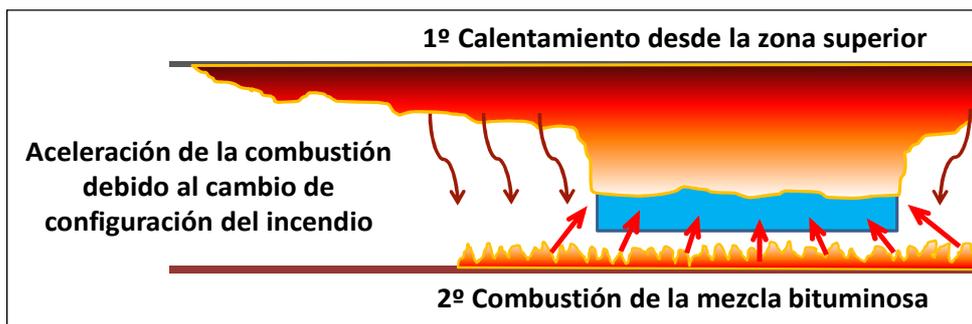
La combustión del betún, a pesar de representar un aporte de calor pequeño comparado con la combustión de la carga del vehículo pesado, representa una fuente de emisión de calor que incide en la zona inferior de la carga del vehículo, cambiando la configuración del incendio y acelerándolo. El aporte de calor por la zona inferior facilita que la carga entre en combustión generalizada mucho antes y de forma más violenta produciendo el aumento de potencia observado en las gráficas.

El fenómeno podemos entenderlo si pensamos en las diferencias que existen en la combustión de una hoja de papel si le aplicamos la llama por la parte superior o por una esquina de su parte inferior.

La aceleración del incendio de la mercancía producirá un aumento sustancial del humo generado al que se sumará el aportado por el pavimento bituminoso en combustión. Se entiende pues que a partir de la ignición del pavimento las condiciones en las cercanías de incendio empeorarán de forma drástica dificultando tanto las tareas de salvamento y extinción como las de evacuación.

Otro factor fundamental para la extensión del incendio será la cercanía que haya con otros vehículos detenidos en el túnel. Cuando la potencia del incendio sobrepasa los 50 MW el incendio se puede extender a vehículos pesados que están a más de 30 m debido a su mayor altura y cercanía a las llamas y gases que circulen por la bóveda. Ese efecto puede atrapar a los bomberos entre dos fuegos ya que si tienen que acercarse a menos de 20 m para realizar la proyección del agua se pueden formar nuevos focos de incendio por detrás de ellos. Por lo tanto si se evita el aumento de potencia debido a la combustión baja la seguridad de los equipos de extinción aumentará de forma significativa.

En la siguiente figura se muestra el cambio de configuración del incendio que pasa a tener un perfil bajo debido al calentamiento producido por la combustión del pavimento bituminoso.



**Figura 127. Nueva configuración del incendio en el escenario**

Este fenómeno explicaría las dificultades que tuvieron los bomberos en la extinción de los incendios de los túneles del Mont-Blanc, St. Gottard y Tauern y donde las condiciones se hicieron insostenibles en un corto periodo de tiempo.

En esta fase, el incendio necesita un aporte importante de aire para mantener la tasa de combustión de forma continuada ya que si no, se entraría en una etapa llamada de “combustión dominada por la ventilación”, en la que la intensidad del incendio se reduciría. Se ha podido comprobar en las simulaciones realizadas que la alimentación de aire está garantizada siempre que haya ventilación forzada en cualquiera de sus configuraciones.

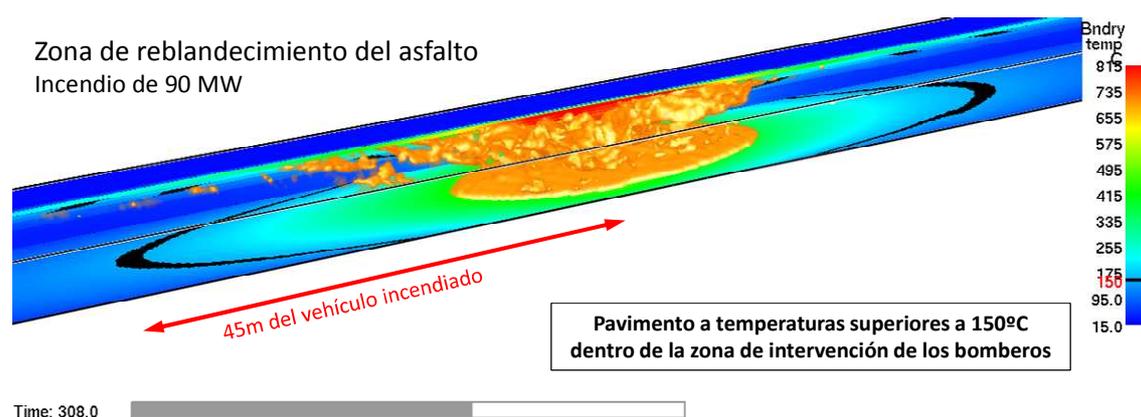
En los casos de ventilación semitransversal y transversal la aceleración del incendio por la combustión de la mezcla bituminosa se retrasa mucho más que sin ventilación o con ventilación longitudinal debido a la efectiva extracción de gases por la zona superior pero no evita que a potencias superiores de 50 MW el sistema sea insuficiente y el efecto de aceleración del incendio por combustión baja se produzca. Sin embargo con pavimento de hormigón la aceleración no se produce y la potencia se mantiene dentro de los márgenes de seguridad de la instalación.

Otra consecuencia que tendrá el comienzo de una combustión baja será la explosión temprana de las ruedas de los vehículos pesados que debido a la violencia con la que se produce representará un riesgo añadido para los bomberos que intenten aproximarse al incendio.

Al no producirse el salto de la potencia del incendio las condiciones no cambian de manera sorpresiva permitiendo a los equipos de extinción trabajar de forma segura.

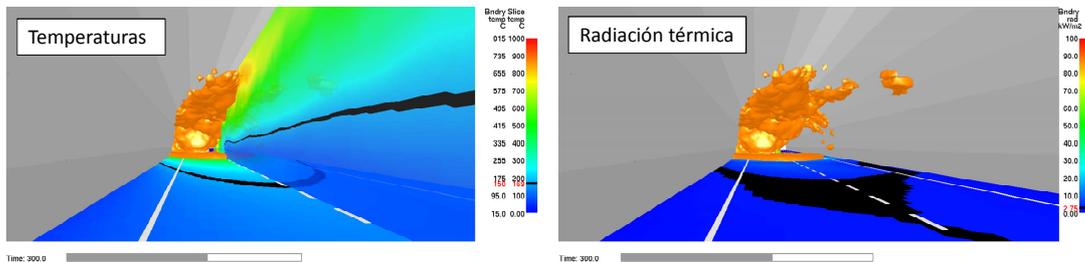
Respecto al tema de la resistencia mecánica del pavimento y a su deterioro hay que decir que el asfalto es un material termoplástico cuya viscosidad disminuye al crecer su temperatura. La temperatura de aplicación varía entre 150 y 180° según el tipo de mezcla bituminosa.

Esas temperaturas se pueden alcanzar a los 5 minutos del inicio del incendio a 45 m del incendio que es superior a la zona de intervención de los equipos de extinción y que se estima en 30 m. Por lo tanto se producirá el reblandecimiento del betún asfáltico en la zona de trabajo de los bomberos con los consiguientes problemas de movilidad.



**Figura 128. Características del escenario para la intervención de los bomberos**

En las siguientes imágenes se observa mediante una franja de color negro la temperatura de los gases que son inferiores a los 170°C por lo que los bomberos pueden trabajar en el interior de esa zona. También se observa la zona de radiación inferior a 4 KW/m<sup>2</sup> en el pavimento. Los bomberos pueden soportar hasta 12.5 KW/m<sup>2</sup> por lo que podrán trabajar con esa radiación en la zona de reblandecimiento del betún asfáltico.



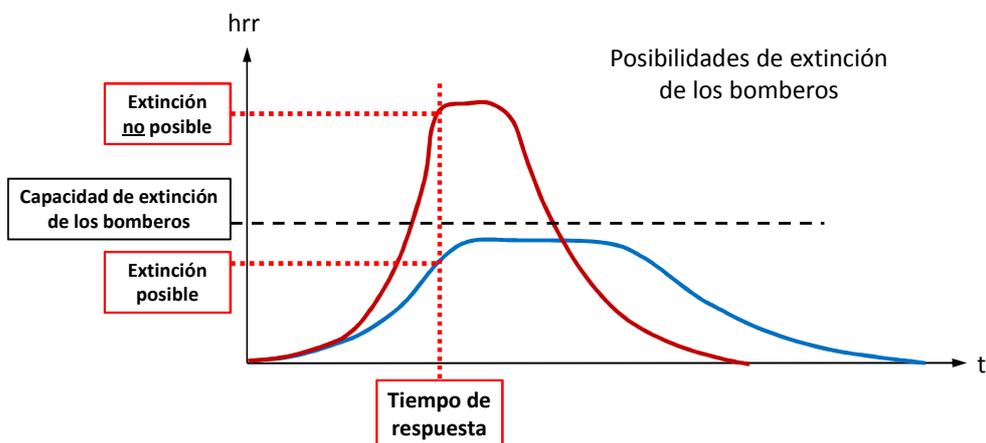
**Figura 129. Zonas de trabajo para los bomberos**

Por lo tanto los bomberos al acercarse al incendio pueden encontrarse con el pavimento reblandecido por el calor lo que perjudicará su movilidad.

### **3.3.4. Condiciones para los equipos de intervención.**

Los equipos de bomberos que participan en la extinción, tienen un tiempo de respuesta que es el empleado en recibir la comunicación, desplazarse hasta el lugar del siniestro y en preparar las maniobras de actuación. Según los efectivos desplazados o los sistemas de extinción existentes en la instalación, dispondrán de una capacidad de extinción limitada. Como el desarrollo del incendio crece y se extienden de forma continuada en sus primeros instantes, es fundamental llegar al lugar del incendio antes de que la potencia de éste se eleve y sea superior a la capacidad de extinción de los bomberos.

De forma general se considera que un vehículo autobomba de primera intervención tiene una capacidad de extinción de 30 a 40 megavatios siempre que los efectivos se aproximen a una distancia de 10 o 15 metros del incendio.



**Gráfica35. Respuesta de extinción de los servicios de bomberos**

Por lo tanto pueden darse dos situaciones. La primera, que la potencia del incendio se mantenga por debajo de la capacidad de extinción de los bomberos en todo momento. La segunda y más grave, que la potencia del incendio sobrepase su capacidad de extinción en un momento dado.

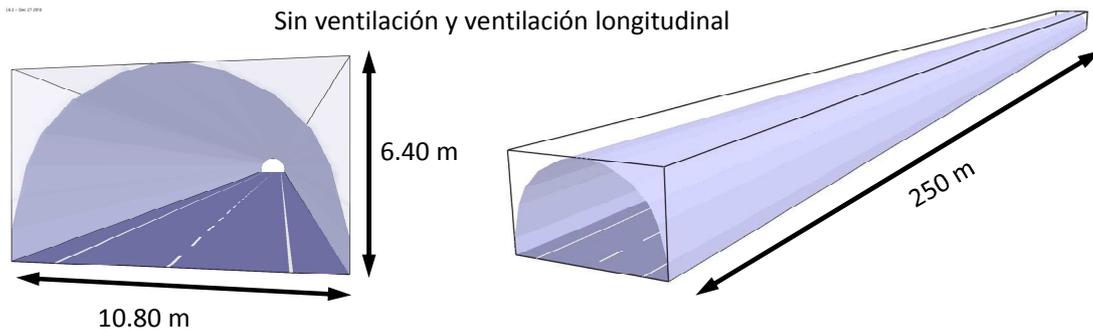
En el primer caso, los bomberos podrán controlar el incendio independientemente del tiempo de respuesta, mientras que en el segundo caso el tiempo de respuesta está limitado al tiempo en el que la potencia del incendio alcanza su capacidad de extinción.

Si existe alguna circunstancia que haga que aumente la potencia del incendio, posiblemente los equipos de extinción no puedan extinguirlo y tengan que retirarse para ponerse a salvo dejando al fuego que evolucione sin control como ocurrió en el incendio del túnel de Tauern.

Si en el análisis que se realiza con la simulación informática de incendios, se comprueba que la presencia de un pavimento de mezcla bituminosa aumenta de forma significativa la potencia del incendio, se puede concluir que el pavimento de hormigón contribuye de forma importante a la seguridad en caso de incendio en un túnel de carretera.

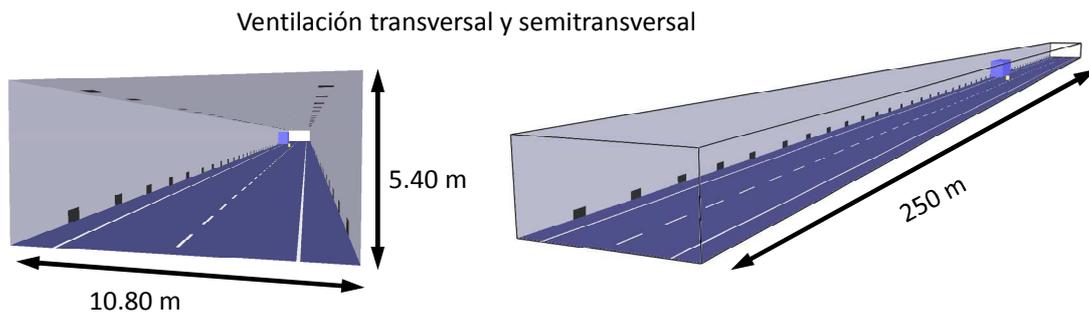
Para un primer análisis, se han realizado dos geometrías de túneles diferentes. Son las configuraciones más habituales que existen en la actualidad para este tipo de instalaciones.

La primera geometría la constituye un túnel con forma abovedada de 250 m de longitud, 6.40 m de altura a clave y 10.80 m de ancho en calzada, en el que se modela dos situaciones significativas de túnel, sin ventilación y con ventilación longitudinal.



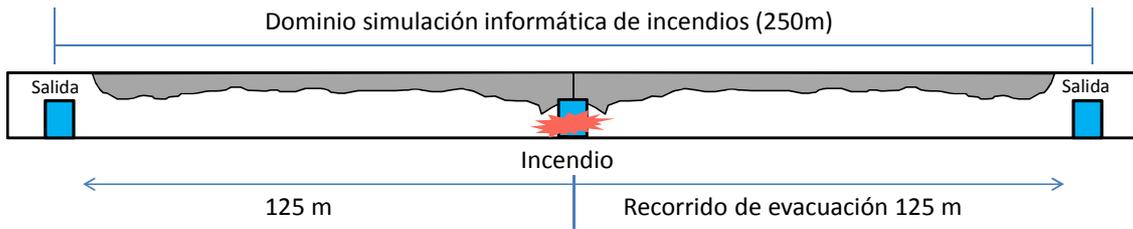
**Figura 130. Primera geometría a estudiar, forma abovedada**

La segunda geometría que se analiza, es la de un túnel con forma rectangular interior de 250 m de longitud, 5.40 m de altura y 10.80 m de ancho en calzada. En este caso se estudia un túnel excavado con tuneladora o entre pantallas y con conductos superior e inferior para ventilación o instalaciones. En esta geometría se modelan los incendios con sistemas de evacuación de humos, semitransversal y transversal.



**Figura 131. Segunda geometría, forma rectangular**

Ante la imposibilidad de simular toda la longitud del túnel, el estudio se centra en una sección de 250 m. de longitud. Dentro de esta zona es donde se producen todos los efectos relevantes. Las llamas, las máximas temperaturas y las velocidades de flujo más elevadas se producen en el sector modelado. Fuera de los 125 m. alrededor del foco del incendio, se considera que las condiciones de circulación del aire y de los gases se estabilizan en flujos laminares que ya no repercuten en la evolución del propio incendio. De igual manera este espacio se ha considerado adecuado para estudiar las condiciones de evacuación, suponiendo que es el espacio que se encuentra entre las dos salidas de evacuación más cercanas. El foco del incendio se ha posicionado en el centro de dos salidas y los recorridos de evacuación se limitarán a una distancia de 125 m.



**Figura 132. Longitud de instalación referida para el estudio**

Para la toma de datos se han ubicado una serie de sensores que registrarán diferentes parámetros de forma que posteriormente pueda realizarse su análisis. Entre los elementos de toma de datos utilizados están:

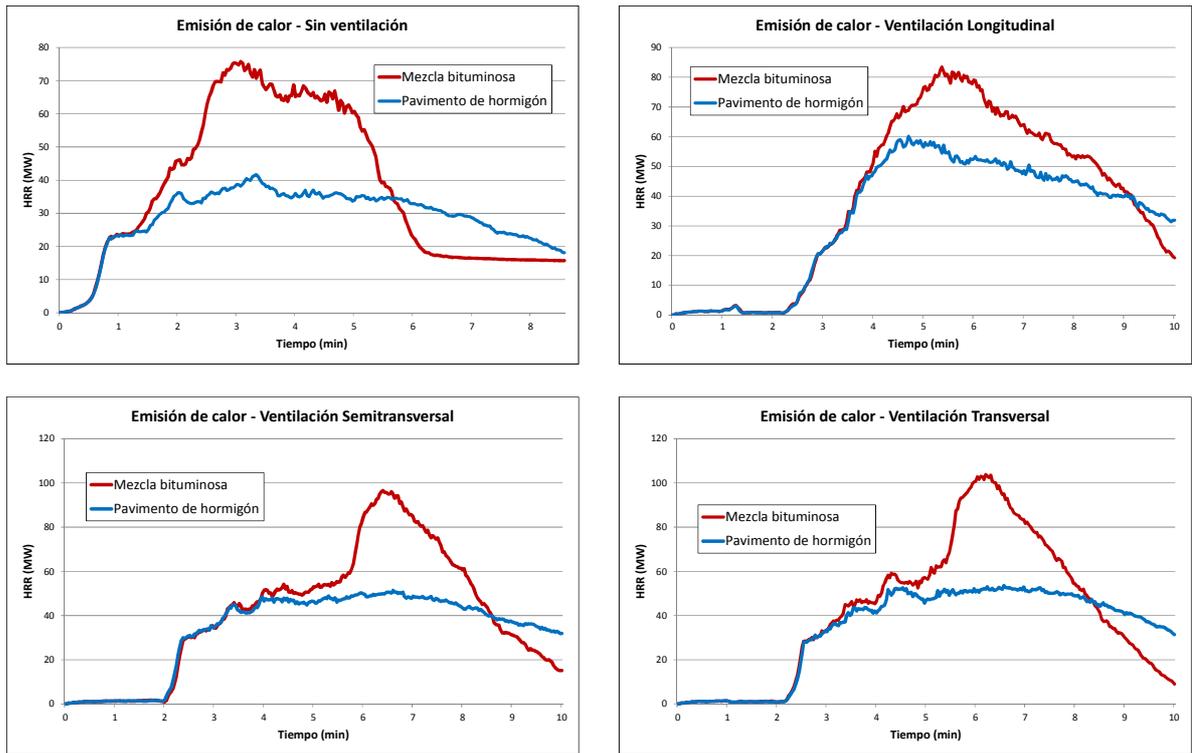
- Planos de lectura de datos y de vectores de velocidad de flujos.
- Sensores puntuales de temperatura de gases y superficiales.
- Representación gráfica de las llamas y el humo.
- Isosuperficies de límite de llamas y humo.
- Lecturas superficiales en los elementos sólidos.

Los parámetros analizados mediante los anteriores elementos serán:

- Temperaturas.
- Concentración de humo.
- Visibilidad en metros.
- Concentración de gases, CO, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>.
- Radiación térmica.
- Potencia de los incendios a lo largo del tiempo de simulación.

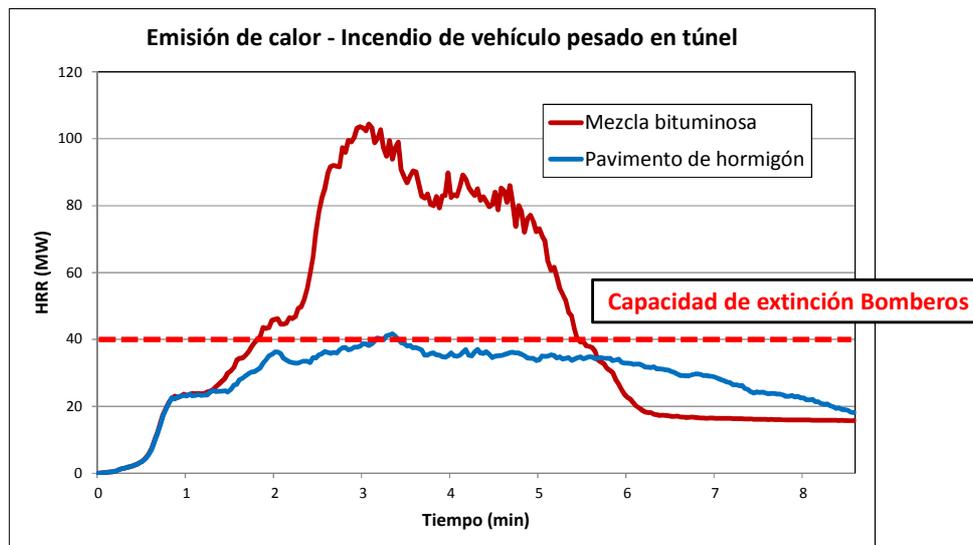
El primer factor analizado es la potencia desarrollada por el incendio en cada uno de los escenarios y con los dos tipos de pavimento.

En las siguientes gráficas se muestran los resultados obtenidos de todos los escenarios modelados.



**Gráfica 36. Resultados obtenidos en los estudios realizados**

El primer aspecto a destacar de la comparación de las curvas obtenidas es que las potencias resultantes en los incendios con pavimento de mezcla bituminosa son superiores para todas las configuraciones de túnel estudiadas. También se observa que el crecimiento de la curva de potencia es inferior por lo que los equipos de salvamento y extinción dispondrán de más tiempo para acceder al lugar del incendio y por lo tanto de mejores condiciones de trabajo a su llegada. Esto ocurre en mayor o menor medida con todos los casos de ventilación.

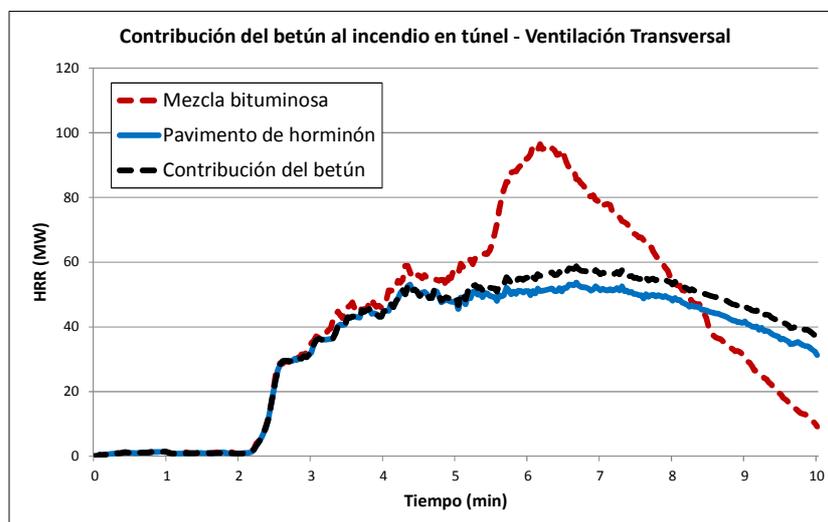


**Gráfica 327. Potencia desarrollada en los incendios**

En la anterior gráfica se observa de forma genérica las diferencias observadas.

El efecto que produce la aceleración de la tasa de emisión de energía se puede entender observando las imágenes comparadas de los incendios en las dos superficies. Debido a la radiación térmica emitida por las llamas acumuladas en el interior de la estructura, cuando el incendio sobrepasa los 40 MW, el pavimento bituminoso llega a su temperatura de ignición y comienza a arder. Aunque su tasa de emisión de calor sea baja (máx. 80 Kw/m<sup>2</sup>) el incendio pasa a tener un perfil bajo que acelera la combustión de la carga. La entrada de aire al incendio no se ve limitada en ningún escenario ya que bien por la convección natural del fuego en el caso de no tener ventilación como por la entrada forzada de aire con cualquier sistema de ventilación el suministro continuo es suficiente.

Si la contribución al incendio del betún fuera únicamente la energía que emite la zona de pavimento que arde se emitirían unos 4 MW ya que la superficie inflamada en el ensayo es de 100 m<sup>2</sup> y la potencia que se emite es de unos 40 Kw/m<sup>2</sup>. Esa potencia representaría únicamente un 8% de la total emitida por el incendio y no debería de empeorar de forma significativa las condiciones en el interior del túnel sin embargo en algunos casos la evolución del incendio puede cambiar de forma radical según se observa en la siguiente gráfica.

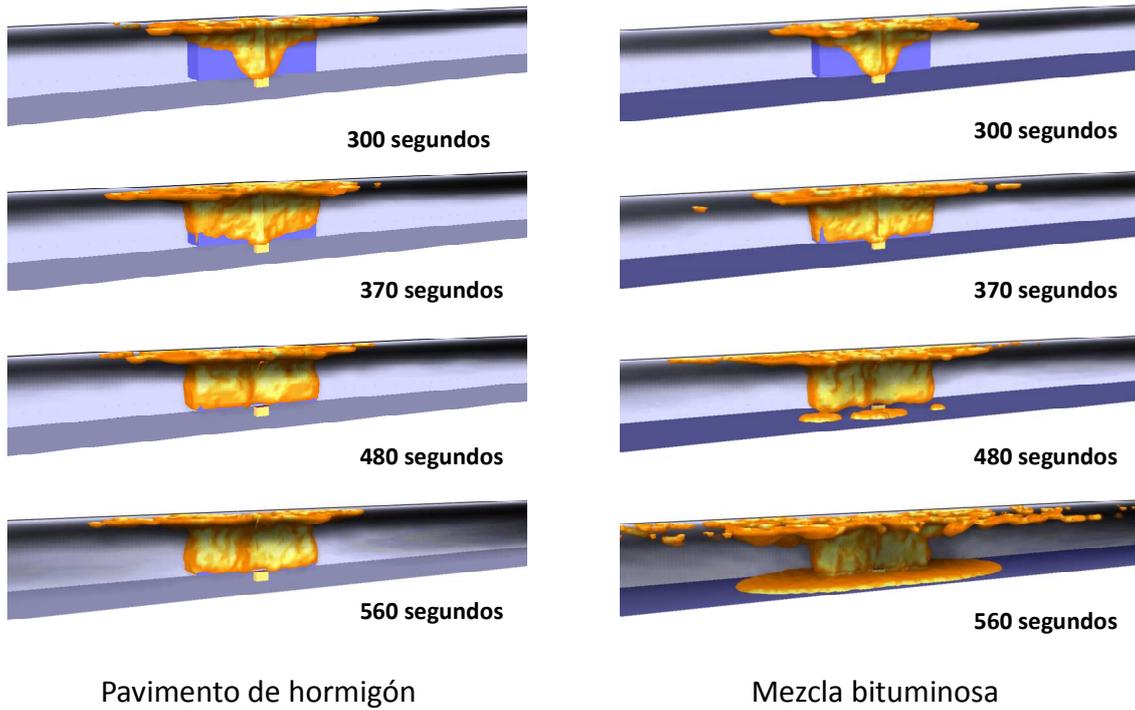


**Gráfica 38. Contribución del material al incendio en el interior del túnel**

La energía total emitida será la misma pero la tasa a la que se emite es completamente diferente a partir del instante en el que el betún comienza a arder. Este hecho se observa en la comparación de las dos líneas punteadas.

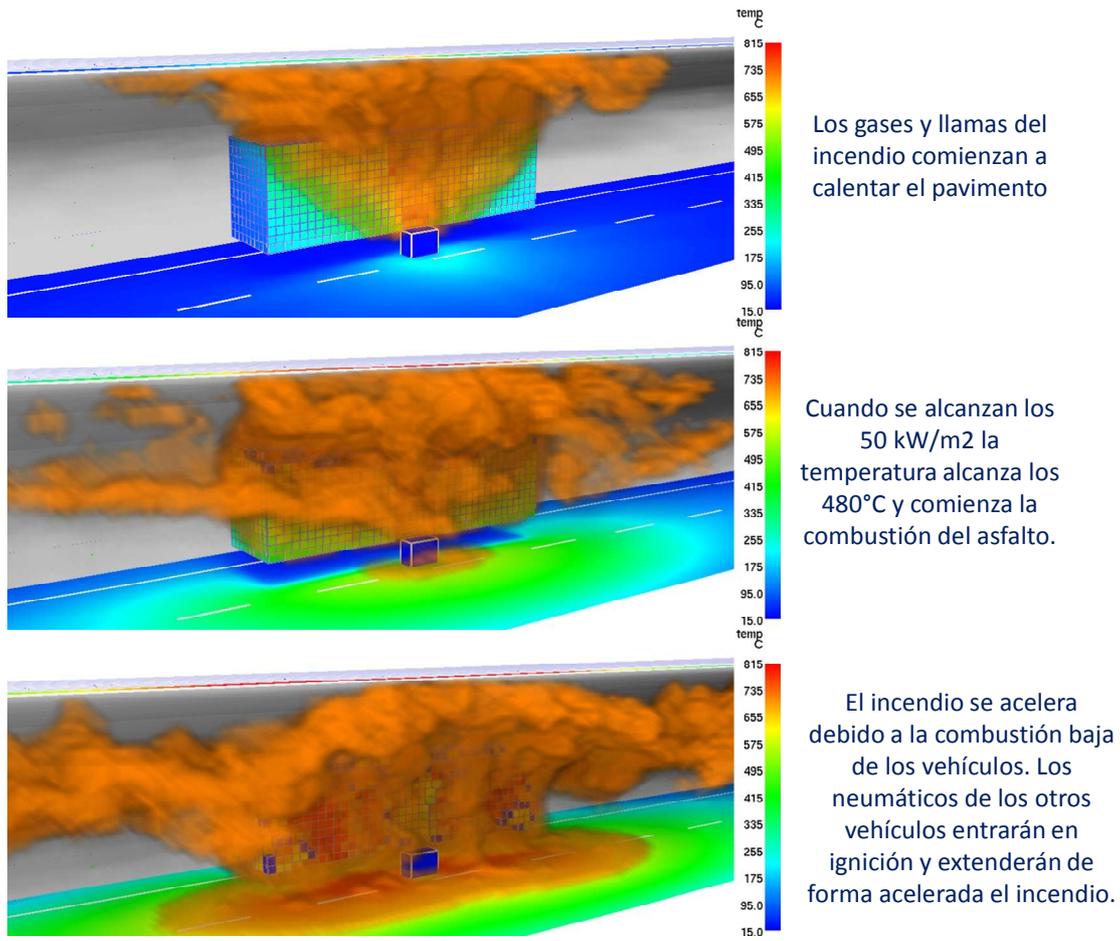
Este incremento de la potencia es el que podría explicar que los bomberos no pudieran controlar los incendios en los túneles del Mont-Blanc y de Tauern y que muchos pasajeros no tuvieran tiempo de evacuar el túnel.

En las siguientes imágenes se observa la diferencia que puede llegar a darse en la combustión de una carga según el tipo de pavimento presente.



**Figura 133. Diferencias en la evolución de un incendio**

En otra secuencia se observa cómo el pavimento de mezcla bituminosa se incendia provocando la aceleración de la combustión en toda la carga.



**Figura 134. Secuencia del desarrollo del incendio con pavimento de mezcla bituminosa**

Si el cálculo del aporte de calor y gases de los pavimentos bituminosos se realiza por superficie parece no ser significativo y que se puede despreciar sin embargo si se contempla todo el escenario los efectos sobre las condiciones en el interior del túnel tienen un gran impacto. Dos aspectos son los que hay que destacar sobre la contribución del pavimento bituminoso el primero es el aporte de la combustión de toda la superficie que rodea al vehículo incendiado que puede llegar a ser de 300 m<sup>2</sup>. Esa superficie va a portar unos 24 MW al comienzo de la combustión y una energía total de 76800 MJ que sería equivalente a la combustión total de 6 o 7 automóviles. Esos valores son porcentajes muy significativos respecto al total de la energía emitida por el incendio pudiendo llegar al 30%.

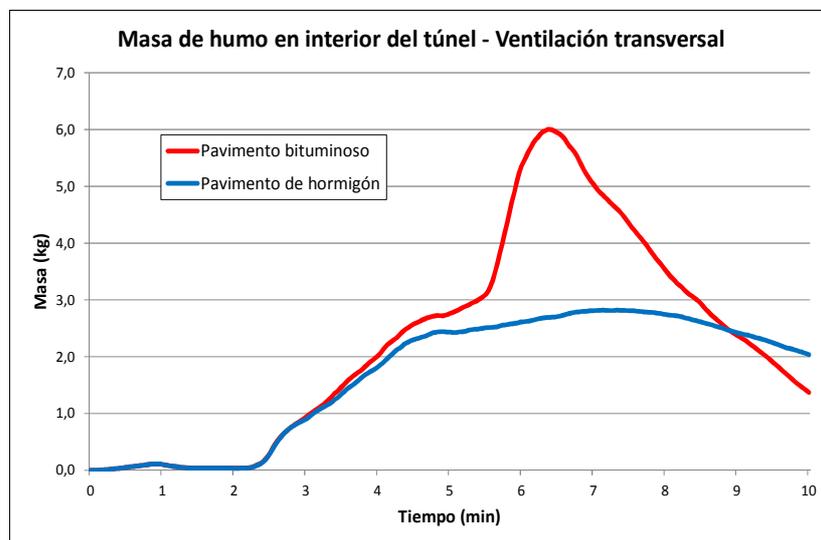
El segundo aspecto que contribuirá a empeorar las condiciones es la aceleración de la combustión que se produciría por un aporte de calor desde la parte inferior que contribución calorífica baja.

### 3.3.5. Condiciones de evacuación.

El principal objetivo de los sistemas de extracción de humos es el de mantener las condiciones ambientales durante el tiempo suficiente para que se pueda evacuar el túnel de forma segura. Los factores que tendrán que estar controlado el máximo tiempo posible serán, entre otros, la concentración de gases tóxicos, la visibilidad, la temperatura y la radiación térmica que provenga de los humos y llamas.

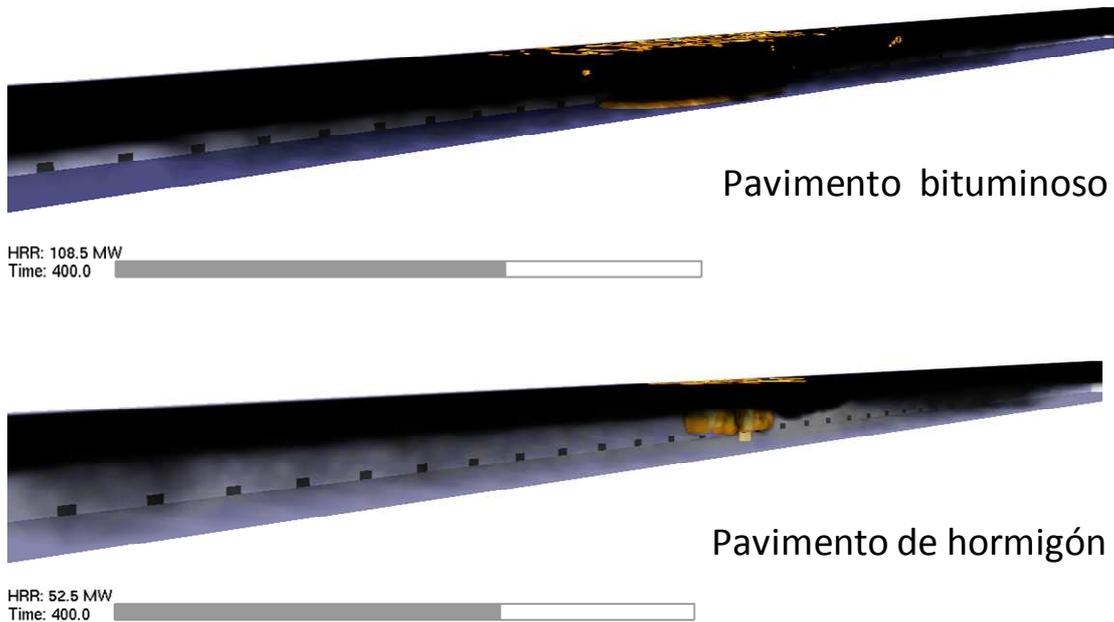
Para comprobar de forma comparativa las condiciones de evacuación en caso de un incendio de un vehículo pesado con una emisión de calor superior a los 40 MW en el interior de un túnel, se ha utilizado una simulación informática en la que se integran todos los factores que influyen en el desarrollo del incendio.

Uno de los resultados obtenidos del estudio es la gráfica de evolución de la masa de humos en el interior del escenario. Se muestra la gráfica con los resultados de aplicar ventilación transversal que se considera la más efectiva. Se observa en la gráfica, un aumento importante de la masa de humos, a partir del instante que comienza la combustión del pavimento bituminoso. Sin embargo para el incendio con pavimento de hormigón los resultados se mantienen prácticamente constantes debido a la efectiva extracción del sistema de evacuación de humos.



**Gráfica 39. Masa de humo en el interior de la instalación**

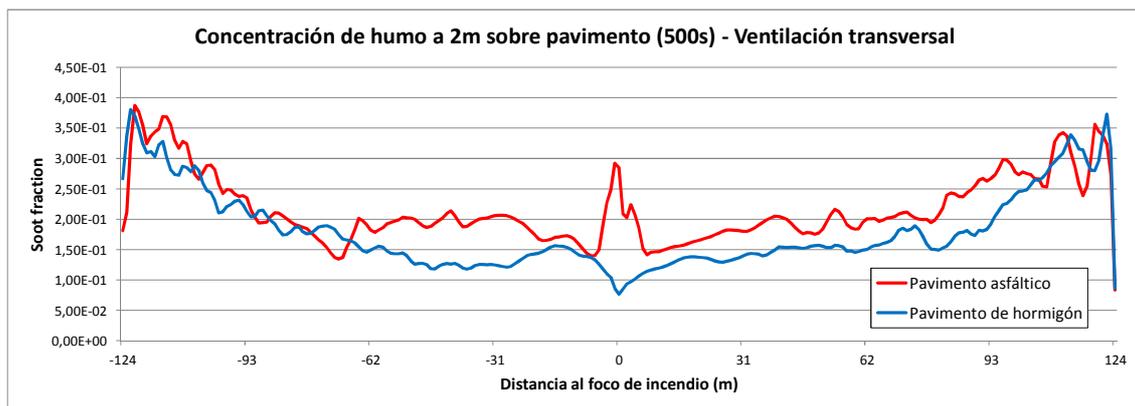
En las siguientes imágenes se aprecia de forma gráfica el grado de opacidad de los humos a nivel del suelo en un sistema de ventilación transversal y a los 400 segundos del inicio del incendio.



**Figura 135. Diferencia de grado de opacidad de los humos en función del pavimento**

Se observa, en la segunda imagen, que la visibilidad en el recorrido de evacuación es mucho mejor que en el caso del incendio con pavimento bituminoso.

En la siguiente gráfica, se muestra la concentración de humo a lo largo del tramo de túnel modelado en el mismo incendio con los diferentes tipos de pavimentos utilizados.

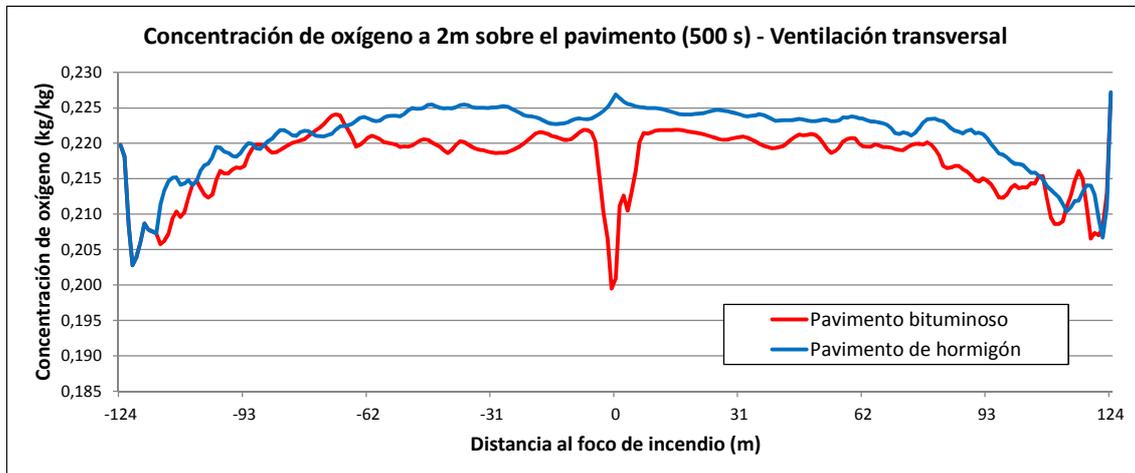


**Gráfica 40. Medición de la concentración de humo en función del pavimento**

La medición se ha realizado a los 500 segundos del incendio y representa la concentración de humo a dos metros de altura a lo largo del tramo de túnel modelado. Se observa que prácticamente en toda la zona analizada las condiciones utilizando pavimento de hormigón son

más favorables. La conclusión es que la evacuación se realizará en mejores condiciones y la actuación de los bomberos será más segura.

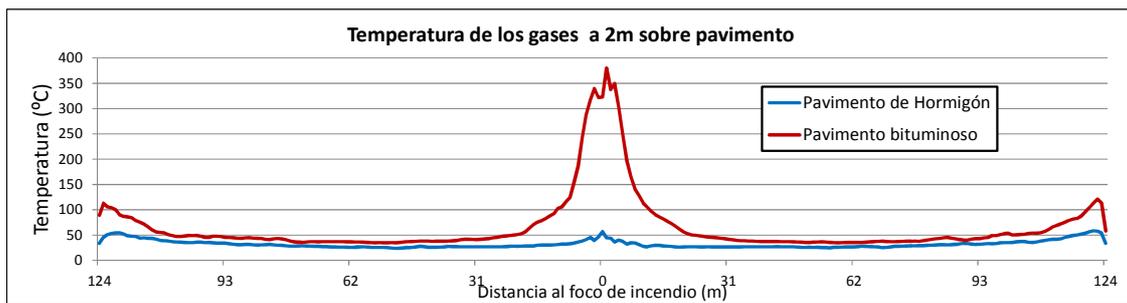
Otro parámetro analizado es el de la concentración de oxígeno a dos metros de altura, en las mismas condiciones que la gráfica anterior.



**Gráfica41. Concentración de oxígeno en función del pavimento.**

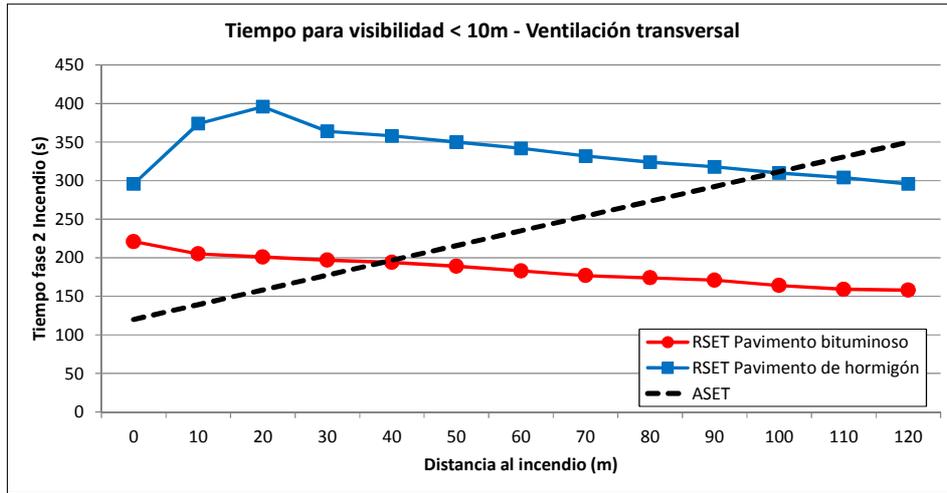
Se comprueba que la concentración de oxígeno en el incendio con pavimento de hormigón es superior a lo largo de todo el recorrido de evacuación.

También la temperatura distribuida a lo largo del túnel a los 400 s de incendio resulta más baja si el incendio se desarrolla en un túnel con pavimento de hormigón.



**Gráfica 42. Temperatura de los gases en función del pavimento**

Otra manera de analizar las condiciones de evacuación de forma comparativa es utilizar los parámetros RSET, (tiempo requerido para la evacuación) y ASET (tiempo disponible para la realizar la evacuación) considerando como límite la visibilidad a 10 metros y con un sistema de ventilación transversal.



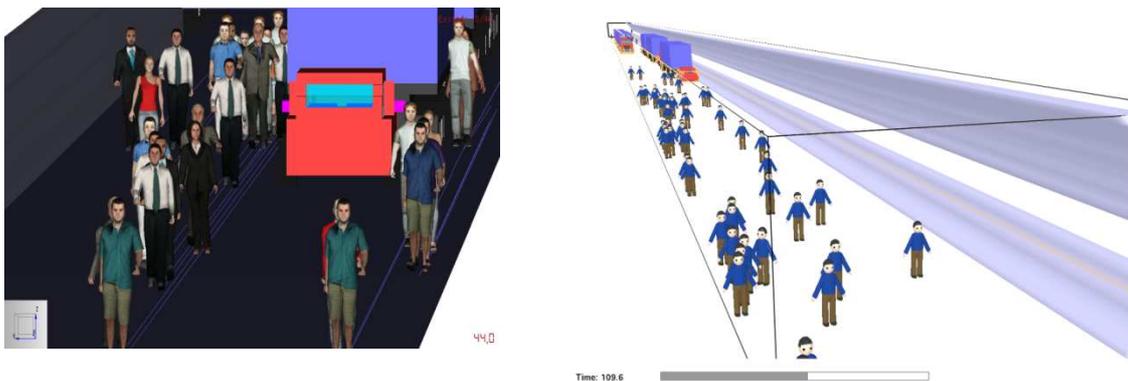
**Gráfica 43. Distancias de seguridad para la evacuación en función del tipo de pavimento**

Con una velocidad constante en la evacuación a partir de la zona del incendio los ocupantes tendrán problemas de visibilidad más tarde con la utilización de un pavimento de hormigón.

Las pendientes de las curvas RSET son de sentido contrario a las de ASET debido al descenso del humo a lo largo del recorrido de evacuación.

Para el cálculo de la curva ASET hemos utilizado dos aplicaciones informáticas que permiten estimar el tiempo de la evacuación de los ocupantes. Estas son el Evac y el Pathfinder.

En las siguientes imágenes se muestran dos secuencias del cálculo del tiempo de evacuación.



**Figura 136. Secuencias de las aplicaciones informáticas utilizadas para el cálculo de evacuación**

### 3.3.6. Daños en instalaciones e infraestructuras.

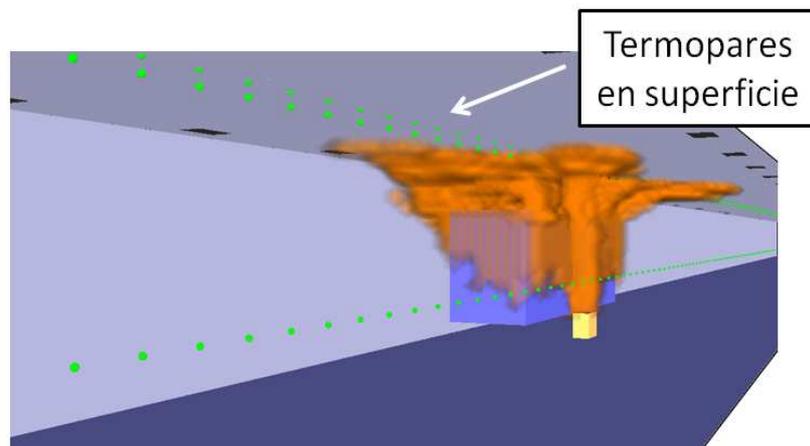
Otro aspecto fundamental a tener en cuenta a la hora de valorar la gravedad de un siniestro es el daño que se produce a la infraestructura y a las instalaciones. Estos van a depender fundamentalmente de las temperaturas que alcancen los gases y de su duración.

Cuando el sistema de extracción de humos funciona correctamente y la potencia del incendio queda por debajo de la de diseño, utilizada para dimensionar dicha instalación, los daños deben de ser puntuales y de poca importancia.

Si por coincidencia de ciertas circunstancias, el fuego supera la potencia para la que la instalación ha sido diseñada, el grado de afección puede ser muy elevado, llegando a inutilizar la instalación durante largos periodos del tiempo. El túnel del Mont-Blanc estuvo cerrado durante 36 meses tras el incendio de 1999.

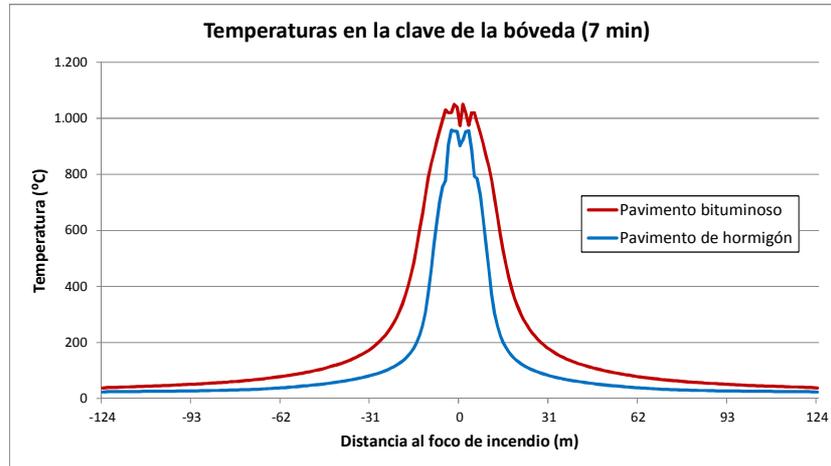
Las reparaciones afectan, en lo que a instalaciones se refieren, a cableados, iluminación, bandejas, circuito cerrado de televisión, detección y extinción de incendios y sistema de ventilación. Mientras que en los elementos estructurales, que garantizan unas condiciones seguras de uso para la circulación en el interior del túnel, son la impermeabilización de la bóveda, el sistema de drenaje, el pavimento y la señalización.

Mediante la toma de temperaturas en el hormigón de la bóveda, el estudio realizado con técnicas de simulación informática de incendios, ha permitido comprobar la situación que generará menos daños en el túnel.



**Figura 137. Ubicación de los termopares utilizados para la medición de temperaturas**

Los datos obtenidos se representan en una gráfica que muestra las temperaturas en el hormigón de la bóveda, a lo largo de 250 m de galería con el incendio en el centro. Con una lectura puntual a los 7 minutos del comienzo del incendio y con la única diferencia del tipo de pavimento utilizado. El primer hecho que se aprecia, es que las temperaturas alcanzadas en el incendio con pavimento de hormigón siempre son inferiores.



**Gráfica 44. Temperaturas en la parte superior de la instalación en función del pavimento y en un instante determinado**

Entre 10 y 20 metros del foco del incendio, se aprecia un salto de temperatura en las mediciones realizadas con diferentes pavimentos, con una elevación en las temperaturas de aproximadamente 200°C para el pavimento bituminoso. Es importante remarcar que este hecho se debe a un cambio de dinámica en el incendio que se producirá cuando coincidan unas series de circunstancias como es el incendio de un vehículo pesado, con una mercancía en la que la radiación y convección, pueda afectar la parte inferior. Esta diferencia de temperaturas puede significar bien que los daños producidos sean importantes o bien que la afcción sea superflua. También se aprecia que la zona afectada por altas temperaturas con el pavimento de hormigón es más reducida.

Las diferencias en los resultados entre los túneles con los dos tipos de pavimento se han mantenido independientemente del sistema de ventilación utilizada.

### **3.3.7. Medidas a adoptar en caso de incendio.**

En el entorno de la Comunidad Europea los túneles de carretera cuentan con medidas de protección adecuadas para garantizar la seguridad de los usuarios en la mayoría de las

situaciones de incendio posibles. En caso de emergencia resulta fundamental que las personas implicadas respeten la señalización y una serie de normas de seguridad generales.

En todos los casos, al acceder a un túnel hay que tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

Antes de entrar en el túnel comprobar que los semáforos están en verde y por lo tanto el acceso permitido. En caso contrario detenerse y no entrar.

Encender las luces de cruce y mantenerlas durante todo el trayecto.

Respetar los rótulos informativos luminosos para los carriles.

Respetar la velocidad de circulación establecida y mantener la distancia de seguridad con el vehículo que nos precede que se recomienda que sea de al menos 100 m.

Mantener sintonizada la radio con la emisora de información del tráfico.

En caso de emergencia en el interior de un túnel hay que tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

Si hay que detenerse en el interior encender los intermitentes de emergencia, aparcar en un apartadero o arrimarse a la derecha para no interrumpir el acceso de vehículos de emergencia.

Si se detiene el tráfico mantener cierta distancia con el vehículo delantero.

Señalizar con los triángulos de emergencia y ponerse el chaleco reflectante.

Estar pendientes de las señales luminosas y acústicas y seguir sus indicaciones.

Contactar con el centro de control y comunicar lo antes posible la emergencia.

Si hay incendio o humo apagar el motor, cerrar las ventanas y dejar la llave en el contacto.

No realizar cambios de sentido ni invadir el carril contrario. No dar marcha atrás.

Coger la documentación y dirigirse a pie hacia la salida o la zona protegida más cercana. Si hay humo denso seguir el alumbrado de emergencia.

Si se incendia nuestro vehículo intentar conducirlo hasta fuera del túnel. Si no es posible desplazarlo hasta un puesto de emergencia e intentar apagarlo con un extintor. En caso de no poder dirigirse a una salida a pie.

Otro aspecto a valorar son los procedimientos de intervención en túneles para los equipos de extinción y rescate. En la elaboración de estos, se incorporan temas como:

El tipo de túnel,

El tipo de ventilación,

La existencia de instalaciones de agua de protección contra incendios,

La existencia de galería de evacuación,

Porque boca salga el humo.

Es prioritario en toda intervención el rescate y la evacuación de personal afectado que se encuentra con vida. Hay que preparar dos equipos de intervención que trabajen simultáneamente en las tareas de rescate y extinción.

Hay dos tipos de estrategias que pueden utilizar los bomberos: estrategia ofensiva y defensiva.

La ofensiva pretende extinguir el fuego de la forma más rápida posible con el mayor potencial del que se disponga.

La defensiva se utiliza en incendios más grandes donde hay otros objetivos como evitar la extensión del fuego, la producción de grandes daños, el control de los humos y evitar exposición a grandes riesgos para los bomberos.

La elección dependerá de la fase en la que se encuentre el incendio.

Para los primeros equipos que lleguen hay dos conceptos fundamentales:

Máxima potencia de incendio asumible

Tiempo máximo de intervención

La potencia suele ser de 20 o 30 MW para una primera salida

El tiempo máximo de intervención será el que transcurra entre la llegada de los bomberos y el desarrollo de un fuego catastrófico.

Es de vital importancia introducir la cámara de visión térmica con el objetivo de poder localizar las personas que han quedado en la zona inundada por el humo.

Se marcan una serie de premisas para los equipos que actúan en el interior de este tipo de instalaciones que son básicas para una buena actuación:

Obtención de la máxima información referente al siniestro,

Rechazar la posibilidad de entrar con vehículos si se carece de visibilidad,

Evitar invertir el sentido de circulación del aire establecido,

Apoyo de medio de guía para evitar la desorientación,

Apoyo de equipos de respiración para el personal afectado en el interior,

Contar con medio de transporte auxiliar para el material,

Comprobar las instalaciones contra incendios propias del túnel,

Controlar a la mayor brevedad posible el desarrollo del incendio, evitando el incendio generalizado, evitando la emanación de gases de los componentes del escenario,

Apoyo de medios auxiliares para evacuar al personal afectado del interior,

Controlar las maniobras a realizar en el interior, el carecer de visibilidad aumenta el riesgo de actuación.

La adopción de estas medidas asegura la respuesta efectiva que minimizan las consecuencias de las emergencias. Que vienen determinadas en buena medida por la actuación en un tiempo de respuesta adecuado, de personal cualificado dotado de los recursos técnicos adecuados

## ÍNDICE DEL CAPÍTULO 4

4.	CONCLUSIONES.....	202
4.1.	INCENDIO EN INTERIORES.....	202
4.2.	INCENDIOS FORESTALES.....	203
4.3.	INCENDIOS EN TUNELES.....	205
4.4.	NUEVOS ESTUDIOS.....	206

## CAPITULO 4

---

### 4. CONCLUSIONES.

Llegados a este capítulo se van a exponer las conclusiones de los temas analizados y se matizan posibles líneas de trabajo para mejorar el comportamiento de los incendios. Con ello, mostrar a los responsables de Protección Civil y Escuelas de Arquitectura de las necesidades que presenta la sociedad actual.

#### 4.1. INCENDIO EN INTERIORES.

El problema primordial es la falta de formación que disponen los arquitectos y los bomberos en este tipo de incendios. Es un inconveniente que aparece en la actualidad con más virulencia por la propia geometría de los edificios. Los edificios son más altos y no suelen estar resguardados por los edificios de alrededor. Por lo que el viento tiene más facilidad de llegar a los paramentos exteriores.

Es muy importante matizar que en los lugares cercanos al litoral, nos encontramos con brisas significativas, que deben de hacer reflexionar ante este tipo de siniestro y su aumento en la frecuencia de aparición.

Los diseñadores de los edificios los hacen más esbeltos. Más altos y los núcleos de comunicación y patios de luces más estrechos. Esta situación permite que los gases de la combustión puedan recorrer estos lugares con mayor facilidad.

Es tan virulento el desarrollo del fuego que el bombero queda sin protección, por lo que lo convierte en un elemento muy vulnerable.

Es un tema que debe de incluirse en el conocimiento del personal que interviene en los incendios.

Las conclusiones obtenidas se basan en los siguientes puntos:

- Formación sobre el comportamiento del incendio cuando se encuentra sometido a la influencia del flujo de aire. Este comportamiento se debe a la aportación de un viento relativamente fuerte o a la succión producida por la diferencia de densidad de los gases. La probabilidad de este suceso es más frecuente en los Edificios de Gran Altura. El fenómeno se puede también desarrollar en una caja de escalera o en patio de luces de un edificio.
- Formación de procedimientos operativos para el personal de los servicios intervinientes. Los bomberos buscan vías de acceso seguras en el interior del recinto y el control de los huecos. La precaución es importante para no romper los elementos de compartimentación.
- La capacitación del personal es la medida del control de riesgo. La sectorización y zonificación del escenario del incendio es de vital importancia. El control de las aperturas del recinto puede evitar el aumento del riesgo y minimizar la seguridad.
- Las técnicas de ataque con las líneas de agua desde posiciones estratégicas como situarse a barlovento o favor del aire para el ataque. Resguardarse de la temperatura y de los gases mediante la construcción de butrones de manera estratégica. El corte de suministro de flujo por medio de unos elementos de compartimentación como son las cortinas ignífugas para garantizarnos el control del aire.
- Valorar las posibilidades que nos brinda la construcción para poder hacer frente al incendio, tratando de buscar una zona segura que nos permita resguardarnos. También controlar los elementos de sectorización existentes en el lugar para poder compartimentar los flujos de aire.

### **4.2. INCENDIOS FORESTALES.**

A lo largo de este proyecto se ha podido observar la novedad que supone este tipo de estudios para el ámbito de la prevención y la actuación de incendios forestales, que es un tema conocido por todos y que puede afectar a cualquier ciudadano de forma directa.

Es interesante pensar que gracias a esta herramienta, se van a poder hacer estudios en laboratorio para valorar la virulencia de los incendios, y qué nuevos factores hay que introducir para minimizar estos riesgos.

## CONCLUSIONES

Gracias a esto, también se podrán dar conclusiones más fiables sobre cómo el incendio ha sido provocado, y no dar como incendios provocados algunos fuegos que se han desarrollado así por causas naturales, o viceversa.

Esta aplicación también será de utilidad para enseñar a los nuevos o ya consagrados brigadistas cómo puede evolucionar un incendio en una determinada zona y con unas ciertas condiciones.

Uno de los problemas que aparece es que el software WFDS es bastante lento cuando debe procesar todos los cálculos. Si no hubiese sido así, también se podría haber estudiado el comportamiento de incendios que se están produciendo en un momento dado. Su evolución y zona de ataque.

También se puede citar que los parámetros de vegetación introducidos son los que venían indicados en la página web del software WFDS, por lo que están sobre todo referidos a tipos de vegetación norteamericana. Esto quiere decir que la simulación ha sido mucho más costosa, por lo que se deberían hacer estudios en laboratorio e introducir los parámetros obtenidos de la vegetación típica mediterránea.

A partir de lo expuesto durante el proyecto, se pueden ver y extraer conclusiones sobre la potencialidad del uso de herramientas SIG para la toma de decisiones en multitud de ámbitos profesionales.

Otro problema que se puede presentar es que para disponer de la primera aplicación será necesario disponer del software ArcGIS, pero que gracias a poder ejecutarse la segunda aplicación desde cualquier ordenador, se podrá tener en una librería todos los ficheros con la superficie topográfica y la masa arbórea (creados anteriormente con la primera aplicación, y son elementos que no varían en un largo periodo de tiempo), e introducir a partir de la aplicación en JAVA los nuevos condicionantes (que son elementos que varían en un corto periodo de tiempo, y son con los que interesará hacer las pruebas en laboratorio).

Viendo cómo pueden ser de útiles y sencillas las herramientas cartográficas (Sistemas de Información Geográfica, LiDAR, y teledetección) en estos temas, con este proyecto también se ha buscado que desde fuera también se conozcan, y así poder utilizar este tipo de herramientas en cualquier campo, o avanzar más en el descrito durante este proyecto.

### **4.3. INCENDIOS EN TUNELES.**

La energía aportada por la combustión del pavimento por su baja ubicación puede provocar, en algunas circunstancias, un cambio en la dinámica del incendio que aumente la tasa de combustión de los vehículos implicados. Dicho aumento de la potencia del incendio puede llegar a sobrepasar la que se ha utilizado para el diseño de los sistemas de ventilación desencadenando una serie de acontecimientos que pueden llevar a que el incendio quede fuera de control con el consiguiente riesgo para las personas y para las infraestructuras.

Una vez que las instalaciones de extracción de humos dejan de realizar su función de forma efectiva el calor se acumulará en el interior del túnel provocando la combustión de otros vehículos y a su vez de una mayor superficie de pavimento bituminoso.

El empleo de pavimentos de hormigón, en algunos casos extremos, puede ser el factor que permita mantener las condiciones dentro de los valores de diseño permitiendo que las instalaciones de extracción sigan realizando su función hasta que la situación quede controlada.

Las condiciones que permitan la evacuación de los ocupantes y la intervención segura de los equipos de emergencias nunca van a verse empeoradas por la presencia de pavimentos de hormigón al contrario de lo que puede pasar con pavimentos de tipo bituminoso.

Las medidas de seguridad se diseñan para incendios de una potencia limitada pero como se ha podido demostrar en algunos casos se sobrepasan estas potencias y las condiciones empeorarán de forma drástica. En estos casos los márgenes de seguridad con los que cuentan tanto los pasajeros que evacúan como los equipos de salvamento y extinción se reducen al mínimo.

Cualquier factor que contribuya a empeorar las condiciones deberá de eliminarse o limitarse al máximo. Durante los incendios en los túneles de carretera un factor que contribuye a empeorar las condiciones de forma importante es la combustión del betún que contienen los pavimentos asfálticos.

La contribución a la seguridad del hormigón en los incendios de túneles de carretera queda totalmente justificada para los profesionales de los cuerpos de bomberos por lo que recomiendan la aplicación del Real Decreto no solo a los túneles de la red de carreteras del Estado sino también por extensión a los túneles urbanos.

#### 4.4. NUEVOS ESTUDIOS.

Con los estudios realizados se observa que los técnicos que realizan los proyectos desconocen el comportamiento del incendio. Se remarca al final del trabajo con el objetivo de ser muy preciso sobre la problemática planteada.

Para ello vamos a discutir sobre algunos incendios de gran envergadura para valorar que lo comentado hasta ahora puede servir para establecer líneas futuras de investigación.

##### - INCENDIO EN LA ESTACIÓN DE KING'S CROSS.

El 17 de Noviembre de 1987 se produjo un incendio en la estación de King's Cross en Londres, la estación de metro más concurrida de Gran Bretaña. Una cerilla arrojada por un descuido inicia una cadena de eventos que ocasionan el incendio más terrible de la historia de los túneles subterráneos.

A las 19:32 un pasajero notó humo y un resplandor por debajo de los peldaños cuando subía por unas escaleras mecánicas.



**Figura 138. Imágenes del escenario.**

A las 19:35 los pasajeros pulsaron el botón de parada de la escalera pues sale humo a mitad del recorrido. La escalera afectada está construida por una estructura de acero recubierta de chapa de madera con peldaños también de madera de 17 metros de recorrido y 30° de inclinación.



**Figura 139. Imagen de la escalera afectada.**

A las 19:42 llega el primer vehículo de bomberos y jefe de dotación. Realiza una inspección encontrando una pequeña columna de humo y el público entrando y saliendo de la estación con toda normalidad. Solicita una instalación de mangueras para realizar la extinción.

A los tres minutos de la llegada se produce una enorme bola de fuego, gran cantidad de humo y temperaturas de 600° que entran en el vestíbulo superior que produce 31 fallecidos incluido el jefe de dotación.

Con posterioridad al incendio se realiza una investigación que demuestra que las llamas crecen de forma exponencial recorriendo en poco más de un minuto, los últimos 10 metros de escalera y emitiendo una potencia similar a la de una turbina de un avión.

### **INCENDIO DEL ESTADIO DE BRADFORD.**

El 11 de Mayo de 1985 y durante el desarrollo de un partido de futbol un pequeño fuego que empieza debajo de las gradas de madera desencadena una catástrofe en la que fallecen 56 personas y produce serias quemaduras a más de 200 personas.

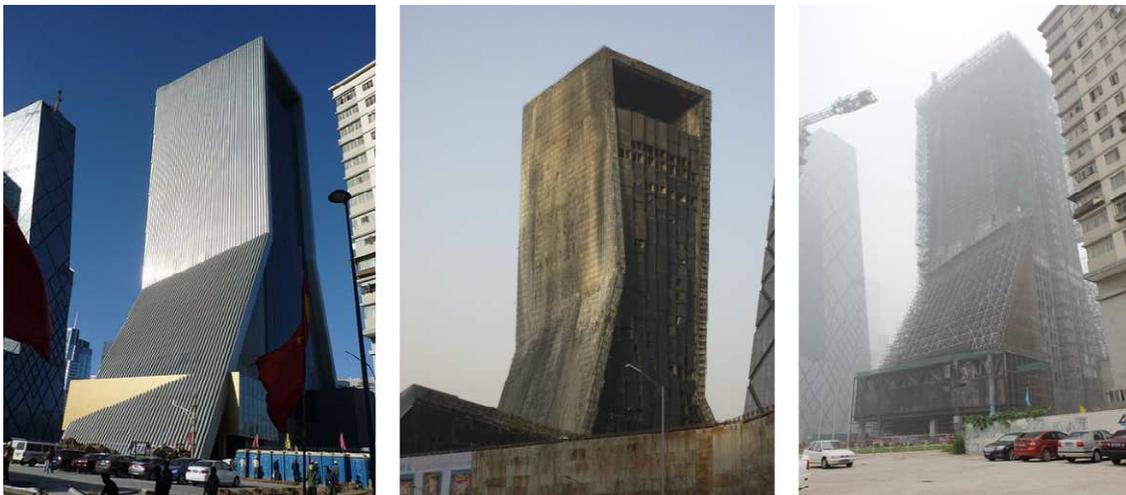
El incendio comienza en unos papeles acumulados debajo de las gradas. El fuego prende en los bancos de madera de forma que nadie puede apagarlo en sus primeros momentos. Sin ningún elemento que sectorice el incendio éste aumenta su potencia gracias a la fácil entrada de aire. En el momento que las llamas llegan a la cubierta y empiezan a circular por debajo de ella el incendio se acelera de forma que en poco más de 2 minutos se han extendido a toda la grada no dando la oportunidad de escapar a muchos espectadores.



**Figura 140. Imágenes que muestran la secuencia del incendio.**

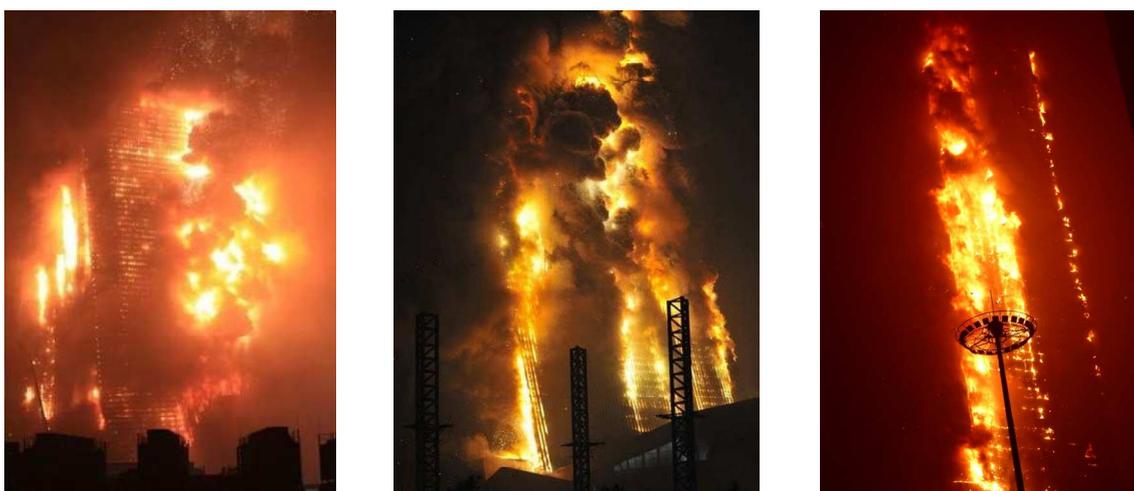
### **INCENDIO DEL HOTEL MANDARÍN EN BEIJING.**

El CCTV es el que la noche anterior a su inauguración y durante el disparo de un castillo de fuegos artificiales comienza.



**Figura 141. CCTV antes y después del incendio y durante su reconstrucción.**

Sobre las 9 de la noche el nuevo edificio de la televisión china que incluía un hotel de lujo y que estaba pendiente de inauguración se incendió. La causa del incendio fue un castillo de fuegos artificiales disparado en su cercanía. En cuestión de 13 minutos el fuego envolvió por completo el edificio de 156 m. de altura resultó destruido pero que no colapsó debido a que su estructura no resultó afectada.



**Figura 142. Tres imágenes del incendio de la torre CCTV de Beijing.**

El edificio estaba desocupado ese día por lo que únicamente murió un miembro de los equipos de emergencias que resultó intoxicado por el humo. El incendio comenzó en la azotea y descendió en 10 minutos por una de las caras de la fachada del edificio debido a las coladas de aluminio. Una vez alcanzó la base el fuego solo tardó 2 minutos en devorar la cara contraria con unas llamaradas que recorrían el edificio en toda su altura.

El edificio ha sido reconstruido ya que la estructura no resultó afectada y a que representaba un icono de la modernidad de la ciudad de Beijing y del estado Chino.

#### **INCENDIO DEL EDIFICIO WINDSOR.**

Incendio del edificio Windsor, el 12 de Febrero del 2005, en el centro económico de Madrid, sufrió un incendio que lo destruyó completamente en poco más de 7 horas. El estudio forense de dicho incendio constituyó uno de los esfuerzos más importantes realizado en un incendio en España por sus importantes consecuencias económicas.

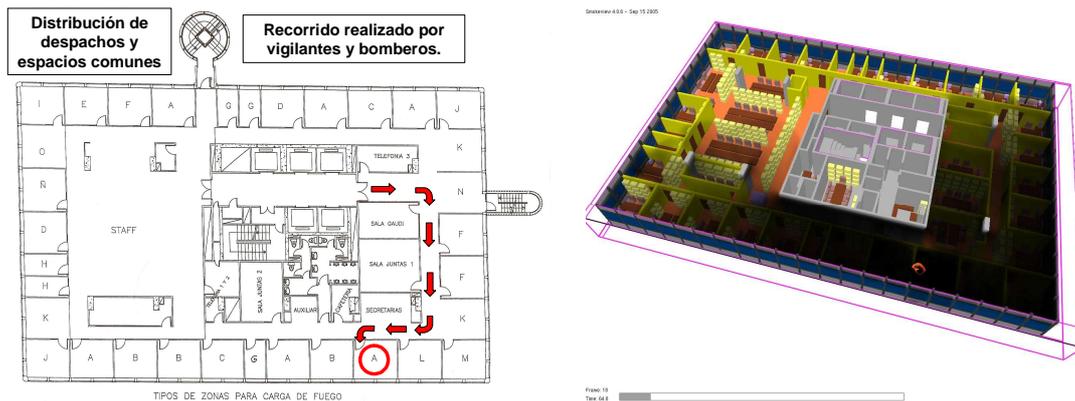
El incendio sorprendió a todos los técnicos de protección contra incendios ya que el edificio cumplía con todas las normativas existentes y sin embargo resultó destruido en su totalidad.

## CONCLUSIONES



**Figura 143. Evolución del edificio, antes, durante y después del incendio.**

El incendio comienza con una llama en la papelera del despacho 2109 que crece en el mueble archivador y en la silla cercana. El fuego no se desarrolla por todo el despacho sino que sube hasta el forjado y se comunica por encima del falso techo a toda la planta. En primer lugar el humo se extiende de forma radial por toda la planta.



**Figura 144. Planta y simulación informática de incendio.**

En cuestión de pocos minutos el humo llega al hall donde se encuentra uno de los dos detectores iónicos de humo y se activa la primera alarma. El fuego queda confinado en el despacho hasta que se rompe la venta instante en el que se desarrolla de forma rápida por la parte superior del falso techo. Por efecto de la caída de trozos de bovedilla el techo flotante fue aumentando su peso a la vez que se quedaba con menor número de tirantes. En un momento dado tanto debido al calor como al peso los anclajes fallaron y el techo fue cayendo en diferentes puntos. De esa manera el fuego entra en los despachos cercanos por la parte superior. Por efecto de la rápida subida de temperaturas las ventanas van rompiendo y alimentando el crecimiento del incendio de manera progresiva por toda la planta.

## **NUEVAS LÍNEAS DE DISEÑO.**

Con estos análisis en el último número de la revista de Seguridad y Medio Ambiente, nos muestra que las nuevas técnicas sobre el diseño, facilitan las alternativas sostenibles para la reducción de elementos contaminantes en la construcción y el desarrollo de proyectos como la aplicación estructural de la madera en edificios de altura.

Es obvio que a favor tiene como puntos de mejora. Se constata la necesidad de que el Código Técnico de la Edificación dé un salto cualitativo, estableciendo objetivos cuantitativos claros, reconociendo la validez de documentos, guías y métodos de cálculo aceptados internacionalmente y aplicando el diseño prestacional al Reglamento de Seguridad Contra Incendios en Establecimientos Industriales, al Reglamento de Protección Contra Incendios y a cualquier otra reglamentación específica.

Pero lo que se matiza desde este estudio es que hay que tener cuidado con los estudios que se encuentran realizando por ejemplo, George Faller, cuando se ponen a explorar las posibilidades para la madera como elemento estructural, que opina que, en un futuro próximo, pueden proliferar construcciones base de madera.

La madera como elementos estructural puede soportar bien las inclemencias del fuego. El problema suele ser que con esa estructura de madera, se acompaña la terminación en las fachadas. Parece que con ello, se alarga la belleza de este material desde el elemento estructural al elemento ornamental. Parece que la madera se tiene que ver desde fuera para que se entienda que el edificio es así.

El problema radica que cuando al personal que marca las líneas de futuro se plantean este problema suelen responder con el discurso de que “Es cierto que la madera puede presentar riesgos adicionales de incendio si no se toman las medidas adecuadas para paliar las amenazas que implica, pero un planteamiento de SCI de normativa prescriptiva no distingue entre medidas tradicionales y otras más innovadoras. El planteamiento se fija en rendimientos, y deja libertad al proyectista para demostrar que se pueden conseguir estos rendimientos con otros materiales planteados. Por este motivo, con el planteamiento se pueden explorar con libertad las posibilidades para la madera como elemento estructural



***Figura 145. Edificio con fachada de madera.***

Es obvio que un planteamiento adecuado puede conseguir rendimientos con otros materiales planteados. Pero es importante también que para ello se deba de conocer de igual manera el comportamiento del incendio que suele ser un enemigo implacable.

## CAPITULO 5

---

### 5. DISCURSIÓN Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.

Como toda Tesis Doctoral debe ser considerada como un punto y seguido en un proceso de investigador. Surgen diferentes aspectos que pueden y deben dar a nuevas líneas de investigación que podrán ser abordadas por el propio autor de esta Tesis Doctoral, o bien, por otros investigadores, que tomen esta línea como referencia para el inicio de su actividad investigadora. Es, por tanto, el objetivo claro de este apartado el establecer unas líneas básicas de futuras investigaciones como referencia a los futuros trabajos.

#### ASPECTOS GENERALES

- La modelización permite comprobar los principios físicos y químicos que rigen la dinámica del fuego en los incendios de interior. Se abordan los efectos más importantes que afectan tanto a sólidos y líquidos como a los gases y la interacción entre ellos.
- Mediante la formación se intenta capacitar a los profesionales de bomberos para que sepan identificar y valorar los efectos físicos ocurridos en el interior del lugar incendiado, proceso que denominan “leer los signos del incendio” y que será un elemento importante a la hora de reconstruir la secuencia de eventos que han acontecido en el lugar del siniestro.
- Con estos fenómenos físicos y químicos hemos conseguido entender una serie de efectos que se producen en los incendios de interior como son el Flashover y los fuegos dominados por el viento, que pueden provocar la extensión rápida del fuego.
- Como línea futura de trabajo se sugiere comenzar a analizar incendios ocurridos a lo largo de estos últimos años en los que ha habido un elevado número de víctimas y en los que la cuantía de pérdidas materiales ha sido muy elevada.
- Las simulaciones se han realizado con el programa FDS que es un programa muy amplio pero poco amigable y de uso solo por personas muy entrenadas en este proceso. Un programa de similares características, amigable y fácil de utilizar por los profesionales de bomberos en el propio proceso de formación o en la propia acción para salir de dudas sobre algún aspecto de cómo va a desarrollarse el incidente en curso, podría ser útil.

- El principal problema que nos encontramos cuando iniciamos una simulación es la introducción de geometría real con exactitud suficiente para que los resultados sean fiables. En esta tesis hemos abordados algunos problemas resolviendo la introducción de estos datos de estas geometrías de forma lo más automática posible al programa FDS. Existen muchos más procedimientos de obtención de geometría y se están desarrollando otros muchos instrumentos de medida rápidos y fiables. Se deberá estudiar cómo es la estructura de la geometría proporcionada por estos sistemas de medida para su exportación al programa FDS o a cualquier otro que resulte de aplicación.
- En la mayoría de los casos la geometría que obtienen los sistemas de medida es tan compleja como la realidad, sin embargo, la simplificación de esta geometría puede acelerar notablemente el cálculo. En esta tesis se han abordado algunas simplificaciones, y continuando en esta línea será necesario localizar de forma automática otras superficies que no correspondan a superficies planas, para su parametrización e introducción automática en el archivo de datos de simulación.
- La introducción de la cartografía mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica facilita de forma sencilla y prácticamente automática los cálculos realizados por el software WFDS, aunque estos siguen siendo lentos para realizar un estudio real en el momento, como líneas futuras se podría estudiar el comportamiento de la cartografía mediante análisis topológicos para lograr que los cálculos sean más rápidos y automatizarlo todo ello en un módulo del propio software, sin necesidad de disponer de programas comerciales de SIG.

### **INCENDIO EN LA ESTACIÓN DE KING'S CROSS.**

- Se observa que se produce uno de los fenómenos estudiados, la transmisión de calor por radiación en el escenario del incendio, que produce el desarrollo del incendio al ritmo muy acelerado.
- El proceso continua por la alimentación central de aire procedente de la zona inferior de la escalera forzada por el efecto chimenea del conjunto de la galería inclinada.
- Como futura línea de trabajo se recomienda analizar el fenómeno que se produjo en la estación de King's Cross en Londres. Efecto que se caracteriza por que el fuego circula por encima de los peldaños y porque calienta la zona interior de la escalera por radiación y convección acelerando el incendio de forma continúa.

### **INCENDIO EN EL ESTADIO DE BRADFORD.**

- Es muy importante las características geométricas del recinto donde se desarrolla el incendio.
- La distribución del combustible de forma uniforme exponiendo una gran superficie a la radiación de las llamas juega un papel muy importante en el desarrollo de la combustión.
- La circulación de las llamas por el edificio producen una irradiación sobre los combustibles que se encuentran debajo a cota de suelo.
- La circulación del elemento, permite que los gases quemados salgan del recinto y fuerzan la entrada de aire sin límite ninguno.
- La futura línea de trabajo propuesta es realizar un estudio sobre el proceso que sucedió en el estadio y para que esa combustión llegara a crecer sin límites y que en poco más de un minuto y medio, el fuego recorriera los 100m de las gradas sin posibilidad de extinción por la fuerza adquirida.

### **.INCENDIO DEL HOTEL MANDARÍN EN BEIJING.**

- La importancia de los materiales con que se impermeabilizan las fachadas y que recorren todo el edificio por el interior de los muros cortinas.
- El propio material de las láminas que componían la parte exterior del muro cortina. Estaban compuestas de un material no inflamables pero si combustible. Estas láminas dispuestas verticalmente tuvieron mucho que ver con el desarrollo del incendio.
- La configuración geométrica de la fachada, también favorece al progreso de las llamas, contribuyendo a un avance muy superior al tiempo de combustión lineal de los paneles exteriores.
- Conforme el fuego iba recorriendo las fachadas iba penetrando en las plantas del edificio que al estar todavía en construcción no contenía todo el mobiliario y que evitó que la estructura interior resultara afectada de gravedad.
- La línea futura de trabajo pasa por la investigación de los factores que provocaron que un edificio de altura de nueva construcción resultara destruido en tan poco tiempo, cuando posiblemente después de su análisis se valore que si no se hubieran conjugando ese cumulo de circunstancia hubiera sido un incidente fácilmente controlable.

### **INCENDIO DEL EDIFICIO WINDSOR.**

- Durante la primera fase del incendio, el fuego progresa sin problemas de alimentación de oxígeno debido a que el volumen de aire en toda la planta es muy grande. Si sucede que disminuye la cantidad de oxígeno lentamente.
- La rotura del cristal del despacho donde se ha producido el incendio produce una variación de la tasa de generación de calor.
- Cuando se rompe la primera ventana, la combustión experimenta un progreso muy rápido que impide que los bomberos puedan actuar.
- Una línea de trabajo propuesta para el futuro será estudiar el fenómeno que sucede para que en tan solo 100 segundos el incendio se desarrolle por toda la planta.
- Otra línea de investigación será como influye la falta de sectorización y la acumulación de calor en la parte superior de la planta.
- Necesario investigar como repercute el hecho de que los materiales combustibles estuvieran repartidos por toda la superficie de forma casi homogénea y ofreciendo una superficie específica grande.

### **INCENDIO FORZADOS POR EL VIENTO.**

- Es un fenómeno al que los bomberos tienen que enfrentarse en muchas más ocasiones que a un flashover o un backdraft y que sin embargo no se conoce por no encontrarse en la bibliografía habitual.
- Los graves daños que genera en el interior de los locales este tipo de incendios han confundido a los técnicos en más de una ocasión ya que han sido confundidos con incendios con presencia de acelerantes.
- El factor desencadenante de este tipo de incendio es el viento, que si genera una circulación interior de gases provocará una multiplicación de la potencia del incendio. Se puede pasar fácilmente de 3 o 5 megavatios de un incendio de interior normal a una potencia de 20 a 30 MW. Las temperaturas también aumentarán ya que la llama cuenta con todo el comburente que necesita y optimizará la combustión.
- La diferencia entre un incendio normal de interior y un incendio forzado por el viento es similar a la que hay entre una llama que arde por difusión y otra que arda por premezcla. En esta última la combustión desprende más calor y las temperaturas son mucho mayores. Una consecuencia será que los gases y humos serán menos espesos ya que arderán en su totalidad.

- Al ser un incendio forzado turbulento, y no uno laminar, las llamas ocuparán todo el espacio por donde circulen, lo que producirá una destrucción de elementos constructivos hasta el mismo piso, lo que podrá confundirnos con la presencia de combustible a la altura del suelo.
- Las llamas recorrerán distancias importantes por dentro del local extendiendo el incendio a otras estancias o incluso a otros pisos o locales.
- Otra de las condiciones importantes para que este tipo de incendios se desarrolle es que antes del establecimiento de la corriente de gases interior, tiene que estar en fase de combustión generalizada probablemente tras un flashover. Se puede desencadenar tras la apertura de los bomberos o bien por colapso espontaneo de alguna ventana o persiana. En muchas ocasiones representa un peligro para los equipos de extinción y un gran inconveniente para su control.
- La línea de investigación de futuro se trata de la búsqueda de nuevos agentes multiplicadores como es el viento, en este caso en el interior de los edificios.

#### **IMPLOSIÓN DE VENTANAS POR SUCCIÓN EN HUECOS DE ESCALERAS.**

- Se trata de un fenómeno que afecta en la rotura de cristales en los núcleos de comunicación vertical como son las escaleras. Los vidrios rotos aparecen en el interior de una zona que no ha sido afectada por el fuego y a cierta distancia del incendio. Se puede sospechar que alguien ha roto deliberadamente dicha ventana y puede hacer llegar a conclusiones erróneas.
- Línea de investigación futura será analizar el fenómeno que produce la rotura de los cristales en las ventanas de las escaleras. Saber cómo se comportan los gases calientes, estudiar como interactúa la temperatura con los materiales y valorar la disminución del volumen de gases. Se trata de un fenómeno similar al que se produce en las neveras cuando las abrimos por segunda vez tras la entrada de aire a temperatura ambiente.

#### **COMPORTAMIENTO ERUPTIVO DE UN INCENDIO FORESTAL.**

- En ocasiones los incendios forestales experimentan una aceleración y se convierten en auténticas tormentas de fuego que recorren cientos de metros en cuestión de segundos. Este tipo de fuegos han causado numerosos fallecimientos incluso de personal experimentado y con equipos y medios adecuados.

- Una línea de investigación futura pasa por estudiar como repercute la presencia de viento en el desarrollo del incendio, a veces el viento debe de ir acompañado de otros factores para que adquiera la virulencia el incendio eruptivo.
- Una segunda línea de investigación será el análisis de la sequedad y la disposición del combustible para la evolución de este tipo de siniestros.
- La tercera línea de investigación futura será la búsqueda de la escala, para conseguir una mejor geometría para los diferentes tipos de parámetros, combustible, velocidad de viento, los vientos de ladera, los diferentes desniveles, etc.

### **ASPECTOS DE DISEÑO.**

- Una futura línea en el terreno de diseño pasa por que se regule, impulse y promocióne la formación en ingeniería de Seguridad Contra Incendios como base necesaria para el desarrollo de esta rama específica de la ingeniería.
- Como resumen matizar que el Diseño ha avanzado a gran velocidad en los últimos años, con una implantación desigual en los distintos países, tanto a nivel práctico como normativo. El futuro del diseño es ciertamente esperanzador y esta disciplina se afianzará tan pronto como la aplicación de los códigos y normas técnicas de reconocido prestigio se generalice a nivel internacional y la formación de profesionales de la ingeniería de Protección Contra Incendios se consolide.

## BIBLIOGRAFÍA.

---

1. Navarrete Ruiz, J. Emergencias 112, número 86, Marzo 2011.
2. Madrzykowski, D. & Kerber S. "Fire Fighting Tactics Under Wind Driven Conditions: Laboratory Experiments. January 2009.
3. Madrzykowski, D. & Kerber S. "Fire Fighting Tactics Under Wind Driven Conditions: 7-Story Building Experiments. April 2009.
4. Capote, J.A.; Alvear, D.; Abreu, O.V.; Espina, P. "The influence of the Exterior Temperature on Natural Venting in Large Atria". Informes de la Construcción, Vol. 60, 511, 49-57, Julio-septiembre 2008.
5. Barowy, A., and Madrzykowski, D. "Simulation of the Dynamics of a Wind-Driven fire in a Ranch-Style House-Texas". National Institute of Standards and Technology. January 2012.
6. Hall, John R., "High-rise Building Fires". National Fire Protection Association, Fire Analysis and Research Division, December 2011.
7. Madrzykowski, D., and Walton, W.D., "Cook County Administration Building Fire, 69 West Washington, Chicago, Illinois, October 17, 2003: Heat Release Rate Experiments and FDS Simulations". National Institute of Standards and Technology, July 2004.
8. NIOSH F99-01, Three firefighters die in a 10-Story High-Rise Apartment Building – New York, NIOSH Firefighter Fatality Investigation and Prevention Program, Morgantown, WV., August 1999.
9. NIOSH F2001-33, High-Rise Apartment Fire Claims the Life of One Career Firefighter (Captain) and Injures Another Career Firefighter (Captain) – Texas, NIOSH Firefighter Fatality Investigation and Prevention Program, Morgantown, WV., October 2002.
10. NFPA 1051. "Standard for Wildland Firefighter Professional Qualifications". National Fire Protection Association, 1 Batterymarch Park, Quincy, MA. 2007 ed.
11. NFPA 1001, Standard for Firefighter Professional Qualifications, National Fire Protection Association, 1 Batterymarch Park, Quincy, MA. 2008 ed.
12. NFPA 1021, Standard for Fire Officer Professional Qualifications, National Fire Protection Association, 1 Batterymarch Park, Quincy, MA. 2003 ed.
13. Andrews, P.L.; Bevins, C.D., Seli, R.C., BehavePlus fire modeling system, version 4.0: User's Guide. USDA, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RMRS-GTR-106WWW, July 2008.
14. Essentials of Fire Fighting, International Fire Service Training Association, Oklahoma State University, Stillwater, OK 5th ed., 2008.

15. Firefighter's Handbook, Essentials of Firefighting and Emergency Response, 2nd ed. Thomson Delmar Learning, Clifton Park, NY 2004.
16. Fundamentals of Firefighter Skills, Jones and Bartlett Publishers, Sudbury, MA., 2004.
17. Report 05-0000531." National Firefighter Near-Miss Reporting System. 18 September 2005. 11. September 2008 <http://www.firefighternearmiss.com/goglemini/h05-0000531.html>
18. Report # 06-0000164." "National Firefighter Near-Miss Reporting System. 15 March 2006. 11. September 2008 <http://www.firefighternearmiss.com/goglemini/h06-0000164.html>
19. "Report # 06-0000186." National Firefighter Near-Miss Reporting System. 24 March 2006. 11. September 2008 <http://www.firefighternearmiss.com/goglemini/h06-0000186.html>
20. Report # 06-0000501." National Firefighter Near-Miss Reporting System. 4 October 2006. 11. September 2008 < <http://www.firefighternearmiss.com/goglemini/h06-0000501.html>
21. Report # 07-0000805." National Firefighter Near-Miss Reporting System. 19 March 2007. 11. September 2008 <http://www.firefighternearmiss.com/goglemini/h07-0000805.html>
22. "Report # 07-0000960." National Firefighter Near-Miss Reporting System. 14 June 2007. 11. September 2008 <http://www.firefighternearmiss.com/goglemini/h07-00960.html>
23. Madrzykowski, D. and Vettori, R. "Simulation of the Dynamics of the Fire at 3146 Cherry Road NE Washington D.C., May 30, 1999," National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, NISTIR 6510 2000.
24. Madrzykowski, D, Forney, G. and Walton D. "Simulation of the Dynamics of a Fire in a Two-Story Duplex - Iowa, December 22, 1999," National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, NISTIR 6854 2002.
25. Vettori, R., Madrzykowski, D. and Walton, W. "Simulation of the Dynamics of a Fire in a One-Story Restaurant -- Texas, February 14, 2000," National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, NISTIR 6923 2002.
26. Madrzykowski, D and Walton, W. "Cook County Administration Building Fire, 69 West Washington, Chicago, Illinois, October 17, 2003: HRR Experiments and FDS Simulations," NIST, Gaithersburg, MD, NIST-SP 1021-2004.
27. McGrattan, K., Bouldin, C. and Forney, G. "Computer Simulation of the Fires in the World Trade Center Towers. Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster." NIST, Gaithersburg, MD, NIST NCSTAR 1-5F 2005.
28. Grosshandler, W., Bryner, N. Madrzykowski, D. and Kuntz, K. "Report of the Technical Investigation of the Station Nightclub Fire," National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, NIST NCSTAR 2 2005.

29. N. Bryner, P. Fuss, B. Klein, and A. Putorti, "Technical Study of the Sofa Super Store Fire - South Carolina, June 18, 2007," National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2011.
30. D. Drysdale, "An Introduction to Fire Dynamics", 2nd ed. West Sussex, England: John Wiley & Sons, 1998.
31. McGrattan, K.; Bouldin, C. and Forney, G. "Computer Simulation of the Fires in the World Trade Center Towers," National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, U.S.A., NCSTAR 1-5F September 2005.
32. Chan, T.K. and Napier, D.H. "Smoldering and Ignition of Cotton Fibers and Dust", Fire Prevention Science and Technology, no. 4, pp. 13-23, February 1973.
33. National Institute of Standards and Technology. (2011, April) Test Type: Cone Calorimeter, Test Number: t5603, Description File: t5603. [Online].  
<http://www.fire.nist.gov/fastdata/data/t5603/t5603.htm>
34. Watanabe, J. and Takeyoshi, T. "Experimental Investigation into Penetration of a Weak Fire Plume into a Hot Upper Layer," Journal of Fire Sciences, vol. 22, pp. 405-420, September 2004.
35. Ogden Manufacturing Company. (2011, April) Engineering & Technical. [Online].  
<http://www.ogdenmfg.com/pdf/tech9.pdf>
36. Spearpoint, M. "Predicting the Ignition and Burning of Wood in the Cone Calorimeter Using an Integral Model," National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, GCR 99-775 1999.
37. Tewarson, A. "Generation of Heat and Gaseous, Liquid, and Solid Products in Fires," in the SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Bethesda, MD, U.S.A.: National Fire Protection Association, 2008, ch. 3-3, pp. 3-142.
38. Forest Products Laboratory., "Chapter 04: Moisture Relations and Physical Properties of Wood," in Centennial edition of Wood handbook, Wood as an Engineering Material. Madison, WI, USA: Forest Products Laboratory, 2010, p. 508.
39. Engineering Toolbox. (2011, April) The Engineering Toolbox.  
[http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d\\_429.html](http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html)
40. United States Department of Energy. (2011, September) Energy Savers: Loose-Fill Insulation.  
[http://www.energysavers.gov/your\\_home/insulation\\_airsealing/index.cfm/mytopic=11650](http://www.energysavers.gov/your_home/insulation_airsealing/index.cfm/mytopic=11650)
41. Wilkes, G. "Heat Insulation". U.S.: John Wiley & Sons, 1950.

42. Jones, B.H. "Performance of Gypsum Plasterboard Assemblies Exposed to Real Building Fires," University of Canterbury, Christchurch, NZ, 2001.
43. National Institute of Standards and Technology. (1990, December) Test Type: Cone Calorimeter, Test Number: 11, Description File: f206.  
<http://fire.nist.gov/fastdata/docs/sp199124.htm>
44. Capote, J.A., Alvear, D. Lázaro M. y Espina, P. "Dinámica del Incendio en Edificios mediante Modelado y Simulación Computacional: CFAST, OZONE, FDS". Grupo GIDAI. Universidad de Cantabria. Revista Cuadernos de Seguridad, Vol. 58: 58-62. 2005
45. McGrattan, K. y otros. "Fire Dynamics Simulator (Version 5). Technical Reference Guide. National Institute of Standard and Technology NIST. 2010.
46. Soubra, Omar-Pierre, y Lorenzo, Alfredo. "Aplicaciones de láser escáner 3D Trimble-MENSI en estudios de accidentes y de criminología (forensics)". VIII Congreso nacional de Topografía y Cartografía. TOPCART 2004. Madrid, 19-24 octubre 2004.
47. HERRÁEZ, J. "Instrumentos modernos en topografía", Universidad Politécnica de Valencia, 1993.