



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática

Desarrollo de un Sistema de Gestión y Seguimiento de Mercancías Peligrosas

Autor:

Cuervo Fernández, Diego

Tutores:

Barriga Navarro, Carlos
Pérez Rueda, M^a Ángeles

Dpto. Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Expresión Gráfica en la Ingeniería, Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Ingeniería Mecánica e Ingeniería de los Procesos de Fabricación

Valladolid, julio de 2014

Agradecimientos:

A mis padres y mi hermana, por su apoyo incondicional, su paciencia y por acompañarme en cada una de las etapas de este camino.

A mi novia Noelia, por permanecer a mi lado y saber comprenderme y darme ánimos cuando lo he necesitado.

A mis amigos, por todos los momentos compartidos, que me han ayudado a descansar y desconectar del trabajo cuando me ha hecho falta.

A todos los profesores y compañeros que he tenido durante estos cuatro años, de los que tanto he aprendido y sin los que no habría conseguido llegar hasta aquí.

A mis tutores Carlos Barriga Navarro y María Ángeles Pérez Rueda por la confianza depositada en mi y por haberme dado la oportunidad de desarrollar este proyecto que me ha hecho crecer profesional y personalmente.

A todos vosotros, MUCHAS GRACIAS, sin vosotros esto no habría sido posible.

*“Tanto si crees que puedes hacerlo como si no,
en ambos casos tienes razón”*

Henry Ford

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN: CONCEPTO DE RIESGO.	3
1.2. MERCANCÍAS PELIGROSAS.....	7
1.3. OBJETIVOS DEL PROYECTO.	10
1.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.	11
1.5. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.	12
CAPÍTULO 2: MERCANCÍAS PELIGROSAS Y RIESGOS AMBIENTALES.	15
2.1. INTRODUCCIÓN.....	17
2.2. EL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS PELIGROSAS.	17
2.2.1. <i>Mercancías peligrosas.</i>	17
2.2.1.1. Definiciones.....	17
2.2.1.2. Clasificación según el ADR/RID.....	18
Clase 1. Materias y objetos explosivos.....	20
Clase 2. Gases.....	23
Clase 3. Materias líquidas inflamables.	25
Clase 4.1. Materias sólidas inflamables.....	27
Clase 4.2. Materias que pueden experimentar inflamación espontánea.....	29
Clase 4.3. Materias que al contacto con el agua desprenden gases inflamables.	31
Clase 5.1. Materias comburentes.....	32
Clase 5.2. Peróxidos orgánicos.	33
Clase 6.1. Materias tóxicas.....	34
Clase 6.2. Materias infecciosas.....	36
Clase 7. Materiales radiactivas.....	38
Clase 8. Materias corrosivas.....	39
Clase 9. Materias y objetos peligrosos diversos.....	41
2.2.1.3. Otras clasificaciones.....	42
2.2.2. <i>El transporte.</i>	46
2.2.2.1. Comparativa de siniestralidad entre el transporte de mercancías comunes y el de mercancías peligrosas.....	47
Transporte por Carretera.....	48
Transporte por ferrocarril.....	48
2.2.3. <i>Producción, consumo y recorridos en España.</i>	48
2.2.3.1. Recorridos medios y unidades de tráfico.....	50
2.2.3.2. Localización de los centros más importantes de producción y consumo de materiales peligrosos en España.....	51
Refinerías y terminales de oleoductos.....	51
Puertos.....	52

Industrias Petroquímicas y Nucleares.	52
2.2.4. Marco Normativo y Recomendaciones.	52
2.2.4.1.- Organismos.	53
2.2.4.2.- Normativa aplicable al transporte de mercancías peligrosas.....	54
2.2.4.3.- Recomendaciones de la ONU para el transporte de mercancías peligrosas	58
2.2.5. Etiquetados y señalización de peligro.	59
2.2.5.1. Etiquetas de peligro.....	59
Código ADR/RID (UNECE, 2011)	59
2.2.5.2. Panel Naranja.	61
2.2.5.3. Número de identificación de la materia (Número ONU).....	63
2.2.5.4. Número de identificación de peligro	64
2.3. LOS RIESGOS.	65
2.3.1. Definiciones.	65
2.3.2. Modelos conceptuales de riesgo.....	67
2.3.3. Análisis de riesgos.....	69
2.3.3.1. Métodos analíticos.	70
2.3.3.2. Métodos deterministas.	71
2.3.3.3. Métodos heurísticos.....	74
2.3.4. Peligros asociados a las mercancías peligrosas.....	75
2.3.5. Delimitación espacial del riesgo	76
CAPÍTULO 3: GENERACIÓN DE MAPAS DE RIESGO MEDIANTE REGRESIÓN LOGÍSTICA.....	79
3.1. INTRODUCCIÓN.....	81
3.2. MODELO CONCEPTUAL.....	81
3.2.1. Determinación de la probabilidad de accidente P_{HG}	82
3.2.2. Determinación de la gravedad G	88
3.2.2.1. Peligrosidad asociada al tipo de accidente (P_e).	88
3.2.2.2. Peligrosidad intrínseca asociada a la mercancía (R_{mp}).....	89
3.2.2.3. Vulnerabilidad del medio (V).....	90
3.2.2.4. Formulación de la gravedad.	92
3.2.3. Determinación del riesgo.....	93
3.2.4. Flujo de trabajo para la determinación del riesgo.....	94
3.3. GENERACIÓN DEL SIG (SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA).....	95
3.3.1. Características de los mapas.	95
3.3.2. Origen de la información geográfica.....	96
3.3.3. Datos de entrada para el modelo de regresión logística.....	98

3.3.4. Desarrollo del modelo de regresión logística.....	99
3.3.5. Generación de mapas de vulnerabilidad.	100
3.3.6. Generación de mapas de gravedad.	102
3.3.7. Obtención de los mapas de riesgo.	104
3.4. ANÁLISIS DE RIESGOS COMO PUNTO DE PARTIDA DEL PRESENTE PROYECTO.....	105
CAPÍTULO 4: TRATAMIENTO NUMÉRICO DE MAPAS EN MATLAB.....	107
4.1. INTRODUCCIÓN.....	109
4.2. REQUISITOS DE LA APLICACIÓN.....	109
4.2.1. Software específico para SIG.	110
4.2.2. Lenguaje de propósito general.	111
4.2.3. Una opción intermedia: MATLAB.	112
4.3. SOFTWARE MATLAB.	112
4.3.1. Introducción a MATLAB.	112
4.3.2. Características principales de MATLAB.....	113
4.3.3. Elección del entorno MATLAB para la aplicación.....	114
4.3.3.1. Lenguaje de programación como herramienta de transformación.....	115
4.3.3.2. Principales ventajas e inconvenientes de MATLAB como entorno de desarrollo.	115
4.4. TRATAMIENTO DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	118
4.4.1. Sistema de coordenadas UTM.	118
4.4.2. Mapa de Castilla y León en coordenadas UTM.	121
4.4.3. Tratamiento de mapas en MATLAB.	122
4.5. FUNCIONES DE TRATAMIENTO DE IMAGEN.....	125
4.5.1. Imágenes como matrices en MATLAB.	125
4.5.2. Funciones de transformación de imágenes.	126
4.5.2.1. Paso de imagen binaria a escala de grises.....	126
4.5.2.2. Paso de imagen en escala de grises a color.....	127
4.5.2.3. Paso de imagen en color a escala de grises.....	127
4.5.2.4. Paso de imagen en escala de grises a binaria.....	127
CAPÍTULO 5: IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO PARA EL CÁLCULO DE RUTAS.....	129
5.1. INTRODUCCIÓN A LA PLANIFICACIÓN DE RUTAS.....	131
5.1.1. Planificación de rutas en dispositivos GPS.....	131
5.1.2. Planificación de rutas en el presente proyecto.....	132
5.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.	133

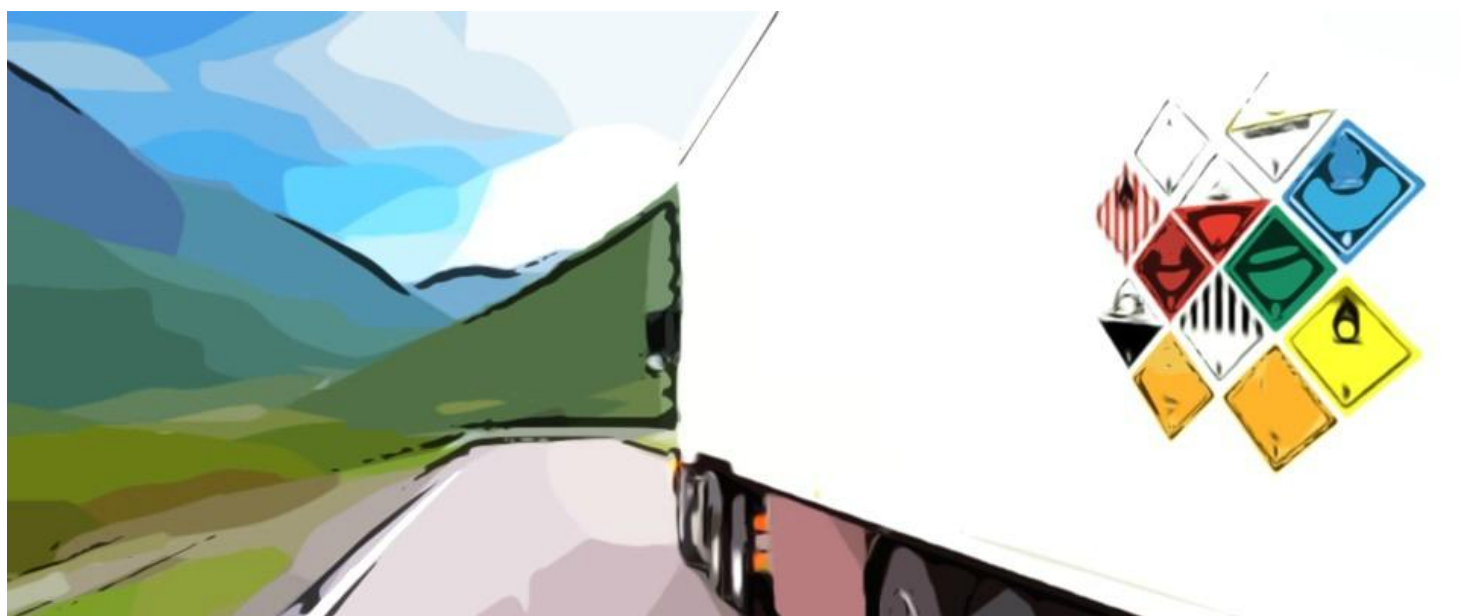
5.3. CONSIDERACIONES GENERALES PREVIAS AL PROBLEMA.....	133
5.3.1. Información de partida.....	134
5.3.2. Sistema de coordenadas para las rutas.....	135
5.3.2.1. Sistema de coordenadas UTM para rutas.....	136
5.3.2.2. Sistema de coordenadas de filas y columnas para rutas.....	137
5.3.3. Operadores válidos en la expansión de nodos.....	138
5.4. ALGORITMOS DE BÚSQUEDA.....	140
5.4.1. Introducción a la resolución de problemas mediante búsqueda.....	140
5.4.2. Tipos de algoritmos de búsqueda.....	142
5.4.3. Criterios de bondad de los algoritmos.....	142
5.4.4. Criterios de coste de las rutas.....	143
5.4.5. Posibilidades de búsqueda para la planificación de rutas.....	143
5.4.5.1. Búsqueda en primero en anchura.....	143
5.4.5.2. Búsqueda de coste uniforme.....	145
5.4.5.3. Búsqueda primero en profundidad.....	147
5.4.5.4. Búsqueda voraz.....	149
5.4.5.5. Búsqueda A*.....	151
5.5. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO A*.....	153
5.5.1. Estructura de los nodos del árbol de búsqueda.....	154
5.5.2. Inicialización de variables.....	155
5.5.3. Bucle principal del algoritmo.....	156
5.5.4. Expansión de nodos.....	159
5.5.5. Inserción en lista enlazada.....	161
5.5.6. Otras funciones auxiliares para el algoritmo de planificación de rutas.....	163
5.5.6.1. Cálculo de la distancia entre nodos.....	164
5.5.6.2. Prueba de éxito entre nodos.....	164
5.5.6.3. Selección de velocidad en función del tramo.....	164
5.5.6.4. Función para mostrar la ruta calculada sobre un mapa.....	166
5.6. EJEMPLO DE EJECUCIÓN DEL ALGORITMO.....	166
5.7. DIAGRAMA RESUMEN DEL ALGORITMO DE PLANIFICACIÓN DE RUTAS.....	170
CAPÍTULO 6: ALGORITMO DE SEGUIMIENTO DE RUTAS EN TIEMPO REAL.....	173
6.1. INTRODUCCIÓN.....	175
6.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	175
6.3. INFORMACIÓN DE PARTIDA.....	176

6.3.1. Implementación de la ruta.	177
6.3.2. Implementación de la posición actual.	178
6.3.3. Implementación de la velocidad y el tiempo.	179
6.4. APROXIMACIONES ADOPTADAS.	179
6.4.1. Máximos errores cometidos con la aproximación adoptada.	180
6.4.2. Justificación de la aproximación adoptada.	180
6.5. ALGORITMO DESARROLLADO.	181
6.5.1. Entradas y salidas de la función.	182
6.5.2. Preparación para el bucle del algoritmo.	182
6.5.3. Bucle principal del algoritmo.	185
6.5.4. Preparación de las variables de salida de la función.	185
6.6. EJEMPLO DE EJECUCIÓN DEL ALGORITMO.	186
CAPÍTULO 7: SIMULADOR DE VEHÍCULOS EN TIEMPO REAL.	191
7.1. INTRODUCCIÓN.	193
7.2. ESQUEMA BÁSICO DE LA APLICACIÓN.	193
7.3. NODOS ORIGEN Y DESTINO DEL MAPA DE CASTILLA Y LEÓN.	194
7.3.1. Municipios seleccionados por importancia demográfica o administrativa.	194
7.3.2. Municipios seleccionados porque representan el límite con otros territorios.	197
7.3.3. Lista total de nodos de comunicación.	199
7.3.4. Función para mostrar la red de comunicación.	200
7.3.5. Implementación de la lista de nodos en el algoritmo de cálculo de rutas.	202
7.4. GESTIÓN DE RUTAS EN FICHEROS.	203
7.4.1. Justificación.	203
7.4.2. Rutas del presente proyecto como rutas de transporte de mercancías peligrosas.	204
7.4.3. Funciones para la gestión de ficheros de rutas.	206
7.4.3.1. Función para generar todas las combinaciones posibles entre nodos de la red.	206
7.4.3.2. Función para la planificación de todas las rutas entre nodos de la lista.	208
7.4.3.3. Función para el almacenamiento de rutas en ficheros.	209
7.4.3.4. Función para leer la ruta a partir de un fichero.	209
7.4.3.5. Función para cargar una tabla para indexar rutas.	210
7.4.4. Estructura de información obtenida.	211
7.5. GENERACIÓN DE VEHÍCULOS.	212
7.5.1. Estructura de datos a generar.	212
7.5.2. Función para crear un vehículo simulado.	213

7.5.3. Simulación de varios camiones en tiempo real.....	215
7.5.3.1. Diagrama de flujo de la aplicación.....	215
7.5.3.2. Función principal del simulador de camiones en tiempo real.....	217
CAPÍTULO 8: GENERACIÓN DE MAPAS DE RIESGO Y LISTAS DE CONFLICTOS.	221
8.1. INTRODUCCIÓN.....	223
8.2. DIAGRAMA DE ENTRADAS Y SALIDAS DE LA APLICACIÓN.	223
8.3. DESARROLLO TEÓRICO DEL ALGORITMO.	224
8.3.1. Algoritmo para generar de listas de conflictos.....	227
8.3.2. Algoritmo para actualizar el mapa RGB.	229
8.4. CONSIDERACIONES PREVIAS A LA IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO.....	229
8.4.1. Selección de radios de influencia y representación.	229
8.4.2. Selección de umbrales de riesgo y colores.	231
8.4.3. Gama de colores del mapa.	232
8.4.4. Mapa resultante de la elección de parámetros.	232
8.5. IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB DEL ALGORITMO.....	233
8.6. FUNCIONES AUXILIARES EN LA GENERACIÓN DEL MAPA DE RIESGO.	241
8.6.1. Función para calcular el riesgo de un vehículo.	241
8.6.2. Función para selección el color.	241
CAPÍTULO 9: INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO DE LA APLICACIÓN.	243
9.1. INTRODUCCIÓN.....	245
9.2. INTERFAZ DE CONTROL DE LA APLICACIÓN.....	245
9.2.1. Panel de selección del número de camiones.....	246
9.2.2. Panel de selección del tiempo de actualización.....	247
9.2.3. Panel de selección de los porcentajes de grupos de mercancías peligrosas.....	248
9.2.4. Botón de inicio de la simulación.	250
9.2.4. Aspecto global de la interfaz.	250
9.3. INTERFAZ PARA MOSTRAR EL MAPA Y LAS LISTAS.	251
9.3.1. Implementación de las herramientas para la exploración del mapa.	253
9.3.2. Implementación de las listas de conflictos.	254
9.3.3. Implementación de los cursores en el mapa.....	256
9.3.4. Aspecto global de la interfaz.	259
CAPÍTULO 10: CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS.	261

10.1. INTRODUCCIÓN.....	263
10.2. CONCLUSIONES.....	264
10.3. FUTUROS DESARROLLOS.....	267
CAPÍTULO 11: ESTUDIO ECONÓMICO DEL PROYECTO.....	269
11.1. INTRODUCCIÓN.....	271
11.2. COSTES DEL PROYECTO.....	271
<i>11.2.1. Costes de personal.....</i>	<i>271</i>
11.2.1.1. Horas anuales estimadas.....	272
11.2.1.2. Coste anual del ingeniero.....	272
11.2.1.3. Coste horario del ingeniero.....	273
11.2.1.4. Número de horas efectivas de trabajo dedicadas al proyecto.....	273
11.2.1.5. Coste total de personal en el proyecto.....	273
<i>11.2.2. Coste del material.....</i>	<i>274</i>
11.2.2.1. Coste total de la inversión.....	274
11.2.2.2. Coste de amortización del equipo.....	274
11.2.2.3. Coste de material auxiliar.....	275
<i>11.2.3. Coste total del proyecto.....</i>	<i>275</i>
ÍNDICE DE FIGURAS.....	277
ÍNDICE DE TABLAS.....	279
ÍNDICE DE ANEXOS.....	281
BIBLIOGRAFÍA.....	283

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN



1.1. Introducción: Concepto de riesgo.

El término riesgo proviene del italiano *rischio*, palabra que a su vez tiene su origen en el vocablo árabe *rizq*, el cual significa “lo que depara la providencia”. Hoy en día, el término se refiere a la contingencia o proximidad de un daño, y se suele asociar a la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y de las consecuencias negativas que conllevaría.

Desde que el ser humano comenzó a transformar su entorno para su propio beneficio, ha estado expuesto a los riesgos asociados a su propia actividad. A medida que la civilización avanzaba, aumentaba nuestra capacidad para transformar la naturaleza para producir bienes y sus inevitables residuos, pero también la incertidumbre con respecto a las acciones humanas y sus consecuencias.

Durante siglos, el ser humano utilizó las deidades de diferentes religiones como justificación para las catástrofes acaecidas, de forma que cualquier evento que escapara a la previsión humana era resultado de la decisión de un Dios, cuyo juicio escapa al de cualquier hombre. Así, cuando algo inesperado sucedía, esto formaba parte del plan de Dios y tenía un sentido y una justificación, por muy terrible que pareciera a ojos humanos. Esta interpretación de los fenómenos imprevisibles como consecuencia de la decisión de una deidad que escapa de la percepción humana estaba provocada, en gran medida, por el desconocimiento de cómo funcionaba realmente el mundo.

Con la llegada del Renacimiento, y más tarde del pensamiento racionalista, la visión del mundo rígida y dogmática que durante siglos había predominado en Europa da paso a una nueva concepción del hombre y del mundo, el llamado Humanismo, que recupera numerosos elementos de la cultura clásica, y que supone una verdadera revolución en las artes y en las ciencias, tanto naturales como humanas.

Uno de los principales preceptos del Humanismo incipiente es el antropocentrismo, que pasa a considerar al hombre como medida de toda las cosas, por lo que, consecuentemente, actos que en épocas anteriores eran atribuidos a un elemento exógeno al ser humano, Dios, ahora tratan de evaluarse y explicarse utilizando como principio de juicio la naturaleza humana. Además, el humanismo también trae

consigo la restauración de la fe en el hombre contemporáneo, que se considera que ha adquirido ciertos valores que le deben conducir a superar al hombre de la época clásica. Por último, el Humanismo otorga a la razón humana un valor supremo, lo que supone la primera piedra sobre la que en el siglo siguiente se levantaría el racionalismo.

Este cambio de enfoque del pensamiento provoca que los seres humanos comenzaran a darse cuenta de que algunos peligros son consecuencia directa de las acciones de los propios miembros de la comunidad. Aparece la percepción de dos clases de peligros diferentes, los naturales, tales como terremotos, huracanes, tsunamis, derrumbamientos o inundaciones, y los tecnológicos, tales como los accidentes de navegación o los accidentes laborales. Mientras el hombre de la época aún no tiene conocimiento suficiente para formular una justificación racional para explicar los primeros, por lo que mantiene la justificación deísta de épocas anteriores, sí observa que los segundos son consecuencia de las decisiones humanas. Es precisamente a partir de este enfoque cuando se comienza a tratar de combinar determinados métodos de análisis con el conocimiento científico de los procesos que acarrearán consigo un peligro tecnológico para lograr una cuantificación de dicho peligro. Surge así el concepto moderno de riesgo, como la cuantificación del peligro de que un determinado proceso humano desencadene en una situación de destrucción, es decir, una cuantificación racionalista del azar.

El concepto de riesgo comienza entonces a aplicarse a numerosas ramas de la producción, tales como las travesías marítimas de los exploradores occidentales durante los siglos XVI y XVII, en las que el riesgo estaba asociado a una dimensión espacial, en la que navegar por aguas desconocidas suponía asumir un riesgo superior a navegar por zonas ya documentadas en mapas. El riesgo de un viaje por mar se aplicaba posteriormente por parte de los prestamistas que financiaban las travesías, que debían darle una dimensión temporal al concepto de riesgo para tomar decisiones con respecto a sus inversiones en exploraciones.

Desde el punto de vista racionalista, los riesgos tecnológicos, derivados de las acciones del hombre, eran considerados como, en cierta medida, previsibles, evitables y/o reducibles, mientras que los riesgos naturales, derivados de la ruptura del equilibrio de las fuerzas intrínsecas de la naturaleza, eran considerados imprevisibles, inevitables

o irreducibles. No obstante, la experiencia demostró que una separación total de los dos tipos de riesgo no era viable en la práctica, sino que existe habitualmente una interacción entre ellos, en el punto en el que, por ejemplo, una climatología adversa (riesgo natural) puede incrementar el riesgo de accidente de un transporte por carretera (riesgo tecnológico). Así, no sólo es necesario cuantificar las probabilidades de un determinado suceso para calcular su riesgo, sino que también es necesario analizar de qué forma los diferentes eventos naturales pueden variar el riesgo tecnológico intrínseco de un determinado proceso productivo humano.

Desde la aparición del concepto de riesgo tecnológico, la sociedad industrial ha ido desarrollando y aplicando medidas puntuales dirigidas a paliar los efectos de los procesos industriales con mayor siniestralidad, introduciendo controles de calidad del proceso o cambios en la logística de la propia industria. No obstante, a medida que avanza la técnica, utilizándose tecnologías cada vez más complejas, lo hace simultáneamente la complejidad de la economía industrial, aumentando el número de servicios de soporte del proceso productivo y el número de pasos en el proceso de obtención de un bien a partir de una materia prima, por lo que las medidas de reducción de riesgos van siempre por detrás del desarrollo tecnológico.

Parece evidente que hoy en día vivimos en un mundo más seguro que todos los precedentes, alcanzando unas cotas de desarrollo nunca vistas en la historia de la humanidad. No obstante, el aumento de los riesgos hace que sea necesaria la cautela a la hora del desarrollo industrial, para anticipar destrucciones catastróficas provocadas por nuestra propia actividad.

Esta situación conduce a que a partir de la década de 1960 experimenten un crecimiento exponencial los estudios que relacionan Ciencia, Tecnología y Sociedad, que estudian las diferentes formas en las que el desarrollo tecnológico expone inevitablemente a las personas y al medio ambiente a unos determinados riesgos. Esta explosión de conocimiento sobre los riesgos que se produce conduce a que el enfoque a la hora de reducir riesgos evolucione, centrándose ya no sólo en adoptar medidas puntuales de seguridad, sino desarrollando planes integrales que involucren todas las etapas del proceso, y tengan en cuenta tanto la seguridad de las comunidades humanas como del medio ambiente. Surgen así a finales del siglo XX toda una serie de

herramientas de estudio, control y reducción de riesgos, tales como las auditorías integrales de los sistemas industriales, los escenarios de riesgo comparados, los análisis de ciclo de vida del producto, los árboles de fallos o las evaluaciones de impacto ambiental.

En la modernidad avanzada, la producción social de riqueza va acompañada sistemáticamente por la producción social de riesgos. Por tanto, los problemas y conflictos de reparto de la sociedad de la carencia son sustituidos por los problemas y conflictos que surgen de la producción, definición y reparto de los riesgos producidos de manera científico-técnica (Beck, 2002). Por tanto, el riesgo se ha convertido en un elemento habitual e imprescindible a la hora del diseño, análisis, implementación y desarrollo de cualquier sistema técnico. Tal es así que el concepto de riesgo ha ido evolucionando con el paso del tiempo y adaptándose a diferentes ramas del conocimiento, tales como las ciencias jurídicas, financieras, sociales.

Las constataciones de riesgo son la figura en la que la ética (y por tanto también la filosofía, la cultura, la política) resucita en los centros de la modernización, en la economía, en las ciencias naturales, en las disciplinas técnicas. (Beck 2002).

En las sociedades occidentales más desarrolladas, en las que los riesgos derivados del progreso tecnológico tienen una importancia capital en la toma de decisiones de las personas, es importante tener herramientas que nos permitan caracterizar el riesgo, asignarle un valor numérico, para poder utilizarlo como apoyo a la hora de tomar decisiones. Además, es necesario disponer de herramientas que simplifiquen y hagan más accesible el acceso a la información sobre los riesgos de una determinada actividad, para simplificar la propia toma de decisiones.

1.2. Mercancías peligrosas.

Partiendo del enfoque bajo el que se estudian los riesgos hoy en día, en el que, según se indicó en el apartado anterior, ya no solo se persigue adoptar medidas puntuales para prevenir ciertos riesgos muy concretos, sino que se desarrollan planes integrales de seguridad completos que tengan minimicen o eliminen los riesgos de todas las etapas de un determinado producto industrial. Los riesgos asociados al ciclo de vida de cualquier proceso industrial aparecen en las cinco fases de vida de cualquier producto industrial: diseño, producción, transporte, almacenamiento y eliminación. Cuando hablamos de materiales peligrosos, los mayores riesgos ambientales y para la vida de las personas suelen aparecer durante las fases de almacenamiento y transporte.

Los materiales peligrosos son sustancias que, ya sea en estado sólido, líquido o gaseoso, poseen determinadas características que los hacen muy dañinos para la vida humana o para el medio ambiente, ya sea por su toxicidad, inflamabilidad, radioactividad y explosividad. Es necesario poseer un profundo conocimiento acerca de cada una de las diferentes sustancias que existen para garantizar en cualquiera de sus fases de vida unas condiciones que minimicen el riesgo de accidente. Entre los materiales peligrosos se incluyen gases, líquidos y sólidos inflamables, sustancias oxidantes, venenos y sustancias infecciosas, sustancias corrosivas, materiales radiactivos, etc.

No cabe duda de que la mayoría de estas sustancias, consideradas como peligrosas, son imprescindibles para el desarrollo tecnológico actual. Así, hoy por hoy es impensable poder prescindir a corto plazo de algunos combustibles fósiles inflamables como la gasolina, el gasoil o el gas natural, algunas sustancias corrosivas como el ácido sulfúrico, empleado en infinidad de aplicaciones como la fabricación de fertilizantes, industria metalúrgica, industria textil o producción de pintura, o productos como el cloro, empleado en desinfección del agua en potabilizadoras, pero que en caso de fuga puede provocar irritaciones en el aparato respiratorio y muerte por asfixia.

Desde la Segunda Guerra Mundial, se ha puesto de manifiesto la importancia de los productos considerados peligrosos en nuestra vida, tanto para el desarrollo y la

mejora de la calidad de vida como para la muerte y destrucción. Durante la propia guerra, así como en las décadas siguientes, durante la guerra fría, la investigación consiguió producir potentes explosivos, gases tóxicos y armamento nuclear que podrían desencadenar millones de muertos y la destrucción de la civilización, pero estos avances en la industria química sirvieron también para crear nuevos fertilizantes para mejorar la productividad agrícola, nuevas fibras artificiales para la industria textil o un auténtico boom en la industria farmacéutica.

Dada la importancia de estos productos en nuestra vida, se justifica la importancia de desarrollar y mantener un sistema de intercambio de bienes peligrosos eficiente y seguro, de forma que se puedan transportar como materias primas, productos intermedios, productos acabados y residuos industriales. Las mercancías peligrosas se pueden transportar por tierra, mar y aire, utilizándose enormes buques de carga para transportar grandes volúmenes de materiales entre países surcando el mar. Para un transporte interior, los medios de transporte más empleados son el ferrocarril, pensado para cubrir grandes distancias con volúmenes enormes de mercancía, y especialmente el transporte por carretera. El desplazamiento por la vía pública de vehículos cargados con mercancías potencialmente peligrosas representa un riesgo de accidente y de daño para el resto de vehículos, las poblaciones cercanas y el medio ambiente.

Un ejemplo del riesgo que representa la circulación de este tipo de mercancías por las carreteras es lo ocurrido el día 11 de Julio de 1978, en el municipio de Alcanar, provincia de Tarragona (España). Ese día un camión cisterna cargado con 25 toneladas de propileno licuado se dirigía hacia Alicante por la carretera N-340, desde la refinería Enpetrol de Tarragona. Al pasar por delante del campamento “Los Alfaques”, en el que en ese momento se encontraban registradas unas 800 personas, la cisterna del camión explotó, provocando una bola de fuego que causó 243 fallecidos, 300 heridos graves y la destrucción total del campamento. El accidente se vio agravado por las bombonas de gas de las autocaravanas y los depósitos de combustible de los coches que se hallaban en el camping, que explotaron también debido al calor.

En la investigación que siguió al accidente, se estableció como posible causa del accidente la sobrecarga de la cisterna, homologada sólo para 19 toneladas. El calor del

mes de Julio en el Mediterráneo, unido a que la cisterna del camión no disponía de una válvula de seguridad que aliviase la presión, provocó la explosión por rotura de una de las soldaduras de la cisterna. Además, se calculó que el accidente se había producido un minuto después de abandonar el núcleo urbano de San Carlos de la Rápita, de forma que si la explosión hubiera tenido lugar unos minutos antes la catástrofe podría haber sido muchísimo peor, ya que el municipio albergaba en esas fechas a unas 20.000 personas.

A raíz de esta tragedia, la más grave relacionada con el transporte de mercancías peligrosas ocurrida en España, se prohibió el paso de camiones de transporte de mercancías peligrosas por travesías urbanas, obligándolos a circular por autovías y autopistas, y se impuso la instalación obligatoria de válvulas de alivio de presión en las cisternas destinadas a ciertos tipos de mercancías peligrosas como gases licuados inflamables.

A nivel internacional, se le presta y se presta una gran atención a las medidas de seguridad de aplicación en lo que respecta a transporte de mercancías peligrosas, para reducir los riesgos de accidente y mitigar las consecuencias de éstos. Así, desde el año 1957, en el que varios países firmaron en Ginebra el Acuerdo Europeo relativo al Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Carretera (ADR), existe una normativa europea que regula el tráfico de mercancías peligrosas por carretera en los países en los que se aplica, revisándose periódicamente para adaptarse a los nuevos materiales, vehículos y tecnologías. España se adhiere a este acuerdo en 1972, y en la actualidad ya es la normativa vigente en la mayoría de países europeos, así como algunos países asiáticos y del norte de África. El acuerdo dispone una serie de normas a cumplir por los vehículos que transportan mercancías peligrosas en lo referidas al embalaje, envase, documentación, identificación de mercancías y vehículo mediante rótulos, capacitación del personal de manejo de estos productos, operaciones de carga y descarga, itinerarios y horarios autorizados para el transporte de mercancías peligrosas y protocolos de actuación en caso de emergencia.

En resumen, dado que un desarrollo sostenible de la civilización debe estar en equilibrio con una protección del medio que habitamos, y dado que no podemos prescindir de materiales considerados peligrosos en su transporte, es necesario conocer

lo mejor posible el riesgo ambiental que supone, y transformar esta información para que su uso sea lo más sencillo e intuitivo posible, para permitir que se tomen las medidas legales de minimización de riesgos para las personas y el medio ambiente oportunas en tiempo real.

1.3. Objetivos del proyecto.

Con el presente proyecto se pretende partir del modelo multivariante de estimación del riesgo desarrollado por Á. Arranz Zazo (2013) para generar una aplicación en tiempo real que sea capaz de monitorizar los vehículos de transporte de mercancías peligrosas que a cada momento circulan por la red de carreteras de Castilla y León.

Se ha suscrito el estudio únicamente a Castilla y León para acotar el proyecto, limitando el número de vehículos que circulan a cada momento, así como la longitud de las rutas entre puntos de la red. No obstante, el proyecto es ampliable a territorios más amplios sin más que cambiando los mapas por los del territorio deseado.

Así, la aplicación principal recibirá los datos de las coordenadas de cada uno de los vehículos, junto a un identificador que contiene información acerca del camión (podría albergar informaciones como tipo de carga, cantidad transportada, empresa responsable del envío, datos del conductor, datos del vehículo, origen y destino...), y consultará con los mapas de riesgo generados con el método de regresión logística para generar mapas de riesgo instantáneos, para apoyar la toma de decisiones en tiempo real en base a los conflictos entre vehículos de transporte de mercancías peligrosas que aparezcan en cada momento.

Además, se desarrollarán toda una serie de funciones para simular los vehículos de transporte de mercancías peligrosas, que van desde algoritmos para calcular la ruta óptima entre dos puntos optimizando diferentes parámetros hasta un simulador de tiempo real para calcular las nuevas posiciones de los camiones en cada instante de actualización. El objetivo de estas funciones de simulación es obtener un modelo a partir del cual probar la aplicación principal, sin necesidad de implementarla en camiones reales.

Mediante la aplicación principal, se pretende que la administración, o la autoridad competente en cada caso, disponga de una herramienta que proporcione información completa de una manera sencilla e intuitiva del riesgo presente en la red de carreteras instantáneamente, trabajando con un sistema de conflictos, para servir de apoyo a la toma de decisiones de las autoridades, que dispondrá de información para adoptar las medidas oportunas para evitar situaciones de peligro.

Los mapas instantáneos generados pueden dar pie tanto a decisiones a corto plazo, tales como ralentizar o parar un camión; decisiones a medio plazo, como variar la ruta de una serie camiones de una determinada empresa; o decisiones a largo plazo, como descubrir tramos en los que de una manera habitual suele aparecer un alto riesgo para la vida humana o el medio ambiente por un motivo determinado, de forma que se puedan planificar las infraestructuras necesarias o los cambios en la normativa para corregir este problema.

1.4. Justificación del proyecto.

Analizar riesgos, bajo el criterio de la ingeniería, significa estimar cuantitativamente el nivel de peligro potencial para las personas y el medio ambiente de una actividad, en función de dos variables, la probabilidad de que se produzca un accidente y la magnitud del daño ocasionado por éste en caso de que suceda.

Para obtener un beneficio del análisis de riesgos, es necesario emplear los resultados como base de información para guiar la política de toma de decisiones de la gestión de dichos riesgos ambientales. De esta forma, se trata de proporcionar una información más clara de los peligros potenciales en el área a estudiar, determinando cuáles son las zonas más críticas en las que se debería controlar el tránsito de mercancías peligrosas o tomar las medidas y desplegar los recursos necesarios para mitigar el daño en caso de accidente.

Por todo ello, son necesarios métodos nuevos para analizar los riesgos que sean versátiles y de fácil manejo para evolucionar en este campo y velar por la seguridad de las comunidades humanas y el medio ambiente ante el transporte de mercancías peligrosas.

1.5. Descripción del proyecto.

A continuación se describirá brevemente en qué consiste cada uno de los capítulos de este documento:

- En el Capítulo 1, el que nos ocupa, se introduce el concepto general de Riesgo, se relaciona dicho concepto con el campo del transporte de mercancías peligrosas, y se presenta la justificación los objetivos que se persiguen con el presente proyecto.
- En el Capítulo 2, se expone detalladamente el concepto de mercancía peligrosa, los tipos de mercancías existentes, los riesgos que van asociados a su transporte y la normativa que le se aplica.
- En el Capítulo 3, se realiza un resumen con los conceptos principales del proyecto de Á. Arranz Zazo (2013), para que sirva así como introducción al presente proyecto, describiendo claramente cómo se generan y que significan los mapas de riesgo que sirven como base de datos para la aplicación desarrollada.
- En el Capítulo 4, se justifica de manera argumentada la elección del software/lenguaje de programación para este proyecto, así como una descripción de cómo se han tratado los mapas de forma numérica MATLAB.
- En el Capítulo 5, se indican diferentes posibles algoritmos para el cálculo de rutas, se justifica la elección de un algoritmo de búsqueda A* y se describen las diferentes funciones que implementan el algoritmo para el cálculo de rutas en el software.
- En el Capítulo 6, se describe el algoritmo de seguimiento de rutas, empleado para calcular posiciones sucesivas en una trayectoria en tiempo real, y la manera en la que dicho modelo se ha implementado en el código.
- En el Capítulo 7, se describen las características principales del simulador de tiempo real, es decir, del resultado de combinar los conceptos de los capítulos 5 y 6. Se indican asuntos como las ciudades elegidas para actuar como nodos en

el simulador, la forma en la que el simulador trabaja con las rutas o la estructura de información que se asocia al identificador de cada vehículo.

- En el Capítulo 8, se habla sobre la aplicación principal que genera los mapas de riesgo en función de la posición de cada camión que recibe del simulador.
- En el Capítulo 9, se describe la interfaz gráfica del programa, y se da una pequeña guía de funcionamiento para el usuario destino del programa.
- En el Capítulo 10, se recoge un pequeño resumen, las conclusiones del trabajo y posibles futuros desarrollos partiendo del presente proyecto.
- En el Capítulo 11, se recogen los resultados del estudio económico del proyecto.

CAPÍTULO 2: MERCANCÍAS PELIGROSAS Y RIESGOS AMBIENTALES.



2.1. Introducción.

El presente capítulo tiene por objetivo presentar el sujeto activo del estudio, es decir, el transporte de mercancías peligrosas, mientras que el sujeto pasivo estaría constituido por cada uno de los elementos naturales, infraestructuras o comunidades humanas susceptibles de ser vulnerables a un accidente con mercancías peligrosas.

Además, profundizaremos en el concepto de riesgo, aplicándolo más concretamente al campo del transporte de las mercancías peligrosas.

2.2. El transporte de mercancías peligrosas.

El transporte de mercancías peligrosas implica numerosos campos, tales como la química, física, logística, normativa de materiales y de transporte o efectos sobre el medio, entre otros. Así, dada la complejidad del estudio del transporte de mercancías peligrosas, en este capítulo solamente se pretende presentar información que pueda servir como introducción teórica al trabajo desarrollado.

2.2.1. Mercancías peligrosas.

2.2.1.1. Definiciones.

El estudio de las mercancías peligrosas es un campo extenso, en el que numerosas instituciones, ya sean públicas o privadas, están involucradas. Es complejo buscar una definición única del concepto “mercancía peligrosa”, por lo que se presentan a continuación una serie de definiciones según diferentes instituciones:

- *“Es cualquier sustancia, compuesto o combinación de ambos, que sea inflamable, corrosivo, detonante, tóxico, radiactivo y/o infeccioso.”* INTEVEP (Instituto Tecnológico Venezolano del Petróleo).
- *“Sustancia (gas, líquido, sólido) capaz de causar daño a la persona, medio ambiente y/o propiedad.”* NFPA (Asociación Nacional de Protección contra incendios, organización civil de los Estados Unidos de Norteamérica).

- *“Son aquellos que poseen un riesgo para la salud y las seguridad del personal de operación o de emergencia, la ciudadanía y/ el ambiente, si no es apropiadamente controlado durante su manipulación, procesamiento, almacenamiento, fabricación, empaçado, transporte, uso y disposición final.”* Department Of Transportation (Ministerio de transporte de los Estados Unidos de Norteamérica).
- *“Cualquier material que cuando se descarga al medio ambiente, puede ser peligroso para la salud o el bienestar de la nación.”* Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica).
- *“Cualquier sustancia que produce daño físico o daño a la salud.”* Occupational Safety and Health Administration (Administración de Salud y Seguridad Ocupacional de los Estados Unidos de Norteamérica).

Podemos hacer una composición con los distintos aspectos parciales de las definiciones, de forma que podemos decir que una mercancía peligrosa es “cualquier sustancia que por sus características pueda resultar dañina o perjudicial, ya sea durante su fabricación, manejo, transporte, almacenamiento o uso. Los materiales peligrosos pueden generar o desprender polvos, humos, gases, vapores, fibra, o radiaciones ionizantes, así como presentar propiedades infecciosas, irritantes, inflamables, explosivas, corrosivas, asfixiantes o tóxicas, de forma que puedan afectar negativamente a la salud de las personas que entren en contacto con ellas, o causar daños materiales a infraestructuras, viviendas, vehículos o medio ambiente”.

2.2.1.2. Clasificación según el ADR/RID

El número de sustancias peligrosas existente es muy elevado, registrando algunos manuales incluso más de 12.000 sustancias diferentes. En el año 1956, el Comité de Expertos de las Naciones Unidas en Transporte de Mercancías Peligrosas, formado por el Consejo Económico y Social de las Naciones Unidas (ECOSOC), presentó un informe que establecía las prescripciones mínimas aplicables al transporte de mercancías peligrosas en todas sus modalidades.

Este informe, se titulaba “Recomendaciones relativas al Transporte de Mercancías Peligrosas” de las Naciones Unidas, conocido habitualmente también como “Libro Naranja”, y estaba destinado a los gobiernos y organizaciones internacionales encargados del transporte de mercancías peligrosas. En ese momento, constituyó un marco legal internacional al que podían adaptarse los diferentes reglamentos existentes en cada país y dentro del cual se admitía que se completara con ciertos artículos válidos únicamente para las regiones que los promulgaban, teniendo como objetivo la unificación mundial de las normativas.

La decimoséptima edición del “Libro Naranja” de la ONU sobre Transporte de Mercancías Peligrosas, del año 2011, recoge aproximadamente unas 3.500 sustancias, las que considera más importantes, atendiendo tanto a su peligrosidad intrínseca como a la importancia de su producción y transporte en el marco socioeconómico internacional.

En España se transportan 1.866 sustancias clasificadas peligrosas, lo que significa una gran heterogeneidad de características, comportamientos y riesgos dentro del campo del transporte de mercancías peligrosas en España, dependiendo de la sustancia que se esté transportando.

La clasificación más empleada en España para la reglamentación y el control del transporte de mercancías peligrosas por superficie (ya sea carretera o ferrocarril) son probablemente dos:

- TPC/TPF (Reglamento Nacional del Transporte de Mercancías Peligrosas por Carretera y Ferrocarril) (Gobierno de España, 2006). Es reglamentación española.
- ADR/RID (Acuerdo Europeo sobre Transporte de Mercancías Peligrosas por Carretera y Ferrocarril) (Comunidad Económica Europea, 2013). Es reglamentación internacional.

En la tabla 1 podemos observar cada una de las clases que recoge la normativa internacional ADR/RID:

Clase	Denominación	Ejemplos
1	Materias y objetos explosivos	Fuegos artificiales, municiones, cohetes, detonadores...
2	Gases	Propileno, etileno, butano, oxígeno, cloro, helio...
3	Líquidos inflamables	Tolueno, aguarrás, gasolina, pinturas, barnices...
4	4.1	Materias sólidas inflamables
	4.2	Materias susceptibles de inflamación
	4.3	Materias que, al contacto con el agua, desprenden gases inflamables
5	5.1	Materias comburentes
	5.2	Peróxidos orgánicos
6	6.1	Materias tóxicas
	6.2	Materias infecciosas
7	Materias radiactivas	Equipos médicos...
8	Materias corrosivas	Ácido sulfúrico, hipoclorito sódico...
9	Materias peligrosas varias	Hielo seco, cosméticos...

Tabla 1-Clasificación del ADR/RID

A continuación se realizará un análisis más detallado de cada una de las clases presentes en la tabla anterior, prestando especial atención a sus riesgos específicos, subclases y ejemplos de materiales pertenecientes a cada uno de los grupos.

Clase 1. Materias y objetos explosivos

A la clase 1 pertenecen algunos de los productos más peligrosos. No solo se incluyen explosivos en sí, sino también algunas sustancias, como algunas sales metálicas, que por sí mismas o en ciertas mezclas, o cuando están expuestas al calor, choque o fricción, pueden causar explosiones, generalmente seguidas de incendio. Algunas sustancias pueden convertirse en explosivas debido a cambios químicos en su estructura (auto-oxidación) sin causa alguna aparente. Su transporte, debido a sus características especiales, tiene una regulación especial.

Estas mercancías, además de estar reguladas por los reglamentos de ADR y RID deben cumplir aspectos relativos al transporte recogidos en el Reglamento de Explosivos. Dentro de la clase 1 aparecen los siguientes tipos de productos:

- **Materiales explosivos**: sustancias sólidas o líquidas (o mezclas de sustancias) que, a través de una reacción química, pueden desprender gases a una temperatura, presión y velocidad tales que pueden ocasionar daños en su entorno.
- **Materiales pirotécnicos**: productos destinados a producir un efecto calorífico, luminoso, sonoro, gaseoso o fumígeno, o una combinación de los anteriores, como consecuencia de reacciones químicas exotérmicas autosostenidas no detonantes.
- **Objetos explosivos**: objetos que contienen uno o varios materiales explosivos y/o materiales pirotécnicos.
- Sustancias y objetos no mencionados en los casos anteriores, fabricados con el fin de producir un efecto práctico por explosión o con fines pirotécnicos.

Las materias y objetos explosivos de la clase 1 se clasifican en divisiones y grupos de compatibilidades dentro de la propia clase, de manera que su código de clasificación estará formado por el número de la división y la letra del grupo de compatibilidad.

Las divisiones son las siguientes:

División	Descripción
1.1	Materias y objetos que presentan un riesgo de explosión en masa. Afectan de manera casi instantánea a toda la carga
1.2	Materias y objetos que presentan un riesgo de proyección sin riesgo de explosión en masa.
1.3	Materias y objetos que presentan un riesgo de incendio con ligero riesgo de efectos de llama, producción de onda expansiva o de proyección, o bien de ambas, pero sin riesgo de explosión en masa.
1.4	Materias y objetos que solo presentan un pequeño riesgo de explosión en caso de ignición o cebado durante el transporte. Los efectos se limitan esencialmente a los bultos y normalmente no dan lugar a la proyección de fragmentos de tamaño apreciable ni a grandes distancias. Un incendio exterior no debe implicar la explosión prácticamente instantánea de la casi totalidad del contenido de los bultos.

1.5	Materias muy poco sensibles que no supongan riesgo de explosión en masa, con una sensibilidad tal que, en condiciones normales de transporte, hay muy poca probabilidad de detonación o de paso de la combustión a la detonación.
1.6	Objetos extremadamente poco sensibles que no supongan riesgo de explosión en masa. Dichos objetos no contendrán más materias detonantes extremadamente poco sensibles y que presenten una probabilidad despreciable de encebamiento o de propagación accidental. El riesgo queda limitado a la explosión de un objeto único.

Tabla 2 - División de materias y objetos explosivos de clase 1

Los grupos de compatibilidad son los siguientes:

Grupo de compatibilidad	Descripción
A	Materia explosiva primaria.
B	Objeto que contenga una materia explosiva primaria y tenga al menos dos dispositivos de seguridad eficaces.
C	Materia explosiva propulsora, u otra materia explosiva secundaria deflagrante u objeto que contenga dicha materia explosiva.
D	Materia explosiva secundaria detonante o pólvora negra, u objeto que contenga una materia secundaria detonante, en cualquier caso sin medios de detonación ni carga propulsora, u objeto que contenga una materia explosiva primaria y que tenga al menos dos dispositivos de seguridad eficaces.
E	Objeto que contenga una materia explosiva secundaria detonante, sin medios de cebado, con carga propulsora.
F	Objeto que contenga una materia explosiva secundaria detonante, con sus propios medios de cebado, con carga propulsora.
G	Materia pirotécnica u objeto que contenga una composición pirotécnica, o bien objeto que contenga a la vez una materia explosiva y una composición luminosa, incendiaria, lacrimógena o fumígena.
H	Objeto que contenga una materia explosiva y además fósforo blanco.
J	Objeto que contenga una materia explosiva y, además, un líquido o gel inflamables.
K	Objeto que contenga una materia explosiva y además un agente químico tóxico.
L	Materia explosiva u objeto que contenga una carga explosiva y presente además un riesgo particular y que exija el aislamiento de cada tipo.
N	Objetos que no contengan más materias detonantes extremadamente poco sensibles.

S	Materia u objeto embalado o concebido de forma que todo efecto peligroso debido a un funcionamiento accidental quede circunscrito al embalaje, a menos que éste haya quedado deteriorado por el fuego, en cuyo caso los efectos de la onda expansiva deben ser lo suficientemente reducidos para no entorpecer la lucha contra incendios ni otras medidas de emergencia en las inmediaciones del bulto.
---	---

Tabla 3 - Grupos de compatibilidad de materias y objetos de clase 1

En la figura 1 se muestra la etiqueta general que deben llevar las mercancías de la clase 1, de color naranja, con un icono de explosión y un número 1 que indica la clase.



Figura 1 - Etiqueta genérica para materiales de clase 1

Clase 2. Gases.

Se consideran materias de la clase 2 todas aquellas sustancias que a 50°C, tengan una presión de vapor superior a 300 KPa (3 bares) o se encuentre en estado gaseoso a 20°C, a la presión normalizada de 101,3 KPa. Aparece aquí una gran variedad de productos distintos, los cuales pueden presentar riesgos muy distintos, de ahí la importancia de las divisiones para esta clase.

Dentro de la clase 2 hay gases inflamables y no inflamables, tóxicos y no tóxicos o inflamables y tóxicos al mismo tiempo. Otra familia importante por lo peligrosa son los químicamente inestables que pueden ser además tóxicos y no tóxicos.

Las materias y objetos de la clase 2 se subdividen del modo siguiente:

- **Gases comprimidos**: son aquellos gases cuya temperatura crítica, es decir, la temperatura límite por encima de la cual un gas no puede ser licuado por compresión, es inferior a 20 °C, como por ejemplo el aire comprimido, nitrógeno comprimido, oxígeno comprimido, etc.
- **Gases licuados**: son aquellos gases cuya temperatura crítica es igual o superior a 20 °C, como por ejemplo cloro, amoníaco, propano, butano, etc.
- **Gases licuados refrigerados**: son gases que, en el momento de ser transportados, se encuentran parcialmente en estado líquido a causa de su baja temperatura, como por ejemplo el neón líquido refrigerado.
- **Gases disueltos a presión**: son gases que, cuando son transportados, se encuentran disueltos en un medio líquido o gaseoso, como por ejemplo amoníaco en agua, acetileno en acetona, etc.
- Generadores aerosoles y recipientes de reducida capacidad que contengan gases, como los cartuchos de gas a presión.
- Otros objetos que contienen un gas a presión.
- Gases no comprimidos no sometidos a disposiciones especiales.
- Recipientes vacíos y cisternas vacías.

Cada uno de los miembros de la clase 2 se deben clasificar en uno de los siguientes grupos en función de sus características, para aplicar las medidas de seguridad concretas para cada grupo:

Grupo	Descripción
A	Asfixiante: gas no comburente, no inflamable y no tóxico que diluya o reemplace el oxígeno normalmente presente en la atmósfera.
O	Comburente: pueden causar o favorecer más que el aire, en general mediante la aportación de oxígeno, la combustión de otras materias.

F	Inflamable: gas que a una temperatura de 20 °C y presión de 101,3 KPa, sea inflamable en mezclas de un 13% como máximo (volumen) con aire, o que tenga una banda de inflamabilidad con el aire de al menos 12 puntos de porcentaje, con independencia de su límite inferior de inflamabilidad.
T	Tóxico: gas cuya CL ₅₀ para la toxicidad aguda es inferior o igual a 5.000 ml/m ³ (ppm).
TF	Tóxico, inflamable.
TC	Tóxico, corrosivo.
TO	Tóxico, comburente.
TFC	Tóxico, inflamable, corrosivo.
TOC	Tóxico, comburente, corrosivo.

Tabla 4 - Grupos de los gases

En la figura 2 se muestran las etiquetas que deben llevar las mercancías de la clase 2, siendo la de color rojo con el símbolo de la llama el utilizado para gases inflamables, el verde para gases no inflamables y el blanco con la calavera para gases tóxicos. En todos los casos, aparece un número 2 que indica la clase de la sustancia transportada:



Figura 2 - Etiquetas genéricas para las materias de la clase 2, inflamables, no inflamables o tóxicos

Clase 3. Materias líquidas inflamables.

Habitualmente para referirse a los miembros de esta clase se utilizan términos como inflamables, altamente inflamables, espontáneamente inflamables en aire, etc. Para el caso de los líquidos, su grado de peligrosidad es inversamente proporcional a su punto de inflamación, es decir, a medida que el punto de inflamación desciende aumenta su peligrosidad.

Por lo general, se incluyen en esta clase los líquidos que por efecto de una llama o por un aumento de temperatura pueden arder, tales como las gasolinas, gasóleos, aceites minerales, benceno, barnices, alcoholes, etc.

Entran dentro de esta definición todas aquellas materias y objetos que tengan una o varias de estas propiedades:

- Tengan un punto de fusión igual o inferior a 20 °C a una presión de 101,3 KPa.
- Tengan, a 50 °C, una presión de vapor máxima de 300 KPa (3 bar) y no sean completamente gaseosos a 20 °C y a la presión normalizada de 101,3 KPa.
- Tengan un punto de inflamación máximo de 61 °C.
- Materias sólidas en estado fundido, cuyo punto de inflamación sea superior a 61 °C y que sean entregadas al transporte o transportadas en caliente a una temperatura igual o superior a su punto de inflamación.

Estas materias se subdividen del modo siguiente:

Grupo	Descripción
A	Materias con un punto de inflamación inferior a 23 °C, ni tóxicas ni corrosivas.
B	Materias con un punto de inflamación inferior a 23 °C, tóxicas.
C	Materias con un punto de inflamación inferior a 23 °C, corrosivas.
D	Materias con un punto de inflamación inferior a 23 °C, tóxicas y corrosivas, o bien objetos que contengan materias de este grupo.
E	Materias con un punto de inflamación de 23 °C a 61 °C, valores límites comprendidos, que puedan presentar un grado menor de toxicidad o corrosividad.
F	Materias y preparados que sirvan de plaguicidas con un punto de inflamación inferior a 23 °C.
G	Materias con un punto de inflamación superior a 61 °C, transportadas o entregadas al transporte calientes a una temperatura igual o superior a su punto de inflamación.
H	Envases vacíos.

Tabla 5 - División de materias líquidas inflamables de clase 3

Los elementos de esta clase se pueden clasificar también en función de su grado de peligrosidad, tal y como se muestra a continuación en la tabla 6:

Peligrosidad	Descripción
Materias muy peligrosas	Materias líquidas inflamables con un punto de ebullición de 35 °C como máximo, y materias líquidas inflamables con un punto de inflamación inferior a 23 °C, que o bien son muy tóxicas o muy corrosivas según los criterios de los reglamentos.
Materias peligrosas	Materias líquidas inflamables que tengan un punto de inflamación inferior a los 23 °C y que no estén clasificadas en el apartado anterior, con excepción de las materias del marginal 2301, 5º c) del ADR.
Materias que presentan un grado menor de peligrosidad	Materias líquidas inflamables que tengan un punto de inflamación de 23°C a 61°C, comprendidos los valores límites, así como las materias del marginal 2301, 5º c) del ADR.

Tabla 6 - Clasificación de las materias de clase 3 en función de su peligrosidad

En la figura 3 se muestra la etiqueta que deben llevar las mercancías de la clase 3, de color rojo con el símbolo de la llama para indicar mercancía inflamable, y con el número 3 que indica la clase de mercancía transportada:



Figura 3 – Etiqueta genérica para mercancías de clase 3

Clase 4.1. Materias sólidas inflamables.

Se consideran también materias peligrosas aquellas materias inflamables que se encuentran en estado sólido en el momento de su transporte, materias capaces de arder por efecto del calor, llamas abiertas, chispas o fricción. Además, bajo la influencia del calor pueden formar mezclas explosivas de vapor y aire y/o gases tóxicos. Pertenecen a esta clase materiales como la madera, el serrín, la celulosa de madera, el azufre, el celuloide, muchos compuestos de fósforo, etc. En general, pertenecen a esta clase cualquiera de los materiales que presenten alguna de estas características:

- Las materias y objetos sólidos fácilmente inflamables y los que se inflaman bajo el efecto de una proyección de chispas o que puedan causar un incendio por efecto de la fricción.
- Las materias de reacción espontánea, que puedan experimentar, a temperaturas normales o elevadas, una descomposición altamente exotérmica cuando se ve expuesta al contacto con impurezas.
- Las materias relacionadas con materias de reacción espontánea, que se diferencian de éstas últimas por tener un punto de descomposición exotérmica superior a 75°C, y que pueden sufrir una descomposición fuertemente exotérmica y, en ciertos envases o embalajes, responder a los criterios relativos a las materias explosivas de la clase 1.
- Las materias explosivas que son humedecidas con suficiente agua o alcohol o que contienen suficiente plastificante para que sus propiedades explosivas queden neutralizadas.

Estas materias se subdividen en los grupos que aparecen en la tabla 7:

Grupo	Descripción
A	Materias y objetos orgánicos inflamables sólidos.
B	Materias y objetos inorgánicos inflamables sólidos.
C	Materias explosivas en estado no explosivo.
D	Materias relacionadas con materias de reacción espontánea.
E	Materias de reacción espontánea que no requieren regulación de temperatura.
F	Materias de reacción espontánea que requieren regulación de temperatura.
G	Envases/embalajes vacíos.

Tabla 7 - División de materias sólidas inflamables de clase 4.1

En función de su peligrosidad, se clasifican igualmente que en el caso de las sustancias de la clase 3, en materias muy peligrosas, peligrosas y las que poseen un grado de peligrosidad menor.

En la figura 4 se muestra la etiqueta que deben llevar las mercancías de la clase 4.1, con franjas de colores rojo y blanco con el símbolo de la llama para indicar un

sólido inflamable, y con el número 4.1 para indicar la clase a la que pertenece la mercancía transportada:



Figura 4 - Etiqueta genérica para materias de la clase 4.1

Clase 4.2. Materias que pueden experimentar inflamación espontánea.

A esta clase pertenecen aquellas materias que se puedan englobar en uno de los siguientes grupos:

a) **Materias pirofóricas:** son materias, mezclas y disoluciones (líquidas o sólidas) que en contacto con el aire, incluso en pequeñas cantidades, pueden inflamarse de manera espontánea en un período de 5 minutos.

b) **Materias que pueden experimentar calentamiento espontáneo:** son materias, objetos, mezclas y disoluciones que al contacto con el aire, sin aportación de energía, son susceptibles de calentarse espontáneamente. Para pertenecer a esta clase, estas materias únicamente pueden inflamarse cuando se encuentren en cantidades apreciables (varios kilogramos) después de un largo período de tiempo (varias horas o días).

Estas materias se pueden clasificar en los subgrupos que aparecen en la tabla 8:

Grupo	Descripción
A	Materias orgánicas espontáneamente inflamables.
B	Materias inorgánicas espontáneamente inflamables.

C	Combinaciones organometálicas espontáneamente inflamables.
D	Envases/embalajes vacíos.

Tabla 8 - División de materias de la clase 4.2

Las materias de esta clase se pueden clasificar en función de su peligrosidad, siendo las más peligrosas las materias pirofóricas (experimentan inflamación espontánea), seguidas por las materias susceptibles de experimentar calentamiento espontáneo, y por último las materias que experimentan poco calentamiento espontáneo.

Dentro de esta clase aparecen sustancias que pueden ser sólidas pirofóricas orgánicas (nº ONU 2846), líquidas pirofóricas orgánicas (nº ONU 2845), combinaciones organometálicas y corrosivas, etc. Son materias de esta clase el fósforo blanco, las combinaciones de fósforo con ciertos metales (alcalinos o alcalinotérreos), algunos tejidos grasientos o aceitosos, los hidruros de litio, sodio y aluminio, etc.

En la figura 5 se muestra la etiqueta que deben llevar las mercancías de la clase 4.2, bicolor con colores rojo y blanco con el símbolo de la llama para indicar una materia que puede inflamarse espontáneamente, y con el número 4.2 para indicar la clase a la que pertenece la mercancía transportada:



Figura 5 - Etiqueta genérica para las sustancias de la clase 4.2

Clase 4.3. Materias que al contacto con el agua desprenden gases inflamables.

Pertencen a esta clase aquellas sustancias que, mediante una reacción con el agua, desprenden gases inflamables que pueden formar mezclas explosivas con el aire, así como los objetos que contienen este tipo de sustancias.

Al igual que en el caso de la clase 4.2, las materias de este grupo pueden ser orgánicas, combinaciones organometálicas, materias en disolventes orgánicos, e inorgánicas.

Dentro de esta clase se encuentran los subgrupos que aparecen en la tabla 9:

Grupo	Descripción
A	Materias orgánicas, combinaciones organometálicas y materias en disolventes que, en contacto con el agua, desprenden gases inflamables.
B	Materias inorgánicas que, en contacto con el agua, desprenden gases inflamables.
C	Objetos que contengan materias que, en contacto con el agua, desprenden gases inflamables.
D	Envases/embalajes vacíos.

Tabla 9 - División de materiales de la clase 4.3

Las sustancias de esta clase se pueden clasificar atendiendo a su peligrosidad al igual que para las anteriores subclases de la clase 4. Pertencen a esta clase sustancias como los clorosilanos, el sodio, el potasio, sus aleaciones, los hidruros metálicos, el carburo de calcio, etc.

En la figura 6 aparece la etiqueta que deben llevar las mercancías de la clase 4.3, de color azul con el símbolo de la llama para indicar una materia que puede inflamarse en contacto con el agua, y con el número 4.3 para indicar la clase a la que pertenece la mercancía transportada:



Figura 6 - Etiqueta genérica para materias de la clase 4.3

Clase 5.1. Materias comburentes.

Las materias comburentes u oxidantes son aquellas materias que, sin ser combustibles en sí mismas, desprenden oxígeno, por lo que en general pueden provocar o favorecer la combustión de otras materias.

Las materias de la clase 5.1 se clasifican en los grupos que aparecen en la tabla 10:

Grupo	Descripción
A	Materias comburentes líquidas y sus soluciones acuosas
B	Materias comburentes sólidas y sus soluciones acuosas
C	Envases vacíos.

Tabla 10 - División de materias comburentes de la clase 5.1

En función de su grado de peligrosidad, las materias de esta clase se pueden clasificar también por grupos de mayor a menor grado de capacidad comburente.

Las sustancias más habituales de esta clase son el peróxido de hidrógeno estabilizado o soluciones, ácido perclórico y sus sales, cloritos, hipocloritos, permanganatos, percarbonatos, etc.

En la figura 7 aparece la etiqueta que deben llevar las mercancías de la clase 5.1, de color amarillo con el símbolo de la llama sobre un cuerpo esférico, símbolo

normalizado para materiales comburentes, y con el número 5.1 para indicar la clase a la que pertenece la mercancía transportada:



Figura 7 – Etiqueta genérica para materias comburentes de la clase 5.1

Clase 5.2. Peróxidos orgánicos.

En la clase 5.2 se incluyen todas aquellas materias orgánicas derivadas del peróxido de hidrógeno, en el cual uno o dos de los átomos de hidrógeno son sustituidos por radicales orgánicos, de forma que queda un compuesto con la estructura bivalente -O-O-.

Son sustancias comburentes como las de la clase 5.1, pero con el añadido de que también son combustibles y relativamente inestables, ya que pueden desprender oxígeno al descomponerse, favoreciendo el efecto de una combustión en cadena. De ahí que esta clase tenga una especial peligrosidad, al ser estas materias al mismo tiempo comburentes y combustibles.

Se clasifican en siete tipos (desde la A hasta la G) según el grado de peligrosidad que presenten. Además, se pueden clasificar en dos grandes grupos atendiendo a su necesidad de regulación de temperatura en el transporte:

- Peróxidos orgánicos para los que no se requiere regulación de temperatura: van desde el n° ONU 3101 hasta 3110, sólidos o líquidos.

- **Peróxidos orgánicos para los que se requiere regulación de temperatura:** van desde el n° ONU 3111 hasta 3120, sólidos o líquidos. Para las materias de este grupo, la temperatura de regulación se calcula a partir de la temperatura de descomposición autoacelerada (TDAA), característica de cada tipo de peróxido.

En la figura 8 se muestra la etiqueta empleada para señalar las mercancías de este grupo, que combina el color amarillo propio de las materias comburentes (clase 5.1) con el color rojo y el símbolo de la llama propios de los sólidos inflamables (clase 3). Además, se muestra el número 5.2 para indicar a que clase pertenece la mercancía transportada.



Figura 8 - Etiqueta genérica para las mercancías de la clase 5.2

Clase 6.1. Materias tóxicas.

Dentro de esta clase se engloba una enorme variedad de sustancias que, pese a que muchas veces no tienen ni afinidades químicas ni características físicas comunes, se clasifican en esta clase por tener en común su toxicidad para el ser humano, los animales y el medio ambiente.

Son sustancias de las que se conoce a través de la experiencia o ensayos que son capaces de dañar la salud del ser humano o causar su muerte por inhalación, absorción cutánea o ingestión mediante una exposición única o de corta duración y en dosis pequeñas relativamente.

Las sustancias de esta clase se pueden distinguir en función de su vía de afección:

- Tóxicos por inhalación.
- Tóxicos por ingestión.
- Tóxicos por absorción cutánea.

Estas materias se pueden subdividir en los grupos que aparecen en la tabla 11:

Grupo	Descripción
A	Materias muy tóxicas por inhalación, con un punto de inflamación inferior a 23 °C.
B	Materias orgánicas con un punto de inflamación igual o superior a 23 °C, o materias orgánicas no inflamables.
C	Compuestos organometálicos y carbonilos.
D	Materias inorgánicas que, al contacto con el agua (al igual que con la humedad ambiental), con soluciones acuosas o con ácidos, puedan desprender gases tóxicos y otras materias tóxicas que reaccionan con el agua.
E	Las demás materias inorgánicas y las sales metálicas de las materias orgánicas.
F	Materias y preparaciones que se usen como plaguicidas.
G	Materias destinadas a laboratorios y a experimentación, así como a la fabricación de productos farmacéuticos, siempre y cuando no aparezcan enumeradas en otros apartados de esta clase.
H	Envases vacíos.

Tabla 11 - División de materias tóxicas de clase 6.1

De la misma manera que se hacía para clases anteriores, es habitual que las materias se clasifiquen atendiendo a su peligrosidad en función de su grado de toxicidad.

Algunas materias pertenecientes a esta clase son el cianuro de hidrógeno estabilizado y disoluciones, los carbonilos, los hidrocarburos halogenados, las mezclas antidetonantes para combustibles de motores, los cianuros, los nitruros, los compuestos de arsénico o de mercurio, etc.

La tabla 12 aporta criterios de clasificación en función de la peligrosidad a partir de los valores de dosis letal (DL₅₀) para toxicidad por ingestión y absorción cutánea y concentración letal (CL₅₀) para toxicidad por inhalación.

Grado de toxicidad	Toxicidad por ingestión DL ₅₀ (mg/kg)	Toxicidad por absorción cutánea DL ₅₀ (mg/kg)	Toxicidad por inhalación CL ₅₀ (mg/l) (Polvos y nieblas)
Muy tóxicas	≤ 5	≤ 40	≤ 0.5
Tóxicas	> 5-50	> 40-200	> 0.5-2
Que presentan un menor grado de toxicidad	<i>Materias sólidas</i> >50-200	> 200-1000	> 2-10
	<i>Materias líquidas</i> >50-500		

Tabla 12- Clasificación de las materias tóxicas según DL50 y CL50

En la figura 9 se muestra la etiqueta empleada para señalar las mercancías de este grupo, que, al igual para el caso de los gases tóxicos (clase 2), emplea el símbolo de la calavera sobre fondo blanco, mostrando además el número 6 para indicar la clase a la que pertenece la mercancía transportada.



Figura 9 – Etiqueta genérica para las materias tóxicas de la clase 6.1

Clase 6.2. Materias infecciosas.

Dentro de esta clase se agrupan todas aquellas materias de las que se conoce o de las que hay razones para creer que contienen agentes patógenos. Estos agentes

pueden ser microorganismos simples, como las bacterias, los virus, los parásitos o los hongos, o microorganismos recombinados, híbridos o mutantes, que se conoce o se sospecha que son capaces de provocar enfermedades infecciosas a los animales o a los seres humanos.

En esta clase se engloban elementos como piel, restos de animales, vísceras, preparaciones o cultivos de virus, bacterias, muestras de tejidos o sangre, etc.

En la tabla 13 se muestran los grupos en los que se puede subdividir la clase 6.2.

Grupo	Descripción
A	Materias infecciosas con un potencial de riesgo elevado.
B	Otras materias infecciosas.
C	Envases vacíos.

Tabla 13 – División de materias infecciosas de clase 6.2

En la figura 10 se muestra la etiqueta que debe acompañar a los vehículos que transportan mercancías de este grupo, que emplea el símbolo del peligro biológico sobre fondo blanco, mostrando además el número 6 para indicar la clase a la que pertenece la mercancía transportada.



Figura 10 – Etiqueta genérica para las materias infecciosas de la clase 6.2

Clase 7. Materiales radiactivos.

En esta clase se engloban todas aquellas sustancias que emiten partículas y radiaciones capaces de provocar daños en las células y tejidos. Dentro de esta clase se incluyen los combustibles nucleares, isótopos radiactivos y todos los compuestos que contienen materiales radiactivos. Uranio, torio y en general todos los emisores de partículas y radiaciones nucleares.

Dentro de la clase 7, según las intensidades de radiación que emiten, las materias se clasifican en tres categorías:

- Categoría I, Blanca.
- Categoría II, Amarilla.
- Categoría III, Amarilla.

En función de la categoría a la que pertenece, así será el grado de blindaje de los contenedores necesario para su transporte seguro.

En la figura 11 se muestra la etiqueta que debe acompañar a los vehículos que transportan materias radiactivas de la clase 7, que emplea el símbolo del peligro por radiación sobre un fondo amarillo (para las categorías II y III) o blanco (para la categoría I), con la palabra radioactivo sobre fondo blanco seguido por un número en números romanos del 1 al 3 para indicar la categoría, mostrando además el número 7 para indicar la clase a la que pertenece la mercancía transportada.



Figura 11 - Etiqueta genérica para señalar materias radiactivas de la clase 7

Clase 8. Materias corrosivas.

Pertenecen a este grupo aquellas materias capaces mediante su acción química de dañar el tejido epitelial de la piel y las mucosas al entrar en contacto con ellas, o que, en caso de fuga, puedan originar daños a otras mercancías, a los medios de transporte o infraestructura, o destruirlos, pudiendo provocar otros peligros. También se engloban en este grupo materias que se transforman en líquido corrosivo al entrar en contacto con el agua o que con la humedad natural del aire pueden generar vapores o neblinas corrosivos.

El término corrosivo no determina un tipo específico de productos que posean ciertas características estructurales comunes, químicas o reactivas. Los hay líquidos, gases y sólidos. Algunos son ácidos, otras bases y sales corrosivas. La mayoría tienen carácter inorgánico, pero los hay también orgánicos.

Atendiendo a su peligrosidad se pueden clasificar en función de su grado de corrosividad, al igual que para materias de las clases anteriores.

Las materias de esta clase se subdividen atendiendo a su estructura química y su carácter ácido o básico de la siguiente manera:

- **Materias corrosivas ácidas:** son las sustancias corrosivas más importantes por el volumen de su producción y transporte en España. Existe una gran variedad de materias de este tipo, y se pueden subdividir en ácidos inorgánicos (ácido sulfúrico, nítrico, clorhídrico, perclórico, fluorhídrico...) y ácidos orgánicos (ácido acético, fórmico, haluros orgánicos, clorosilanos...).
- **Materias corrosivas básicas:** pueden ser inorgánicas como los hidróxidos sódico y potásico, el hipoclorito sódico, etc; o bien orgánicas como las hidracinas, aminas alquílicas, poliaminas, etc. Por lo general, las bases suelen presentar un grado muy alto de corrosividad.
- **Otras materias corrosivas:** las más importantes son disoluciones de peróxido de hidrógeno y soluciones de hipoclorito. Las disoluciones de peróxido de hidrógeno de menos del 60% son consideradas corrosivas y no de la clase 5.1. Las disoluciones de menos del 8% no se consideran materias peligrosas y no están afectadas por estas regulaciones. Las disoluciones de hipoclorito de menos del 16% de cloro activo pertenecen a esta clase. Las de menos del 5% de cloro activo no están afectadas por estas regulaciones.

En la figura 12 se muestra la etiqueta que debe acompañar a los vehículos que transportan materias corrosivas de la clase 8, que emplea el símbolo de un tubo de ensayo vertiendo líquido corrosivo sobre una superficie y una mano, en un fondo bicolor blanco y negro, mostrando además el número 8 para indicar la clase a la que pertenece la mercancía transportada.



Figura 12 - Etiqueta genérica que acompaña a las materias corrosivas de la clase 8

Clase 9. Materias y objetos peligrosos diversos.

Son materias y objetos que, durante el transporte, suponen un peligro diferente de los que contemplan las restantes clases. En la tabla 14 aparecen los diferentes subgrupos en los que se dividen las materias dentro de esta clase.

Grupo	Descripción
A	Materias que, inhaladas en forma de polvo fino, puedan poner en peligro la salud. Amianto y sus mezclas azul, marrón y blanco.
B	Materias y aparatos que, en casos de incendio, pueden formar dioxinas: son los denominados PCB y PCT, bifenilos y terfenilos policlorados y polihalogenados y sus mezclas (Las mezclas cuyo contenido de PCB o PCT no sobrepasen de 50 mg/kg, no están afectadas por estas regulaciones). Además, se incluyen los aparatos que contengan PCB o mezclas como transformadores, condensadores, aparatos hidráulicos que contengan ciertos tipos de aceites con piralenos o materias similares.
C	Materias que desprenden vapores inflamables: polímeros expansibles que contienen líquidos inflamables.
D	Pilas de litio.
E	Aparatos de salvamento: aquellos que contengan señales fumígenas u otras materias para hacer señales.
F	Materias peligrosas para el medio ambiente: son materias líquidas y sólidas contaminantes del medio ambiente acuático y soluciones que no estén clasificadas en las demás clases. Parafinas cloradas, pesticidas, etc. También son los organismos y microorganismos modificados genéticamente.
G	Materias transportadas a temperatura elevada.

H	Otras materias que presenten un riesgo durante el transporte pero que no se correspondan con las definiciones de ninguna otra clase.
I	Envases y embalajes vacíos.

Tabla 14 - División de materias y objetos peligrosos de clase 9

Estas materias se pueden clasificar también, al igual que para clases anteriores, siguiendo criterios de peligrosidad.

En la figura 13 se muestra la etiqueta que debe acompañar a los vehículos que transportan materias de la clase 9, que está dividida en dos partes iguales, una a rayas blancas y negras, y otra blanca, y se muestra además el número 9 para identificar la clase a la que pertenece la mercancía transportada.

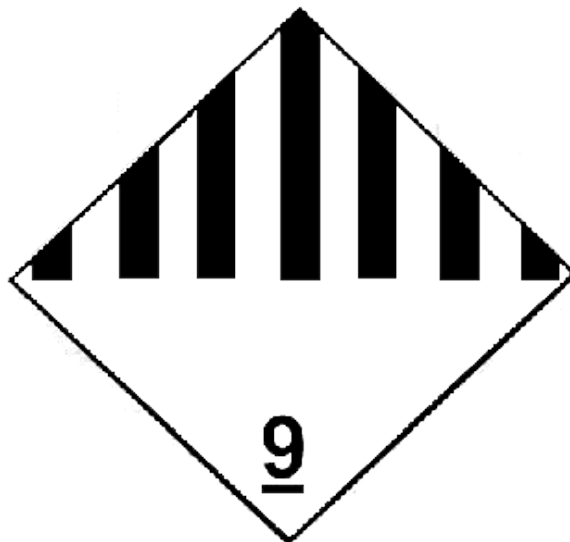


Figura 13 - Etiqueta genérica que acompaña las mercancías de la clase 9

2.2.1.3. Otras clasificaciones.

Además de la clasificación de las mercancías peligrosas utilizando las clases ADR/RID, existen multitud de variantes para clasificar las mercancías peligrosas en función de parámetros muy diversos. Por lo general, todas las clasificaciones comparten algunos objetivos, ya que todas están orientadas a mitigar las consecuencias de accidentes en los que estén involucradas mercancías peligrosas, dando pautas para un correcto embalaje y señalización de estas mercancías, así como a dar una guía de actuación para los servicios de emergencia en caso de que un accidente así se produzca.

Una de estas clasificaciones es la de Residuos Tóxicos y Peligrosos (RTP), que pese a que pueden englobarse en alguna de las clases definidas anteriormente por sus características químicas o físicas, y, por tanto, estar bajo la reglamentación ADR y RID, están sujetos a una especial regulación.

Los recipientes o envases que contengan residuos tóxicos y peligrosos deben estar etiquetados de forma clara, legible e indeleble, al menos en la lengua oficial del Estado. En la etiqueta debe figurar al menos la siguiente información:

- El código de identificación del residuo.
- Nombre, dirección y teléfono del titular del residuo.
- Fechas de envasado.
- Naturaleza de los riesgos que presentan los residuos.

Las clasificaciones de RTP se pueden realizar en función de varias características, dependiendo del criterio que se emplee para elaborarlas:

- Tipos genéricos de RTP: aparecen 41 tipos de sólidos, líquidos, lodos, y gases comprimidos o licuados.
- Clasificación en función de los constituyentes de los residuos, que dependiendo de las cantidades y forma de presentación del residuo le pueden dar un carácter tóxico y peligroso: aparecen desde C1 hasta C54 (no correlativos), que designan el o los componentes principales del residuo o las familias químicas a las que pueden asignarse.
- Clasificación por sus características. Al ser la clasificación más comparable a la de las mercancías peligrosas, es la adjunta en la tabla 15.

Grupo	Descripción
H1	Explosivos: sustancias y preparados que puedan explosionar bajo el efecto de la llama o que son más sensibles a los choques o a las fricciones que el dinitrobenceno.

H2	Comburentes: sustancias y preparados que presenten reacciones altamente exotérmicas al entrar en contacto con otras sustancias, en particular sustancias inflamables.
H3-A	Fácilmente inflamables: sustancias y preparados que tengan un punto de inflamación inferior a 21 °C.
H3-B	Inflamables: sustancias y preparados líquidos que tengan un punto de inflamación superior o igual a 21 °C e inferior o igual a 55 °C.
H4	Irritantes: sustancias y preparados no corrosivos que puedan causar reacción inflamatoria por contacto inmediato, prolongado o repetido con la piel o las mucosas.
H5	Nocivos: sustancias y preparados que por inhalación, ingestión o penetración cutánea, puedan entrañar riesgos de gravedad limitada para la salud.
H6	Tóxicos: sustancias y preparados (incluidos los preparados y sustancias muy tóxicos) que por inhalación, ingestión o penetración cutánea, puedan entrañar riesgos graves, agudos o crónicos, incluso la muerte.
H7	Carcinógenos: sustancias y preparados que por inhalación, ingestión o penetración cutánea, puedan producir cáncer o aumentar su frecuencia.
H8	Corrosivos: sustancias y preparados que puedan destruir tejidos vivos al entrar en contacto con ellos.
H9	Infecciosos: materias que contienen microorganismos viables o sus toxinas, de los que se sabe o existen razones fundadas para creer que causan enfermedades en el ser humano o en otros organismos vivos.
H10	Tóxicos para la reproducción: sustancias y preparados que por inhalación, ingestión o penetración cutánea, puedan inducir malformaciones congénitas no hereditarias o aumentar su frecuencia.
H11	Mutagénicos: sustancias y preparados que por inhalación, ingestión o penetración cutánea puedan producir defectos genéticos hereditarios o aumentar su frecuencia.
H12	Sustancias o preparados que emiten gases tóxicos o muy tóxicos al entrar en contacto con el aire, con el agua o con un ácido.
H13	Materias susceptibles, después de su eliminación, de dar lugar a otra sustancia por un medio cualquiera, por ejemplo lixiviado, que posea alguna de las características enumeradas anteriormente.
H14	Peligrosos para el medio ambiente: sustancias y preparados que presenten o puedan presentar riesgos inmediatos o diferidos para el medio ambiente.

Tabla 15 - Características y denominación de los RTP

El Reglamento de Residuos Tóxicos y Peligrosos establece una serie de requisitos a mayores que las disposiciones del ADR y RID en lo referente al transporte de residuos peligrosos, aumentando así las condiciones de seguridad requeridas para el transporte.

La clasificación anterior es solo orientativa, en función de la composición química del producto, y es demasiado generalista en cuanto a las propiedades de riesgo de cada uno de los productos, además de agrupar en el mismo subgrupo materiales con

comportamientos muy heterogéneos. Por ello, emplearla como base para un análisis de riesgos puede dirigirnos hacia errores de importancia.

Otra clasificación de interés para las mercancías peligrosas es la que se encuentra en la “Guía Norteamericana de Respuesta en Caso de Emergencia” (CANUTEC, 2012), que clasifica las 3.500 mercancías peligrosas contenidas en el “Libro Naranja” de la ONU en 62 grupos, a los que denomina *números guía* de intervención, y que constituyen, de alguna manera, una clasificación según comportamientos homogéneos.

Esta es la clasificación que empleó en su proyecto Á. Arranz Zazo (2013), debido a que su agrupamiento de mercancías por comportamiento y peligrosidad en lugar de por su composición físico-química, la hace óptima para generar diferentes mapas de análisis de riesgo para cada tipo de comportamiento del producto transportado, de ahí su interés. Puesto que los mapas generados durante ese proyecto son la base de datos para la aplicación del presente proyecto, se va a respetar esta clasificación.

Esta clasificación está elaborada conjuntamente por los Departamentos de Transporte de Estados Unidos y Canadá y el Secretariado de Comunicaciones y Transportes de México, y es una guía concebida para dar unas pautas de respuesta inicial para los servicios de emergencia que deben actuar en caso de accidente relacionado con una de estas mercancías. Esta clasificación utiliza la identificación a partir del número ONU de los peligros asociados a la mercancía en cuestión, y también define las distancias de aislamiento y control en caso de accidente a partir de la experiencia empírica respetando un cierto margen de seguridad.

Esta guía se actualiza cada tres años, con el fin de adecuarse a los nuevos materiales y tecnologías.

En la misma línea de esta clasificación está la “Guía de Primera Intervención para el Transporte de Mercancías Peligrosas” elaborada por la Dirección General de Protección Civil, que fundamentalmente identifica a los productos a partir del *número ONU*, y se concentra principalmente en los medios y tipos de intervención contra cada uno de los productos.

2.2.2. El transporte.

El transporte de mercancías peligrosas se define como el proceso mediante el cual se produce el desplazamiento de una materia clasificada como peligrosa por alguna de sus características físicas o químicas, entre dos puntos geográficos diferentes.

El transporte de este tipo de mercancías es especialmente problemático, ya que la distancia a la cual una materia peligrosa almacenada en un punto fijo puede generar un riesgo ambiental o de salud se multiplica exponencialmente, estando expuestos una infinidad de ecosistemas, infraestructuras o comunidades, que se encuentran en la ruta seguida por un vehículo que transporte mercancías peligrosas, a este riesgo. Por si esto fuera poco, una mercancía peligrosa mientras está siendo transportada se ve sometida a todas las vicisitudes que rodean al tráfico aéreo, marítimo o terrestre, sea por carretera o por vía férrea, y a la aleatoriedad en la aparición de ciertos eventos que pueden provocar un accidente durante una operación de transporte.

En general, el transporte de mercancías peligrosas ha ido evolucionando de la mano del transporte a lo largo de la historia. No obstante, a partir de la revolución industrial las cantidades de materias peligrosas producidas y transportadas han experimentado un crecimiento exponencial, por lo que también ha aumentado el peligro que supone dicho transporte. Sin embargo, los conceptos implícitos de riesgo siguen siendo los mismos.

Una desigual distribución de los yacimientos fósiles a lo largo del planeta, y el abaratamiento de los costes del transporte, ha provocado que en los últimos años haya habido un gran incremento en la intensidad del flujo de estas materias primas por todo el mundo. Alrededor del 44% del petróleo, el 14% del gas y el 11% del carbón son objeto de transacciones internacionales.

Los medios de transporte de mercancías peligrosas más empleados son los transportes terrestres por carretera y ferrocarril para la distribución zonal y capilar; los fletes marítimos para la distribución a granel y a grandes distancias, concentrándose principalmente en el abastecimiento de productos petrolíferos desde los yacimientos a los centros de refino; y los transportes aéreos, que están mucho más limitados a

cantidades menores que demandan una mayor rapidez en la distribución de productos a grandes distancias, o a transportes militares.

En el presente trabajo, en relación al tipo de transporte de mercancías peligrosas, nos subscribiremos al transporte por carretera en el ámbito geográfico de Castilla y León.

2.2.2.1. Comparativa de siniestralidad entre el transporte de mercancías comunes y el de mercancías peligrosas.

Para la obtención de los datos se han consultado los boletines, anuarios estadísticos o informes de las siguientes unidades administrativas:

- Instituto Nacional de Estadística.
- Dirección General de Tráfico y la Dirección General de Protección Civil y Emergencias, del Ministerio del Interior.
- Subdirección General de Estadística y Estudios y fuentes propias del Gabinete de Ordenación y Coordinación del Transporte de Mercancías Peligrosas, del Ministerio de Fomento.

Cuando se habla del transporte de mercancías peligrosas, es importante destacar que la mayor parte de los accidentes se deben a factores humanos o fallos mecánicos del vehículo o convoy, mientras que es una minoría de las ocasiones en las que el accidente es debido a fallos en los embalajes de las mercancías transportadas.

Además, cuando se produce un accidente con víctimas en el transporte terrestre en el que está involucrado un vehículo que transporta mercancías peligrosas, el porcentaje de las víctimas que se deben a las mercancías peligrosas transportadas oscila entre el 3% y el 7 %, mientras que el resto de las víctimas se deben al accidente en sí.

La exigencia de capacitación profesional de los conductores de vehículos para el transporte de mercancías peligrosas, la observancia en el cumplimiento de los tiempos

de descanso y demás normas más restrictivas a las que se someten: las restricciones al tráfico en determinados horarios y por determinadas vías, así como las condiciones que se imponen a los vehículos de este transporte, tanto en su construcción como en las inspecciones, han influido sin duda alguna en buena parte en los resultados tan favorables en cuanto a siniestralidad del transporte terrestre de mercancías peligrosas se refiere.

Transporte por Carretera.

Como se puede observar, tanto el número de mercancías como el de mercancías peligrosas transportadas por carretera se incrementa cada año, mientras que el número de accidentes con víctimas no presenta una clara tendencia ni en el número total de accidentes con víctimas en carretera, ni en el transporte de mercancías en general ni en el transporte de mercancías peligrosas. (Secretaría General de Transportes, 2011).

Transporte por ferrocarril.

Por el contrario, en lo relacionado con el transporte por ferrocarril, tanto el número de mercancías comunes como el de mercancías peligrosas transportadas sufre pocas variaciones de año en año, no presenta una clara tendencia, mientras que en el número de accidentes en el transporte de mercancías comunes se observa una tendencia de descenso que no aparece en el transporte de mercancías peligrosas.

Es importante resaltar que el número de accidentes por millón de toneladas transportadas en el transporte de mercancías peligrosas por ferrocarril es más elevado, en general, que en el resto de mercancías y presenta una tendencia ascendente, mientras que para las mercancías en general la tendencia es descendente (Secretaría General de Transportes, 2011).

2.2.3. Producción, consumo y recorridos en España.

Dentro de este apartado se va a presentar un pequeño resumen sobre los volúmenes de mercancías peligrosas producidos, consumidos y transportados en España, sin ser una un análisis desglosado ni una estimación detallada, sino más bien una pequeña introducción que aporte una idea general sobre los órdenes de magnitud de las cantidades con las que se va a trabajar.

La información ha sido extraída fundamentalmente de los datos recogidos y elaborados por el ministerio de fomento en el “estudio comparativo de la siniestralidad en el transporte terrestre de mercancías peligrosas” (Secretaría General de Transportes, 2011). Según la fuente citada, mientras que en el año 2000 se transportaban sobre 88,9 millones de toneladas en 2010 la cantidad transportada media en España de mercancía peligrosa era alrededor de 213,6 millones de toneladas. Hablamos de consumo aparente y no de consumo real, ya que los problemas de stocks pueden desconfigurar mucho los datos.

Debido a la importancia de los productos energéticos derivados del petróleo dentro del campo de las mercancías peligrosas, las ocho provincias de la península que cuentan con refinerías de petróleo, que son A Coruña, Vizcaya, Huelva, Ciudad Real, Murcia, Cádiz, Castellón y Tarragona, producían el 88,5% de los 65 millones totales en el año 1.979. Si a éstas les añadimos Barcelona y Santander, con importantes sectores químicos, reúnen entre las diez el 92% del total, quedando para las 40 provincias restantes el 8% de la producción. Por lo tanto, podemos afirmar que España es un país con una producción muy concentrada.

De todos los productos descritos en el apartado sobre las mercancías peligrosas, hay tres, que son los combustibles líquidos (fueles, gasóleos y gasolinas), que representan aproximadamente un 80% del total de productos peligrosos transportados, relación que se mantiene actualmente.

A finales de los años setenta, en relación a la distribución del transporte por superficie, la participación de la carretera y el ferrocarril era del 50% para cada uno, aproximadamente. A partir de ahí, la tecnología para el transporte por carretera y las infraestructuras comenzaron a mejorar exponencialmente, por lo que la carretera empezó a tomar mucha más fuerza, y ya a mediados de la década de los 80, la proporción era bastante diferente: un 90% de las mercancías peligrosas que se transportaba por superficie utilizaba la carretera, mientras que sólo un 10% empleaba como medio de locomoción el ferrocarril. En años posteriores, el ferrocarril ha ido recuperando parte de la cuota de mercado perdida hasta situarse alrededor de un 25% del transporte de mercancías peligrosas por superficie.

Existen varias razones para explicar el porqué de la disminución del transporte de mercancías peligrosas mediante el ferrocarril en la primera mitad de la década de los 80. El principal motivo del descenso seguramente estuvo asociado al incremento del transporte por tubería en nuestro país, por el desarrollo del Plan Energético Nacional (PEN), particularmente en el caso de los combustibles de la Clase 3 del ADR, y también, por la sustitución de los mismos por combustibles gaseosos, a consecuencia de las variaciones del mercado.

Cabe destacar de un modo especial el auge del gas natural, transportado mediante gasoductos, que ha sustituido en muchos casos a los combustibles líquidos para algunas aplicaciones, además de provocar una disminución del consumo, y por tanto, del transporte de los GLP (Gases Licuados del Petróleo), principalmente del butano y propano.

El posterior “renacer” del ferrocarril fue debido a la toma de una serie de medidas, fundamentalmente de mejora del servicio, formación, mentalización de su personal y desarrollo comercial, aunque sin llegar a alcanzar la importancia anterior a la crisis energética de los setenta.

Generalmente, la siniestralidad del transporte por ferrocarril es bastante menor al transporte por carretera; sin embargo, debido a que la cantidad de producto transportado por unidad de transporte es muchísimo mayor en el caso del ferrocarril que en el caso del transporte por carretera, las consecuencias de un accidente ferroviario serán habitualmente mucho más severas que las de un accidente por carretera.

2.2.3.1. Recorridos medios y unidades de tráfico.

Con los datos de los que se dispone, y teniendo en cuenta que se han excluido los datos sobre transportes interiores y zonales, así como los de la distribución, el reparto y el transporte capilar, los recorridos medios aproximados correspondientes al transporte interzonal son de 180 km para el transporte por carretera y de 220 km para el transporte ferroviario. Para el cálculo de estos recorridos medios están excluidos los transportes realizados dentro de las áreas interzonales, lo que haría que los recorridos medios fueran mayores.

Se puede hacer un cálculo también de las toneladas totales transportadas en España mediante cada uno de los dos medios de locomoción entre el número de kilómetros totales recorridos por este tipo de mercancías. Estos valores son de:

- 11,7 millones de toneladas por kilómetro para el transporte de mercancías peligrosas por carretera.
- 47,5 millones de toneladas por kilómetro para el transporte de mercancías peligrosas por ferrocarril.

Tal y como se puede ver, la estadística para el ferrocarril prácticamente multiplica por cuatro el valor para el transporte por carretera, debido indudablemente a la capacidad de carga mucho mayor que posee un tren respecto de un camión.

2.2.3.2. Localización de los centros más importantes de producción y consumo de materiales peligrosos en España.

Para tener una visión completa de las principales rutas de transporte de mercancías peligrosas en España, es necesario partir de un conocimiento de la ubicación geográfica de las principales refinerías de petróleo, de los complejos químicos y petroquímicos, de las centrales nucleares y de los centros de recepción y consumos de mercancías peligrosas más importantes de nuestro país. En los subapartados siguientes se hará un repaso de los núcleos con flujo de mercancías peligrosas más importantes del país.

Refinerías y terminales de oleoductos.

Las refinerías españolas más importantes se encuentran en Huelva, Cartagena (Región de Murcia), Algeciras (Cádiz), Castellón, Somorrostro (Vizcaya), Tarragona, A Coruña, Puertollano (Ciudad Real) y Santa Cruz de Tenerife.

Por su parte, los terminales de oleoducto más importantes de España están ubicados en Málaga, Rota (Cádiz), Puertollano (Ciudad Real), Almodóvar de Campos (Ciudad Real), Loeches (Comunidad de Madrid), Villaverde (Comunidad de Madrid), Barajas (Comunidad de Madrid), Zaragoza, Ayoluengo de la Lora (Burgos) y Quintanilla Escalada (Burgos).

Puertos.

Los puertos españoles más utilizados en el transporte de mercancías peligrosas son los de Huelva, Bahía de Cádiz, Algeciras (Cádiz), Málaga, Cartagena (Región de Murcia), Valencia, Castellón, Tarragona, Barcelona, Bilbao, Santander, Gijón-Musel (Asturias), Avilés (Asturias), A Coruña, Santa Cruz de Tenerife y Puerto de la Luz (Las Palmas).

Industrias Petroquímicas y Nucleares.

Las industrias químicas y petroquímicas con mayor importancia dentro de España se sitúan en Huelva, Algeciras (Cádiz), Cartagena (Región de Murcia), Castellón, Tarragona, Martorell (Barcelona), Bilbao, Torrelavega (Cantabria) y Sabiñánigo (Huesca).

Es de interés también una referencia a las centrales nucleares de Ascó (Tarragona), Vandellós (Tarragona), Santa María de Garoña (Burgos), José Cabrera (Guadalajara, actualmente en proceso de desmantelamiento), Cofrentes (Valencia), Trillo (Guadalajara) y Almaraz (Cáceres).

Otras instalaciones de interés para el análisis del flujo de mercancías peligrosas de la clase 7 son la Empresa Nacional del Uranio situada en Juzbado (Salamanca) y la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos en el Cbril (Córdoba).

2.2.4. Marco Normativo y Recomendaciones.

El marco normativo que rodea el transporte de mercancías peligrosas, se ocupa de dar normas generales y normas específicas para los diferentes medios para el transporte: aéreo, marítimo, ferroviario y por carretera. Además, cuando se trata de transporte de materiales radioactivos de la clase 7, se ofrecen una serie de medidas de seguridad específicas para adaptarse a la especial peligrosidad de estas materias.

En este apartado, se obviarán todas aquellas normativas específicas para medios de transporte diferentes al terrestre por carretera, pero sí que se presentará sin embargo una serie de normas de carácter general que sirven para cualquier medio en el que se pueda transportar mercancías peligrosas.

2.2.4.1.- Organismos.

Los principales organismos que han dictado normas de seguridad para el transporte de mercancías peligrosas de aplicación en un contexto internacional son:

- **ONU** (Organización de las Naciones Unidas).
- **ISO** (International Organization for Standardization): es un organismo internacional encargado de promover el desarrollo de normas internacionales, entre las cuales se encuentran las de Transporte y Seguridad.
- **IAEA** (International Atomic Energy Agency): Es un organismo perteneciente a las Naciones Unidas encargado de establecer una serie de normas de seguridad nuclear y protección ambiental, así como de promover la cooperación técnica entre los países miembros para trabajar por una contribución de la energía atómica para la paz, la salud y la prosperidad del mundo.
- **ADR** (Agreement for the International Carriage of Dangerous Goods by Road): Acuerdo Europeo para el Transporte de Mercancías Peligrosas por Carretera, para regular el embalaje, transporte, documentación y demás aspectos del transporte de mercancías peligrosas.

Además, existen otras asociaciones y organismos que, aunque no tienen validez legal más allá de las fronteras de su país, las normas que promulgan han servido habitualmente para desarrollar y promulgar nuevas normas por parte de los organismos internacionales:

- **NFPA** (National Fire Protection Association), organización estadounidense, que elabora y actualiza los “NFPA Codes”, que son la base de la mayoría de los códigos tanto nacionales como internacionales en materia de fuegos, prevención de incendios, materiales de lucha contra incendios...
- **ANSI** (American National Standards Institute), organización sin ánimo de lucro que se encarga de supervisar el desarrollo de normas y estándares en Estados

Unidos. En lo referido al campo de las mercancías peligrosas, elabora normas de seguridad acerca del almacenamiento, transporte, diseño...

Existe además un organismo que está experimentando un auge en prestigio en algunos aspectos referidos al transporte de mercancías peligrosas en los últimos años, el CEFIC (Conseil Europeen des Federations de l'Industrie Chimique), con sede en Zúrich, y que agrupa las asociaciones de empresas de productos químicos de los países europeos más importantes, España entre ellos.

Entre los diferentes trabajos del CEFIC, destacan las TREMCARDS (Transport Emergency Cards), que son unas fichas con recomendaciones de seguridad, que suponen una pequeña guía de actuación ante situaciones de emergencia en el transporte de los principales productos químicos peligrosos.

2.2.4.2.- Normativa aplicable al transporte de mercancías peligrosas

La mayoría de las normas de los acuerdos internacionales se han ido incorporando paulatinamente, salvo algunas excepciones, a los reglamentos nacionales para el transporte interior, y, por lo tanto, los requisitos de transporte, nacionales e internacionales, ya sea por carretera, ferrocarril y vías navegables interiores, por lo que se ha alcanzado ya un alto grado de compatibilidad entre las normativas nacionales e internacionales de los diferentes países.

Tal y como se ha indicado en el apartado anterior, únicamente se mencionará la normativa asociada al transporte de mercancías peligrosas por carretera, método en el que está centrado el presente proyecto. Este es el método más habitual y voluminoso en España, salvo si nos referimos al transporte de crudo y productos petrolíferos, el cual se realiza habitualmente por mar o por tubería.

Tanto el transporte nacional como el internacional, se rigen por el Acuerdo Europeo sobre Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Carretera (ADR), con sede en Ginebra. Este Acuerdo tiene como objetivo principal regular las condiciones del transporte de materias y objetos considerados como peligrosos. Nacido en el seno de la Comisión Económica de las Naciones Unidas el 30 de septiembre de 1957, engloba un gran número de países dentro del ámbito europeo.

España se adhirió a este Acuerdo el 22 de febrero de 1972 y las regulaciones fueron aprobadas por nuestro país y publicadas en el B.O.E. del 9 de Julio de 1973. Periódicamente se han ido publicando en el B.O.E. actualizaciones del ADR, entrando la última en vigor el 1 de enero de 2011, constando de los Anexos A (Disposiciones relativas a las materias y objetos peligrosos) y B (Disposiciones relativas al material de transporte y al transporte) (UNECE, 2011).

Para el transporte por carretera en la unión Europea, se aplica la siguiente normativa específica de emergencias:

- Directiva 95/50/CE del Consejo, de 6 de octubre de 1995, relativa a procedimientos uniformes de control del transporte de mercancías peligrosas por carretera.
- Directiva 94/55/CE del Consejo, de 21 de noviembre de 1994, sobre la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros con respecto al transporte de mercancías peligrosas por carretera. Diario Oficial nº L 319 de 12/12/1994. Modificaciones:
 - Directiva 96/86/CE de la Comisión, de 13 de diciembre de 1996, para la adaptación al progreso técnico de la Directiva 94/55/CE del Consejo sobre la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros con respecto al transporte de mercancías peligrosas por carretera (Texto pertinente a los fines del EEE). Diario Oficial nº L 335 de 24/12/1996, págs. 0043 y 0044.
 - Directiva 1999/47/CE de la Comisión, de 21 de mayo de 1999, por la que se adapta por segunda vez al progreso técnico la Directiva 94/55/CE del Consejo sobre la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros con respecto al transporte de mercancías peligrosas por carretera (Texto pertinente a los fines del EEE). Diario Oficial nº L 169 de 05/07/1999, pág. 0001 - 0058.

- Directiva 2000/61/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 10 de octubre de 2000, por la que se modifica la Directiva 94/55/CE del Consejo sobre la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros con respecto al transporte de mercancías peligrosas por carretera. Diario Oficial nº L 279 de 01/11/2000, pág. 0040 - 0043.
- Directiva 2001/7/CE de la Comisión, de 29 de enero de 2001, por la que se adapta por tercera vez al progreso técnico la Directiva 94/55/CE del Consejo sobre la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros con respecto al transporte de mercancías peligrosas por carretera (Texto pertinente a efectos del EEE). Diario Oficial nº L 030 de 01/02/2001, pág. 0043.
- Directiva 96/49/CE del Consejo, de 23 de julio de 1996, sobre la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros relativas al transporte de mercancías peligrosas por ferrocarril, y sus modificaciones. Diario Oficial nº L 235 de 17/09/1996.
- Directiva 2000/61/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 10 de octubre de 2000, por la que se modifica la Directiva 94/55/CE del Consejo sobre la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros con respecto al transporte de mercancías peligrosas por carretera.
- Directiva 2001/7/CE de la Comisión, de 29 de enero de 2001, por la que se adapta por tercera vez al progreso técnico la Directiva 94/55/CE del Consejo sobre la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros con respecto al transporte de mercancías peligrosas por carretera (Texto pertinente a efectos del EEE).

Para el transporte por carretera en España además del ADR, se aplica la siguiente normativa específica de emergencias:

- ADR en vigor: BOE 1 de enero de 2011 (UNECE, 2011).

- Orden FOM/2924/2006, de 19 de septiembre, por la que se regula el contenido mínimo del informe anual para el transporte de mercancías peligrosas por carretera, por ferrocarril o por vía navegable (BOE, 2006).
- Resolución de 21 de Noviembre de 2005, de la Dirección General de Transportes por carretera, sobre la inspección y control por riesgos inherentes al transporte de mercancías peligrosas por carretera. (BOE, 2005).
- Real Decreto 563/2010, de 7 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento de artículos pirotécnicos y cartuchería. (BOE, 2010)
- Orden FOM/605/2004 de 27 de febrero 2004 sobre la capacitación profesional de los consejeros de seguridad para el transporte de mercancías peligrosas por carretera, por ferrocarril o por vía navegable: BOE de 9 de marzo de 2004. (BOE, 2004)
- Real Decreto 1256/2003 de 3 de Octubre, por el que se determinan las autoridades competentes de la administración general del estado en materia de transporte de mercancías peligrosas, y se regula la comisión para la coordinación de dicho transporte. (BOE, 2003)
- Orden FOM/2861/2012, de 13 de diciembre, por la que se regula el documento de control administrativo exigible para la realización de transporte público de mercancías por carretera. (BOE, 2013)
- Resolución de 21 de noviembre de 2005, de la Dirección General de Transportes por Carretera, sobre la inspección y control por riesgos inherentes al transporte de mercancías peligrosas por carretera. (BOE, 2005)
- Orden FOM/2924/2006, de 19 de septiembre, por la que se regula el contenido mínimo del informe anual para el transporte de mercancías peligrosas por carretera, por ferrocarril o por vía navegable. (BOE, 2006)

- Orden de 24 de abril de 2000 por la que se regula el parte de accidente: BOE de 17 de mayo de 2000. (BOE, 2000)
- Real Decreto 818/2009, de 8 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento General de Conductores. (BOE, 2009)
- Reglamento General de Vehículos: BOE 26 de enero de 1998. (BOE, 1998)
- Resolución de 16 de enero de 2013, de la Dirección General de Tráfico, por la que se establecen medidas especiales de regulación del tráfico durante el año 2013. (BOE, 2013)
- Real Decreto 948 /2005, de 29 de julio, por el que se modifica el Real Decreto 1254/1999, de 16 de julio, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas. (BOE, 2005)
- Real Decreto 230/1998, de 16 de febrero, por el que se aprueba el Reglamento de explosivos. (BOE, 1998)
- Real Decreto 407/1992, de 24 de abril, por el que se aprueba la Norma Básica de Protección Civil. (BOE, 1992)

2.2.4.3.- Recomendaciones de la ONU para el transporte de mercancías peligrosas

Debido al carácter internacional de la ONU, a la que pertenecen la mayoría de las naciones del mundo, este organismo ha generado una serie de recomendaciones para el transporte de mercancías peligrosas embaladas, elaboradas por su “Comité de Expertos de Transporte de Mercancías Peligrosas Embaladas” de Nueva York.

Pese a que no tienen un carácter obligatorio, estas recomendaciones constituyen la base de otras regulaciones internacionales e incluso de las que se establecen para el transporte interior dentro de los territorios nacionales, que muchas veces adaptan sus leyes a las normas y recomendaciones generales de la ONU.

Dichas recomendaciones, a pesar de su carácter opcional, tienen una innegable utilidad práctica para todos los involucrados, directa o indirectamente, en la planificación o diseño de elementos relacionados con el transporte de Mercancías Peligrosas. A través de adaptarse a este marco general de recomendaciones, se facilitará que los reglamentos nacionales e internacionales adopten un único sistema de clasificación, numeración, embalaje y etiquetado de las Mercancías Peligrosas.

Los transportistas, los expedidores y las autoridades encargadas de la inspección se beneficiarán con la simplificación de las operaciones de transporte, manipulación e inspección y, con la supresión de trámites, sus tareas serán mucho más sencillas y los obstáculos que dificultan el transporte internacional de las Mercancías Peligrosas se reducirán.

2.2.5. Etiquetados y señalización de peligro.

Existen dos elementos fundamentales para la identificación del peligro de la mercancía transportada en un vehículo: las etiquetas de peligro y los paneles naranjas.

2.2.5.1. Etiquetas de peligro.

Las etiquetas de peligro son unas señales que indican mediante iconos los riesgos que entraña la materia que se transporta, y se suelen colocar sobre las mercancías o sobre los bultos o envases que las contienen.

Código ADR/RID (UNECE, 2011)

El sistema de etiquetado que propone ADR es el que se ha seguido para las etiquetas mostradas en el apartado 2.2.1.2. Clasificación según el ADR/RID para cada una de las clases, y tiene los siguientes objetivos:

- Hacer que las mercancías peligrosas sean fácilmente reconocibles a distancia por el aspecto general (símbolo, color y forma) de sus etiquetas.
- Hacer que la naturaleza del riesgo sea fácilmente reconocible mediante unos símbolos conocidos por todo el mundo.

Los cinco símbolos principales que contienen estas señales, ya mencionados en apartados anteriores, son:

- La bomba: peligro de explosión.
- La llama: peligro de incendio.
- La calavera y las tibias cruzadas: peligro de envenenamiento.
- El trébol esquematizado: peligro de radiactividad.
- Los líquidos goteando de dos tubos de ensayo sobre una mano y una plancha de metal: peligro de corrosión.

Además, se emplean también otros símbolos complementarios en las etiquetas del ADR como:

- Una llama sobre un círculo: materias comburentes.
- Una botella: gases comprimidos no inflamables.
- Tres medias lunas sobre un círculo: sustancias infecciosas.
- Un aspa sobre una espiga de trigo: sustancias nocivas que deben colocarse a distancia de los alimentos
- Siete franjas verticales: sustancias peligrosas varias.

Además de las etiquetas, existen rótulos, que consisten en etiquetas de peligro ampliadas, y que deben ir colocadas en el exterior de las unidades de transporte para advertir al resto de personas de la vía pública, autoridades y servicios de emergencia de los riesgos que entrañan las mercancías transportadas.

Las unidades de transporte deben llevar las etiquetas en al menos dos lados opuestos de la unidad. Estas etiquetas para el exterior del vehículo son cuadradas y

deben tener unas dimensiones mínimas de 25x25 mm y ser resistentes a la intemperie. Se colocan de manera que las diagonales del cuadrado quedan una vertical y otra horizontal.

Identifican, junto con el denominado panel naranja de 40x30 cm, rápidamente y desde el exterior del vehículo la mercancía que se transporta y el tipo de riesgo que conlleva.

2.2.5.2. Panel Naranja.

Los paneles naranja van colocados en el exterior de la unidad de transporte, y se emplean para identificar la naturaleza de la materia que se transporta y los riesgos que entraña en caso de accidente. Deben ser de color naranja, reflectante y con un reborde negro. Sus dimensiones habituales son de 30 x 40 cm.

Estos paneles naranja llevan una serie de números de identificación, de color negro, característicos de cada materia, cuyo significado es el siguiente:

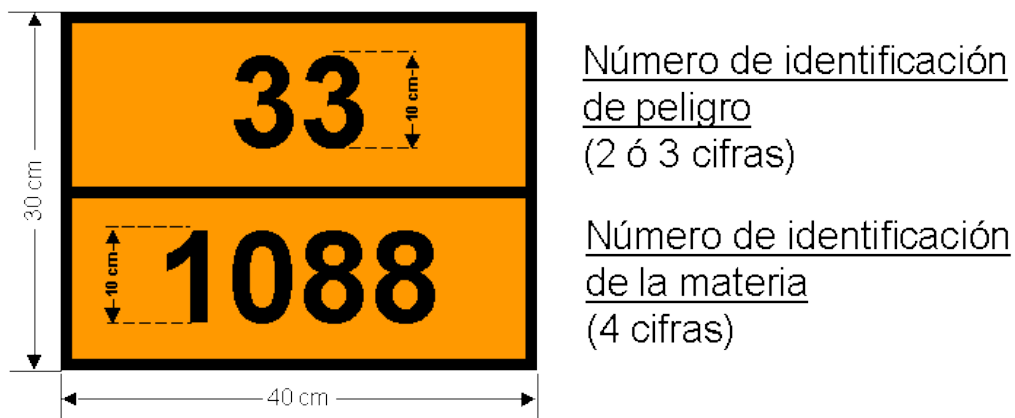


Figura 14 - Panel naranja

En la parte superior del panel se coloca un código de peligro para identificar el tipo de riesgo de la materia que se transporta, es lo que se denomina número de identificación de peligro. Este código se compone de dos o tres números y a veces de la letra X que los precede.

En la parte inferior, aparece un número de cuatro cifras que hace referencia a la identificación de la materia que se transporta. Es lo que se denomina número de la ONU.

La presencia de números en el panel naranja no es obligatoria en los vehículos caja que porten bultos con mercancías peligrosas y en cisternas con capacidad inferior a 3.000 L.

Normalmente se colocan en las partes delantera y trasera de los vehículos, pero en los vehículos cisterna, aquellos que transporten contenedores cisterna y los vehículos o contenedores que transporten mercancías peligrosas a granel, deberán igualmente llevar los paneles naranja en cada lado de la cisterna, los compartimentos de las cisternas o de los vehículos/contenedores para mercancías a granel.

A continuación se detalla, esquemáticamente, la forma de colocar los paneles naranja y las etiquetas de peligro en función del tipo de vehículo del que se trate:

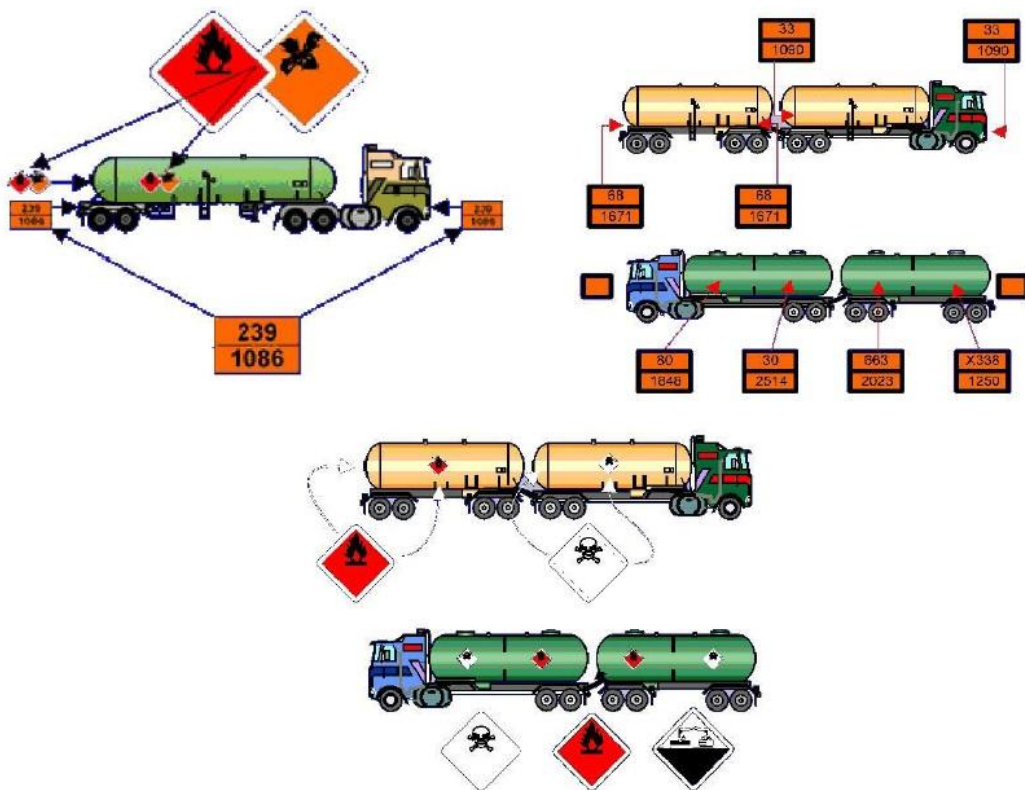


Figura 15 - Colocación de los paneles naranja y etiquetas de peligro según el tipo de vehículo

Para los vehículos cisterna, ya sea una cisterna permanente o una cisterna portátil (como la que se muestra en el esquema), la forma correcta de identificar la mercancía y los riesgos que entraña es la siguiente:

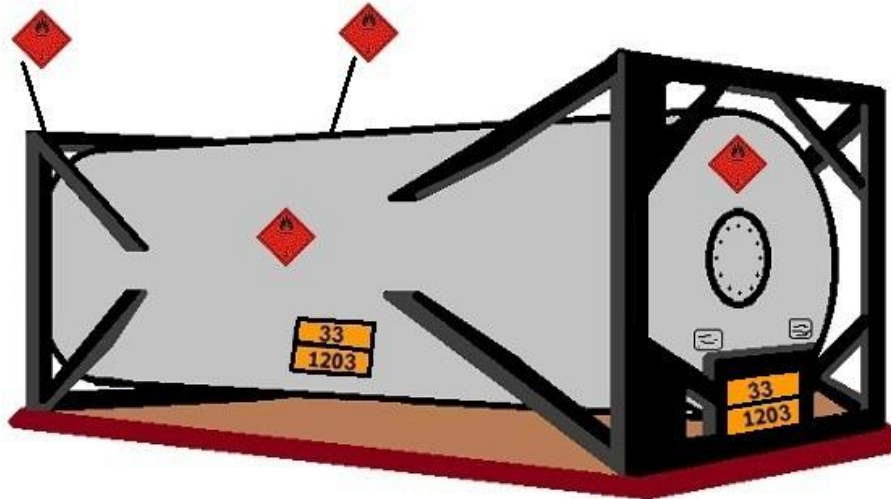


Figura 16 - Colocación de las etiquetas de peligro y paneles naranja en una cisterna

Se debe colocar una etiqueta en cada lado de la cisterna, y otra por delante y otra por detrás, además de señalar adecuadamente la carga con paneles naranja como se muestra.

2.2.5.3. Número de identificación de la materia (Número ONU).

El número de identificación de la materia o número ONU, presente en la parte inferior del panel naranja que acompaña a una mercancía peligrosa, es un número de cuatro cifras que identifica la materia a la que acompaña. Este número fue adoptado por parte del Comité de Expertos de la ONU en sus Recomendaciones para el Transporte de Mercancías peligrosas, más conocido como Libro Naranja (UN, 2011).

Dentro del Libro Naranja aparece un listado completo de materias, por orden alfabético, junto a su número ONU, que permite su correcta identificación. Cada número está oficialmente asignado a un único producto, y figura en todas las reglamentaciones nacionales e internacionales sobre transporte de mercancías peligrosas, ya sea por

carretera, ferrocarril, vía aérea, transporte marítimo y vía navegable interior. El listado se encuentra en el cuadro I del Apéndice B.5 del ADR (UNECE, 2011).

Además, se presenta otro listado completo igual que el anterior, presentando producto junto a su número de identificación, pero ordenado por su número ONU, con todas las mercancías peligrosas que están en el cuadro III del Apéndice B.5 del ADR (UNECE, 2011).

2.2.5.4. Número de identificación de peligro

Como ya se dijo previamente, el número de identificación de peligro es un conjunto de dos o tres cifras, acompañado en ocasiones de la letra X, y que se refiere al tipo de peligro intrínseco a la materia que se transporta. Cada cifra del conjunto indica, en general, los peligros siguientes:

Primera cifra	Descripción del peligro
2	Emanación de gas resultante de presión o de una reacción química.
3	Inflamabilidad de materias líquidas (vapores) y gases o materia líquida susceptible de autocalentamiento.
4	Inflamabilidad de materias sólidas o materias susceptibles de autocalentamiento.
5	Comburente (favorece el incendio).
6	Toxicidad o peligro de infección.
7	Radiactividad.
8	Corrosividad.
9	Peligro de reacción violenta espontánea (incluye peligro de explosión, de descomposición o de una reacción de polimerización con un desprendimiento de calor considerable o de gases inflamables y/o tóxicos).

Tabla 16 – Significado de las cifras del número de identificación de peligro en función de la materia que se transporta

Por otra parte, es necesario tener en cuenta las siguientes normas a la hora de interpretar el número de identificación de peligro:

- a) Cuando la cifra figura dos veces, se está indicando una intensificación del peligro que conlleva.
- b) Cuando el peligro de una materia puede ser indicado suficientemente con una sola cifra, el número de identificación de peligro se completará con un cero en segunda posición.

- c) Las combinaciones de las siguientes cifras tienen sin embargo un significado especial: 22, 323, 333, 362, 382, 423, 44, 446, 482, 539, 606, 623, 642, 823, 842, y 99.

- d) Cuando la letra X precede al número de identificación, indica que la sustancia reacciona de manera peligrosa con el agua. Para tales materias, no se podrá utilizar el agua más que con la autorización de los expertos.

2.3. Los riesgos.

2.3.1. Definiciones.

En el lenguaje cotidiano, es habitual que se empleen indistintamente los términos riesgo y peligro, o desastre y catástrofe. Durante el día a día, las personas están constantemente asumiendo riesgos, tanto físicos como económicos, o “estando en peligro de...”.

Cualquier actividad que realiza el hombre conlleva un riesgo asociado. Como es obvio, el entorno industrial tampoco está exento del riesgo en múltiples facetas: economía, seguridad e higiene, etc. como consecuencia del desarrollo de actividades productivas. No obstante, a pesar de la presencia del riesgo en todas las facetas de nuestra vida, rara vez nos paramos a pensar en qué es el riesgo y cómo definirlo, cuantificarlo y controlarlo o minimizarlo.

Decimos normalmente que algo es “poco arriesgado” o “presenta mucho riesgo”, pero excepto para algunas ocasiones muy concretas de la actividad industrial, no suelen existir herramientas para cuantificar el riesgo de una determinada actividad, o no se suelen emplear cuando estas existen.

En la comunidad científica, tampoco hay unanimidad al referirse a los conceptos de riesgo y peligro, por lo que existen múltiples definiciones, de las cuales se presentan algunas a continuación:

Definiciones de Riesgo:

- Desde una perspectiva etimológica, se define como la *“Posibilidad de que exista un daño”*.
- *“Peligro en el que entra la idea del azar.”*, Canceill (1.983):
- *“Posibilidad de sufrir un daño por la exposición a un peligro.”* Universidad de Arizona.
- *“Producto de la probabilidad de ocurrencia de un peligro por el valor del daño esperado.”* Rowe (1.977).

Definiciones de Peligro:

- *“Fuente del riesgo.”* Universidad de Arizona. Se refiere a una sustancia o acción que pueda causar daño.
- *“Una condición, proceso o suceso potencial que supone una amenaza para la salud, seguridad y bienestar de un grupo de ciudadanos, o para las funciones o economía de una comunidad o para el medio ambiente.”* Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, 1977).
- *“El daño potencial derivado de la interacción sociedad/tecnología.”* (Lundgren, 1986).
- Otras definiciones (Ayala, 1990) definen la peligrosidad como *“el conjunto de aspectos físicos que caracterizan un fenómeno potencialmente dañino, especialmente su tipología, probabilidad de ocurrencia, dimensión espacial, duración y características dinámicas que puedan definirse cualitativa o cuantitativamente”*. Este mismo autor define el riesgo como *“el daño potencial producible por un fenómeno potencialmente dañino que puede ser cuantificado en términos económicos o sociales o evaluado cuantitativamente”*.

La ecuación fundamental para evaluar cuantitativamente el riesgo, siguiendo la línea propuesta por Ayala (Ayala, 1990), viene dada de acuerdo a la expresión siguiente:

$$R=P_{HG}\times V_U\times V \quad (2.1)$$

donde

- **R:** es el valor del riesgo.
- **P:** es la probabilidad de ocurrencia.
- **Vu:** es la vulnerabilidad.
- **V:** es el valor del bien expuesto.

Si el valor se expresa en términos económicos, el tipo de riesgo considerado será de pérdidas económicas, mientras que si el bien expuesto es la vida humana, será un riesgo social.

Si relacionamos la expresión 2.1 con la definición dada por Ayala (Ayala, 1990) tenemos que los factores de vulnerabilidad y de valor del bien expuesto están englobados implícitamente en el término de gravedad. No obstante, este valor aplicado al medio ambiente es difícil, en la mayoría de las veces, traducirlo a valor económico y se recurre, por tanto, a una valoración empírica en función de parámetros, tales como: rareza, fragilidad, etc. similares a los empleados en los estudios de evaluación de impacto ambiental (EIA).

Este modelo de cálculo de riesgo asociado al transporte de mercancías peligrosas es el empleado como punto de partida para el proyecto acerca del análisis de riesgos ambientales en el transporte de mercancías peligrosas (Á. Arranz Zazo, 2013), que a su vez ha generado los mapas de riesgo empleados como base de datos consultiva en el presente proyecto.

2.3.2. Modelos conceptuales de riesgo.

Podemos considerar que un modelo conceptual es toda aquella simplificación que permita comprender y expresar, cualitativa o cuantitativamente, el funcionamiento de cualquier proceso del mundo real, con el objetivo de poder actuar sobre alguna o

varias de las variables consideradas en el modelo para conseguir algún un efecto o resultado en el asunto estudiado.

Los efectos de la actualización de los riesgos ambientales suponen, sin ninguna duda, un impacto sobre nuestras condiciones de vida o sobre el entorno en el que vivimos, es decir, un impacto ambiental, considerando al hombre como un elemento más integrante del medio.

De acuerdo a la "National Environment Policy Act" (NEPA, 1969), el impacto ambiental se define como *"la alteración que se produce en el medio, ocasionada por un proyecto o actividad que se lleva a cabo"*.

Debe tenerse en cuenta que el impacto ambiental depende tanto del tipo de actividad o proyecto que lo desencadena como del medio receptor de dicho impacto. Así, un accidente con derrame de líquidos contaminantes sobre una zona geológicamente impermeable, podría ser asimilado por el medio natural sin dar lugar a procesos degradantes, con lo que el impacto ambiental sobre el substrato acuífero sería prácticamente nulo. Sin embargo, la misma acción introducida en un medio poroso, como por ejemplo un área de captación de agua potable, podría desencadenar procesos irreversibles de degradación, alcanzando el impacto ambiental valores máximos.

El grado de alteración que un accidente o actividad puede provocar en un ecosistema, se expresa como la diferencia entre la evolución del medio sin la aplicación del accidente o actividad y la evolución con la aplicación del mismo. Y se denomina *Impacto Ambiental* al grado de incidencia que tiene en las condiciones o circunstancias que rodean al hábitat humano.

Bajo esta perspectiva de impacto ambiental, en el análisis que nos ocupa la actividad o proyecto considerado será el transporte de mercancías peligrosas a través de la red de carreteras de Castilla y León, atravesando una serie de ecosistemas y medios, de forma que a lo largo de su ruta es posible que se produzca un accidente en el que aparezca una fuga de mercancías, de forma que éstas salgan de su contenedor y afecten al espacio circundante. El medio receptor o escenario de dicho impacto será el

espacio físico y biótico, comprendido entre los puntos de origen y destino, y sobre el que se originaría dicho accidente.

La magnitud del impacto generado por el accidente dependerá de la calidad y cantidad del factor ambiental afectado, mientras que la importancia estará condicionada por la intensidad (tipo de accidente), la extensión (volumen, tipo y comportamiento de las mercancías expulsadas) y el momento en que se produce. El signo del impacto en este tipo de análisis, al contrario que en otras evaluaciones del impacto ambiental, siempre será negativo, dado que un accidente de mercancías peligrosas siempre tendrá un carácter perjudicial.

2.3.3. Análisis de riesgos.

Un análisis de riesgos tiene como último objetivo la prevención de la ocurrencia y la mitigación de los efectos de accidentes en los que se encuentre involucrado el objeto a estudiar.

Básicamente, las etapas de las que consta el proceso del análisis de riesgos son:

1. Identificar los peligros que puede representar el objeto de estudio para las personas, bienes y medio ambiente. En este caso, el objeto de estudio será el transporte de mercancías peligrosas.
2. Tipificar los riesgos en una serie de accidentes de gravedad significativa cuya ocurrencia es factible.
3. Determinar los alcances que puedan tener estos accidentes.
4. Definir las zonas vulnerables existentes dentro del medio a estudiar.
5. Calcular los daños que se pueden provocar en caso de la ocurrencia de estos accidentes.
6. Analizar las causas de los accidentes, eventualmente cuantificando sus frecuencias.

7. Determinar el nivel de riesgo asociado al objeto de estudio, en este caso un vehículo cargado con una mercancía peligrosa transportada a través de una serie de ecosistemas.

Para realizar estas etapas y, por tanto, para obtener una evaluación del riesgo de cualquier tipo de fenómeno, existen básicamente tres tipos de métodos:

- Métodos analíticos: se fundamentan en la simulación espacio-tiempo de determinadas situaciones.
- Métodos deterministas: basados en criterios empíricos causa-efecto.
- Métodos heurísticos: utilizan algoritmos que aplicando el conocimiento propio del problema y técnicas razonables, se aproximan a la solución de problemas en un tiempo razonable.

2.3.3.1. Métodos analíticos.

Los métodos analíticos son aquellos que pretenden modelizar mediante ecuaciones el comportamiento fisicoquímico del proceso de riesgo, partiendo de la determinación de las variables que determinan dicho proceso.

Sólo en el campo de los materiales peligrosos, existen una infinidad de variables que pueden intervenir, por lo que estos métodos exigen el desarrollo de modelos muy sofisticados de difusión de líquidos y gases, mecánica de fluidos, de propagación de ondas térmicas y expansivas etc., y tienen desarrollos matemáticos extremadamente complejos. Además, si incorporamos al modelo puramente físico-químico que engloba las materias transportadas todas las ecuaciones físicas que intervienen en el propio funcionamiento del vehículo junto a las variables estocásticas que intervienen en el medio ambiente y en la carretera (posición del resto de vehículos, dirección y velocidad del viento, posición de las personas en el entorno, etc.) y en definitiva una infinidad de parámetros que afectan a la probabilidad de ocurrencia de un accidente o a la gravedad de éste, el tamaño del modelo analítico es absolutamente inviable para cualquier sistema de procesamiento existente en la actualidad.

No obstante, estos métodos sí que tienen una gran utilidad en el análisis de riesgos en instalaciones fijas, al existir en estos sistemas un número de variables involucradas mucho menor, por lo que permiten precisar con bastante exactitud diferentes situaciones.

Estos métodos tienen como objetivo final la determinación cuantitativa de los distintos factores de riesgo en el espacio definido, propagación de ondas térmicas o expansivas, difusión en la concentración de contaminantes, etc. y, a partir de dicha información, predecir las consecuencias de acuerdo al conocimiento experimental de las dosis letales, leyes de difusión de contaminantes en medios fluidos, etc., y poder abordar las medidas correctivas que pueden prevenir y/o mitigar las consecuencias negativas de dichos accidentes.

Sin embargo, los resultados cuantitativos, aparentemente muy precisos, deben utilizarse con cautela, al estar sujetos a la variabilidad de los datos que alimentan al modelo, datos meteorológicos, hidrológicos, demográficos o de salud pública, etc., que no tienen la misma precisión que el modelo, y por ello los resultados pueden adolecer de dicha falta de precisión.

Estos métodos han ido evolucionando paralelamente al desarrollo de los sistemas informáticos, cuya capacidad de cálculo, proceso y almacenamiento ha progresado de un modo prácticamente exponencial. La posibilidad de iteración de gran número de cálculos y su representación espacial, ha permitido el ajuste de dichos modelos mediante análisis retrospectivos de situaciones ya ocurridas y su posterior utilización como métodos de previsión de situaciones.

Los modelos matemáticos analíticos inciden con mayor énfasis sobre el factor de gravedad del fenómeno ya ocurrido. El factor de probabilidad, por el contrario lo suele tratar de forma estadística, al igual que los métodos deterministas.

2.3.3.2. Métodos deterministas.

Los métodos deterministas, a diferencia de los analíticos, son métodos cualitativos o semicualitativos y empíricos, es decir, fundamentados en relaciones causa-efecto y que cubren un abanico diferente de resultados, como son la

identificación de todo tipo de peligros, sus causas originarias, los efectos negativos extremos que acarrearían y permiten una estimación aproximada del riesgo.

Los métodos deterministas presentan la ventaja de ser mucho más sencillos de aplicar. Su propósito principal es la evaluación de la máxima envolvente de daños, es decir tienen un carácter conservador. Generalmente los métodos deterministas suelen pasar por una serie de etapas, que son:

1. **Determinación de los factores de riesgo:** Se trata de identificar los elementos que influyen, de forma directa, en el hecho de que se produzca un accidente; entendiendo por accidente un suceso incontrolado capaz de producir daño. Ejemplos de accidentes pueden ser: la BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*) de un depósito presurizado, la UVCE (*Unconfined Vapour Cloud Explosion*) de un gas liberado por una cisterna, la contaminación de aguas, los *Fire Flash* o llamaradas, etc. En el transporte de mercancías peligrosas el factor de riesgo más importante, y que predetermina el comportamiento, es la propia mercancía.
2. **Identificación de riesgos:** Constituye el punto de partida del análisis, condicionando todo su planteamiento. Básicamente se pueden considerar tres tipos de métodos para la identificación de riesgos, que se describen en los siguientes apartados:
 - ***Métodos cualitativos:*** Estos métodos se caracterizan por no recurrir a cálculos numéricos. Suelen basarse en técnicas de análisis crítico y su eficacia depende de la calidad y objetividad de la información disponible. Destacan los siguientes:
 - i. **Análisis histórico:** Consiste en un estudio, lo más amplio posible sobre accidentes ocurridos en el pasado en instalaciones y/o con productos similares a los estudiados.
 - ii. **Análisis fundamental de operabilidad:** Es una técnica inductiva de análisis crítico realizada por un equipo multidisciplinar para

identificar desviaciones de proceso que pueden conducir a accidentes.

- iii. **Análisis de modo, efecto y criticidad de los fallos:** Es un método inductivo de reflexión sobre las causas y sus consecuencias.
- iv. **Análisis preliminar de riesgos:** Método inductivo en el que de forma sistemática se analizan las causas, efectos principales y medidas preventivas/correctivas asociadas.
- v. **“Check list”:** Constituyen listas exhaustivas de posibles iniciadores/accidentes a contemplar en la identificación de riesgos.
- vi. **“What if...?”:** Es un método inductivo en el cual se analizan sistemáticamente las consecuencias de determinados sucesos.

- **Métodos semicualitativos:** Estos métodos se caracterizan por recurrir a una clasificación de las zonas donde se produce el accidente en base a una serie de índices que miden su potencial para ocasionar daño en función de un conjunto de magnitudes y criterios (tipo y cantidad de producto, características de peligrosidad, fragilidad del elemento expuesto, etc.).
- **Otros métodos de apoyo.** Básicamente se incluyen aquí las auditorías de seguridad que suelen responder a otros objetivos, pero que pueden constituir una base para la identificación de riesgos.

3. **Cálculo de consecuencias:** El objetivo principal de esta fase es la determinación de los elementos vulnerables asociados a los accidentes identificados. Es decir, determinar aquellos elementos que van a sufrir los efectos de un accidente, entendiendo por efecto el fenómeno físico asociado a un accidente y capaz de producir daño directo a las personas, bienes y medio ambiente. Básicamente se consideran efectos la radiación térmica, sobrepresión, concentraciones tóxicas, proyección de fragmentos, etc; de forma que un mismo accidente puede tener asociados distintos efectos. El cálculo de consecuencias, en términos generales, debe cumplir las siguientes especificaciones:

- Todos los posibles efectos del accidente deben ser determinados, especialmente los más graves.
 - Determinar las zonas de intervención y alerta, las zonas de daños materiales y/o al medio ambiente.
 - Para los efectos que evolucionan con el tiempo, como la radiación térmica o concentraciones tóxicas, deberán tenerse en cuenta, además, los tiempos de exposición (dosis).
4. **Determinación del riesgo**: En esta fase, el objetivo principal consiste en combinar los resultados obtenidos en las anteriores etapas, calculando una estimación del riesgo asociado a cada una de las hipótesis accidentales contempladas.

2.3.3.3. Métodos heurísticos.

Los métodos heurísticos o aproximados son procedimientos eficientes para encontrar soluciones válidas, aunque no se puede comprobar que dichos métodos sean óptimos. En estos métodos, la rapidez del proceso es tan importante como la calidad de la solución obtenida.

El método heurístico más intuitivo es el de la búsqueda exhaustiva, en el que dado un problema, se analizan todas las soluciones posibles y escoger la mejor. Debido al desarrollo del algoritmo, este proceso será factible solo para aquellos problemas simples que tengan un número limitado de soluciones alternativas.

Otros métodos heurísticos son:

- **Métodos de descomposición**: El problema original se descompone en subproblemas independientes en los que estén involucradas un menor número de variables, y por tanto más sencillos de resolver, de forma que cuando se alcanzan todas las subsoluciones se puedan combinar para obtener la solución total.

- **Métodos inductivos**: La idea de estos métodos es generalizar partiendo de versiones pequeñas o más sencillas del problema hasta alcanzar el caso completo.
- **Métodos de reducción**: Consiste en identificar propiedades que se cumplan mayoritariamente en las buenas soluciones e introducirlas como restricciones del problema, simplificando el espacio de posibles soluciones del problema y, en ocasiones, eliminando variables del problema. Obviamente, aquí aparece el riesgo de que la solución (o soluciones) óptima del problema original pertenezca a la parte del espacio de soluciones que se ha eliminado con la incorporación de restricciones extra.
- **Métodos constructivos**: Consisten literalmente en construir una solución del problema paso a paso. Usualmente son métodos deterministas y suelen estar basados en la mejor elección en cada iteración.
- **Métodos de búsqueda local**: A diferencia de los métodos anteriores, los procedimientos de búsqueda o mejora local, comienzan con una solución del problema y la mejoran progresivamente. El método finaliza cuando no existe ninguna solución accesible que mejore la anterior.

2.3.4. Peligros asociados a las mercancías peligrosas

Los diferentes tipos de sustancias químicas que se transportan como mercancías peligrosas, al verse implicadas en accidentes pueden generar, básicamente, las siguientes situaciones de riesgo, que pueden presentarse aisladas o concatenadas:

- Inflamabilidad de las áreas circundantes.
- Ondas expansivas destructivas.
- Generación de nubes tóxicas y contaminantes.
- Contaminación de aguas superficiales y subterráneas.

El tipo de riesgo va a estar determinado, en primer lugar, por las propiedades de toxicidad, reactividad e inflamabilidad/explosividad, de los productos transportado (sujeto activo del estudio), y en segundo, por las características del medio afectado (sujeto pasivo del estudio). Las consecuencias ambientales que puede ocasionar un accidente en el que se vean involucradas mercancías peligrosas son:

- Destrucción de la masa vegetal.
- Destrucción de edificaciones e infraestructuras.
- Destrucción del patrimonio cultural.
- Mortalidad de personas y fauna.
- Inhabilitación de suelos para la agricultura.
- Inhabilitación de acuíferos y cauces de agua.

2.3.5. Delimitación espacial del riesgo

En la evaluación y modelización espacial de los riesgos, los sistemas de Información Geográfica (SIG), constituyen una herramienta idónea para el diseño de los "escenarios de riesgo" a partir de la caracterización y localización de las fuentes de peligro como de los receptores potenciales de esos impactos (Goodchild, et al., 1993).

Si atendemos a este análisis, a la hora de crear el escenario de riesgo mediante el sistema SIG, existirá por una parte una componente correspondiente al sujeto pasivo (que es el riesgo potencial de daños a lo largo del conjunto de carreteras de Castilla y León), que es la parte correspondiente al proyecto de Á. Arranz Zazo (2013), mientras que el componente correspondiente al sujeto activo (los vehículos presentes a cada instante en la red de carreteras, caracterizados por el tipo de sustancia que transportan), es la parte correspondiente al presente proyecto, sujetos activos cuya posición se actualizará en tiempo real.

Los análisis propuestos tienen una gran componente espacial. Así, la gravedad de las consecuencias de cualquier accidente de mercancías peligrosas está en función de la ubicación relativa de dicho accidente con respecto a los elementos vulnerables contemplados, acuíferos, masas de agua superficial, poblaciones o cualquier otro elemento ambiental. Los aspectos ambientales son tratados previa integración y modelización en un SIG.

Por otro lado, la probabilidad de ocurrencia de un accidente no es homogénea en todo el espacio, sino que tiene también una componente de diferenciación territorial. Por lo que se pueden integrar sobre un SIG.

Para la integración de todas estas variables territoriales, con el objetivo de perfilar un análisis de riesgos, el empleo de herramientas SIG tiene la gran ventaja en la capacidad de éstas para la carga, gestión y cálculo de grandes cantidades de información georreferenciada sobre el medio, así como para categorizarla en capas separadas y conseguir de esta manera una mejor y más clara representación del mismo. De esta manera, el SIG es empleado como un medio de almacenamiento de información, análisis y representación de los resultados espaciales y alfanuméricos.

Los SIG son herramientas orientadas a un fin concreto, es necesario por tanto definir previamente el objetivo a conseguir con las mismas, y de esta manera adecuar dichas herramientas a los objetivos planteados.

La cartografía del riesgo (Bosque J., 1992) implica identificar, localizar y caracterizar espacialmente tres componentes del problema:

- La actividad fuente del riesgo, objeto de este proyecto.
- El área susceptible de sufrirlo
- Los receptores potenciales del daño

Los dos últimos puntos están incorporados a los mapas de riesgo generados en el proyecto de Á. Arranz Zazo (2013). En el sistema desarrollado en ese proyecto, y que

servirá como base de datos en el presente proyecto, incluye información espacial y alfanumérica relativa a:

- Red de Carreteras
- Siniestralidad de la red de carreteras
- Productos transportados
- Inventario de elementos vulnerables

El objetivo del presente proyecto es emplear la potencialidad de análisis que poseen los mapas generados por Á Arranz Zazo en su proyecto de 2013 en análisis predictivos, empleando una monitorización en tiempo real de los riesgos presentes en cada instante en la red de carreteras, de forma que se puedan estudiar y corregir inmediatamente aquellos riesgos que sobrepasen los umbrales admisibles.

En el presente proyecto se empleará la definición de riesgo obtenida por Arranz Zazo (2013), que analiza cada uno de los factores que intervienen, tanto ambientales como probabilísticos, y que prima los daños ambientales al objetivo sobre el resto de factores, al ser el objetivo primordial perseguido en la evaluación del riesgo el estudio y la prevención de los daños ambientales en el objetivo.

CAPÍTULO 3: GENERACIÓN DE MAPAS DE RIESGO MEDIANTE REGRESIÓN LOGÍSTICA



3.1. Introducción.

En este capítulo, se presentará un breve resumen del método desarrollado por Á. Arranz Zazo en su proyecto de 2013 para generar mapas de riesgo, que son la base de datos de la que se nutre la aplicación desarrollada durante el presente proyecto.

Durante su proyecto, desarrolló un modelo capaz de estimar a partir de múltiples variables el valor numérico del riesgo para el transporte de mercancías peligrosas en cualquier lugar de Castilla y León. Las variables que intervienen en el modelo, son tanto dependiente de la propia carretera, del producto transportado y de la vulnerabilidad del terreno circundante a la carretera.

Para su proyecto, Arranz Zazo empleó el método de la regresión logística por su amplio uso en métodos predictivos, como en las ciencias de la salud y economía. Su punto fuerte se centra en la evaluación de variables cualitativas. Estas aparecen como parámetros que influyen en la ocurrencia de los accidentes, en algunas ocasiones con una elevada carga de subjetividad e indefinición.

3.2. Modelo conceptual.

La estimación de los factores de riesgo, y la determinación final de su nivel, se basó en el desarrollo de una metodología predictiva de carácter determinista, con la que se evaluaron los dos factores que determinan el nivel de riesgo:

- Probabilidad de ocurrencia de un accidente en el que estén implicadas mercancías peligrosas.
- Gravedad del accidente, estimada por las potenciales consecuencias para el hombre y el medio ambiente.

Este factor de gravedad está condicionado por la interacción entre las propiedades químicas del tipo de mercancía y las características de fragilidad ambiental del elemento expuesto. Se adopta, por tanto, un concepto de riesgo sencillo y polivalente, que lo evalúa como un producto de la probabilidad por la magnitud de las consecuencias o gravedad.

La valoración de los dos multiplicandos de la expresión adjunta, definen los resultados del análisis.

$$R = P_{HG} \times G \quad (3.1)$$

Donde:

- **R:** es el valor del riesgo, como una magnitud asociada a una determinada zona.
- **P_{HG}:** es la probabilidad de ocurrencia de un accidente.
- **G:** Gravedad estimada a partir del tipo e intensidad de los daños posibles.

3.2.1. Determinación de la probabilidad de accidente P_{HG}.

La probabilidad de ocurrencia estima mediante el método de regresión logística, instrumento estadístico de análisis bivariado o multivariado, de uso tanto explicativo como predictivo. Su empleo resulta útil cuando se tiene una variable dependiente dicotómica (un atributo cuya ausencia o presencia se ha puntuado con los valores cero y uno, respectivamente) y un conjunto de *m* variables predictoras o independientes, que pueden ser cuantitativas (que se denominan covariables o covariadas) o categóricas (Silva, 1995).

Los modelos de regresión logística son modelos estadísticos en los que se pretende conocer la relación entre una variable dependiente cualitativa, dicotómica (regresión logística binaria o binomial) o con más de dos categorías (regresión logística multinomial) y entre variables explicativas independientes.

Por sus características, los modelos de regresión logística permiten dos finalidades (SEQC, 2011):

- Cuantificar la importancia de la relación existente entre cada una de las covariables y la variable dependiente.

- Clasificar individuos dentro de las categorías (presente/ausente) de la variable dependiente, según la probabilidad que tenga de pertenecer a una de ellas dada la presencia de determinadas covariables.

No cabe duda que la regresión logística es una de las herramientas estadísticas con mejor capacidad para el análisis de datos en investigación, de ahí su amplia utilización.

Las variables explicativas, o covariables, pueden ser cuantitativas o cualitativas. A su vez, las covariables cualitativas deben ser dicotómicas, es decir, que puedan tomar valores de 0 para su ausencia y de 1 para su presencia (esta codificación es importante, ya que cualquier otra codificación provocaría modificaciones en la interpretación del modelo). En el caso de las covariables cualitativas que tienen más de dos categorías, como es el caso de la división de la altitud de la carretera en intervalos, para su inclusión en el modelo se realiza una transformación, pasando de la covariable a $n-1$ covariables cualitativas dicotómicas ficticias o de diseño, denominadas variables “*dummy*”, de forma que la categoría de la covariable que no tiene una variable *dummy* (la restante hasta las n categorías) se toma como categoría de referencia, es decir, la que, en ausencia del resto de variables *dummies*, es la categoría de referencia la que está presente.

En general, los requisitos y etapas de la regresión logística son los que se muestran a continuación (Pando, et al., 2004).

- Recodificar las variables independientes categóricas u ordinales en variables ficticias o simuladas y la variable dependiente.
- Evaluar efectos de confusión y de interacción del modelo explicativo.
- Evaluar la bondad de ajuste de los modelos.
- Analizar la fuerza, sentido y significación de los coeficientes, sus exponenciales y estadísticos de prueba.

Para los modelos de regresión logística binaria, si tenemos una variable dependiente Y , que toma valores $Y=1$ (presencia de una característica u otra categoría de la variable) e $Y=0$ (ausencia de la característica o la otra categoría de la variable), la ecuación de partida del modelo viene dada por:

$$P[Y = 1|X] = \frac{e^{b_0 + \sum_{s=1}^n b_s x_s}}{1 + e^{b_0 + \sum_{s=1}^n b_s x_s}} \quad (3.2)$$

Donde $P[Y = 1|X]$ es la probabilidad de que Y tome el valor **1**, en presencia de las covariables X , que lo denotaremos por $p(X)$.

X es un conjunto de n covariables $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ que forman parte del modelo; b_0 es el término independiente y los b_i son los coeficientes de las covariables.

La función:

$$f(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (3.3)$$

que aparece en otros muchos campos de la matemática aplicada, y cuya gráfica se muestra en la figura, se le denomina *función logística*.

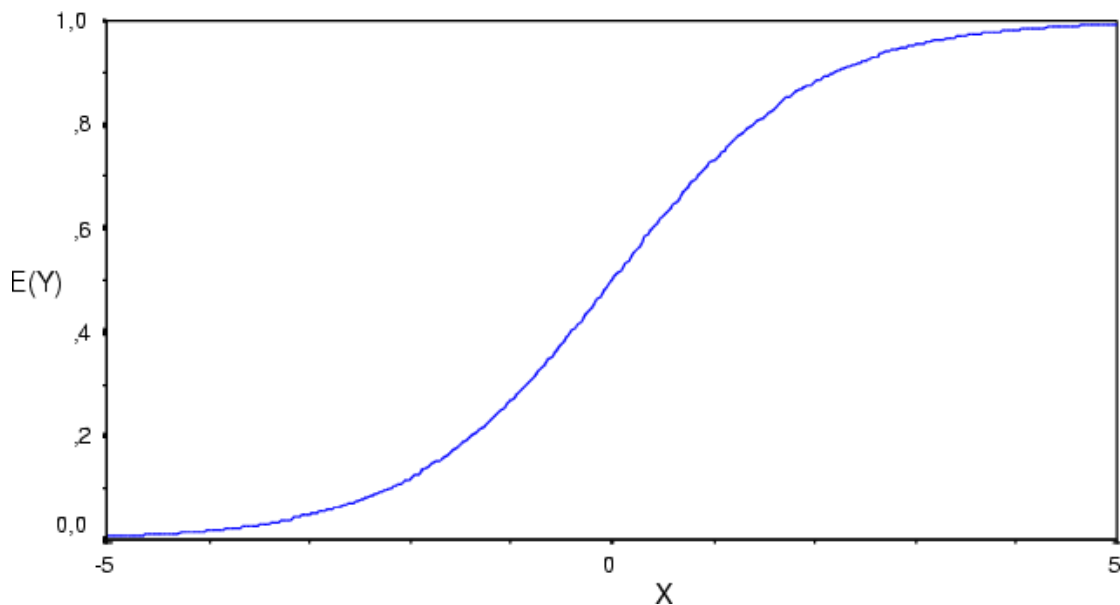


Figura 17 - Representación de la función logística

El modelo de regresión logística se encarga de modelar la probabilidad de un proceso binomial como la función logística de una combinación lineal de variables dependientes.

Para seleccionar el conjunto de variables predictoras que se incluyen en el modelo, los criterios a seguir son incluir todas aquellas variables que se consideren importantes para el modelo, independientemente de si se ha demostrado o no significación estadística en un análisis univariado previo, lo cual podría inducir a dejar de incluir en el modelo covariables con una débil asociación a la variable dependiente en solitario pero que podrían ser fuertes predictores de la misma al tomarlas en conjunto con el resto de covariables. No obstante, es recomendable incluir todas las variables que en el análisis univariado previo demuestren tener una relación con la variable dependiente.

Con estos criterios se debe de obtener un modelo, lo más reducido posible, que explique los datos (*principio de parsimonia*), y que sea congruente e interpretable. Generalmente, un mayor número de variables en el modelo tiende a producir mayores errores estándar.

Una vez se seleccionan las covariables para ser incluidas en el modelo, el siguiente paso es obtener el modelo más reducido que siga explicando los datos. Para ello, se recurre a métodos de selección paso a paso, bien mediante inclusión, hacia adelante, o por eliminación, hacia atrás, o a la selección de variables por mejores subconjuntos de covariables.

Otro aspecto a tener en cuenta a la hora de elegir el número de covariables a incluir en un modelo de regresión logística es el tamaño muestral, porque modelos muy grandes para muestras con tamaños muestrales relativamente pequeños pueden provocar errores estándar grandes o coeficientes estimados excesivamente elevados (sobreajuste). La recomendación general es que por cada covariable se cuente con un mínimo de 10 individuos por cada categoría de la variable dependiente con menor representación (Aguayo, 2007).

Además, otra cuestión a tener en cuenta de los modelos de regresión logística es la inclusión de factores de interacción, para estudiar cómo la asociación de dos o más covariables puede influir en la variable dependiente. Las interacciones se incluyen siempre que sean interpretables y tengan significado desde el punto de vista del autor.

Para la estimación de los coeficientes del modelo y de sus errores estándar se utiliza la estimación por máxima verosimilitud, es decir, estimaciones que hagan máxima la probabilidad de obtener los valores de la variable dependiente y proporcionada por los datos de la muestra. Los cálculos para las estimaciones de los coeficientes de la regresión logística multinomial no son directos, hay que llevar a cabo métodos iterativos, como el método de Newton-Raphson.

Existe una serie de indicadores que nos permiten mejorar el ajuste del modelo logístico estos son:

- Prueba omnibus sobre los coeficientes del modelo
- Bondad de ajuste de Hosmer-Lemeshow
- Coeficiente pseudo-R² de Cox-Snell
- Coeficiente pseudo-R² de Nagelkerke
- Tasa de clasificaciones correctas
- Contrastes de Wald
- Contrastes de razón de verosimilitud
- Intervalos de confianza.

El criterio para incluir o excluir variables distintas a las de interés, es sobre todo los cambios en los coeficientes y no los cambios en la significación del modelo. Se pueden construir de dos formas:

- Por eliminación o hacia atrás ("backward"). Se ajusta el modelo máximo y se calcula el logaritmo del cociente de verosimilitudes para cada variable como si fuera la última introducida, se elige el menor de ellos y se contrasta con el nivel de significación elegido. Si es mayor o igual que el valor crítico se adopta este modelo como resultado del análisis y si es menor se elimina esa variable y se vuelve a repetir todo el proceso hasta que no se pueda eliminar ninguna variable.
- Por inclusión o hacia adelante ("forward"). Se empieza con un modelo de una variable, aquella que presente el mejor logaritmo del cociente de verosimilitudes. Se calcula el logaritmo del cociente de verosimilitudes para la inclusión de todas las demás, se elige el menor de ellos y se contrasta con el nivel de significación elegido. Si es menor que el valor crítico, se para el proceso y se elige el modelo simple como mejor modelo, y si es mayor o igual que dicho valor crítico, esa variable se incluye en el modelo y se vuelve a calcular el logaritmo del cociente de verosimilitudes para la inclusión de cada una de todas las restantes, y así sucesivamente hasta que no se pueda incluir ninguna más.
- "Stepwise" que consiste en que, cada vez que con el criterio anterior se incluye una variable, se calculan los logaritmos del cociente de verosimilitudes de todas las incluidas hasta ese momento como si fueran las últimas y la variable con menor logaritmo del cociente de verosimilitudes no significativo, si la hubiera, se elimina. Se vuelven a calcular los logaritmos del cociente de verosimilitudes y se continua añadiendo y eliminando variables hasta que el modelo sea estable.

Una vez encontrado el mejor modelo, es necesario validarlo. La validez es el grado en que las predicciones coinciden con las observaciones y tiene dos componentes: calibración y discriminación:

- La calibración compara el número predicho de eventos con el número observado en grupos de individuos.
- La discriminación evalúa el grado en que el modelo distingue entre individuos en los que ocurre el evento y los que no. Esto se puede ver en la tasa de clasificaciones correctas.

3.2.2. Determinación de la gravedad G.

En el transporte de mercancías peligrosas se pueden definir dos tipos de amenazas. Por un lado, la amenaza que supone la magnitud del accidente, y por otro, las características físico-químicas del producto transportado. En el primer caso se definirá una peligrosidad o severidad asociada al tipo de accidente (P_e) y en el segundo mediante una peligrosidad intrínseca del producto (R_{mp}).

Así, la gravedad del daño causado por un accidente en el que se ven involucradas mercancías peligrosas se puede considerar multidimensional y está condicionada principalmente por tres factores, que se pueden observar en la siguiente expresión, utilizada para estimar la gravedad:

$$G = P_e * (R_{mp} + V) \quad (3.4)$$

De la ecuación 3.4, ya conocemos lo que representan P_e (peligrosidad asociada al accidente) y R_{mp} (peligrosidad intrínseca asociada al producto transportado), mientras que el término V es un coeficiente asociado a la vulnerabilidad del medio en el que se produce el accidente.

3.2.2.1. Peligrosidad asociada al tipo de accidente (P_e).

La magnitud de la severidad (P_e) cada situación de emergencia se estima en función del tipo de accidente, recogidos en la tabla 17:

Tipo de accidente	Descripción	Peligrosidad extrínseca(P_e)
Tipo 1	Avería o accidente en el que el vehículo de transporte no puede continuar la marcha, pero el continente de las materias peligrosas transportadas está en perfecto estado y no se ha producido vuelco.	1
Tipo 2	Accidente a consecuencia del cual el continente ha sufrido desperfectos o se ha producido un vuelco, pero no existe fuga o derrame del contenido.	2
Tipo 3	Accidente a consecuencia del cual el continente ha sufrido desperfectos y existe fuga o derrame del contenido.	4
Tipo 4	Accidente en el que existen daños o incendio en el continente y fugas con llamas en el contenido.	6

Tipo 5	Accidente en el que se produce la explosión del contenido destruyendo el continente.	6
--------	--	---

Tabla 17- Valores de peligrosidad extrínseca (P_e) según el tipo de accidente

Los estudios predictivos, como en el caso que nos ocupa, deben adoptar un criterio conservador, considerando el peor de los accidentes posibles. De esta manera, a la hora de elaborar los mapas de riesgo, el valor para la peligrosidad extrínseca será constante con un valor de 6.

3.2.2.2. Peligrosidad intrínseca asociada a la mercancía (R_{mp}).

Para la estimación de las propiedades físico-químicas de peligro de los productos (R_{mp}), se han clasificado el total de los productos químicos peligrosos, transportados en España, en grupos de comportamiento similar mediante la asignación de valores relativos de:

- Índice de Inflamabilidad (H_i).
- Índice de Reactividad (H_r).
- Índice de Toxicidad/Corrosividad (H_t).
- Grado de Oxidación (H_{GO}).

Estos factores de peligrosidad se combinan siguiendo la expresión siguiente:

$$R_{mp} = \left(\frac{H_i + H_t + H_r}{3} + H_{GO} - 1 \right) \quad (3.5)$$

El rango de valores extremos de peligrosidad intrínseca (R_{mp}) calculado para los 53 grupos de productos clasificados, oscila entre 4 para los productos más peligrosos entre los que se encuentran los gases tóxicos de grupo 6, y 1 para los menos peligrosos, entre los que se encuentran los gases inertes. Los grupos 2 y 16, también empleados como ejemplo en el análisis, tienen valores de (R_{mp}) que oscilan entre 2,6 y 3,3 respectivamente.

3.2.2.3. Vulnerabilidad del medio (V).

La vulnerabilidad se define como el potencial de una comunidad o territorio para experimentar daños, y es función de la presencia en el entorno considerado de actividades, elementos, usos y/o poblaciones sensibles susceptibles de ser dañadas en caso de accidente (Hewitt, 1997).

En el análisis de Á. Arranz Zazo (2013) se consideraron dos tipos básicos de elementos vulnerables expuestos. Por un lado, la población expuesta directamente al accidente, en un entorno razonable al emplazamiento del accidente, V_p , y por otro, el medio ambiente V_a , cuyas afecciones generarán indirectamente daños también a la población.

Para la estimación de la vulnerabilidad a la población V_p , se debe partir de la densidad de población de cada término municipal, y de los núcleos urbanos como zonas de agrupamiento de la población como variables fundamentales, y definidas geográficamente por los polígonos que definen los cascos urbanos y los límites de término municipal.

La evaluación de la vulnerabilidad ambiental V_a se lleva a cabo en función de las características del área donde se realicen emisiones de sustancias potencialmente contaminantes y sus previsibles efectos.

Se consideraron cuatro elementos vulnerables ambientales en el análisis:

- Red hidrográfica: considerando la magnitud y orden de cada río, embalse o canal.
- Hidrogeología: teniendo en cuenta la permeabilidad de los terrenos y la posible filtración de sustancias peligrosas y contaminación de los acuíferos.
- Usos y aprovechamiento del suelo: se considera aquí la vegetación los tipos de aprovechamiento y vegetación, presentes en cada zona.
- Red de Espacios Naturales (REN).

Para cada uno de estos elementos vulnerables se definen a su vez dos índices de vulnerabilidad.

- **Vulnerabilidad intrínseca:** Denotada por V_i , define lo vulnerable que es cada elemento con independencia de la sustancia por la que se vea afectada. Esta fragilidad o vulnerabilidad intrínseca V_i de los diferentes elementos ambientales se determina según su rareza, capacidad de recuperación, reversibilidad, grado de dependencia humana de sus recursos, etc.

Este factor se ha representado espacialmente en forma de mapas digitales de vulnerabilidad intrínseca V_i o fragilidad, creados a partir de los mapas de usos del suelo, mapas geológicos e hidrogeológicos, mapas de población y mapas de espacios protegidos.

- **Vulnerabilidad extrínseca o externa:** que se denota por V_e y que define lo vulnerable que es cada elemento frente al tipo de sustancia involucrada. Así un elemento acuífero tendrá valores muy altos de V_e frente al vertido de una sustancia tóxica, pero en cambio adoptará valores muy bajos frente a una sustancia de características explosivas.

La vulnerabilidad total de cada elemento se expresa como el producto de ambos términos para cada elemento de expuesto considerado. Para el caso de elementos de población la vulnerabilidad se calculará según la ecuación 3.6:

$$V_p = V_i \times V_e \quad (3.6)$$

En el caso de elementos ambientales, la ecuación será la equivalente a la anterior, pero para calcular la vulnerabilidad ambiental:

$$V_a = V_i \times V_e \quad (3.7)$$

El valor total de la vulnerabilidad será la suma de la media de todos los valores de vulnerabilidad ambiental (m) de cada uno de los elementos ambientales expuestos, más la media de todos los valores de vulnerabilidad de población expuesta (n), expresados de la siguiente forma:

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n V_{pi}}{n} + \frac{\sum_{j=1}^m V_{aj}}{m} \quad (3.8)$$

El rango de valores para la vulnerabilidad total está comprendido entre 0 y 32, de forma que la escala ordinal propuesta en el proyecto de **Á. Arranz Zazo (2013)** es a su vez la misma desarrollada por **R. Martínez-Alegría**, y se muestra en la tabla 18:

Valor de V	Vulnerabilidad
0-6	Baja
6-12	Media
12-18	Alta
18-24	Muy alta
>24	Extremadamente Alta

Tabla 18 - Estimación de los umbrales para la vulnerabilidad ante accidente

3.2.2.4. Formulación de la gravedad.

La gravedad en función de los factores citados en los puntos anteriores se calcula mediante la siguiente expresión, fruto de combinar las ecuaciones 3.4, 3.5 y 3.8:

$$G = P_e \times \left(n_a \times \left(\frac{(H_i + H_t + H_r)}{3} + (H_{GO} - 1) \right) + \left(\frac{\sum_{i=1}^n V_{pi}}{n} + \frac{\sum_{j=1}^m V_{aj}}{m} \right) \right) \quad (3.9)$$

En esta ecuación, el factor n_a actúa como factor de ponderación para equilibrar en orden de magnitud el valor de la peligrosidad intrínseca R_{mp} frente a los valores considerablemente mayores de la vulnerabilidad total. Para el proyecto de **Á. Arranz Zazo (2013)**, este factor toma el valor de 4.

Esta expresión para la gravedad puede ser utilizada tanto para estudios predictivos como estudios correctivos. Para un estudio predictivo, como el que nos ocupa, se debe contemplar el peor accidente posible, tal y como ya se dijo en el apartado sobre la peligrosidad extrínseca.

Por el contrario, cuando se realizan estudios correctivos, ante un accidente que ya ha ocurrido, a la expresión de gravedad se le aplicará el valor real de la peligrosidad extrínseca (P_e), aunque también es necesario contemplar la posibilidad de que la gravedad del accidente aumente.

3.2.3. Determinación del riesgo.

Si combinamos la expresión del riesgo, (ecuación 3.1) con la de la gravedad (ecuación 3.9) obtenemos la ecuación empleada para determinar el riesgo:

$$R = P_{HG} \times \left(P_e \times \left(n_a \times \left(\frac{(H_i + H_t + H_r)}{3} + (H_{GO} - 1) \right) + \left(\frac{\sum_{i=1}^n V_{pi}}{n} + \frac{\sum_{j=1}^m V_{aj}}{m} \right) \right) \right) \quad (3.10)$$

Donde:

- **R:** Nivel de riesgo.
- **P_{HG}:** Probabilidad de ocurrencia de un accidente en el que estén implicadas mercancías peligrosas.
- **P_e:** Peligrosidad o severidad asociada al tipo de accidente.
- **n_a:** Factor para equilibrar el orden de magnitud de la expresión de la peligrosidad intrínseca con respecto a la vulnerabilidad total.
- **H_i:** Índice de inflamabilidad del producto transportado.
- **H_r:** Índice de reactividad del producto transportado.
- **H_t:** Índice de toxicidad/corrosividad del producto transportado.
- **H_{GO}:** Grado de oxidación del producto transportado.
- **V_{pi}:** Vulnerabilidad de cada uno de los elementos de población expuestos.
- **n:** Número de elementos poblacionales expuestos.
- **V_{ai}:** Vulnerabilidad de cada uno de los elementos ambientales expuestos.
- **m:** Número de elementos ambientales expuestos.

3.2.4. Flujo de trabajo para la determinación del riesgo.

A continuación, se presenta el flujo de trabajo que es necesario seguir para determinar el riesgo en el transporte de mercancías peligrosas, para un determinado tipo de producto. El diagrama que aparece es el desarrollado por Á. Arranz Zazo (2013), empleado durante su proyecto para generar los mapas de los que se nutre la aplicación del presente proyecto.

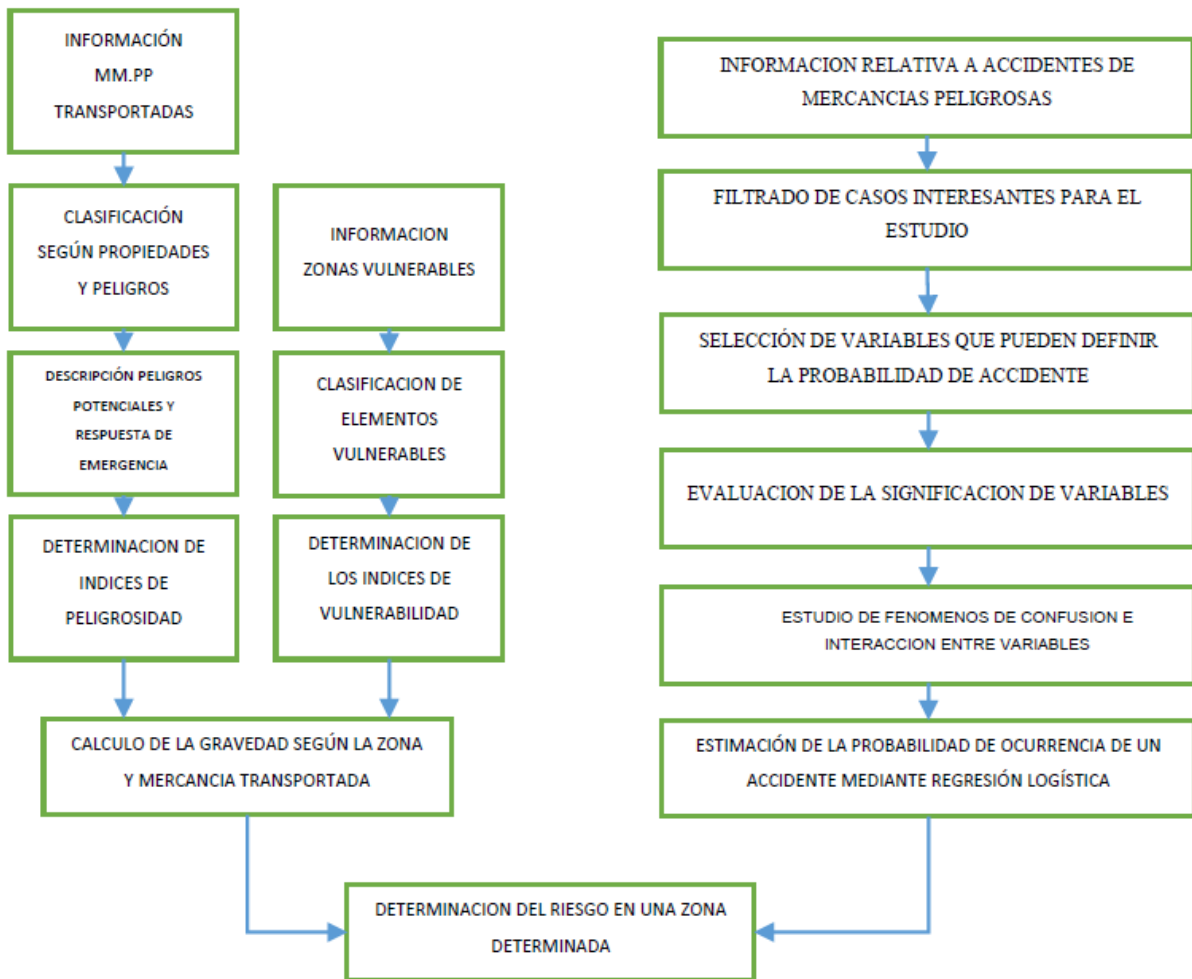


Figura 18 - Diagrama de trabajo para determinar el riesgo en una zona determinada

En el diagrama, se puede apreciar las tres ramas en las que se basa el estudio del riesgo: probabilidad de ocurrencia de accidente, peligrosidad del producto transportado y vulnerabilidad del medio, dando la combinación de estos últimos factores una medida de la gravedad del accidente en función de la zona y la mercancía transportada.

En la rama de la derecha del diagrama observamos el proceso de regresión logística para la determinación de la probabilidad de ocurrencia, en el que se parte de información relativa a los accidentes ocurridos en la red de carreteras estudiada, clasificándolos en función de las variables elegidas para el modelo. Tras un proceso en el que se verifica la significación de las variables, así como la interacción entre ellas, se aplica la regresión logística para estimar la probabilidad de ocurrencia de un accidente en el que se vean involucradas mercancías peligrosas.

Por otro lado, en la rama central del diagrama muestra el proceso de determinación de la vulnerabilidad según la zona. Así, se elaboran mapas de zonas vulnerables partiendo de la información sobre los cuatro elementos nombrados en el apartado 3.2.2.3 (red hidrográfica, hidrogeología, usos y aprovechamiento del suelo y red de espacios naturales). A partir de esta información espacial, se asignan coeficientes y se elaboran mapas con información acerca de la vulnerabilidad.

Por último, en la rama izquierda del diagrama se observa que se parte de información sobre las características físico-químicas y de peligrosidad de la mercancía peligrosa a estudiar. A partir de esta información, se agrupan productos con características similares, determinando los índices de peligrosidad para cada grupo.

Combinando la rama de la izquierda con la central, podemos obtener mapas diferentes para cada grupo de productos (en función de la peligrosidad) de la gravedad en función de la zona (que viene dada por la vulnerabilidad).

3.3. Generación del SIG (Sistema de Información Geográfica).

3.3.1. Características de los mapas.

La información de partida para la elaboración de los mapas de riesgo del proyecto de Á. Arranz Zazo comprende, por un lado, la relacionada con los elementos ambientales expuestos al riesgo del conjunto regional de Castilla y León, y por el otro los elementos generadores de dichas situaciones, es decir la de la propia red de comunicaciones en su vertiente de infraestructura de transporte, ya que en algunos casos concretos esta misma red pudiera considerarse un elemento expuesto, como

sería una explosión en un túnel. Todo este conjunto permite determinar los diferentes escenarios de riesgos.

Además, también emplea un completo registro de la siniestralidad involucrando mercancías peligrosas desde el año 1997 hasta el 2012 en las carreteras del ámbito de estudio. Estos accidentes fueron tabulados en formato de base de datos, y se han georreferenciado de un modo concordante con el resto de la información.

A partir de este conjunto de información geográfica, se ha creado, homogeneizado en un único formato digital y proyección (UTM, huso 30N extendido), un sistema de información geográfica (SIG) orientado al análisis de riesgos ambientales por transporte de mercancías peligrosas.

La escala de precisión de la información gráfica ha sido la 1:50.000 para la información vectorial y de 80x80 m para las unidades de información elemental en la representación "raster" de aspectos espaciales continuos. El objetivo de este SIG es operar conjuntamente con las diferentes capas de información, mapas básicos y mapas derivados.

3.3.2. Origen de la información geográfica.

La red de comunicaciones se extrajo de la planimetría del mapa, con escala 1:50.000, propiedad de la Junta de Castilla y León. Durante el proyecto de Á. Arranz Zazo (2013) se realizó un filtrado de posibles viales no recogidos en el mapa mediante la comparación con los datos del sistema del Ministerio de Agricultura SIGPAC (Ministerio de Agricultura, 2013). Por lo tanto, el grado de actualización de la red de carreteras del proyecto de Á. Arranz Zazo, y por tanto también del presente proyecto, que parte de sus mapas, es del año 2012.

La base cartográfica de delimitación de términos municipales proviene de los archivos vectoriales del Instituto Geográfico Nacional, e incluye datos de la codificación del Instituto Nacional de Estadística. Los datos de población se actualizaron mediante los datos del Instituto Nacional de Estadística con fecha 1 de enero 2012 (INE, 2012).

Los usos del suelo se clasificaron en 36 clases equivalentes que se contemplan en “Corine Land Cover” (CORINE). La función de esta capa de información es la de reflejar la forma en que está utilizado el territorio, según el tipo de cultivos, zonas forestales, vegetación y otros usos susceptibles de ser agredidos por un accidente de mercancías peligrosas.

La red fluvial se ha incluido todos los ríos de la región, canales y embalses, así como lagos y lagunas, pertenecientes a las cuencas hidrográficas presentes en Castilla y León.

El mapa hidrogeológico tiene su origen en el Mapa Geológico y Minero de Castilla y León.

En la figura siguiente se puede observar esquemáticamente como se aplicó el mismo sistema de referencia a las distintas capas de información, para poder generar mapas derivados a partir de operaciones entre mapas:

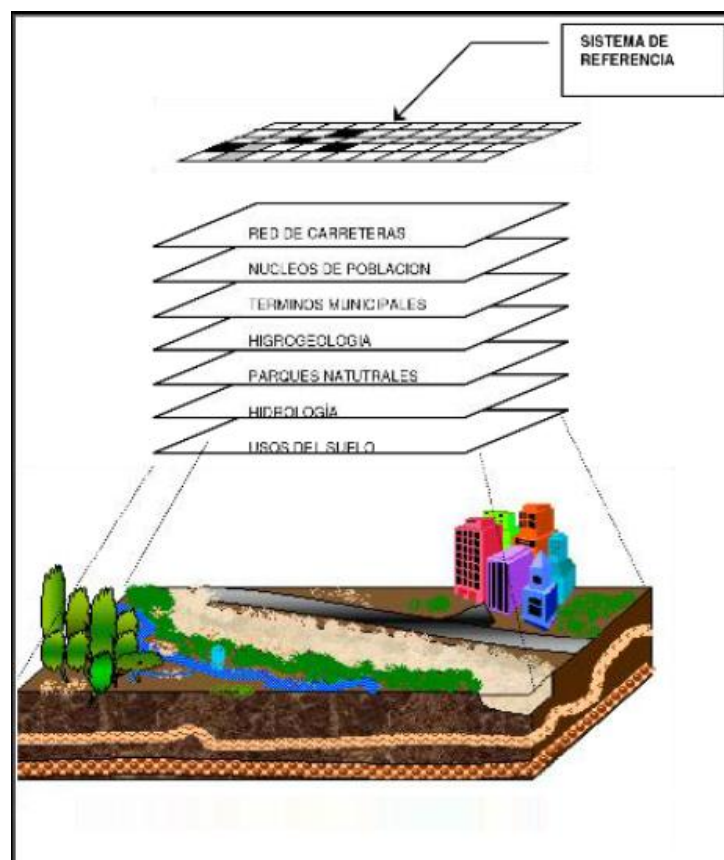


Figura 19 - Superposición de capas a analizar en un territorio

3.3.3. Datos de entrada para el modelo de regresión logística.

Para la selección de variables que forman parte del modelo de regresión logística, durante el proyecto de Á. Arranz Zazo (2013) se tuvo en cuenta, a su vez, el modelo desarrollado por (Martínez-Alegría, et al., 2003) y (Yáñez, et al., 2011). Estas son las siguientes en principio, sin haber realizado una optimización del modelo.

- Tipología y estado de la vía de comunicaciones, siendo autopista, autovía, nacional, autonómica, provincial y local.
- Estación del año, considerándose por tanto las cuatro estaciones del año.
- Condiciones climatológicas, que contemplan únicamente dos casos, buenas y malas condiciones.
- Provincias, de forma que se tienen en cuenta las nueve que forman parte de la Comunidad Autónoma de Castilla y León.
- Altimetría, estableciéndose una serie de intervalos para convertir esta variable continua en categórica.
- Tipo de zona de accidente, tipificado con tres posibles valores: recta, curva o cruce.

Para la adquisición de la base de datos de accidente se partió de los informes que la Guardia Civil u otros organismos remiten a Protección Civil cuando hay un accidente en el que está involucrado un vehículo que transporta mercancías peligrosas. A partir de los informes, se creó una base de datos en la que es posible integrar las diferentes variables anteriores y clasificar los accidentes en función del lugar y momento en que sucedió el accidente.

Además, se identificó algunos campos no recogidos en los partes de accidente como son cota altimétrica, y tipo de zona se ha procedido mediante el uso del visor SIGPAC, ya sea el perteneciente al Ministerio de Agricultura (Ministerio de Agricultura, 2013) o en su defecto el de la Junta de Castilla y León (Junta Castilla y León, 2013).

3.3.4. Desarrollo del modelo de regresión logística.

Después del análisis exhaustivo que se realizó durante el proyecto de Á. Arranz Zazo (2013), el modelo que propuso para determinar la probabilidad de la ocurrencia de un accidente en el que estén involucradas mercancías peligrosas viene dado por la siguiente expresión:

$$P(\text{accidente}) = \frac{1}{1+e^{-LOGIT}} \quad (3.11)$$

En la expresión 3.11, el valor del término exponencial es el que sigue:

$$\begin{aligned} LOGIT = & 2,2122 + 2,73 * \text{autovía} + 1,767 * \text{autopista} + 3,126 * \text{nacional} + \\ & +2,027 * \text{autonómica} + 2,04 * \text{provincial} + 0,804 * \text{otoinv} - 0,674 * \text{resto} + \\ & +1,05 * \text{curva} + 0,762 * \text{recta} + 1,228 * \text{malas} - 1,510 * \text{alt}_{\text{less } 700} - \\ & -0,073 * \text{alt}_{700_900} \end{aligned}$$

Tal y como se puede apreciar, el modelo final contiene una serie de variables categóricas reducidas respecto a las planteadas inicialmente. Estas son:

- De las nueve variables de provincia, se reducen en el modelo a dos grupos: León, Burgos y Valladolid frente al resto de provincias.
- De las cuatro estaciones, se reducen en el modelo a únicamente dos grupos, otoño e invierno frente a primavera y verano.
- La altimetría total de Castilla y León se ha reducido a 3 rangos, menos de 700 metros, desde 700 hasta 900 metros y más de 900 metros sobre el nivel del mar.

Mediante un sistema de información geográfica (SIG), se introdujeron los mapas booleanos correspondientes a cada una de las variables que aparecen en la expresión del LOGIT.

Mediante un operador de mapas, se combinan todos estos mapas booleanos siguiendo la ecuación 3.11, siendo posible obtener el siguiente mapa, que muestra la

probabilidad de accidente para cada uno de los puntos de la red de carreteras estudiadas:

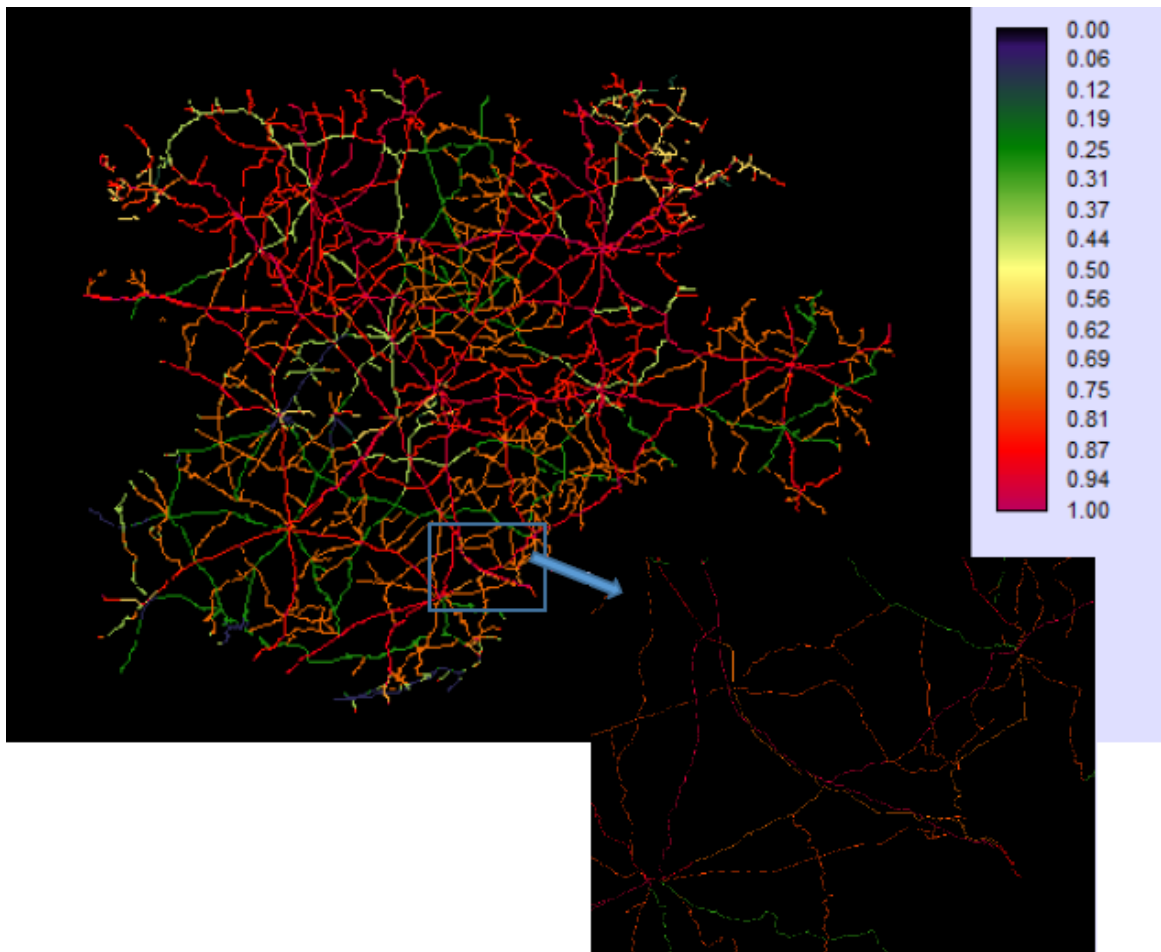


Figura 20 - Probabilidad de accidente en la red de carreteras de Castilla y León

3.3.5. Generación de mapas de vulnerabilidad.

Una vez se ha obtenido el mapa correspondiente a la probabilidad de ocurrencia de accidente, el siguiente paso fue incorporar al SIG los valores de vulnerabilidad, de forma que se clasifique cada pixel con su valor comprendido de 0 a 4, tanto de vulnerabilidad intrínseca como extrínseca.

Es necesario tener en cuenta que los valores dependen del producto transportado, de forma que en el proyecto de Á. Arranz Zazo (2013) se utilizó la clasificación en 62 grupos de comportamiento elaborada por los departamentos de Transporte de Estados Unidos y Canadá y el Secretariado de Comunicaciones y

Transportes de México (CANUTEC , 2012) , tal y como ya se dijo en el apartado 2.2.1.3. Otras clasificaciones..

Por razones de operatividad, en el proyecto de Á. Arranz Zazo (2013) se dieron unas pautas para generar mapas de vulnerabilidad total, pero únicamente se generaron a modo de ejemplo mapas para tres de los grupos, que se han considerado de especial interés para el análisis:

- Explosivos del grupo 2, por sus especiales características de peligrosidad.
- Gases tóxicos e inflamables con peligro extremo, clasificados en el grupo 6, entre los que se incluye el Sulfuro de Hidrógeno (nº ONU 1053), uno de los productos con mayor peligrosidad intrínseca.
- Líquidos inflamables del grupo 16, combustibles, aceites lubricantes y otros derivados del petróleo, por ser estos productos los más ampliamente representados en el porcentaje total de flujos de mercancías peligrosas del grupo, y consecuentemente los que presentan una mayor siniestralidad absoluta.

En consecuencia de que sean estos tres únicos grupos para los que se ha calculado la vulnerabilidad total, los mapas de riesgo generados durante el proyecto de Á. Arranz Zazo (2013) serán únicamente los correspondientes a estos grupos, y serán los que se tomen como base de datos de la aplicación.

Para calcular la vulnerabilidad y representarla geoespacialmente, se han utilizado los mapas de elementos ambientales y de población expuestos, asignando un valor de vulnerabilidad a cada elemento dependiendo del grupo de comportamiento al que pertenezca la mercancía transportada y mediante un operador de mapas generando el mapa de la vulnerabilidad total aplicando la ecuación 3.8.

En la siguiente imagen aparece el mapa de vulnerabilidad total (V) frente a líquidos inflamables del grupo 16, que establece una escala de 0 a 32, siendo este último el elemento más vulnerable:

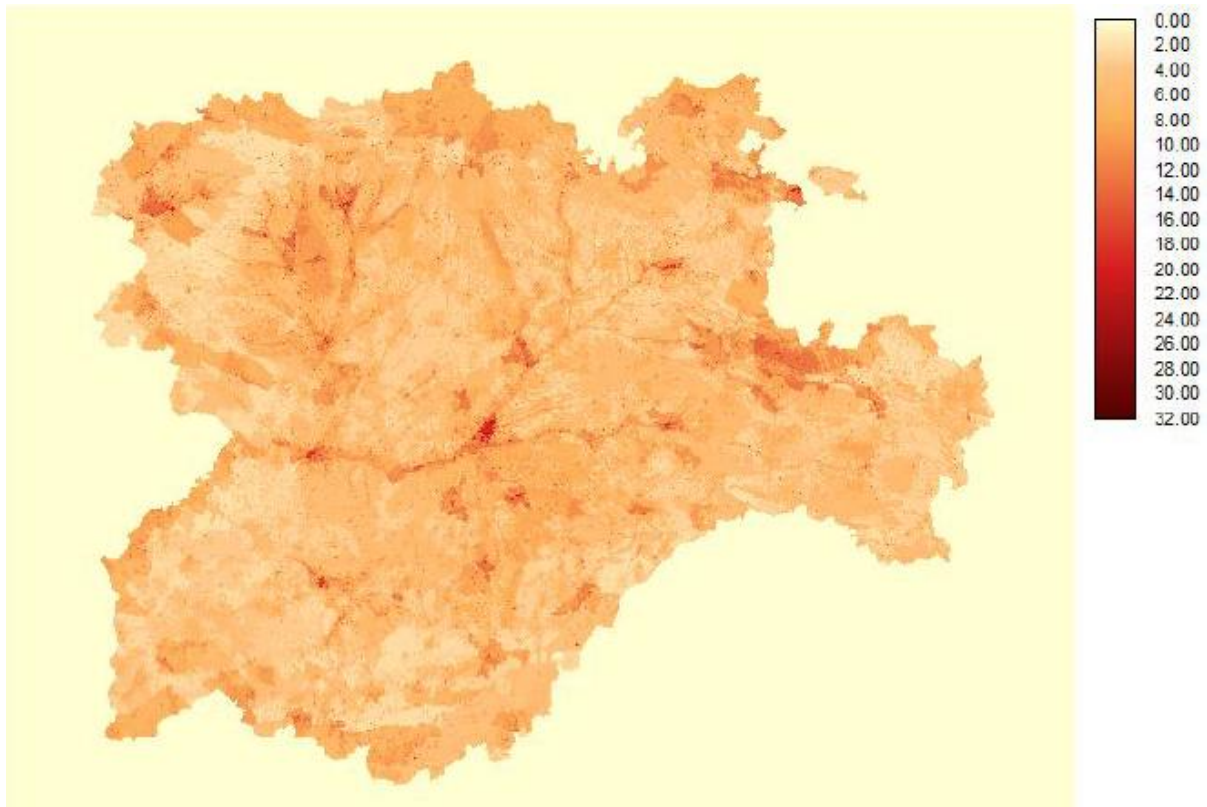


Figura 21 - Mapa de vulnerabilidad total frente a líquidos inflamables del grupo 16

Se puede ver que, ante este tipo de sustancias, los núcleos urbanos y los lechos fluviales son generalmente zonas mucho más vulnerables que el resto.

3.3.6. Generación de mapas de gravedad.

Llegados a este punto, el siguiente paso es el de aplicar la ecuación 3.9 mediante un operador de mapas para generar un mapa de gravedad (G) en función de la vulnerabilidad del medio, de la peligrosidad intrínseca del tipo de material transportado y del tipo de accidente. En la generación de dicho mapa intervendrá, por tanto, el mapa de vulnerabilidad para un cierto grupo, al que se le sumará el término correspondiente al R_{mp} del grupo en concreto (ver ecuación 3.5) por el factor n_a , de forma que se multiplique este total por la peligrosidad extrínseca, que para el proyecto de Á. Arranz Zazo (2013) vale 6 (mapas conservadores que se ponen en el peor tipo de accidente posible).

Así, utilizando los mapas de vulnerabilidad de los diferentes grupos, y la peligrosidad intrínseca R_{mp} correspondiente, se pueden generar mapas de gravedad

para cada uno de los grupos de mercancías peligrosas existentes. En el proyecto de Á. Arranz Zazo (2013) se generaron mapas de gravedad para los grupos 2, 6 y 16, al igual que para el caso de la vulnerabilidad.

Para una mejor comprensión de los resultados se establecieron los siguientes intervalos para la gravedad del proyecto de Á. Arranz Zazo (2013):

Valor de G	Gravedad
<100	Baja
100-150	Media
150-200	Alta
>200	Muy alta

Tabla 19 - Estimación de los umbrales para la gravedad de un accidente

Para el caso de los líquidos inflamables del grupo 16, al igual que en el caso de la vulnerabilidad se obtiene el mapa siguiente:

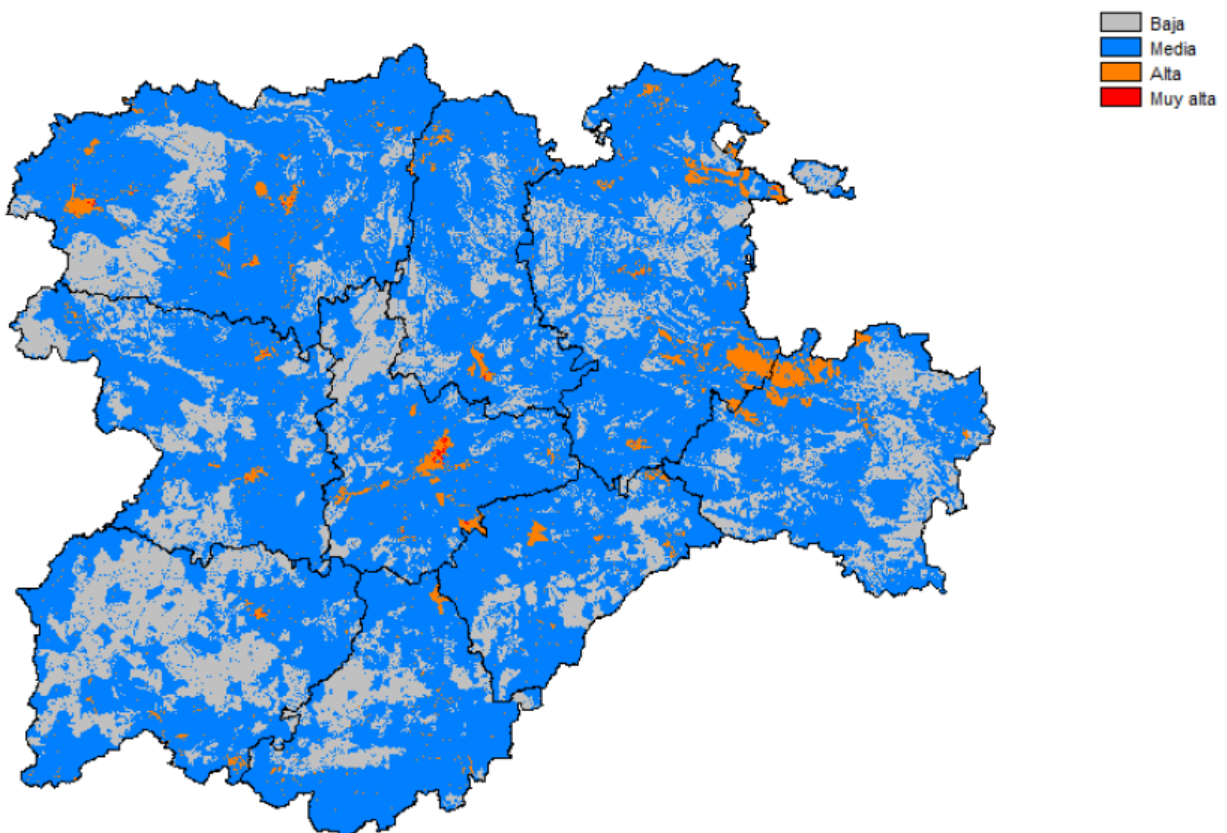


Figura 22 - Gravedad potencial máxima de un accidente de líquidos inflamables del grupo 16

La gravedad potencial máxima de los accidentes en los que intervienen líquidos inflamables del tipo de combustibles fósiles del grupo 16 está bastante equilibrada entre valores bajos y medios, concentrándose estos últimos en los fondos de valle fluviales y en las áreas más permeables asociadas a acuíferos. Hay también valores altos y muy altos localizados en los cascos urbanos y áreas metropolitanas de las mayores ciudades

3.3.7. Obtención de los mapas de riesgo.

Obtenidos los dos factores que definen el riesgo en el transporte de mercancías peligrosas, probabilidad de ocurrencia de accidente y gravedad del accidente, se utiliza el operador producto de mapas para obtener un mapa derivado que indique el riesgo de cada punto geográfico.

Es reseñable que los puntos sometidos a este riesgo se encuentran dentro de una banda o “buffer” a ambos lados de la carretera. Esta zona está delimitada por los radios de afección contemplados en “*Emergency Response Guidebook*” (CANUTEC, 2012) para cada uno de los grupos. Estas distancias, basadas en la experiencia de los servicios de emergencia, tienen un carácter empírico y son bastante conservadoras.

Se ha aplicado el mismo criterio a la hora de establecer umbrales en el mapa que para el caso de la gravedad, que es el que aparece en la tabla siguiente:

Valor de R	Riesgo
<100	Bajo
100-150	Medio
150-200	Alto
>200	Muy alto

Tabla 20 - Umbrales de riesgo

El mapa de riesgo para materiales del grupo 16 queda de la manera siguiente:

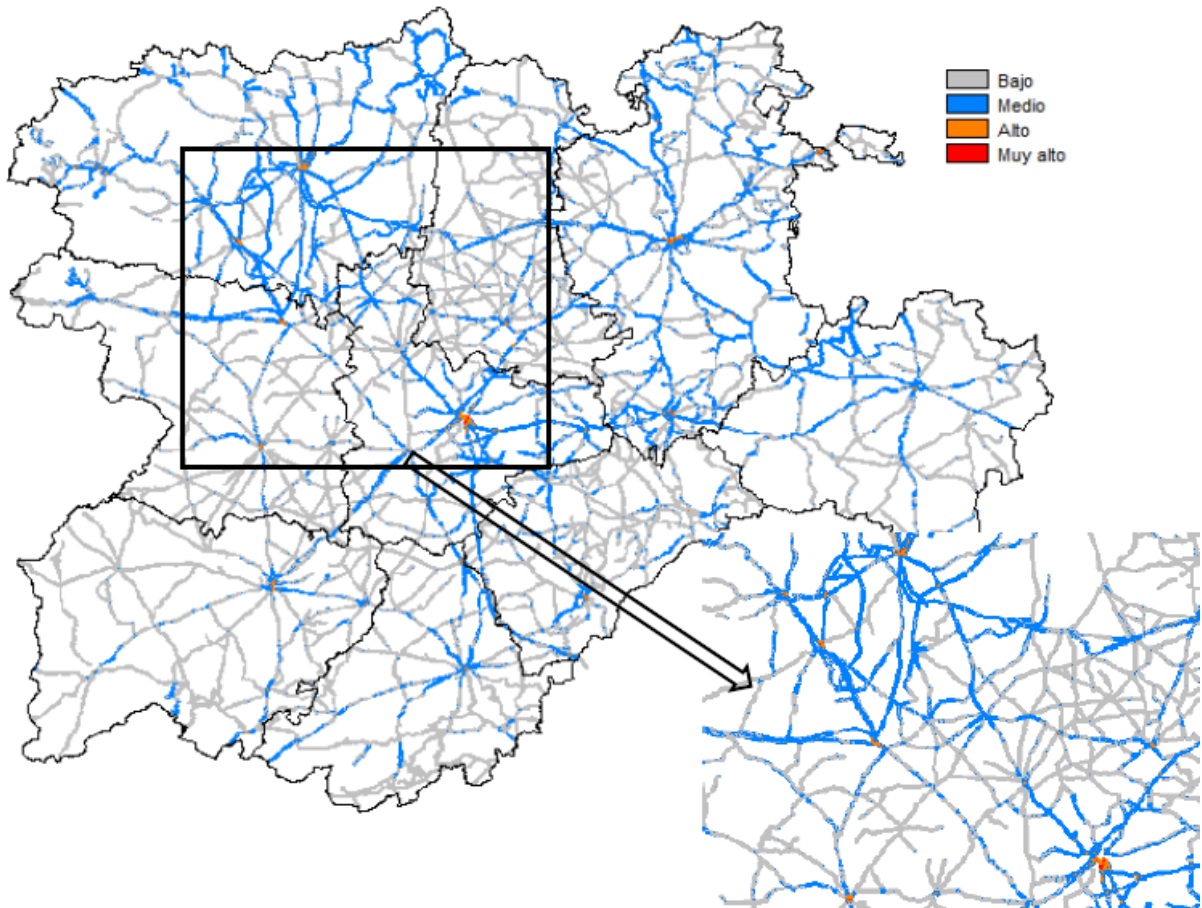


Figura 23- Mapa de umbrales de riesgo para líquidos inflamables del grupo 16

Para los casos de vertido de de líquidos inflamables del grupo 16, nos encontramos que existe un mayor riesgo alcanzándose en los núcleos urbanos más poblados factores de riesgo más altos. Como ejemplo se ve la alta concentración de zonas de alto riesgo alrededor de las poblaciones de Valladolid, León, Burgos, Aranda de Duero y otras que son nodos de la red vial objeto del estudio.

3.4. Análisis de riesgos como punto de partida del presente proyecto.

Para el presente proyecto, el método de análisis de riesgo desarrollado por Á. Arranz Zazo en su proyecto (2013) se utiliza como una base de datos, a partir de la cual es posible estimar en tiempo real el riesgo que suponen los vehículos de transporte de mercancías peligrosas presentes en un determinado momento de tiempo.

Es necesario apuntar que, pese a que el mapa de riesgo mostrado en este capítulo es un mapa dividido en umbrales, el que usaremos como base de datos del

proyecto será un mapa puramente numérico. Es decir, que mientras el mapa mostrado en este capítulo es un mapa cuyos píxeles pueden tomar cinco valores discretos diferentes (bajo, medio, alto, muy alto y nulo (fuera de la banda de riesgo de todas las carreteras), los mapas que emplearemos en capítulos subsiguientes serán mapas de valores continuos, también generados con el método de Á. Arranz Zazo.

Se ha respetado para el presente proyecto la elección de los grupos de mercancías peligrosas más característicos realizada por Á. Arranz Zazo, de forma que para la presente aplicación se simularán únicamente mercancías peligrosas que pertenezcan a uno de los siguientes tres grupos:

- Grupo 2, materiales explosivos, como la pólvora.
- Grupo 6, gases tóxicos e inflamables con peligro extremo, como el sulfuro de hidrógeno.
- Grupo 16, líquidos inflamables como combustibles, lubricantes y otros derivados del petróleo, como las gasolinas y los gasóleos.

Durante los capítulos siguientes, se detallará de qué manera se ha incorporado el método de análisis, mediante la operación sobre los mapas de estimación del riesgo generados, para conseguir los objetivos del proyecto.

CAPÍTULO 4: TRATAMIENTO NUMÉRICO DE MAPAS EN MATLAB



4.1. Introducción.

En este capítulo, se hablará sobre las características del software MATLAB, repasando las principales ventajas e inconvenientes que presenta para un proyecto de este tipo, justificando así su elección por encima de otros lenguajes de programación posibles.

A continuación, se ofrecerá una visión detallada acerca de la mejor manera de tratar los mapas, generados por un SIG, que es un programa cuya función específica es la generación y operación con mapas, con un lenguaje de programación orientado a objetos, de carácter matemático y de propósito general. Para ello, se describirán las principales adaptaciones de formato llevadas a cabo para poder operar con MATLAB con mapas en un lenguaje matemático.

Además, se presentarán una serie de funciones sencillas que se valen de las capacidades para el procesamiento de imágenes que lleva implementadas el lenguaje MATLAB, que sirven para preparar los mapas para extraer información, así como para crear los mapas a mostrar al usuario.

4.2. Requisitos de la aplicación.

A la hora de seleccionar un software o lenguaje de programación u otro, debemos dar el paso previo de preguntarnos cuáles son los requisitos que debe reunir un software para ser apto para la aplicación del presente proyecto. Haciendo una abstracción de las características necesarias, podemos obtener principalmente las siguientes:

- Capacidad de extracción de información de un sistema de información geográfica (SIG).
- Capacidades que permitan la generación de algoritmos de inteligencia artificial, tanto para el cálculo de rutas como para su seguimiento en tiempo real.
- Capacidad de procesamiento matemático para dichos algoritmos.

- Capacidad de gestión de información con ficheros y variables de programa.
- Capacidad de generación y manipulación rápida de mapas de riesgo instantáneo.
- Capacidad de generación de interfaces gráficas de usuario, o GUI.
- Capacidad de modularización, o generación de diferentes funciones que interaccionen entre sí.

A la vista de estos requisitos, aparecen dos opciones para la selección de software: o bien emplear un software específico para la generación y gestión de SIG, o bien emplear un software o lenguaje de propósito general. Cada una de estas opciones tiene puntos fuertes y débiles, de forma que se sopesará a continuación los pros y contras de cada una de ellas.

4.2.1. Software específico para SIG.

Existen una serie de programas, tanto de código abierto como comerciales, específicamente orientados a la captura, almacenamiento, manipulación y análisis de información geográficamente referenciada, construyendo así un SIG. Ejemplos de este tipo de software pueden ser ArcGIS, gvSIG, IDRISI o GRASS.

La principal ventaja de estos programas es que permiten trabajar de una manera muy sencilla con mapas, por lo que la georreferenciación de los vehículos en la red de carreteras sería insuperable. No obstante, los mapas, así como toda la información geográfica que lleva asociada, son archivos muy grandes, de hasta algunos cientos de megabytes. Generar y manipular archivos tan voluminosos en un tiempo adecuado para que la información que contengan no esté desactualizada en un sistema de tiempo real. Así, sería positivo poder reducir la densidad de información almacenada en los mapas para reducir los ficheros y aumentar la velocidad de la aplicación.

Además, pese a que estos programas son muy buenos en la generación de mapas, muchos ni siquiera incluyen una opción para generar interfaces o código fuente de usuario, y los que incluyen una consola de comandos es demasiado limitada para

cumplir con los requisitos de aplicación. Así, habría que recurrir a generar todo el simulador de vehículos, calculador de rutas, etc. con un lenguaje de propósito general de bajo nivel, como podría ser C o BASIC. El gran problema que tiene esto es el tener que crear una interfaz entre el software SIG y el de propósito general, que debería desarrollarse en forma de base de datos, lo cual supondría tener que hacer constantes actualizaciones de datos en el disco duro, lo que penalizaría muchísimo la velocidad de la aplicación. Además, esto requeriría desarrollar complejos mecanismos de comunicación entre procesos como son los semáforos o los segmentos de memoria compartida, que también contribuirían a hacer más lenta la aplicación.

Sin embargo, si es digno de mencionar la importancia que este tipo de software ha cobrado en el presente proyecto, ya que todos los mapas generados durante el proyecto de Á. Arranz Zazo (2013), y que sirven como entrada al presente proyecto, fueron creados mediante el software IDRISI, orientado a SIG con capas ráster.

4.2.2. Lenguaje de propósito general.

La gran ventaja de emplear un lenguaje de propósito general como podría ser C, BASIC, Java u otras opciones es la completa libertad para desarrollar la aplicación, al poder partir desde cero prácticamente y poder trabajar a bajo nivel. Así, se podría desarrollar perfectamente los sistemas de simulación de vehículos en tiempo real y el calculador de rutas.

No obstante, precisamente el trabajar a bajo nivel supone a su vez la mayor desventaja para la aplicación. El hecho de extraer información de un SIG, o generar mapas de riesgo instantáneo, supone toda una infinidad de funciones a bajo nivel que suponen elevar el volumen de código a realizar.

De nuevo se podría contemplar la posibilidad de dejar que de la generación de mapas se encargara un software específico orientado a SIG, pero estaríamos en la misma situación que en el apartado anterior, con la consiguiente inviabilidad por las razones previamente comentadas.

4.2.3. Una opción intermedia: MATLAB.

Una de las ventajas de MATLAB, software del que posteriormente se hablará, es que permite desarrollar desde cero aplicaciones, tal y como se haría empleando un lenguaje de propósito general, pero además posee toda una serie de funciones de más alto nivel, almacenadas en *toolboxes*, que simplifican la creación de aplicaciones y aceleran el proceso de generación de prototipos.

En concreto, MATLAB incluye una serie de funciones para el procesamiento de imágenes que simplificarán mucho la extracción de información de los SIG generados, así como la generación de nuevos mapas para el riesgo instantáneo.

El hecho de poder integrar las funciones de cálculo y seguimiento de rutas con las relacionadas con el SIG va a permitir almacenar toda una serie de variables en espacio de trabajo, en la memoria RAM, evitando tener que recurrir al almacenamiento en disco duro provocado por las interfaces entre programas, con la consiguiente pérdida de velocidad de la aplicación.

4.3. Software MATLAB.

4.3.1. Introducción a MATLAB.

En este subapartado trataremos de responder a la pregunta: ¿Qué es MATLAB? Si atendemos a la descripción general que ofrece MathWorks, empresa propietaria y distribuidora de este software, MATLAB *“es un lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo para el cálculo numérico, la visualización y la programación. Mediante MATLAB, es posible analizar datos, desarrollar algoritmos o crear aplicaciones. El lenguaje, las herramientas y las funciones matemáticas incorporadas permiten explorar diversos enfoques y llegar a una solución antes que con hojas de cálculo o lenguajes de programación tradicionales, como pueden ser C/C++ o Java”*.

MATLAB, acrónimo de MATrix LABoratory, o laboratorio de matrices, surge en 1984, creado por Cleve Moler, un matemático y programador estadounidense especializado en análisis numérico. Moler ya había colaborado en los años 70 en el desarrollo de dos paquetes de software escritos en FORTRAN, LINPACK y EISPACK, que contenían funciones para el cálculo de operaciones con matrices y el cálculo de

autovalores y autovectores, respectivamente. Moler había desarrollado MATLAB como un lenguaje de computación numérica para que sus estudiantes de la universidad de Nuevo México pudieran tener acceso a las funciones de estos dos paquetes sin la necesidad de aprender FORTRAN. Así, en el año 1984, Cleve Moler cofunda Mathworks con Jack Little y comienza a comercializar este programa.

Se estima que en 2004 había ya más de un millón de usuarios de MATLAB, en ámbitos académicos y empresariales.

4.3.2. Características principales de MATLAB.

MATLAB ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M) disponible para Unix, Windows, Mac OS y GNU/Linux.

El lenguaje M es un lenguaje orientado a matrices, al tener como elemento básico de datos una matriz que no requiere dimensionamiento. El trabajo con una matriz como unidad elemental de datos permite reducir el tiempo de resolución de algunos problemas numéricos en comparación con otros lenguajes, como son C, BASIC o FORTRAN.

Otra de las virtudes de MATLAB es que ha ido evolucionando en los últimos años a partir de la colaboración de usuarios independientes, que han ido desarrollando toda una serie de funciones para hacer una infinidad de aplicaciones más fácilmente implementables mediante el software MATLAB. Toda esta serie de funciones se agrupan en bibliotecas de soluciones para problemas específicos denominadas *toolboxes*, que extienden el entorno de trabajo original de MATLAB, que era el del cálculo matricial, a una gran variedad de campos de la ingeniería.

Así, se fue desarrollando código para los campos de procesamiento de señales, diseño de sistemas de control, simulación de sistemas dinámicos, redes neuronales, etc. En los últimos años, el abanico tecnológico abarcado por las *toolboxes* se ha abierto espectacularmente, de forma que nos encontramos en un punto en el que existen más de 50 *toolboxes*, preinstaladas en la versión de 2013 de MATLAB, además de otra serie de bibliotecas de usuario disponibles en la red para descargar gratuitamente. Existen *toolboxes* con funciones para campos tan diversos como:

- Sistemas de control en tiempo real.
- Robótica.
- Protocolos para sistemas de comunicación industrial.
- Tratamiento de imágenes y visión artificial.
- Finanzas.
- Filtros de señal.
- Compilador de VHDL.
- Georreferenciación y SIG.

Viendo la progresión del desarrollo en los últimos del software MATLAB, cuyas capacidades se multiplican versión tras versión, no se ve un techo a corto plazo para su crecimiento. Precisamente esta característica, su capacidad de crecimiento, es la que le ha permitido a MATLAB convertirse en uno de los entornos de desarrollo líderes en enseñanza, investigación e industria, al convertir a cada uno de sus usuarios en autores contribuyentes, que no solo se nutran de las aplicaciones existentes, sino que trabajen en crear nuevas aplicaciones que puedan ser utilizadas para mejorar la comunidad de MATLAB para usuarios futuros.

4.3.3. Elección del entorno MATLAB para la aplicación.

Una vez explicado que es MATLAB, con su origen y sus principales características, conviene dar respuesta ahora a la pregunta de por qué se ha seleccionado el entorno de programación MATLAB para el presente proyecto. No hay una razón única, sino que esta elección ha sido fruto de un estudio de las distintas alternativas existentes, sopesando ventajas e inconvenientes de cada uno de los lenguajes y entornos.

4.3.3.1. Lenguaje de programación como herramienta de transformación.

Hay que ser consciente de que, al igual que sucede con el idioma en el que una obra literaria está escrita, un entorno de programación con su lenguaje característico es únicamente una herramienta que permite al autor de cualquier aplicación o proyecto obtener una transformación de sus ideas en algo real y tangible. Así, aunque no podemos decir que la elección del software sea una cuestión menor, tampoco podemos hablar de una decisión crítica en el desarrollo de un proyecto.

El hecho de seleccionar un lenguaje u otro depende habitualmente de los requisitos de la aplicación, pero también de los conocimientos y la experiencia previa del autor, que sabe que existen multitud de herramientas en forma de entornos y lenguajes para materializar sus ideas acerca del proyecto, y que el hecho de seleccionar una u otra para realizar el prototipo no implica que la aplicación final no pueda apoyarse en otra serie de lenguajes o entornos para su desempeño.

Continuando con la analogía de la obra literaria, el lenguaje de programación debe adaptarse a los objetivos de la aplicación, al igual que el idioma en el que la obra está escrita debe estar acorde con el del lector, siendo necesaria una traducción cuando no coincidan éstos no coincidan.

Por eso, es necesario comprender que las razones que se darán en este apartado para la selección de MATLAB como entorno de desarrollo del presente proyecto no deben considerarse como categóricas, sino que son razones personales del autor para la selección de entorno, que, no obstante, es consciente de que esta decisión afecta únicamente al prototipo de la aplicación, de forma que se deja abierta la puerta a incorporar elementos de otros lenguajes en futuras actualizaciones y expansiones de la aplicación.

4.3.3.2. Principales ventajas e inconvenientes de MATLAB como entorno de desarrollo.

Probablemente la mayor virtud de MATLAB es, tal y como se describió previamente, su amplia expansión y constante crecimiento, así como su uso extenso en la comunidad educativa internacional para el desarrollo de una gran variedad de prototipos. No debemos olvidar que el hecho de utilizar un entorno ampliamente

utilizado garantiza la difusión, actualización y aprovechamiento de cualquier tipo de aplicación. Además, el hecho de que los programas se creen y se ejecuten en un entorno integrado como es MATLAB, y dado que existen licencias para varios sistemas operativos (GNU/Linux, Windows, Mac OS y Unix), se garantiza en este punto una interoperabilidad entre sistemas operativos que no sería posible si se utilizara un lenguaje con incompatibilidades entre sistemas, como puede ser el C por ejemplo.

Otra de las ventajas que presenta MATLAB con respecto a otros lenguajes es su orientación hacia el trabajo con matrices y vectores, lo que nos permite trabajar cómodamente en numerosos aspectos de la aplicación, como son:

- Gestión y creación de mapas que, como veremos en siguientes apartados, se gestionan como matrices.
- Almacenamiento, lectura y gestión de las distintas rutas, que se ven representadas en una sucesión de coordenadas en el mapa que se gestionan como vectores.
- Almacenamiento de los datos correspondientes a todos los vehículos de transporte de mercancías peligrosas actualmente en carretera, que se crea como un vector de estructuras de datos.

Por otra parte, el amplio soporte matemático y la alta precisión de los cálculos permiten minimizar los tiempos de ejecución sin perder precisión en la simulación en tiempo real para los vehículos de transporte de mercancías peligrosas, por lo que MATLAB permite un mayor tamaño de la muestra de vehículos para un mismo periodo de ejecución que otros tipos de lenguaje.

Es también notable la presencia de una serie de funciones implementadas en el lenguaje de MATLAB, que garantizan la robustez del código y permiten reducir el volumen de código así como optimizar el rendimiento del programa. En concreto, son destacables las funciones de operaciones con ficheros (apertura, lectura, escritura, etc.) y las operaciones con imágenes (lectura, muestra, paso de color a blanco y negro, etc.), formando parte estas últimas de la *toolbox* de procesamiento de imágenes.

Si tenemos que destacar algún inconveniente del lenguaje MATLAB, debemos referirnos a dos aspectos principales, uno derivado del propio software de desarrollo y otro del tipo de distribución que tiene este software.

Por una parte, la gestión de memoria en MATLAB resulta un tanto “oscura” si la comparamos con otros lenguajes más convencionales. MATLAB tiene asignado una cierta cantidad de memoria fija para el almacenamiento de variables durante la ejecución de un programa, y si se superara este límite el programa fallará al no poder almacenar más información.

Por si fuera poco, en el flujo habitual de un programa en el que van apareciendo y desapareciendo variables, así como modificándose algunas cambiando su tamaño, la memoria que inicialmente estaba asignada para MATLAB sufre de fragmentación, por lo que el espacio de almacenamiento de variables se reduce aún más. Este es un tema delicado, puesto que una mala asignación de memoria al software MATLAB puede provocar que la aplicación no funcione adecuadamente.

En caso de computadores con una memoria RAM menor, en ocasiones es necesario recurrir a aumentar el *swap* o espacio de intercambio del disco, lo que habitualmente se denomina memoria virtual, de forma que los procesos puedan obtener espacio del *swap* para superar la carencia de memoria RAM.

Además, a la hora de desarrollar determinadas funciones que vienen implementadas en las bibliotecas de MATLAB, como por ejemplo la inserción de elementos en posiciones intermedias de vectores, los programadores buscaron desarrollar funciones de alto nivel, primando la facilidad de uso sobre la velocidad. Así, si tuviéramos un vector con 50 elementos y deseáramos insertar un elemento en la posición 20, con estas dos sencillas líneas de código sería suficiente:

```
vector(21:51) = vector(20:50);  
vector(20)=valor_a_insertar;
```

No obstante, estas dos sencillas líneas de código, suponen 31 asignaciones de variables, con su consiguiente carga computacional y, por tanto, tiempo de ejecución. Por tanto, a la hora de emplear MATLAB este tipo de funciones para las aplicaciones,

debemos ser conscientes de la carga computacional que pueden traer asociada, por lo que muchas veces será preferible crear nuevas funciones de usuario que generen una menor carga computacional.

Así, la existencia de algunas funciones de alto nivel en MATLAB provoca también que el programador deba llevar un cuidado especial al trabajar con estas funciones, o de lo contrario ralentizará el programa en exceso.

Por otro lado, el hecho de que MATLAB sea un software comercial, con unas licencias con un coste asociado, puede suponer una desventaja sobre otras alternativas de código abierto. No obstante, ya hemos dicho que la amplia difusión del producto MATLAB con la gran comunidad de usuarios existentes en todo el mundo permite compensar este defecto con otras ventajas como la reutilización de código, la expansión de la comunidad, el crecimiento de las prestaciones del software, etc.

4.4. Tratamiento de información geográfica.

Una vez decidido que MATLAB será el software a emplear para el desarrollo de la aplicación, el primer paso es determinar de qué manera se van a modelar los mapas y la información que contienen de manera numérica dentro del programa, para lo que primeramente deberemos comprender las normas que se ha seguido en su generación.

4.4.1. Sistema de coordenadas UTM.

Tal y como se dijo en el capítulo 3, todos los mapas que se van a utilizar en este proyecto, tanto los generados por Á. Arranz Zazo en su proyecto (2013) como los generados en este proyecto, van a utilizar el sistema de proyección UTM 30 N extendido.

El sistema de coordenadas universal transversal de Mercator (en inglés UTM) es un sistema que se basa en la proyección cartográfica transversa de Mercator, construida como una proyección cilíndrica conforme tangente a un meridiano central, que determina el número de proyección UTM. Esta proyección se muestra esquemáticamente en la figura 24.

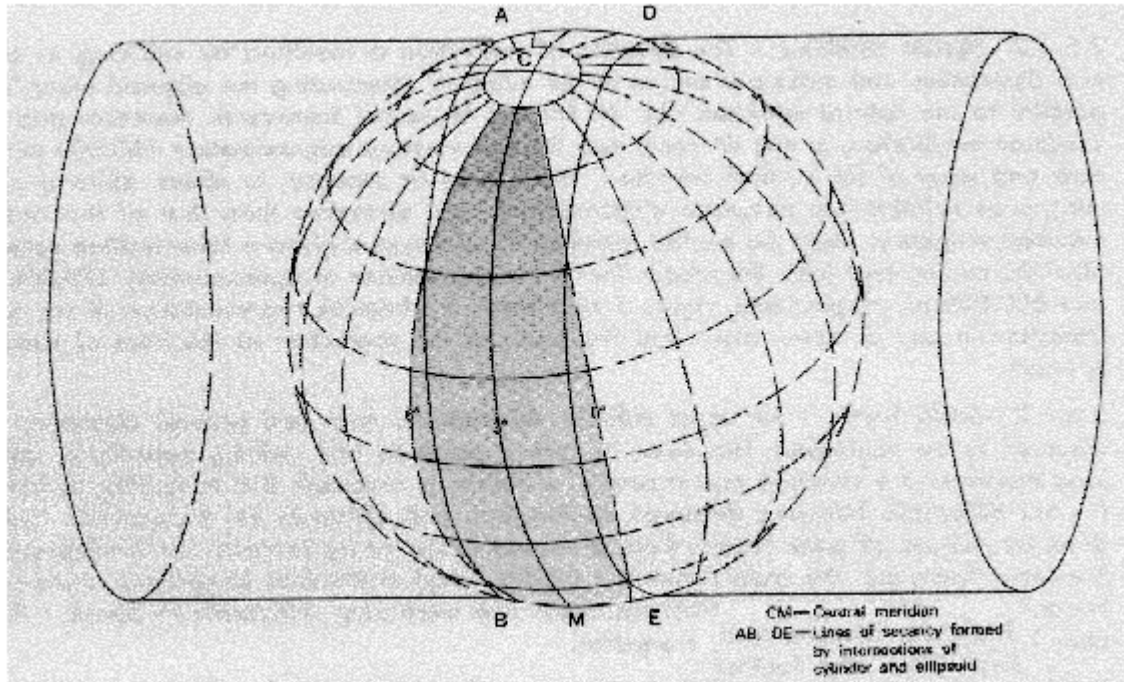


Figura 24 - Proyección cartográfica transversa de Mercator

Las coordenadas de este sistema, a diferencia de las coordenadas geográficas, expresadas en longitud y latitud, se expresan en metros a nivel del mar, en coordenadas x e y dentro de un cierto sistema de referencia.

La ventaja de esta proyección, y la razón por la cual se utiliza en lugar de las coordenadas geográficas, es que las distorsiones aparecidas al proyectar son pequeñas, debido a que ningún punto está alejado del meridiano de referencia en torno al cual se ha proyectado. No obstante, esto se consigue a costa de la discontinuidad entre los diferentes meridianos, ya que los puntos que se encuentran al límite entre dos zonas se están proyectando dos veces con meridianos de referencia diferentes.

Para evitar las discontinuidades, es habitual que se construyan zonas extendidas, de forma que si deseamos representar un territorio que se encuentra entre dos zonas UTM no aparezca una distorsión en el mapa.

La división del globo en meridianos de referencia para la proyección UTM da como resultado la división del mapa del mundo en 60 husos UTM de 6° cada uno. La división en husos UTM se muestra en la figura 25.

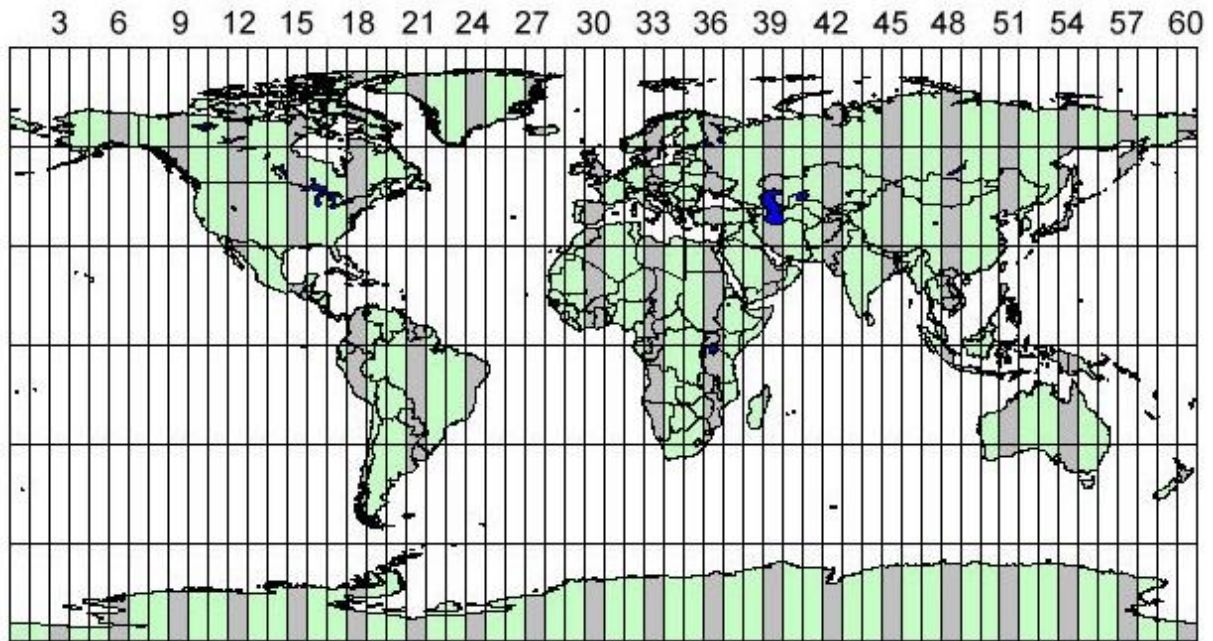


Figura 25 - División en husos UTM del mapamundi

Tal y como podemos observar, para abarcar la península Ibérica, lo ideal es utilizar una proyección en el huso UTM 30 zona norte (de ahí la N), extendiéndolo al 29 y 31 para evitar que haya deformaciones dentro del propio mapa peninsular. Es muy habitual que los mapas de España se valgan de esta proyección para representar en el plano todo el territorio peninsular y las islas Baleares introduciendo una distorsión mínima.

Se puede ver claramente que éste es el huso adecuado a la hora de representar en un mapa la península Ibérica si atendemos a la figura 26.



Figura 26 - Proyección de la península Ibérica con una proyección UTM 30 N extendida

La relación entre las coordenadas geográficas, medidas en función de la latitud y longitud, y las coordenadas de una determinada zona UTM son conocidas, por lo que se podría incorporar una función de conversión para el caso de que los dispositivos GPS que emplearan los vehículos a monitorizar por la aplicación del presente proyecto enviaran coordenadas cartesianas en lugar de coordenadas UTM.

4.4.2. Mapa de Castilla y León en coordenadas UTM.

Ahora que ya conocemos el sistema de proyección empleado en la representación del terreno de Castilla y León en los mapas utilizados en el presente proyecto, obtendremos aún más información atendiendo a la tabla de información que aporta IDRISI junto a todos los mapas; tabla que aparece en la figura 27.

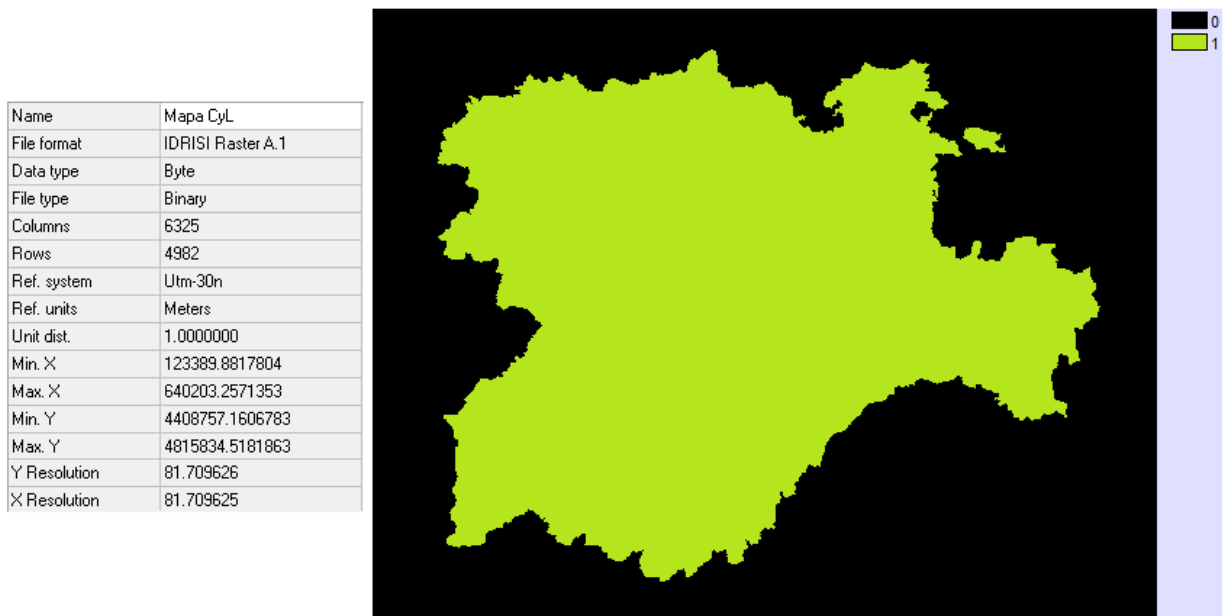


Figura 27 - Tabla de información que aporta IDRISI con cada mapa

De la tabla podemos extraer la siguiente información:

- El mapa está almacenado en un archivo de tipo ráster con una extensión única del software IDRISI, la extensión *.rst*. El formato ráster implica que el mapa está dividido en una serie de celdas de un tamaño predeterminado que almacenan un tipo determinado de información.

- El tipo de dato almacenado en cada celda es un byte, y además es un fichero binario, por lo que cada una de las celdas podrá tomar el valor 0 o el valor 1. Para el mapa de ejemplo, la celda tomará un valor de 1 si está dentro del territorio de Castilla y León y tomará un valor de 0 si no lo está.
- El número de filas y columnas de celdas que tiene el mapa es de 4982 y 6325 respectivamente. Este dato es importante porque se repetirá para absolutamente todos los mapas que se empleen en el proyecto.
- El sistema de proyección que utiliza el mapa es UTM 30 N, y su unidad de referencia es el metro.
- Aparecen reflejados también los valores de x e y máximos y mínimos, que son los que delimitan que zona se representa dentro de lo que sería una proyección total del huso UTM 30 N.
- Por último, aparece la escala del mapa, el valor en metros al que corresponde cada fila o cada columna. De nuevo hay que destacar la importancia de este valor, que determinará la distancia que debe recorrer un vehículo para que su posición cambie desde una celda a la contigua. Esta distancia es de 81,710 metros, tanto para las filas como para las columnas, de manera que las celdas serán cuadradas.

Una vez que conocemos las características principales de los mapas con los que se va a trabajar, es hora de adaptarlos para poder utilizar su información mediante MATLAB.

4.4.3. Tratamiento de mapas en MATLAB.

La solución adoptada para la lectura de mapas con MATLAB, dadas las características del software, es sencilla: tratar los mapas como matrices numéricas, de forma que cada píxel del mapa ráster corresponderá a un elemento de la matriz. Tal y como es obvio, dado que los mapas tienen 4982 filas y 6325 columnas, como se anunció en el apartado anterior, las matrices que almacenen mapas también tendrán el mismo tamaño. Por lo general, y a no ser que se indique lo contrario, en el presente

proyecto el valor 0 en una matriz de cualquier mapa corresponde a un punto fuera del área de influencia de todas las carreteras.

El primer paso para poder transformar un mapa ráster de IDRISI en una matriz de MATLAB es convertir éste a un formato adecuado para su lectura. Para ello, utilizaremos la función de IDRISI para exportar los formatos ráster (la extensión `rst` sólo es válida dentro del software IDRISI) a otros formatos, y seleccionaremos la opción de exportar a formato GEOTIFF/TIFF, una acción que generará dos archivos:

- Una imagen en formato TIFF, formato sin compresión para imágenes de alta calidad, con tantos píxeles como celdas tiene la imagen. Cada uno de los píxeles tendrá el mismo valor que tenía la celda original del mapa ráster. No obstante, esta imagen no es visible mediante un visor estándar, por ser una matriz bidimensional, mientras que las imágenes son matrices tridimensionales, de forma que la tercera dimensión tiene tres elementos, uno para cada color de la escala RGB. En principio, la imagen obtenida se utilizará para obtener información o, a través de algunas funciones de transformación, obtener imágenes de mapas que sí sean visibles.
- Un fichero de georeferenciación en formato TFW, que contiene la información acerca del tipo de proyección del mapa, tamaño del ráster de la imagen, origen para las x y las y , etc. Para este proyecto, este fichero no se va a utilizar, pero cabe mencionar su utilidad para generar mapas georeferenciados mediante MATLAB, utilizando la *mapping toolbox* que incluye MATLAB a partir de la versión 2013.

Una vez hemos obtenido el mapa deseado en un formato TIFF legible por MATLAB, utilizaremos la función para leer imágenes para transformarla en una matriz de datos. La siguiente línea de código es suficiente:

```
matriz_mapa=imread('MapaCyl.tif');
```

La función `imread` forma parte de la *image processing toolbox* de MATLAB. Una característica importante a tener en cuenta cuando exportemos ficheros desde IDRISI hacia MATLAB es que, mientras que IDRISI considera el valor 0 como un índice válido,

MATLAB no lo hace, sino que empieza a contar desde el valor 1 (referir en MATLAB un índice 0 en una matriz provoca un fallo en la ejecución del programa). Esto provoca que las coordenadas obtenidas en IDRISI de cualquier punto se encuentren desfasadas una fila y una columna. Para corregir esto, es necesario mover toda la matriz de mapa una unidad hacia la izquierda y hacia arriba, con la siguiente línea de código:

```
matriz_mapa (1:4981,1:6324)=matriz_mapa(2:4982,2:6325);
```

En la figura 28 se puede apreciar el proceso a partir del cual se han generado los datos. Vemos como a partir del mapa de la región circundante a la ciudad de Astorga (León), se ha obtenido la información correspondiente a los tipos de carreteras en IDRISI en un mapa ráster, y que esta información ha sido exportada a MATLAB y transformada en una matriz numérica, en la que se ha otorgado un valor a cada elemento en función del tipo de vía existente en la celda ráster, o bien un valor 0 para el caso de que no exista carretera en dicha celda.

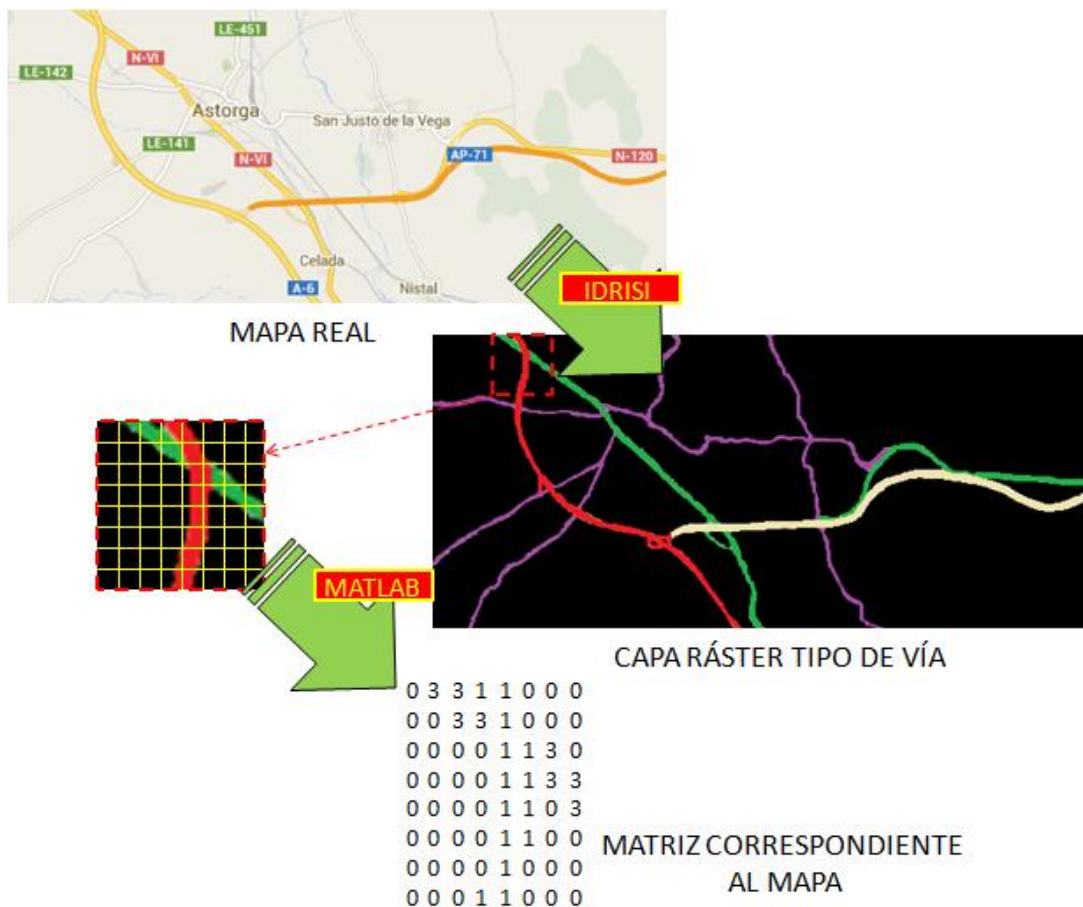


Figura 28 - Proceso de transformación de información geográfica para su operación con MATLAB

4.5. Funciones de tratamiento de imagen.

Dado que trataremos los mapas como matrices de MATLAB correspondientes a imágenes, se han desarrollado algunas funciones para transformar las imágenes en formas más provechosas para la aplicación.

4.5.1. Imágenes como matrices en MATLAB.

Las imágenes en MATLAB se representan como matrices numéricas, cuyos elementos son enteros de 8 bits sin signo (abarca desde el 0 hasta el 255). Estas matrices tendrán un número de filas y de columnas igual a la resolución que tengan las propias imágenes.

Además, estas matrices pueden ser bidimensionales, por lo que el valor entero de cada elemento de la matriz será la intensidad de gris del píxel, mientras que si las matrices son tridimensionales, con una profundidad de tres elementos, cada píxel tendrá asignado tres valores, cada uno marcando la intensidad de color de la escala RGB.

Así, una matriz unidimensional corresponderá con una imagen en escala de grises, en el que el 255 corresponde al color blanco y el 0 al color negro; mientras que una matriz tridimensional de profundidad tres corresponderá a una imagen en color, donde el 255 corresponde al color rojo, verde o azul, según la profundidad a la que estemos, y el 0 al color negro.

Existe otro tipo de imágenes de interés para el presente proyecto, que son las imágenes binarias. Éstas están almacenadas como una matriz bidimensional al igual que las imágenes en escala de grises, con la diferencia de que ahora el elemento que se almacena en cada uno de los píxeles ya no es un entero de 8 bits, sino que es un único bit lógico, en el que un 1 implica color blanco y un 0 implica color negro.

Los tres tipos de imágenes mencionados aparecen en la figura 29. Las imágenes en escala de grises y en formato binario se han creado aplicando las diferentes funciones que se explicarán en subapartados siguientes.



Figura 29 - Imágenes en color, escala de grises y binaria

Para la creación de la imagen binaria, se ha empleado un umbral de 90, de forma que, partiendo de la imagen en escala de grises, a todos los píxeles que tienen un valor de más de 90 se les asigna un 1, mientras que al resto se le asigna un 0.

4.5.2. Funciones de transformación de imágenes.

En este apartado se enumeran las funciones que se han desarrollado y empleado en el presente proyecto para alternar entre los distintos tipos de imágenes aplicándolas a los mapas a mostrar. El código completo y comentado de cada una de las funciones se incluye en el anexo de códigos del CD.

4.5.2.1. Paso de imagen binaria a escala de grises.

Para pasar de una imagen binaria a una en escala de grises, habrá que transformar la matriz de la imagen binaria, con elementos de un bit lógico, en elementos en formato uint8, o entero sin signo de 8 bits, asignando el valor 255 donde haya un 1 y el 0 donde haya un 0.

Este proceso es importante a la hora de crear mapas para mostrar partiendo de mapas binarios, por lo que se ha desarrollado la función bin2gray, cuya llamada es la siguiente:

```
matriz_escala_grises=bin2gray(matriz_binaria);
```

4.5.2.2. Paso de imagen en escala de grises a color.

Para pasar de una imagen en escala de grises a color, es necesario tomar la matriz bidimensional y concatenarla otras dos veces en una tercera dimensión, mediante la línea de código:

```
matriz_rgb= repmat(matriz_escala_grises,[1,1,3]);
```

Esta línea se ha incluido dentro de la función `gray2rgb` desarrollada para el presente proyecto. La llamada a dicha función es la siguiente:

```
matriz_rgb=gray2rgb(matriz_escala_grises);
```

4.5.2.3. Paso de imagen en color a escala de grises.

Para convertir una imagen de color en una imagen en escala de grises, MATLAB incorpora en la *image processing toolbox* una función ya implementada, llamada `rgb2gray`.

Básicamente lo que hace esta función es recorrer la matriz de la imagen a color, y para cada píxel hace la media entre los valores del [R G B], valor que almacena en el píxel correspondiente a la matriz de la imagen en escala de grises. De esta manera, transforma una matriz tridimensional en una matriz bidimensional adecuada para que las imágenes en color y en escala de grises se correspondan.

La llamada a esta función se realiza utilizando la siguiente línea de código:

```
matriz_escala_grises=rgb2gray(matriz_rgb);
```

4.5.2.4. Paso de imagen en escala de grises a binaria.

Para realizar esta conversión, es necesario tener un valor umbral, que implique que para valores de intensidad de la matriz de la imagen en gris mayores a ese umbral se escriba un 1 en la matriz binaria, mientras que para el resto de valores se coloca un 0.

El funcionamiento de esta función es simple, va recorriendo la matriz de la imagen en escala de grises, comparando con el umbral y asignando un valor a la matriz binaria.

La llamada a la función es la siguiente línea de código:

```
matriz_binaria=binariza(matriz_escala_grises);
```

Para el caso del presente proyecto, el umbral se sitúa en 0, es decir, que se colocará un 0 en la matriz binaria siempre y cuando haya un 0 en la matriz en escala de grises, y se colocará un 1 para el resto de casos. La razón de este umbral es que, para los mapas binarios generados por IDRISI, al pasar a formato GEOTIFF/TIFF se obtiene una matriz unidimensional con elementos de tipo entero de 8 bits sin signo en la que únicamente hay 0 y 1; por lo que aplicándole la función para binarizarla se reduce 8 veces el tamaño que ocupa en memoria el mapa.

CAPÍTULO 5: IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO PARA EL CÁLCULO DE RUTAS.



5.1. Introducción a la planificación de rutas.

La planificación de rutas, o generación de rutas, consiste en encontrar un camino seguro a través del cual un vehículo puede llegar desde una posición inicial hasta una posición final, pasando por una serie de puntos intermedios, que deben cumplir todos los requisitos impuestos, así como optimizar una serie de parámetros.

La definición general de planificación de rutas denomina como seguro a todo aquel camino continuo y libre de obstáculos, de forma que la posición del vehículo que debe seguir la ruta debe ser en todo momento una función continua.

El sistema de generación de rutas debe crear una secuencia ordenada de posiciones seguras y únicas que debe tomar un vehículo guiado por la ruta generada.

5.1.1. Planificación de rutas en dispositivos GPS.

Por lo general, este tipo de problemas se suelen resolver mediante el empleo de una base de datos con información acerca del territorio en el que se debe planear la ruta centrada en una serie de nodos, y una utilización de algún algoritmo de búsqueda para ir expandiendo nodos hasta encontrar una solución satisfactoria, que habitualmente seguirá un cierto criterio de optimización (ya sea distancia, tiempo, consumo de combustible, etc.).

Generalmente, cuanto mayor es el tamaño de un nodo de la base de datos, es decir, cuanta más información contiene sobre cada uno de los nodos, existe un menor número de nodos para un mismo mapa, lo que implica que el número de nodos expandidos hasta llegar al objetivo se reduce, es decir, hay un aumento de velocidad a costa de aumentar muchísimo la complejidad espacial de las bases de datos que se consultan.

Los dispositivos GPS comerciales suelen disponer de unas bases de datos muy complejas, con un sistema de niveles o capas de importancia según el tipo de vía que contengan, y nodos basados en los cruces entre niveles, para poder calcular las rutas rápidamente, ya que son dispositivos cuyo espacio de almacenamiento puede estar exclusivamente dedicado al almacenamiento de mapas. No obstante, los diferentes

sistemas de ordenación de mapas y algoritmos empleados por algunas de los fabricantes de navegadores GPS (Garmin, Globalsat, SiRF, Navman, etc.) se mantienen en el más absoluto secreto comercial, por lo que es difícil saber con seguridad los algoritmos que emplean.

Sin embargo, lo que sí está claro es que para desarrollar el algoritmo de planificación de rutas de la aplicación del presente proyecto no se dispone de las complejas bases de datos con las que trabajan los fabricantes de navegadores ni de una gran capacidad de almacenamiento para estas bases, por lo que el algoritmo a desarrollar deberá partir de los mapas de carreteras para calcular la ruta, aun a costa de sacrificar velocidad de cálculo.

5.1.2. Planificación de rutas en el presente proyecto.

Durante el presente proyecto, dentro del territorio total de Castilla y León, se considerarán como posiciones válidas o seguras todas aquellas posiciones que pertenezcan a la red de carreteras de la comunidad, y se seguirán dos criterios diferentes para determinar si una ruta es óptima o no, a selección del usuario, el criterio de mínima distancia y el de mínimo tiempo empleado, en base a una velocidad media asignada a cada tipo de vía.

Hay que tener en cuenta que para calcular las rutas del presente proyecto, únicamente se dispone como base de datos del mapa de carreteras de la comunidad. Así pues, al contrario que en el caso de la base de datos empleada en sistemas comerciales, la del presente proyecto es una base con muchos nodos pero con muy poca complejidad espacial, tan solo un bit de memoria por cada posición posible dentro del mapa de Castilla y León, lo que supondrá un mayor tiempo de cálculo por la mayor profundidad a la que se encuentran los nodos.

Además, dado que las rutas no van a servir para la guía de un vehículo real controlado por un operador humano, sino que deben servir para guiar el vehículo simulado de manera autónoma por el mapa, y que siempre debe estar situado sobre una carretera para poder calcular el riesgo que suponen, las exigencias de precisión para las rutas de este proyecto son mayores que en los GPS comerciales, lo que también supondrá una exigencia extra en el tiempo de cálculo.

5.2. Formulación del problema.

El problema del cálculo de rutas es relativamente sencillo de plantear, ya que inicialmente tiene los siguientes elementos:

- Posición o estado inicial, de la que partirá el vehículo.
- Posición o estado final, que es la posición objetivo del problema.
- Posiciones seguras, o estados válidos, que son cada una de las posiciones del mapa de Castilla y León que corresponde a una carretera.
- Operadores a aplicar en cada nodo, son cada una de las acciones que podemos realizar en un nodo para buscar sus hijos a la hora de expandirlo.
- Solución del problema, es la sucesión de posiciones seguras que conduce de la posición inicial a la posición final. Si además esta solución cumple que es la de menor coste total asociado, según el criterio adoptado en el cálculo de la ruta, hablaremos de que la solución es óptima.

Una vez ya tenemos formulado el problema, se va a construir una estructura de árbol de búsqueda, que se van a ir expandiendo siguiendo un orden determinado, generando los nodos hijos, que serán aquellas posiciones directamente alcanzables con un movimiento desde el nodo padre aplicando uno de los operadores.

5.3. Consideraciones generales previas al problema.

Una vez hemos formulado el problema, debemos acometer ahora dos asuntos fundamentales. Por un lado, deberemos analizar de qué manera distinguiremos las posiciones válidas de las no válidas, y por otro deberemos analizar como almacenar los datos de las rutas.

5.3.1. Información de partida.

Para resolver el problema, emplearemos el mapa de nombre 'Carr_homog.tif', obtenido exportando a formato TIFF/GEOTIFF el mapa ráster original de nombre 'Carr_homog.rst', utilizado en el proyecto de Á. Arranz Zazo (2013). Este es un mapa binario, en el que los píxeles que corresponden a carretera se marcan con un 1, mientras que el resto se marcan con un 0. El mapa binario se obtiene, en última instancia, empleando las funciones de transformación de formatos de imágenes descritas en el capítulo anterior.

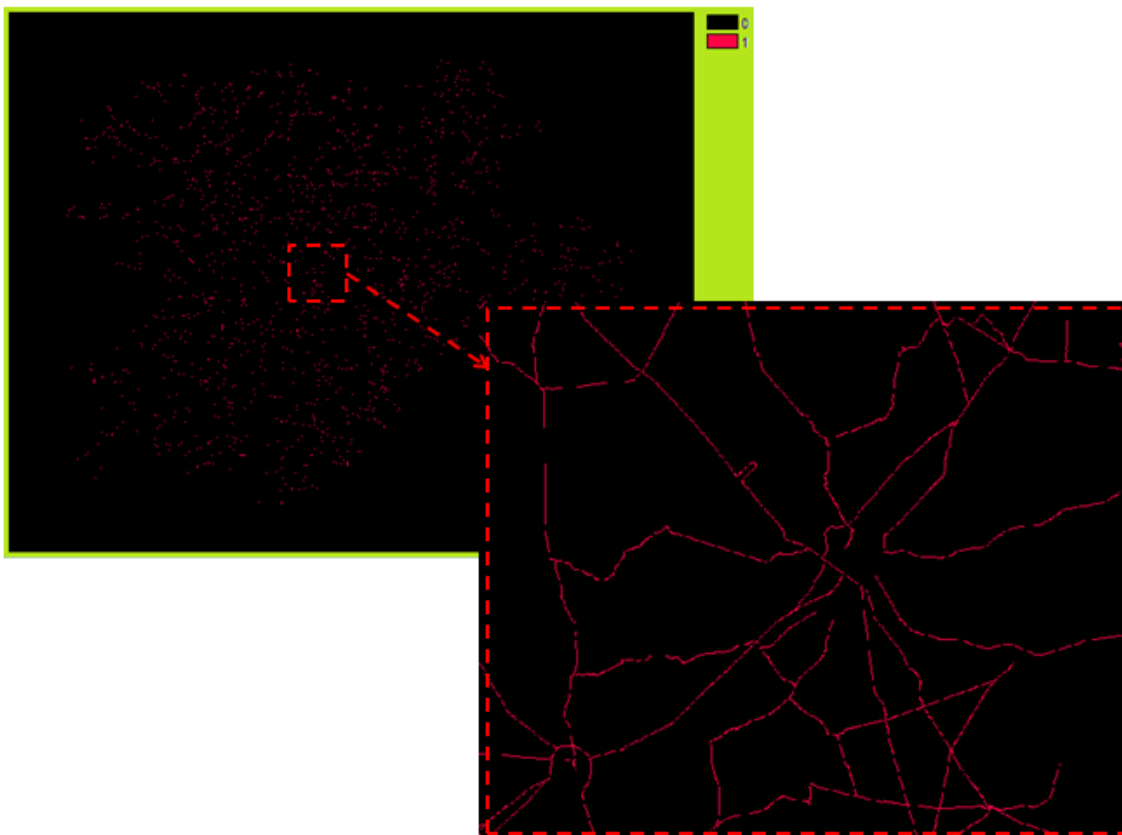


Figura 30 - Mapa binario empleado para el cálculo de rutas

En la figura 30, aparece el mapa binario de tipo ráster empleado para el algoritmo de cálculo de rutas, con una ampliación centrada en la ciudad de Valladolid.

De esta forma, resolvemos el primer problema, puesto que, dada una posición del mapa, son conocidas cuáles de las posiciones alcanzables aplicando un operador al

nodo son válidas, sin más que realizar una consulta en la matriz del mapa. En pseudocódigo, para comprobar si una posición es válida bastaría con:

```
si (matriz_mapa_carreteras(fila,columna)==1)
    posicion_valida=1;
si no
    posición_valida=0;
fin
```

5.3.2. Sistema de coordenadas para las rutas.

Para la resolución del segundo problema, debemos analizar en primer lugar qué son las rutas, y qué datos necesitamos para definir inequívocamente una ruta. Como respuesta a la primera cuestión, una ruta es una sucesión de posiciones consecutivas que llevan desde una posición inicial hasta una posición final. Esta definición de las rutas conduce directamente a la respuesta a la segunda cuestión: para la definición de una ruta, lo único necesario serán las coordenadas de cada una de las posiciones sucesivas en forma de vector, así como la profundidad (el número de posiciones de que tiene la ruta) para detectar el momento en el que un vehículo ha alcanzado el final de su ruta.

Aquí se plantea el problema de qué sistema de coordenadas utilizar para definir las posiciones sucesivas, y se plantean dos posibles soluciones: Emplear las coordenadas x e y en metros de la proyección UTM o utilizar como sistema de coordenadas las filas y columnas de la matriz.

Cada una de estas posibilidades tiene sus ventajas e inconvenientes, que se analizarán a continuación, pero, atendiendo a la información del mapa ráster, la equivalencia entre un sistema y otro corresponde a dos sencillas ecuaciones. Conocidas la X_{min} y X_{max} ; y la Y_{min} y la Y_{max} que aparecen en la figura 27, las ecuaciones para obtener la columna en la que nos encontramos son:

$$columna = floor\left(\frac{X_{actual} - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} * num_columnas\right) + 1 \quad (5.1)$$

$$fila = num_filas - floor\left(\frac{Y_{actual} - Y_{min}}{Y_{max} - Y_{min}} * num_filas\right) \quad (5.2)$$

En las ecuaciones 5.1 y 5.2, el comando floor devuelve el valor de la parte entera de un número, es decir trunca la parte decimal. Con esta simple ecuación podemos obtener los índices de la matriz del mapa que corresponden a cualquier posición real en coordenadas x e y . Nótese que el sentido en que se incrementan las x es la misma que la de las columnas, mientras que para el caso de las y y las filas este sentido es opuesto.

5.3.2.1. Sistema de coordenadas UTM para rutas.

Emplear las coordenadas UTM en metros para el almacenamiento de las rutas tiene como ventaja que, a la hora de desarrollar el algoritmo de tiempo real que siga dicha ruta, el cálculo de la distancia recorrida en cada ciclo de actualización quedaría más sencillo, al estar la distancia entre dos posiciones sucesivas de la ruta directamente en metros.

Como contrapunto a esta ventaja, aparecen otros inconvenientes como el de que aparece un abuso excesivo de las ecuaciones 5.1 y 5.2 en el programa, lo que es preocupante sobre todo cuando hablamos de operaciones en tiempo real. Ya que las rutas se calculan a partir de una matriz de mapa, es decir, en filas y columnas, habría que aplicar ya una vez las ecuaciones para cada posición que se almacene. Además, en el algoritmo en tiempo real, y esto es lo preocupante, sería necesario llamar a las ecuaciones para representar las posiciones de cada uno de los vehículos en el mapa, con su consiguiente carga computacional.

Por ello, se ha descartado esta opción, ya lo que debe primar en la aplicación es la velocidad de procesamiento para hacer que la aplicación de tiempo real sea lo suficientemente ágil. Si la aplicación se empleara sobre un sistema real, tendríamos la ventaja de que se eliminaría la carga computacional del simulador de vehículos en tiempo real, por lo que podríamos compensar ese descenso de carga introduciendo las ecuaciones 5.1 y 5.2 para convertir las coordenadas UTM en filas y columnas a la hora de representar en un mapa.

5.3.2.2. Sistema de coordenadas de filas y columnas para rutas.

El hecho de emplear el sistema de coordenadas de columnas y filas supone la ventaja de que se unifican formatos entre la representación de mapas y el cálculo y seguimiento de rutas, lo que implica:

- Menor carga computacional.
- Menor espacio de memoria al no tener que almacenar coordenadas en ambos sistemas (UTM y filas/columnas).
- Mayor velocidad de procesamiento en tiempo real.
- Se eliminan los posibles errores de redondeo al eliminar ecuaciones de transformación.

Los inconvenientes que presenta este sistema son dos principalmente. El primero es el hecho de que el algoritmo de seguimiento de rutas se hace más complejo, al tener que intervenir constantemente el factor de escala del ráster para pasar de filas/columnas a metros, pudiendo así calcular que distancia se recorre en un determinado lapso de tiempo.

El segundo inconveniente es una cuestión más bien estética, ya que en la aplicación no aparecen nunca directamente las coordenadas UTM, las posiciones reales sobre el territorio de los vehículos, por lo que a ojos del usuario puede resultar un nivel de abstracción excesivo. Además, la implementación de esta opción exige que, a la hora de llevar a la práctica real esta aplicación, haya que introducir las ecuaciones como modificación al programa para transformar las coordenadas UTM en filas y columnas.

No obstante, dado que para la presente aplicación lo que se va a tratar de primar es la velocidad de procesamiento, éste es el sistema de coordenadas seleccionado para representar la información de las posiciones de la ruta, por lo que a partir de este momento en el presente proyecto siempre se utilizará las filas y columnas como sistema de referencia.

5.3.3. Operadores válidos en la expansión de nodos.

Merece la pena detenerse a analizar cuáles son los operadores válidos para, a partir de una posición, generar nuevas posiciones. Es importante no sólo conocer cuáles son, sino saber también el coste que suponen, así como la forma en la que se implementan en el código.

Existen un total de 8 operadores que podemos aplicar en cada posición para buscar posiciones seguras a partir de la posición actual, y se muestran en la figura 31.

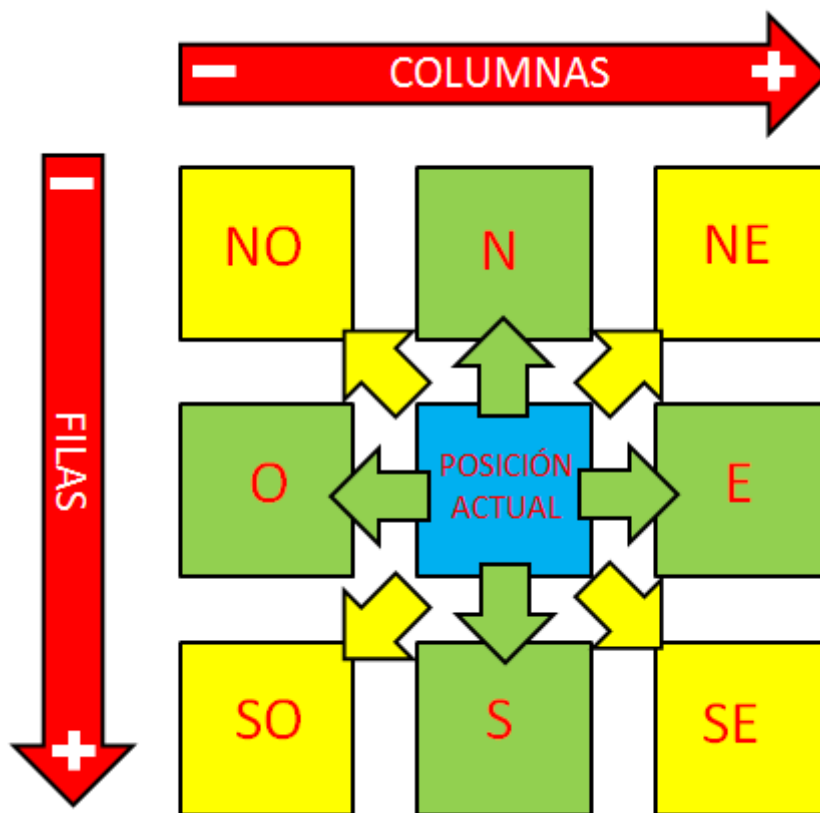


Figura 31 - Operadores posibles en la expansión de nodos

Observamos que la aplicación de cuatro de ellos, los marcados con color verde (Norte, Este, Sur y Oeste), suponen incrementar o decrementar en 1 unidad únicamente las filas o las columnas. Por lo tanto, el coste que tienen será proporcional a la distancia del lado de cada píxel, en el caso del presente proyecto de unos 80 metros. Observamos que, a partir de la posición actual, decrementar la fila supone desplazarse al norte, incrementar la columna supone desplazarse al oeste, incrementar la fila supone desplazarse al sur y decrementar la columna supone desplazarse al oeste.

Por otra parte, los otros cuatro operadores válidos, marcados con el color amarillo, son los resultantes de aplicar un incremento o decremento en las filas y otro simultáneamente en las columnas. Esto provoca que el coste sea proporcional a la diagonal de cada píxel, es decir, de aproximadamente $\sqrt{2} * 80$ metros. En concreto, estos operadores conducen desde la posición actual al noroeste (decrementar fila y columna), al noreste (decrementar fila e incrementar columna), al sudeste (incrementar fila y columna) y al suroeste (incrementar fila y decrementar columna).

No obstante, a la hora de realizar la expansión de los nodos, hay que tener en cuenta que pese a que son ocho en total los operadores a aplicar, sólo van a generar hijos en cada caso los que conduzcan a una posición correspondiente a carretera (un 1 en el mapa binario), desechándose en cada caso todos aquellos operadores que conduzcan a salirse de las carreteras.

El bucle para aplicar los operadores se muestra a continuación:

```
for k= 1:-1:-1
    for j= 1:-1:-1
        if(j~=k || k~=0)
            if(matriz_mapa(fila+j,columna+k)==1)
                %Operador válido, genera hijo
            end
        end
    end
end
```

Observamos cómo se utilizan los índices j y k , que toman los valores -1, 0 y 1, para completar todos los operadores. Se comprueba en la primera condición que j y k no valgan 0 ambos, lo que supondría aplicar un operador nulo que generaría un hijo en la misma posición que el padre, mientras que en la segunda condición se comprueba que la posición generada por el operador corresponda a un 1 en el mapa de carreteras. Si es así, el hijo se genera, y si no se desecha.

5.4. Algoritmos de búsqueda.

5.4.1. Introducción a la resolución de problemas mediante búsqueda.

La planificación de rutas en el presente problema se va a plantear como un problema de un solo estado, que por definición son todos aquellos problemas en los que el agente que resuelve el problema, en nuestro caso el algoritmo, conoce tanto sus acciones como el estado actual del problema, ya que conoce tanto la posición en la que se encuentra en un determinado momento como el operador que aplica, así como la nueva posición que resultará de aplicar el operador. Cuando esto se cumple, se habla de un entorno determinista y accesible.

Este tipo de problemas son aptos para su resolución mediante algoritmos de búsqueda. A partir de la formulación del problema expuesta en el apartado 5.2, el agente deberá ir recorriendo todo el espacio de estados, que son en el presente proyecto todas las posiciones válidas del mapa, hasta encontrar la posición objetivo.

Así, si el estado actual no es el objetivo, éste se expande, aplicando todos los operadores posibles, generando sucesores, y se considera pasa a otro estado como estado actual, repitiendo el proceso una y otra vez hasta dar con el objetivo.

Este proceso de construcción del árbol de búsqueda se puede observar atendiendo al diagrama de flujo de la figura 32, que es común para todas las estrategias de búsqueda.

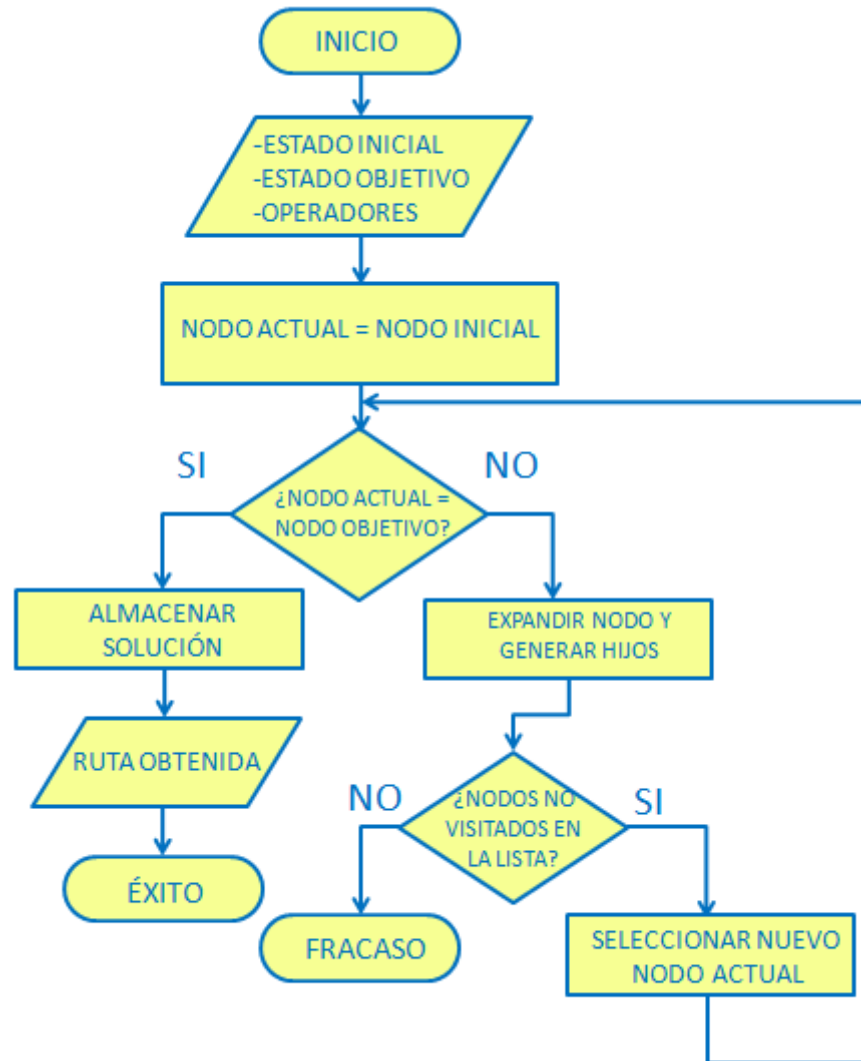


Figura 32 - Diagrama de flujo de un algoritmo de búsqueda genérico

Si observamos el diagrama, podemos observar que existe un bucle desde el nodo inicial hasta que alcanzamos una solución, ya sea de éxito o fracaso. Como es obvio, el número de pasadas que se dé a este bucle tendrá mucho peso en el tiempo de ejecución del algoritmo. Así, la clave de los distintos tipos de búsqueda reside en la selección del siguiente nodo a expandir, o la selección del nuevo nodo actual en el diagrama.

En función de esta selección, se determinará cuantas pasadas al bucle dará el algoritmo, el número de nodos a almacenar en memoria, si la solución es óptima o no... Así, a la hora de hablar de los tipos de búsqueda viables para la generación de rutas, se

van a estudiar en realidad el criterio o criterios que se emplean en la selección del siguiente nodo a expandir.

5.4.2. Tipos de algoritmos de búsqueda.

Por lo general, hablamos de dos tipos de búsquedas:

- **Búsquedas ciegas**, o búsquedas no informadas, en las que únicamente se emplea la información aportada por la definición del problema. En el caso del presente proyecto, esta información es el estado inicial, estado objetivo, los operadores válidos y el mapa binario que contiene el espacio de estados.
- **Búsquedas heurísticas**, o búsquedas informadas, que no solo emplean la información de la definición del problema sino que también utilizan información acerca del coste entre el estado actual y el objetivo.

5.4.3. Criterios de bondad de los algoritmos.

Por lo general, los diferentes algoritmos se deben valorar en función de los parámetros siguientes:

1. **Complejidad**: Son estrategias completas todas aquellas que, en el caso de que exista una solución, garantizan encontrarla. Sólo son estrategias completas aquellas que recorren todo el espacio de estados.
2. **Complejidad espacial**: Es una medida del número de nodos que deben almacenarse en memoria.
3. **Complejidad temporal**: Es una medida del número de nodos que deben expandirse.
4. **Optimalidad**: Son algoritmos óptimos todos aquellos que garantizan encontrar la solución de menor coste en el caso de que existan varias.

5.4.4. Criterios de coste de las rutas.

A la hora de realizar la expansión de nodos, un criterio importante en muchos algoritmos es la función de coste de cada nodo $g(X)$. Debido al propio objetivo del proyecto, se han seleccionado dos criterios diferentes para determinar el coste de cada uno de los nodos:

- **Distancia recorrida**: El coste de un nodo es la distancia que lleva recorrida desde el nodo inicial, independientemente del tipo de vial por el que la haya recorrido.
- **Tiempo empleado**: El coste de un nodo es el tiempo que emplearía un vehículo en llegar desde el nodo inicial, en buenas condiciones de tiempo y tráfico, asignándole una velocidad media para el trayecto para cada tipo de carreteras, por lo que en este caso el coste sí depende del vial por el que haya transcurrido la ruta hasta el nodo actual.

El coste es importante porque determina el criterio de optimalidad utilizado, ya que como se dijo en el apartado anterior, la solución óptima es la de menor coste.

5.4.5. Posibilidades de búsqueda para la planificación de rutas.

Se presenta en este apartado un análisis de diferentes posibilidades para el cálculo de las rutas para el presente proyecto, cada uno con sus ventajas e inconvenientes.

Las diferentes estrategias presentadas se diferencian entre sí en el criterio establecido para elegir cuál es el siguiente nodo que se expande.

5.4.5.1. Búsqueda en primero en anchura.

La búsqueda primero en anchura es un tipo de búsqueda ciega que expande primero los nodos no expandidos menos profundos. Así, cada vez que expande un nodo, añade los hijos en una lista FIFO, de forma que los primeros nodos que salen son los de menor profundidad.

En la figura 33 podemos observar de qué manera se construye el árbol de búsqueda para este tipo de algoritmo.

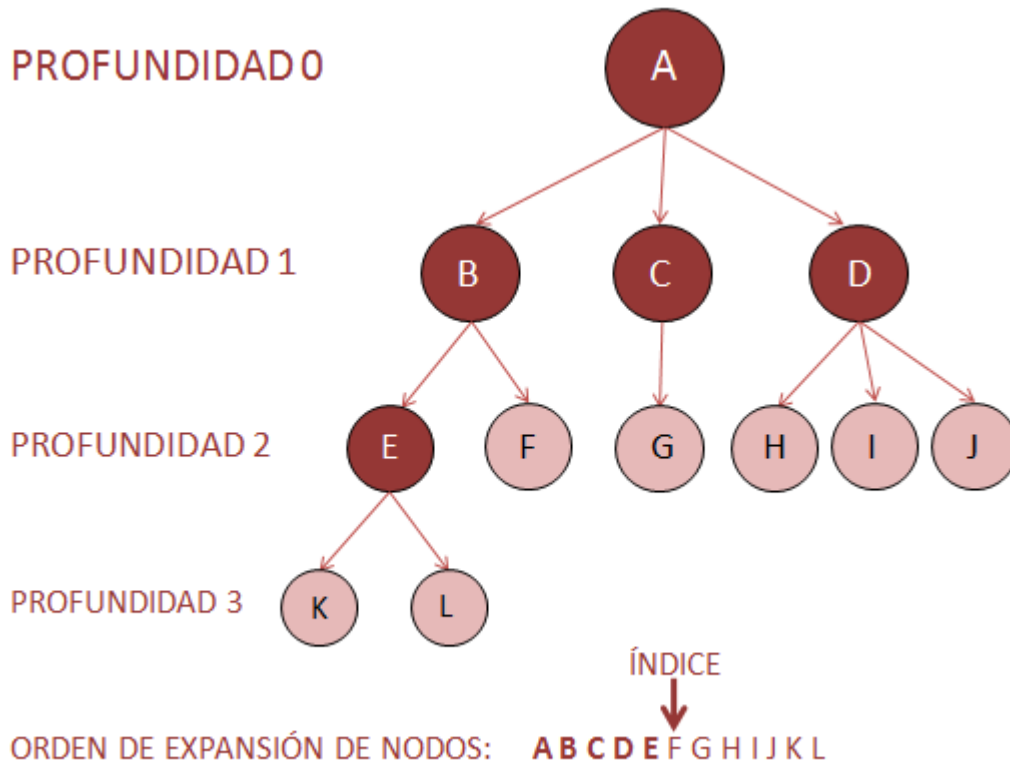


Figura 33 - Construcción del árbol de búsqueda primero en anchura

La búsqueda primero en anchura sí es completa, puesto que tarde o temprano va a recorrer todo el árbol y va a encontrar la solución, si es que existe.

En lo que se refiere a complejidad temporal, cada vez que pasa a una nueva profundidad significa que ya ha expandido todos los nodos de la profundidad anterior. Por lo tanto, si el factor de ramificación medio (número de hijos medios por nodo) es b , y la profundidad a la que se encuentra la solución es d , el número de nodos expandidos puede modelarse bastante bien con la ecuación 5.3:

$$\text{Numero_nodos_expandidos} \simeq 1 + b + b^2 + b^3 + \dots + b^d \quad (5.3)$$

Puesto que el tiempo empleado es proporcional al número de nodos que se expanden, si la profundidad de la solución d se hace muy grande, el término b^d se hace enorme, demasiado para conseguir un algoritmo ágil.

En cuanto a complejidad espacial, puesto que hay que ir almacenando todo el árbol de nodos para recuperar el camino, el número de nodos guardados en memoria será aproximadamente igual al número de nodos expandidos. Por tanto, de nuevo a profundidades muy grandes, el espacio de memoria ocupado es hace inabarcable con este algoritmo.

Además, este método tiene el defecto de no ser óptima, a no ser que el coste sea el mismo para todos los operadores. Puesto que este es el caso del presente proyecto, en el que hay cuatro operadores con un coste y otros cuatro con otro, este algoritmo no hallaría la ruta óptima por lo general, por lo que no cumple con los requisitos exigidos por la planificación de rutas.

5.4.5.2. Búsqueda de coste uniforme.

El algoritmo de búsqueda de coste uniforme es una modificación de la búsqueda primero en anchura para que sea óptima. Al igual que la anterior, también es una búsqueda ciega, y la diferencia reside en que en este caso los nodos que se expanden primero son los de menor coste de camino acumulado no expandidos, en lugar de los de menor profundidad no expandidos.

Por ello, la lista de nodos ya no es estática, como en el caso anterior, en el que los nodos hijos se insertaban al final de una lista FIFO, sino que en este caso se van insertando por orden de coste acumulado creciente, de forma que se expandan antes los de menor coste.

El algoritmo de coste uniforme sigue siendo completo, al igual que en el caso de la búsqueda primero en anchura, puesto que se recorre el árbol completo, y si existe una solución se va a encontrar tarde o temprano.

La figura 34 muestra de cómo se construye el árbol de nodos de un algoritmo de búsqueda de coste uniforme.

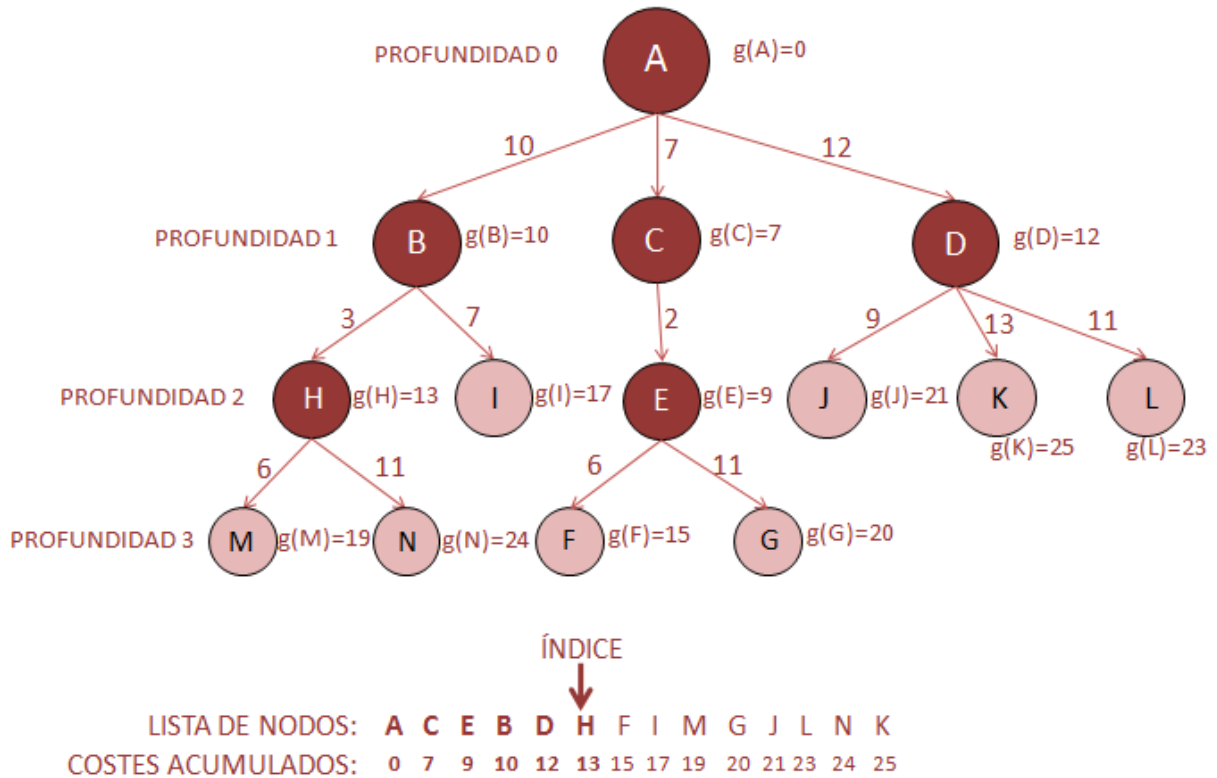


Figura 34 - Construcción del árbol de búsqueda de coste uniforme

En el árbol observamos que cada arco conlleva asociado el coste del operador que genera el hijo, de forma que en cada nodo se acumula el coste siguiendo la ecuación 5.4:

$$g(\text{hijo}) = g(\text{padre}) + \text{coste}(\text{padre}, \text{hijo}) \quad (5.4)$$

Este algoritmo tiene la ventaja sobre el anterior de que es óptima, siempre y cuando se cumpla que:

$$g(\text{hijo}) \geq g(\text{padre}) \quad (5.5)$$

Para que se cumpla la expresión 5.5, la función coste entre el padre e hijo, asociada a los operadores a aplicar, debe ser siempre mayor o igual que cero. Puesto que en el problema de la planificación de rutas no pueden existir distancias ni tiempos negativos, este algoritmo será óptimo para el cálculo de rutas.

Analizando en lo que se refiere a complejidad temporal, se expandirán todos aquellos nodos cuya función de coste sea menor o igual que el de la solución óptima:

$$g(n) \geq g \text{ de la solución óptima} \quad (5.6)$$

De la misma manera, han de almacenarse los hijos de todos los nodos que se hayan expandido, puesto que no sabemos con exactitud en qué rama del árbol va a estar la solución.

Tal y como hemos visto, este algoritmo si es apto para el cálculo y la planificación de rutas, por sus propiedades de completitud y optimalidad. Si aplicáramos este tipo de búsqueda al cálculo de rutas, y analizáramos que nodos se expanden a cada momento, veríamos como se van expandiendo nodos de manera circular en torno a la posición inicial, aumentando poco a poco el radio del círculo de nodos determinado por el coste acumulado.

No obstante, si bien este algoritmo es válido para el cálculo de rutas, no es la manera más eficiente de hacerlo, puesto que, deben expandirse todos los nodos que estén en la circunferencia de radio igual al coste del nodo solución.

5.4.5.3. Búsqueda primero en profundidad.

El algoritmo de búsqueda primero en profundidad es una búsqueda ciega que expandirá primero los nodos más profundos. Cuando expande un nodo, almacena los hijos al final de una lista LIFO, en la que los primeros nodos que salen son los últimos en entrar. De esta forma, se expanden primero los nodos más profundos.

Para evitar que el algoritmo caiga en bucles infinitos, hay que limitar el espacio de búsqueda, que debe ser finito, por lo que se deben marcar los estados repetidos para no volverlos a almacenar en la lista de nodos. Además, los nodos expandidos se deben marcar como visitados, para evitar volverlos a expandir indefinidamente al avanzar el algoritmo.

En la figura 35 aparece el árbol de nodos construido para un algoritmo en de búsqueda primero en profundidad.

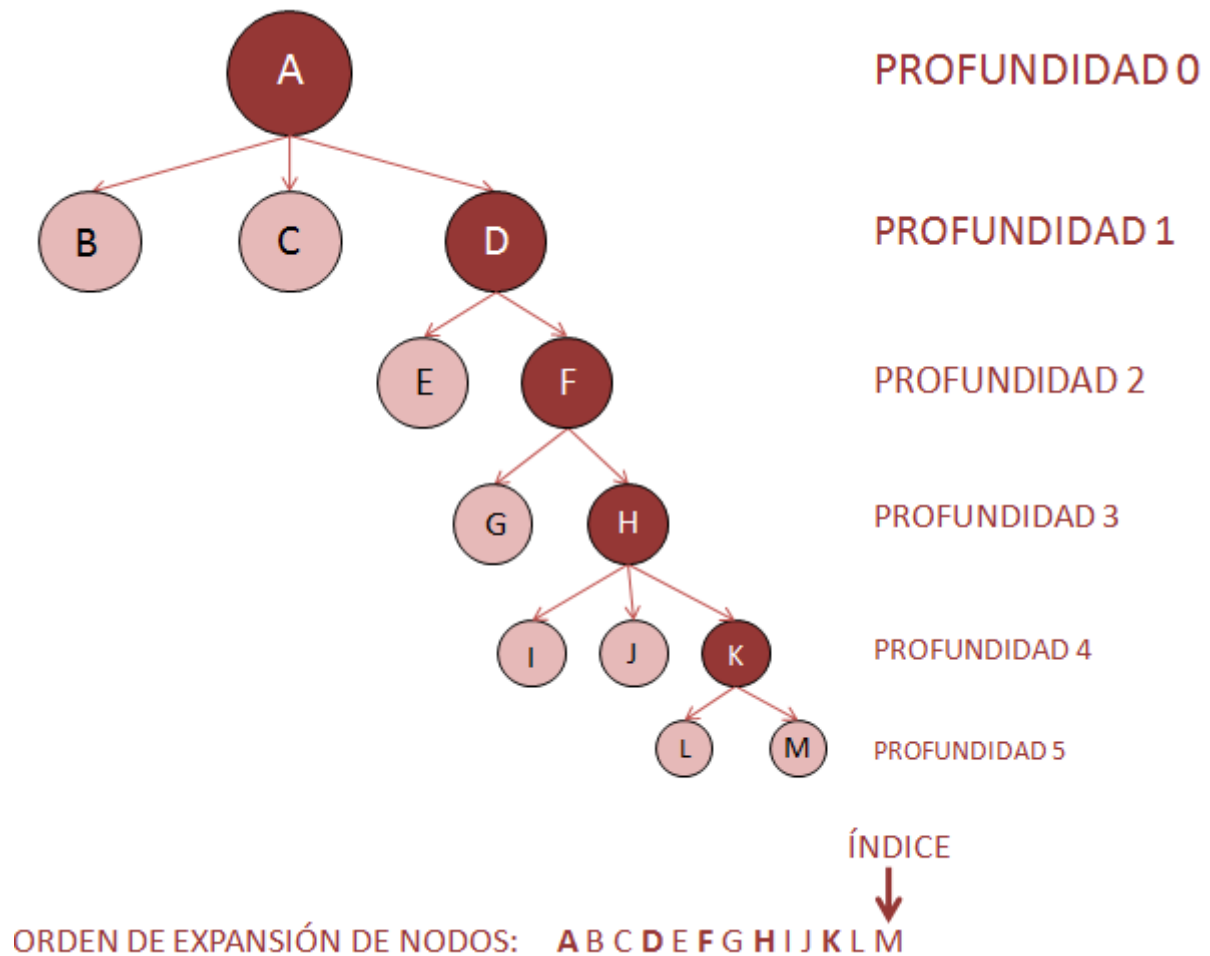


Figura 35 - Construcción del árbol de búsqueda primero en profundidad

El índice siempre se colocará al final de la lista de nodos. Cuando el nodo a expandir no tenga hijos no visitados para expandir, el nodo se borra de la lista y el índice avanza una posición hacia el principio de la lista. Siempre que se evite caer en bucles infinitos, eliminando los nodos repetidos de la expansión de nodos, este algoritmo será completo, ya que recorre todo el árbol de nodos.

En cuanto al tiempo, será proporcional a b^m , donde m es la profundidad máxima del árbol de estados. No obstante, dependiendo de la posición del nodo objetivo dentro del árbol de nodos, el tiempo de búsqueda presenta una gran variabilidad. No es recomendable utilizar este algoritmo para árboles de búsqueda en los que la profundidad máxima del árbol es mucho mayor que la de la solución.

La gran ventaja que tiene este algoritmo es que es lineal en lo que respecta a la complejidad espacial, ya que solo se almacena una rama determinada del árbol. Esto provoca que el máximo número de nodos que se almacenan en memoria sea proporcional al producto del factor de ramificación medio del árbol, b , por la profundidad máxima del árbol, m .

Sin embargo, este algoritmo no sirve para la planificación de rutas, ya que calcula una solución, pero no garantiza calcular la ruta óptima. Esto sucede porque el algoritmo se queda con la primera vez que encuentra el nodo objetivo, que no suele ser para nada óptima.

5.4.5.4. *Búsqueda voraz.*

Las tres estrategias de búsqueda que se han explicado hasta este punto eran búsquedas ciegas, que solo utilizaban la información del enunciado del problema, y resolvían los problemas mediante generación sistemática de estados. Así, consiguen adaptarse muy bien a todo tipo de problemas, pero presentan la desventaja de ser realmente ineficaces.

Para mejorar estas estrategias, se van a utilizar las llamadas estrategias de búsqueda informada o heurística, que emplean conocimiento específico del problema para mejorar la eficiencia de la resolución del problema.

Este tipo de búsquedas añaden a los algoritmos de búsqueda general el conocimiento específico del problema para minimizar la complejidad espacial y temporal del algoritmo. Así, a la hora de expandir un nodo, se empleará una función de evaluación o heurística aplicada a cada hijo, de forma que se inserten en la lista por orden de puntuación, es decir, el siguiente nodo a expandir será el nodo no expandido más deseable.

Para una búsqueda voraz, denominaremos $h(n)$ a la función heurística que estima el coste desde el nodo actual hasta el objetivo. Para el caso de la planificación de rutas, un buen estimador del coste es calcular la distancia en línea recta desde el nodo actual hasta el objetivo, para el caso de que la función de coste sea la distancia, o

bien la distancia en línea recta por una determinada velocidad esperada, en el caso de que la función de coste sea el tiempo.

El único requisito para la función heurística es que obligatoriamente $h(n) = 0$ si n es el nodo objetivo.

La búsqueda voraz consiste en expandir primero el nodo que más se acerque al objetivo, o que suponga un mayor “bocado” en el coste que resta hasta el objetivo. La estructura del árbol es básicamente una búsqueda en profundidad, con la diferencia de que ahora los nodos hijos ya no se insertan en al final de la lista LIFO, sino que se insertan por orden decreciente del coste estimado $h(n)$, tal y como podemos observar en la figura 36.

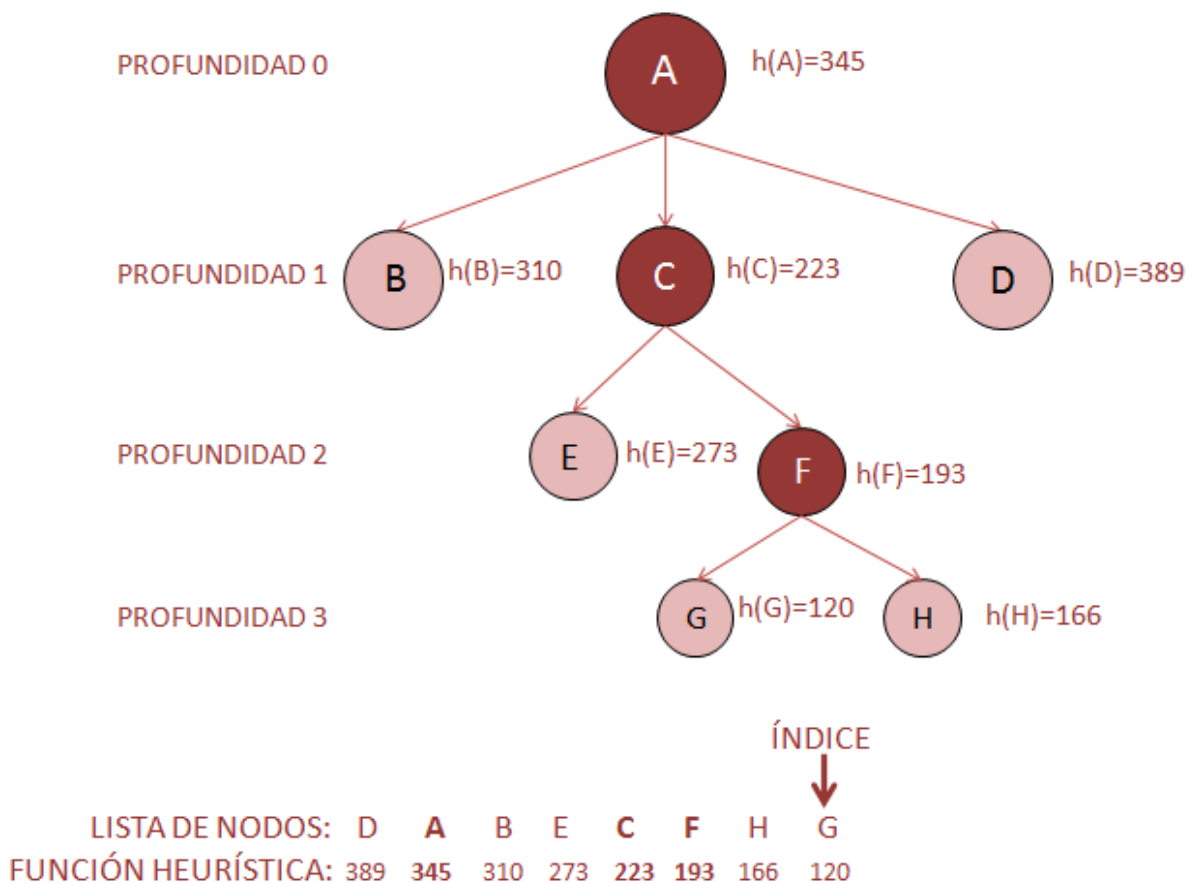


Figura 36 - Construcción del árbol para búsqueda voraz

Vemos como el índice, al igual que para el caso de la búsqueda en profundidad, se sitúa siempre sobre el último elemento de la lista. Si detecta que el nodo a expandir ya está visitado, el nodo se elimina y el índice retrocede hacia el inicio de la lista.

A pesar de que, teóricamente, deberían recorrerse todos los nodos y almacenarse el árbol completo, por lo que el número de nodos a expandir sería proporcional a b^m , con b factor de ramificación del árbol y m profundidad máxima del árbol, el empleo del heurístico puede reducir sustancialmente las complejidades espacial y temporal, al expandirse primero los nodos que mayores posibilidades tienen de conducir a la solución. No obstante, no debemos perder de vista que el heurístico es solamente una estimación del coste, por lo que en ocasiones esta reducción de complejidad no es tal.

La búsqueda voraz es además completa, siempre y cuando no se almacenen nodos repetidos en la lista de nodos, para evitar caer en bucles infinitos. El gran problema de este algoritmo es que no es óptimo, ya que el algoritmo arrastra las decisiones de los primeros nodos durante todo el árbol, y es posible que alcance el objetivo sin ser la solución de menor coste.

5.4.5.5. Búsqueda A*.

Dado que la búsqueda voraz no es óptima, deberemos buscar otro método que, empleando la función heurística para reducir la complejidad del problema, sí sea válida para el problema de la planificación de rutas.

La solución es la búsqueda A*, pronunciada A estrella o A asterisco, que define una nueva función de evaluación, $f(n)$, que responde a la ecuación 5.7:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (5.7)$$

Así, la idea es combinar la búsqueda voraz, que minimiza el coste al objetivo $h(n)$, con la búsqueda de coste uniforme, que minimiza el coste acumulado $g(n)$, para obtener un algoritmo heurístico capaz de calcular rutas óptimas.

Para que el algoritmo sea óptimo, el heurístico debe ser admisible, lo que quiere decir que la estimación del coste del nodo al objetivo no debe superar el coste real, es decir, debe ser un subestimador. Esto es así para conseguir que la función de evaluación $f(n)$ no decrezca en todo el camino desde el nodo inicial, lo que significa que, al expandir primeramente los nodos de menor valor de $f(n)$, conseguiremos obtener la ruta óptima.

La construcción del árbol de búsqueda es en este caso muy similar a la del caso de la búsqueda de coste uniforme, con la diferencia de que ahora, en lugar de ordenar los nodos en la lista según el valor de $g(n)$, se utilizará el valor de $f(n)$.

En la figura 37 se muestra la construcción del árbol para búsqueda A*.

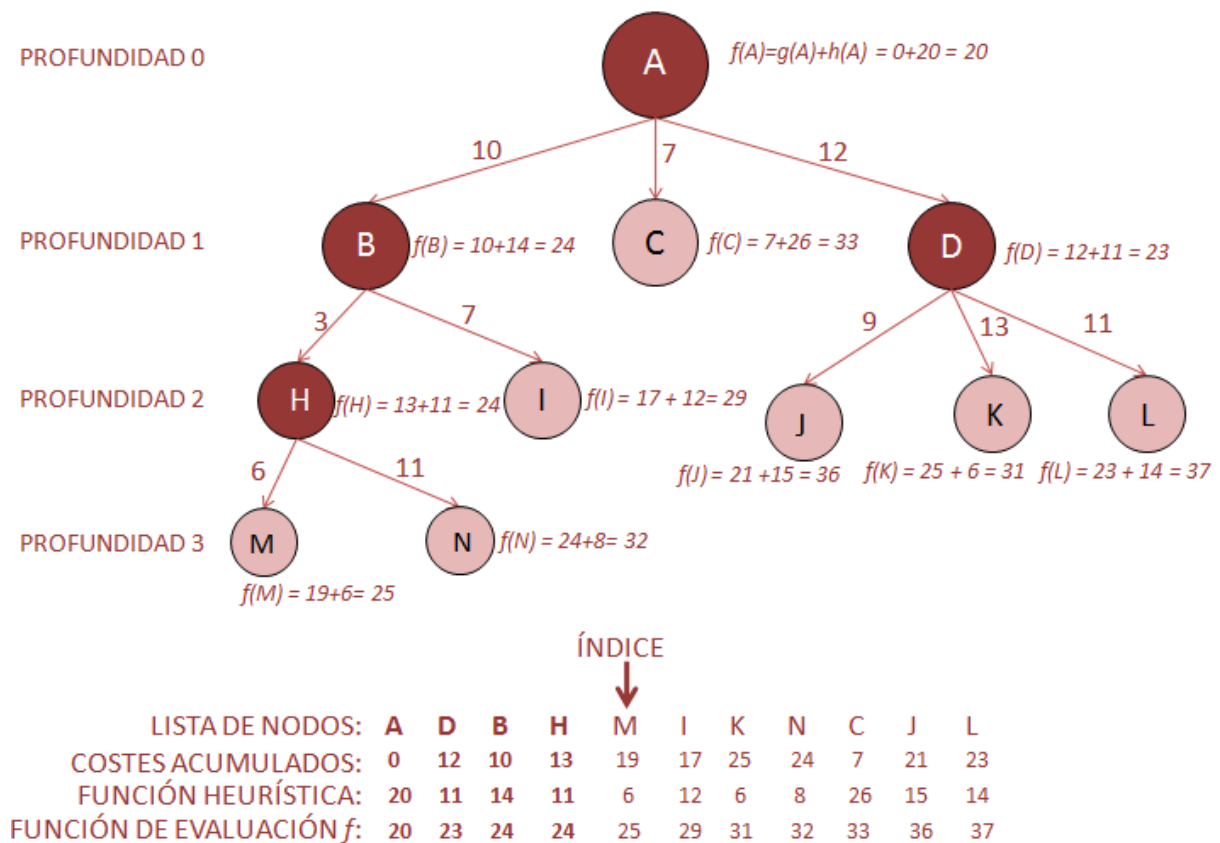


Figura 37 . Construcción del árbol para una búsqueda A*

Este algoritmo es completo para el caso del presente proyecto, puesto que el espacio de estados del problema de la planificación de rutas en el mapa de carreteras de Castilla y León es finito.

En cuanto a la complejidad temporal, se considera que aumenta exponencialmente con la longitud de la solución, pero tiene la ventaja de que, para cualquier heurístico, el algoritmo A* es el que expande un menor número de nodos. Su complejidad espacial es similar a la de la búsqueda de coste uniforme, es decir, proporcional a b^d , ya que es necesario almacenar todos los nodos.

Por último, tal y como ya hemos dicho, el algoritmo es óptimo porque no se expande la banda de coste esperado f_{i+1} hasta que no se ha terminado de expandir la banda f_i .

Dado que este algoritmo reúne todas las condiciones para ser un buen planificador de rutas, es el que se ha elegido para el presente proyecto, después de comparar las capacidades de todos los algoritmos explicados. Las grandes ventajas que ofrece este algoritmo sobre los de búsquedas ciegas es su mayor velocidad, mientras que la gran ventaja que aporta sobre el algoritmo de búsqueda voraz es el de aportar siempre soluciones óptimas, requisito indispensable para una aplicación de planificación de rutas.

5.5. Implementación del algoritmo A*.

Una vez se ha realizado el estudio sobre los diferentes métodos de búsqueda y se ha tomado la decisión de emplear el algoritmo de búsqueda A* para el planificador de rutas del presente proyecto, es necesario tomar la decisión de cómo implementarlo con la máxima eficiencia posible en MATLAB.

Durante los subapartados siguientes, se realizará un recorrido por los aspectos más notables de la programación del planificador de rutas. No obstante, para una consulta en detalle del código, todos los programas desarrollados se incluyen como en el anexo I del CD.

5.5.1. Estructura de los nodos del árbol de búsqueda.

El primer paso a la hora de implementar en el código un árbol de búsqueda es definir claramente cuál es la estructura de los nodos que lo forman.

En la tabla se muestran los campos de la estructura creada en MATLAB para la implementación del algoritmo.

	Campos	Descripción
NODO	profundidad	Nivel de profundidad al que se encuentra el nodo. El nodo padre o raíz tiene profundidad 0, y cada vez que se expande un nodo la profundidad se incrementa en 1.
	fila	Almacena la coordenada fila del mapa a la que corresponde el nodo.
	columna	Almacena la coordenada columna del mapa a la que corresponde el nodo.
	padre	Índice del nodo que generó el nodo actual durante su expansión.
	dist_recorrida	Distancia recorrida acumulada desde el nodo inicial hasta el nodo actual.
	tiempo_empleado	Tiempo empleado por un vehículo que hubiera hecho el recorrido desde el nodo inicial hasta el actual, dependiendo de las carreteras por las que haya transcurrido la ruta.
	siguiente	Índice del siguiente nodo a expandir de la lista de nodos, que será el nodo con valor de la función de evaluación inmediatamente superior.
	coste	Es el valor de f , como suma de los valores de las funciones de coste g y heurística h .

Tabla 21 - Estructura de los nodos para el árbol de búsqueda

Conviene realizar algún comentario aclaratorio sobre algunos de los campos de la estructura de nodos.

En primer lugar, es importante destacar que se almacenan en los nodos tanto distancia recorrida hasta el nodo actual como tiempo empleado para alcanzarlo, de forma que la estructura de nodos sea la misma tanto cuando se utilice el criterio de distancia mínima como el criterio de tiempo mínimo.

En el campo coste, que contiene la función de evaluación $f(n)$, que es el criterio que se sigue para ordenar los nodos en la lista de expansión, dependiendo del criterio de optimalidad empleado se utilizará como función de coste $g(n)$ el valor del campo de distancia recorrida o tiempo empleado.

Para el caso de la función heurística, $h(n)$, también dependerá del criterio de optimalidad la función utilizada. Debemos tener en cuenta que la función heurística debe ser obligatoriamente un subestimador del coste hasta el nodo objetivo, para que el algoritmo sea óptimo:

- Si se sigue el criterio de distancia mínima, la función heurística utilizada será la distancia geométrica entre el nodo actual y el nodo objetivo.
- Si se sigue el criterio de tiempo mínimo, la función heurística utilizada será la distancia geométrica entre el nodo actual y el objetivo multiplicado por la máxima velocidad que puedan alcanzar los vehículos, que en el presente proyecto coincidirá con la velocidad en autovía, inicialmente en el código de 80 km/h ,

Por otra parte, la inserción de nodos por orden de $f(n)$ no se va a realizar en un vector tradicional de MATLAB, sino que se va a realizar una estructura de lista enlazada para incrementar la velocidad del algoritmo y reducir la carga computacional, de ahí que sea necesario el campo siguiente en la estructura de nodos.

5.5.2. Inicialización de variables.

En este apartado definiremos de qué manera se inicializa el sistema antes de entrar en el bucle de expansión de nodos.

El primer paso antes de arrancar el algoritmo, es cargar un mapa binario que represente el espacio de estados válidos para el problema. Además, se carga el mapa de tipos de carreteras para determinar la velocidad de cada tramo, y se define el criterio de optimalidad a utilizar. También se definen como constantes las velocidades para cada tramo, así como el factor de escala del ráster de los mapas.

Por otra parte, para arrancar el algoritmo es imprescindible definir el valor de los campos para el nodo inicial.

	Campos	Valor
NODO RAÍZ	profundidad	0

	fila	Fila de la posición inicial.
	columna	Columna de la posición inicial
	padre	0
	dist_recorrida	0
	tiempo_empleado	0
	siguiente	0
	coste	0

Tabla 22 - Valor de los campos del nodo raíz

En la tabla 22 se pueden observar los parámetros iniciales del nodo raíz del algoritmo.

Hay que tener cuidado a la hora del trabajo con la lista de nodos si se llegara al nodo raíz, puesto que en caso de que aparezca en el código una llamada al padre del nodo, el hecho de hacer referencia a un índice cero en una matriz provoca una excepción y una salida del programa.

Además, previamente a entrar en el bucle se inicializan los elementos de la lista de nodos, que son dos, representados en la tabla 23.

	Elementos	Descripción	Valor inicial
LISTA DE NODOS	indice	Indica la posición en la lista del nodo que se va a expandir a cada momento	1
	inicio	Representa el primer elemento no visitado de menor valor de f	1

Tabla 23 - Elementos de la lista de nodos

Por último, se inicializa a cero también la variable contadora de nodos expandidos, de carácter estadístico, que sirven para determinar la bondad del algoritmo y comparar distintas rutas y criterios de optimalidad, así como la variable número de nodos, que es el número de nodos generados.

5.5.3. Bucle principal del algoritmo.

Para generar el árbol de búsqueda, se empleará un bucle que se repetirá o bien hasta que se alcance la posición objetivo (hecho representado con una variable booleana llamada exito) o bien se llegue al final de la lista (hecho que implicaría que la variable indice tomara el valor cero).

Lo primero que se hace en el bucle es comprobar si el nodo actual es el nodo objetivo, con una llamada a la siguiente función:

```
exito=prueba_meta_map(nodo(indice).fila,nodo(indice).columna,...  
...fil_obj,col_obj);
```

En caso de que no se haya alcanzado el objetivo, el nodo actual se expande para generar nuevos hijo, para lo cual se realiza la llamada a la función de expansión de nodos:

```
[hijo,num_hijos]=expandir_nodo(nodo(índice),índice,mapa,fila_max,...  
...columna_max,factor_escalas,mapa_tipo,v_autovia,v_nacional,...  
...v_comarcal,v_local);
```

Una vez se han generado todos los hijos posibles a partir de un nodo, éstos deben ser insertados en la lista de nodos. Para lo cual, el algoritmo les asignará un valor a la función de evaluación, que dependerá del parámetro de optimización:

- Si el parámetro empleado es el de distancia mínima, el coste que se le asigna al hijo será el campo `dist_recorrida` de su estructura más la distancia entre su posición y el objetivo. La implementación en el código será:

```
nuevo_coste=hijo(j).dist_recorrida+distancia(hijo(j).fila,...  
...hijo(j).columna,fil_obj,col_obj,factor_escalas);
```

- Si el parámetro empleado es el de tiempo mínimo, el coste que se le asigna al hijo será el del campo `tiempo_empleado` más la distancia entre su posición y el objetivo dividido entre la máxima velocidad a alcanzar, que será la velocidad en autovías y autopistas. La implementación en el código será:

```
nuevo_coste=hijo(j).tiempo_empleado+distancia(hijo(j).fila,...  
...hijo(j).columna,fil_obj,col_obj,factor_escalas)/v_autovia;
```

Una vez se ha obtenido el valor de la función de evaluación f , se realiza la llamada a la función de inserción de nodos en lista por orden de coste, para que se actualicen los campos siguiente de los nodos correspondientes, así como la variable inicio si es necesarios:

```
[nodo, inicio, num_nodos]=insertar_en_lista(nuevo_coste, nodo, inicio, ...  
... num_nodos);
```

Además, para cada uno de los hijos generados, se marcará su posición con un cero en el mapa binario, lo cual consigue agilizar sensiblemente el algoritmo al no generar hijos repetidos:

```
mapa(hijo(j).fila, hijo(j).columna)=0;
```

Una vez calculado coste e insertado ordenadamente en la lista para cada uno de los hijos generados por la función de expansión, el paso siguiente es actualizar el índice para la siguiente iteración, determinando cual es el nodo de coste inmediatamente superior al que se acaba de expandir para la siguiente iteración:

```
indice=nodo(inicio).siguiente;  
inicio=indice;
```

Una vez se ha salido del bucle, si se ha alcanzado la posición objetivo, se deberá ir recorriendo a partir del nodo objetivo hacia atrás, avanzando en un bucle hacia el nodo raíz a través de los ancestros del nodo objetivo, almacenando así la ruta completa en un vector:

```
%Se inicializa el puntero i para almacenar el vector ruta  
i=nodo(indice).profundidad+1;  
tamano_ruta=i;  
  
%Bucle para almacenar la ruta  
while(i>0)  
    %Se almacena la ruta optima  
    ruta(i).fila=nodo(indice).fila;  
    ruta(i).columna=nodo(indice).columna;  
  
    %Variacion del indice para la siguiente iteracion  
    indice=nodo(indice).padre;  
  
    %Actualización del puntero  
    i=i-1;  
end
```

Por último, dentro de la función `calcula_ruta`, se incluirá una llamada a una función de visualización de rutas, la función `muestra_ruta`, que se puede consultar en el anexo de código del CD

```
muestra_ruta(ficheroTIF,ruta,tamano_ruta);
```

En caso de que no se alcance la solución, se advierte al usuario y se sale del programa.

```
disp(sprintf('Exito no alcanzado :('));
```

En los apartados siguientes se hará un repaso por el funcionamiento de las diferentes funciones auxiliares a las que se ha recurrido en la implementación del algoritmo.

5.5.4. Expansión de nodos.

Tal y como vimos en el apartado anterior, la llamada a la función `expandir_nodo` tiene un total de once parámetros. No obstante, hay que destacar que, debido a la manera en que en MATLAB se agrupan las funciones, que impide el uso de constantes globales, cinco de los once parámetros de la función podrían inicializarse como constantes en otro tipo de lenguajes.

Dado que MATLAB no tiene una función principal, un `main`, o bien un fichero de cabeceras donde podamos definir constantes para todas las funciones, es necesario pasar en la llamada a las funciones todas las constantes. Estas constantes en este caso son el factor de escala del mapa, así como las cuatro velocidades en función del tipo de carreteras tramos.

Por otra parte, pese a que los parámetros de fila y columna máxima no son constantes al uso, porque se inicializan al inicio del programa, sí es cierto que su valor no varía durante todo el programa, por lo que en cierto modo también podríamos considerarlas constantes.

Además, se le pasa a la función la matriz del mapa binario como parámetro, para evaluar a la hora de la generación de los hijos qué operadores son válidos y cuáles

no en cada posición. También se le pasa la matriz correspondiente a los tipos de carreteras, para actualizar correctamente el parámetro tiempo empleado de cada hijo, en función del tipo de vía en el que se genere.

Por último, se le pasa como argumento el nodo que estamos expandiendo como tal, así como el índice que tiene éste dentro de la lista para almacenarlo en el campo padre de los hijos generados.

Una vez dentro del algoritmo de expansión de nodos, el proceso utilizado es utilizar el bucle desarrollado en el apartado 5.3.3. Operadores válidos en la expansión de nodos. para la aplicación de todos los operadores posibles partiendo de la posición del nodo actual.

Así, el algoritmo debe llevar el control de un contador de hijos generados, así como un vector de hijos creado con todos los nodos generados mediante la aplicación de operadores válidos a la posición actual. La secuencia de asignaciones a ejecutar para cada operador válido es la siguiente:

```
%Incremento del número de hijos
num_hijos=num_hijos+1;

%Creación del hijo
hijo(num_hijos)=nodo;
hijo(num_hijos).columna=nodo.columna+k;
hijo(num_hijos).fila=nodo.fila+j;
hijo(num_hijos).profundidad=nodo.profundidad+1;
hijo(num_hijos).padre=indice;

%Cálculo de la distancia correspondiente a aplicar el operador
dist_expansion=distancia(hijo(num_hijos).fila,...
...hijo(num_hijos).columna,nodo.fila,nodo.columna,factor_escal);
hijo(num_hijos).dist_recorrida=nodo.dist_recorrida+dist_expansion;

%Se calcula el tiempo empleado en segundos
hijo(num_hijos).tiempo_empleado=nodo.tiempo_empleado+...
...dist_expansion/selección_velocidad_tramo(nodo.fila,nodo.columna...
...,mapa_tipo,v_autovia,v_nacional,v_comarcal,v_local);
```

Tal y como vemos, a la hora de crear un hijo igualamos primeramente el elemento a crear con el nodo que hemos expandido, para que la estructura sea la misma, para posteriormente actualizar los campos necesarios.

A la hora de calcular la distancia recorrida al aplicar el operador y el tiempo que ésta supone, se emplean llamadas a las funciones auxiliares de cálculo de distancia y selección de velocidades, que se estudiarán con un mayor detenimiento en subapartados siguientes.

5.5.5. Inserción en lista enlazada.

La función `insertar_en_lista` se empleará para llevar una lista ordenada de los nodos en función de su función de evaluación. El empleo de esta función en lugar de un vector tradicional presenta la ventaja de que se reduce sustancialmente la carga computacional del algoritmo, tal y como se apuntó en el apartado 4.3.3.2. Principales ventajas e inconvenientes de MATLAB como entorno de desarrollo. del Capítulo 4 del presente proyecto, donde se enumera como uno de los inconvenientes de MATLAB la alta carga computacional que conllevan algunas funciones de alto nivel implementadas en el lenguaje. En concreto, en dicho apartado se exponía un ejemplo que explica claramente por qué razón se ha desarrollado la lista de nodos en forma de lista enlazada, que es para evitar estar constantemente realizando movimientos e inserciones en vectores tradicionales.

Para la estructura de lista enlazada, se emplea una variable llamada `inicio` que contendrá el índice del primer nodo de la lista, así como un campo de cada elemento de la lista que se empleará como si fuera un puntero al elemento siguiente de la lista, de forma que en el campo 'siguiente' de cada nodo se almacena el índice del nodo inmediatamente posterior en la lista. Para el caso del último nodo de la lista, en el campo 'siguiente' se almacenará un cero, valor no válido para los índices de los vectores en MATLAB, para indicar que se ha alcanzado el fin de la lista.

Para una mejor comprensión de cómo funciona la estructura de lista enlazada se muestra gráficamente en la figura 38.

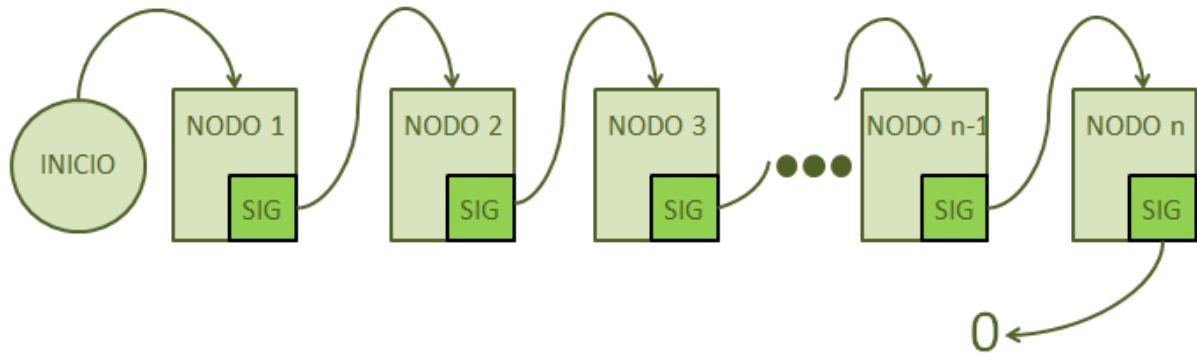


Figura 38 - Estructura de lista enlazada

La gran desventaja que presenta este tipo de estructuras con respecto a los vectores tradicionales es que el acceso a sus elementos es secuencial, no aleatorio, por lo que para alcanzar un elemento k de la lista siempre habrá que visitar previamente los $k - 1$ anteriores. No obstante, la inserción de nodos en el medio de la lista consiste únicamente en hacer dos asignaciones de variables, por lo que la carga computacional es mucho menor que en caso de vectores tradicionales, lo que convierte a las listas enlazadas en las estructuras ideales para vectores en los que hay que realizar muchas inserciones.

La implementación en el código de una lista enlazada es sencilla. Consiste en un recorrido secuencial a partir de la posición de la lista que indica inicio hasta la posición de inserción, que es aquella en la que se cumple que el coste del elemento de la lista ante el que se va a insertar supera el coste del elemento a insertar. Es decir, se hace un recorrido de los nodos de menor a mayor valor de coste, de forma que se determina la posición de inserción en el momento que el coste de los elementos de la lista es mayor que el del elemento a insertar.

Para ello, hay tres posibilidades a contemplar:

- **Hay que insertar al principio de la lista:** El campo siguiente del nodo a insertar apuntará al índice apuntado por inicio hasta el momento, y el nuevo inicio será el índice del elemento a insertar:

```
if nuevo_coste < nodo(inicio).coste
    nodo(num).siguiente = inicio;
```

```
    inicio=num;  
end
```

- **Hay que insertar en una posición intermedia de la lista:** El campo siguiente del nodo anterior al que vamos a insertar debe apuntar al índice del nodo a insertar, mientras que el campo siguiente del nodo a insertar almacenará la posición que había almacenada en el campo siguiente de la posición anterior.

```
if(nodo(indice).coste > nuevo_coste)  
    nodo(anterior).siguiente=num;  
    nodo(num).siguiente=indice;  
    break  
end
```

- **Hay que insertar al final de la lista:** El campo siguiente del nodo anterior al que vamos a insertar debe apuntar al índice del nodo a insertar, al igual que en el caso anterior, pero ahora el campo siguiente del nodo a insertar debe valer cero para indicar que es el nuevo final de la lista.

```
if(indice==0)  
    nodo(anterior).siguiente=num;  
    nodo(num).siguiente=0;  
    break  
end
```

La función `insertar_en_lista` devolverá el vector de nodos completo que se le pasó en la llamada, con las modificaciones correspondientes en los campos 'siguiente' de los nodos, así como las variables `num_nodos` y el puntero al inicio de la lista actualizado.

5.5.6. Otras funciones auxiliares para el algoritmo de planificación de rutas.

Durante la implementación del algoritmo se han empleado otras funciones auxiliares, tales como la función para el cálculo de la distancia entre nodos, que permite calcular el coste de los nodos y los operadores, una función que recibe las posiciones de dos nodos y devuelve un uno en caso de que sean iguales o un cero en caso contrario. Tenemos también una función que consulta en el mapa de tipos de carreteras y

devuelve la velocidad correspondiente a cada tramo, y la función que muestra la ruta en color verde en un mapa de carreteras.

5.5.6.1. Cálculo de la distancia entre nodos.

Para la función distancia, sencillamente se calcula la distancia geométrica entre dos puntos empleando el teorema de Pitágoras, para multiplicar después el resultado (obtenido en unidades ráster) por el factor de escala del mapa, obteniendo el resultado en metros.

$$dist = \sqrt{(fila1 - fila2)^2 + (columna1 - columna2)^2} * factor_escala \quad (5.8)$$

La ecuación 5.8 es la que se ha implementado en el código. La llamada a la función de distancia se realiza con la siguiente sintaxis.

```
[dist]=distancia(x1,y1,x2,y2,factor_escala);
```

5.5.6.2. Prueba de éxito entre nodos.

La función que comprueba si dos nodos tienen la misma posición, utilizada como prueba de haber alcanzado el éxito en el algoritmo de búsqueda, compara las coordenadas filas y columnas de dos nodos y devuelve un uno o un cero en función de que sean iguales o no. El algoritmo desarrollado es el siguiente:

```
if(x1==x2 && y1==y2)
    iguales=1;
else
    iguales=0;
end
```

La llamada a la función se realiza con la sintaxis siguiente:

```
[iguales]=prueba_meta_map(x1,y1,x2,y2);
```

5.5.6.3. Selección de velocidad en función del tramo.

La función para obtener la velocidad a la que un camión circulará en una determinada posición del mapa recibe de la función que le llama el mapa con los tipos de carreteras, así como las velocidades seleccionadas para cada tipo de vías.

El mapa de tipos de carreteras es un mapa en el que cada una de las carreteras está marcada con un número del 1 al 6, agrupándola en uno de los grupos presentes en la tabla 24, mientras que el resto del espacio tiene un 0.

Valor mapa tipo	Tipo de Carretera	Velocidad asignada	Velocidad (km/h)
0	Ninguna vía, posición no válida.	Ninguna	Ninguna
1	Autovía.	v_autovia	80
2	Autopista de peaje.	v_autovia	80
3	Carretera nacional.	v_nacional	60
4	Carretera autonómica.	v_nacional	60
5	Carretera comarcal.	v_comarcal	50
6	Carretera local.	v_local	40

Tabla 24 - Tipos y velocidades de carreteras

Dentro de la función `selecciona_velocidad_tramo`, con la llamada siguiente:

```
[velocidad_kph]=seleccion_velocidad_tramo(fil,col,mapa_tipo,...  
...v_autovia,v_nacional,v_comarcal,v_local);
```

sencillamente se almacena en una variable de selección el valor resultante de consultar en el mapa de tipos de carreteras la posición actual, y con ese valor se realiza un switch:

```
seleccion=mapa_tipo(fil,col);
```

```
%En función del tipo de carretera, se selecciona una velocidad u otra  
switch seleccion
```

```
case 1  
    velocidad_kph=v_autovia;
```

```
case 2  
    velocidad_kph=v_autovia;
```

```
case 3  
    velocidad_kph=v_nacional;
```

```
case 4  
    velocidad_kph=v_nacional;
```

```
case 5  
    velocidad_kph=v_local;
```

```
case 6  
    velocidad_kph=v_comarcal;
```

```
otherwise
```

```
    disp(sprintf('Error en la seleccion de velocidad. La...  
...variable seleccion vale %d',seleccion));
```

```
        velocidad_kph=v_local;  
    end
```

5.5.6.4. Función para mostrar la ruta calculada sobre un mapa.

La sintaxis de la llamada a la función para mostrar la ruta calculada es la siguiente:

```
muestra_ruta(ficheroTIF,ruta,tamano_ruta);
```

Observamos como los parámetros que recibe la función son el vector con todas las posiciones de la ruta, el tamaño de dicho vector y el mapa sobre el que se desea que se represente la ruta.

Una vez dentro de la propia función, se prepara la imagen para ser mostrada y se va recorriendo el vector ruta coloreando los píxeles del mapa en color verde. Finalmente, se usa la función `imshow` para mostrar el mapa con la ruta dibujada.

```
%Bucle para marcar la ruta en el mapa  
for i=1:tamano_ruta  
    mapa_RGB(ruta(i).fila,ruta(i).columna,1)=0;  
    mapa_RGB(ruta(i).fila,ruta(i).columna,2)=255;  
    mapa_RGB(ruta(i).fila,ruta(i).columna,3)=0;  
end  
  
%Se muestra el mapa con la ruta marcada  
imshow(mapa_RGB);
```

5.6. Ejemplo de ejecución del algoritmo.

A continuación se expone un ejemplo de cómo este algoritmo calcula las rutas. Para ello, se empleará la función `calcula_ruta`, que implementa el algoritmo desarrollado durante todo el presente capítulo, y que además incorpora una función para que se muestren las rutas calculadas en el mapa.

Además, se ha incorporado un sistema de ficheros para que, partiendo de la introducción de los nombres de cualquiera de los nodos de la red de orígenes y destinos (que se desarrollarán en profundidad en el capítulo 7), automáticamente obtenga las coordenadas en el mapa.

En concreto, vamos a calcular una ruta entre Valladolid y San Rafael, en Segovia, que es el último municipio de Castilla y León por el que se pasa por la AP-6 dirección Madrid.

La llamada a la función `calcula_ruta` tiene la sintaxis siguiente:

```
[ruta]=calcula_ruta(origen,destino,ficheroTIF,modo);
```

Donde `origen` y `destino` son dos cadenas de caracteres con el nombre de las ciudades o municipios entre los que se calculará la ruta, `ficheroTIF` es el nombre del fichero que contiene mapa que se va a emplear para el cálculo de la ruta, y `modo` es una cadena de caracteres que determinará si el criterio de optimización es el espacio o el tiempo.

Calcularemos inicialmente la ruta de mínima distancia, con la siguiente llamada:

```
[ruta]=calcula_ruta('Valladolid','SanRafael','Carr_homog.tif',...  
...'distancia_minima');
```

Tras desarrollar el árbol de búsqueda y generar la ruta, se muestran por pantalla algunos datos estadísticos acerca de la ruta calculada, y se muestra el mapa con la ruta marcada en color verde.

```
Éxito alcanzado  
Distancia recorrida: 138.47 kilometros  
Tiempo empleado: 2 horas 14 minutos 32 segundos  
Profundidad de la solución: 1507  
Nodos expandidos: 8014  
Tiempo de ejecución del algoritmo: 2.56 segundos
```

La ruta obtenida es la que se muestra en la figura 39, en la parte de la izquierda como se muestra en MATLAB y en la derecha la ruta correspondiente en un mapa de carreteras con más información:



Figura 39 - Ruta de mínima distancia entre Valladolid y San Rafael

Observamos cómo la ruta calculada sale de Valladolid por la carretera nacional 601 hasta Adanero (Ávila), momento en el que coge la autopista AP-6 hasta San Rafael.

Calcularemos ahora la misma ruta, entre Valladolid y San Rafael, pero tratando en esta ocasión de optimizar el tiempo empleado. La llamada a la función es como sigue:

```
[ruta]=calcula_ruta('Valladolid','SanRafael','Carr_homog.tif',...  
...'tiempo_minimo');
```

Podemos observar los datos estadísticos mostrados en esta ocasión, y compararlos con los obtenidos en el caso de la optimización de la distancia recorrida. Vemos que hay unos 20 kilómetros más, pero que, sin embargo, el tiempo calculado para la ruta es de unos 15 minutos menos.

```
Éxito alcanzado  
Distancia recorrida: 158.14 kilometros  
Tiempo empleado: 1 horas 59 minutos 43 segundos  
Profundidad de la solución: 1611  
Nodos expandidos: 12268
```

Tiempo de ejecución del algoritmo: 7.80 segundos

La ruta obtenida en esta ocasión es la mostrada en la figura 40, al igual que en el caso anterior, tal y como se muestra en MATLAB y sobre un mapa real.



Figura 40 – Ruta de mínimo tiempo entre Valladolid y San Rafael

Observamos cómo la ruta calculada sale de Valladolid por la autovía A-62 hasta Tordesillas, donde coge la autovía A-6 dirección Madrid hasta Adanero (Ávila), donde se coge la autopista AP-6 hasta San Rafael.

En el presente ejemplo, el hecho de seleccionar una ruta a través de un tipo de carretera u otro está condicionado por el criterio de optimalidad que se use. Podemos superponer las dos rutas en el mismo mapa para comprobar la diferencia existente entre ambas, tal y como se ha hecho en la figura 41.

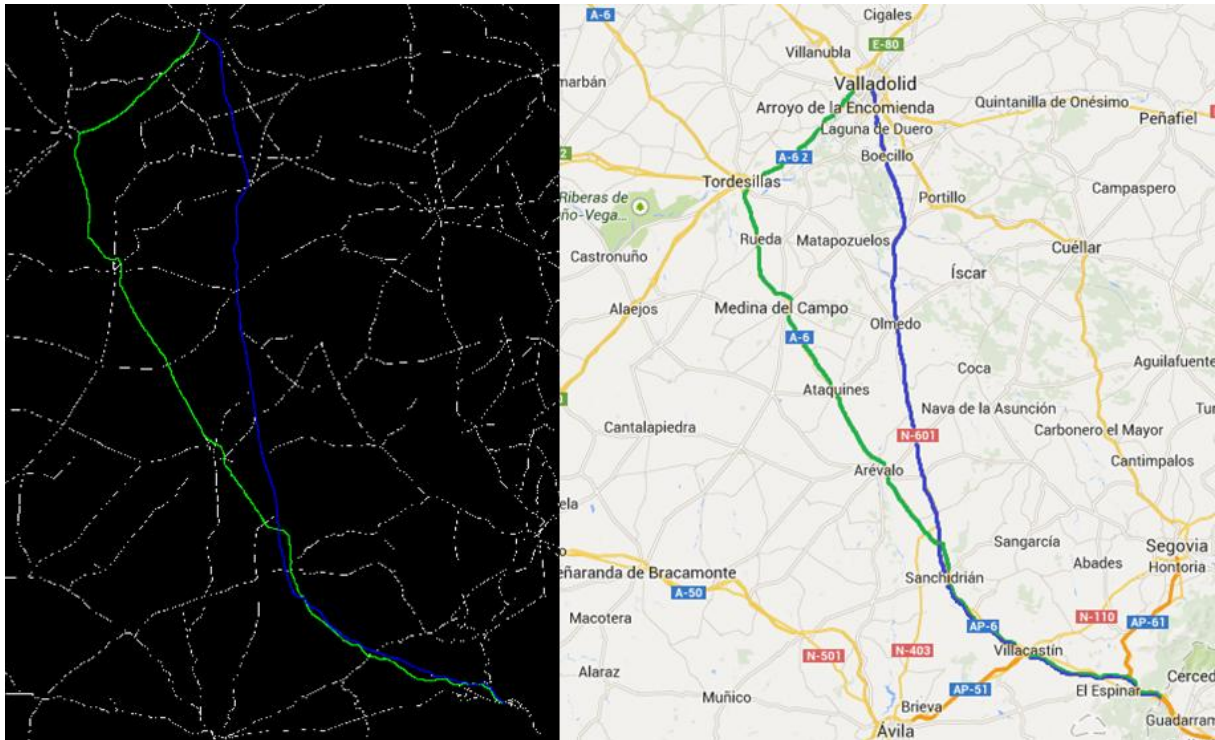


Figura 41 - Comparativa entre las rutas de distancia mínima y tiempo mínimo

5.7. Diagrama resumen del algoritmo de planificación de rutas.

Para terminar el presente capítulo, se ha realizado un diagrama de entradas y salidas, que se muestra en la figura 42, a modo de resumen del algoritmo de planificación de rutas implementado con MATLAB. Este algoritmo desarrollado será clave en el desarrollo de la aplicación, tal y como se verá en el capítulo 7 de la memoria del presente proyecto.

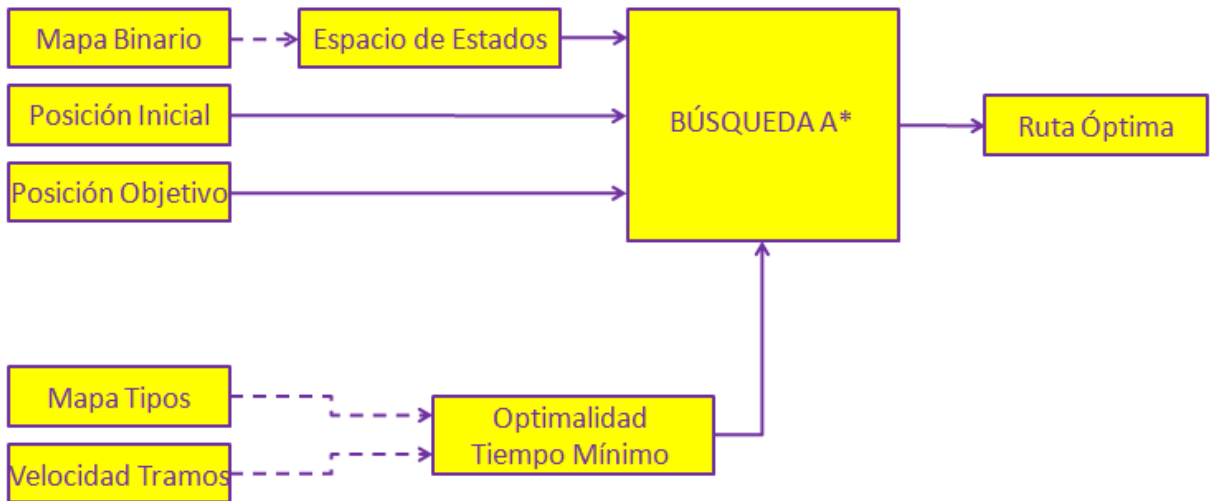


Figura 42 - Diagrama de entradas y salidas del algoritmo de planificación de rutas

CAPÍTULO 6: ALGORITMO DE SEGUIMIENTO DE RUTAS EN TIEMPO REAL.



6.1. Introducción.

En el capítulo anterior se ha mostrado de qué manera se crean rutas óptimas entre dos puntos a través del mapa de Castilla y León. No obstante, en la presente aplicación, el objetivo será que exista un seguimiento de dichas rutas en tiempo real por parte de los vehículos.

Así, deberemos emplear alguna herramienta matemática que nos permita calcular la posición (x_2, y_2) que ocupará un vehículo dentro de un intervalo t de tiempo, considerando que actualmente ocupa la posición (x_1, y_1) , y se desplaza a una velocidad v .

Durante el presente capítulo se resolverá esta problemática, que constituye una parte muy importante del presente proyecto y de cualquier aplicación de simulación de vehículos en tiempo real.

6.2. Formulación del problema.

Previamente a desarrollar un algoritmo de seguimiento de rutas, debemos analizar cuáles son los datos de entrada que se van a utilizar en la implementación del código.

Así, el algoritmo debe recibir la ruta completa a seguir por el vehículo, así como la posición exacta dentro de su trayectoria en el momento de la ejecución del algoritmo, que denotaremos por posición antigua, además de la velocidad a la que se mueve el vehículo y el intervalo de tiempo para el que se debe calcular la nueva posición.

El diagrama de entradas y salidas del problema se muestra en la figura 43.

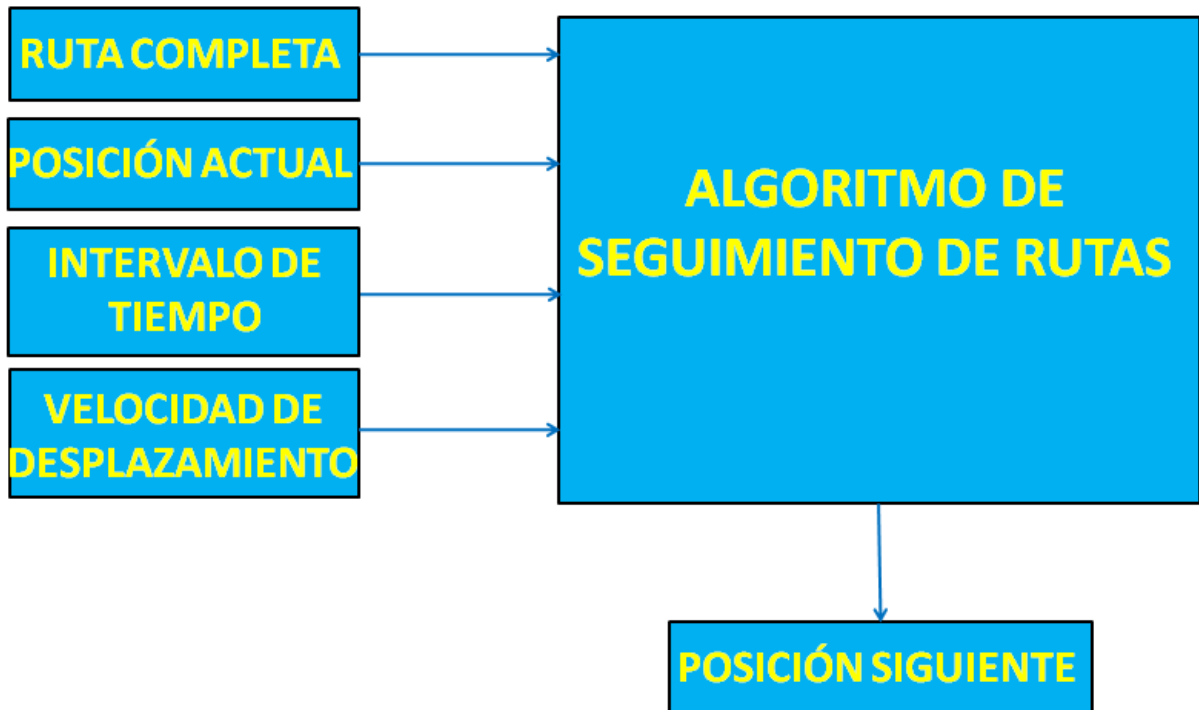


Figura 43 - Diagrama de entradas y salidas del algoritmo de seguimiento de rutas

6.3. Información de partida.

Una vez se han determinado las entradas y salidas que debe tener el algoritmo, es necesario encontrar una manera de implementarlas de una manera clara y lo más sencilla posible en el código. Para ello, vamos a utilizar a modo de ejemplo un vehículo que se desplace por la ruta de la figura 44.

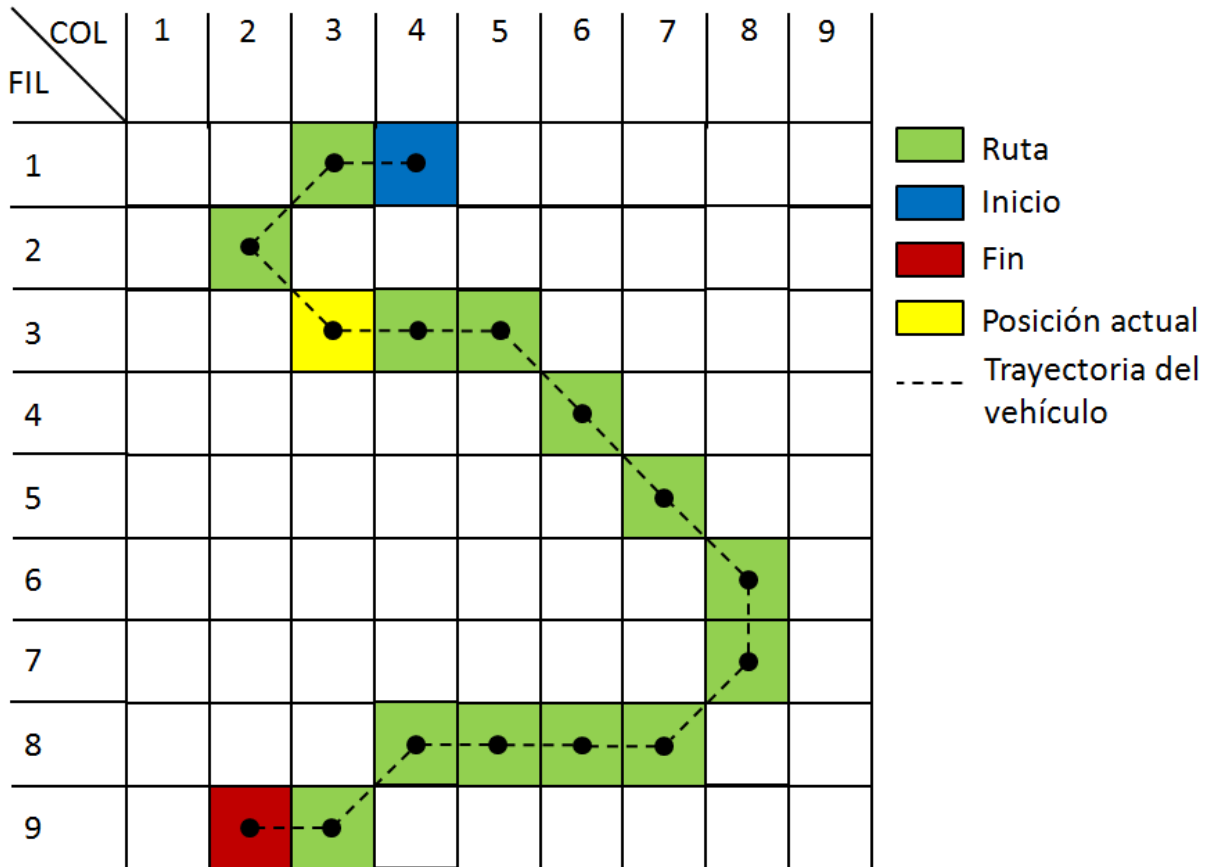


Figura 44 - Ruta de ejemplo para el algoritmo de seguimiento

6.3.1. Implementación de la ruta.

Si la ruta de la figura 44 hubiera sido calculada mediante el algoritmo desarrollado en el capítulo anterior sobre un mapa ráster real, el vector de ruta con dos campos hubiera quedado de la siguiente manera:

```

ruta(1).fila = 1      ruta(1).columna = 4
ruta(2).fila = 1      ruta(2).columna = 3
ruta(3).fila = 2      ruta(3).columna = 2
ruta(4).fila = 3      ruta(4).columna = 3
ruta(5).fila = 3      ruta(5).columna = 4
ruta(6).fila = 3      ruta(6).columna = 5
ruta(7).fila = 4      ruta(7).columna = 6
ruta(8).fila = 5      ruta(8).columna = 7
ruta(9).fila = 6      ruta(9).columna = 8
ruta(10).fila = 7     ruta(10).columna = 8
ruta(11).fila = 8     ruta(11).columna = 7
ruta(12).fila = 8     ruta(12).columna = 6
ruta(13).fila = 8     ruta(13).columna = 5
    
```

```
ruta(14).fila = 8      ruta(14).columna = 4
ruta(15).fila = 9      ruta(15).columna = 3
ruta(16).fila = 9      ruta(16).columna = 2
```

Además de la sucesión de puntos, es interesante recibir también en una variable la profundidad, o número de elementos del vector ruta, para detectar en qué momento el vehículo ha llegado a su destino. Así, para el caso del ejemplo de la figura 44, tendríamos una variable:

```
profundidad = 16
```

6.3.2. Implementación de la posición actual.

A la hora de almacenar la posición que ocupa el vehículo actualmente, así como la nueva posición que ocupa una vez transcurrido el intervalo de tiempo para el que se ejecuta el algoritmo, son dos las variables que se necesitan.

Por una parte, es necesario almacenar el índice de la celda ráster dentro de la ruta. Es decir, para el caso de la figura 44, la variable índice tomará el valor:

```
indice = 4
```

Sin embargo, además del índice que indica en que casilla nos encontramos, es necesario también llevar una variable que contabilice la distancia recorrida a partir de la celda ráster indicada por la variable índice. De esta forma, cuando la variable recorrido tome el valor máximo admisible, se reiniciará, y el índice se incrementará en una unidad.

Para el caso del ejemplo de la figura 44, si consideramos que el vehículo se encuentra justo en el centro de la casilla (3, 3), la variable recorrido valdrá:

```
recorrido = 0
```

Como la siguiente celda, la de índice 5, es la casilla (3, 4), recorrido deberá ir aumentando con el paso del tiempo y, en el momento en el que la variable recorrido sea igual al lado de la celda ráster, se reiniciará y la celda actual pasará ser la de índice 5.

De la misma manera, para llegar a la celda actual (3,3) desde la celda anterior (2,2), recorrido ha ido aumentando con el tiempo hasta alcanzar el valor de la diagonal de la celda ráster, es decir, $\sqrt{2} * lado_raster$.

6.3.3. Implementación de la velocidad y el tiempo.

A la hora de incorporar el intervalo de tiempo para el que se calcula la siguiente posición y la velocidad, la única precaución que se debe tener con las unidades de medida es que exista una concordancia entre la velocidad, tiempo y longitud de la celda ráster.

Para el caso del algoritmo del presente proyecto, se van a adoptar las unidades del Sistema Internacional, es decir, el tamaño de la celda ráster se medirá en metros, la velocidad en metros por segundo y el intervalo de tiempo en segundos.

6.4. Aproximaciones adoptadas.

Cabe analizar que, idealmente, para esta aplicación habría que asignarle una velocidad a cada uno de los píxeles, de forma que, cuando se calcule la siguiente posición, cada vez que se pase de un píxel a otro se consulte la velocidad en el mapa de tipos de carreteras.

No obstante, la consulta de la velocidad en un mapa conlleva asociado un pequeño tiempo de cómputo que puede suponer un problema si, por ejemplo, se están calculando en tiempo real las posiciones de 200 vehículos, y cada uno de ellos avanza de media cinco píxeles para cada actualización de la posición.

Así, este pequeño intervalo de tiempo se multiplica por 1000, lo que en tiempo real puede suponer un problema. Por ello, en el algoritmo que se ha desarrollado para el seguimiento de rutas en el presente proyecto, el mapa de tipos de carreteras se consulta una vez solamente para cada vehículo, previamente a llamar al algoritmo.

6.4.1. Máximos errores cometidos con la aproximación adoptada.

Esto puede suponer pequeños desajustes entre la posición real y la calculada en un entorno de radio δ alrededor de un punto donde el tipo de carretera cambia, donde δ sigue la ecuación 6.1:

$$\delta = \frac{t \cdot v_1}{factor_escala} \quad (6.1)$$

Donde la velocidad v_1 es la velocidad asignada al primero de los dos tramos que confluyen en el centro del entorno de radio δ :

Así, supongamos que un vehículo avanza por una autovía a 80 km/h , y llega a un desvío para acceder a una carretera comarcal, por la que su velocidad será de 50 km/h , con un periodo de actualización de 30 segundos. Así, el radio δ entorno al punto de cambio de tipo de vía en el que se podría ver afectado por el error es de:

$$\delta = \frac{30 \text{ s} \cdot 22,2 \text{ m/s}}{80 \text{ m/pixel}} = 8,33 \text{ píxeles} \quad (6.2)$$

Así, el error máximo para este caso afectaría a 8,33 píxeles (siempre que el vehículo avance en línea recta), lo que supone una diferencia de posición al cabo de los 30 segundos, en metros de:

$$\epsilon = (8,33 \text{ píxeles} \cdot 80 \text{ m/pixel}) - (30 \text{ s} \cdot 13,9 \text{ m/s}) = 249,4 \text{ m} \quad (6.3)$$

Este error máximo será de unos 250 metros al cabo de 30 segundos. Es decir, en el simulador el vehículo habrá recorrido unos 250 metros más que en el caso del vehículo real.

6.4.2. Justificación de la aproximación adoptada.

No obstante, pese a que este error parece alto, son varios los factores que permiten compensar estos errores a la hora de adoptar esta aproximación:

- Los errores tienden a compensarse a lo largo de la ruta completa. Así, en el ejemplo anterior, el vehículo que venía por una autovía, con la velocidad más

alta de todas las posibles, es probable que cuando se incorporó a ésta desde una carretera de más baja velocidad, el vehículo del simulador recorriera menos metros de los que recorrería en realidad, al circular varios píxeles por una autovía manteniendo la baja velocidad que llevaba en la carretera convencional.

- Por lo general, no suelen darse muchos cambios de vía en una ruta. Si atendemos, por ejemplo a las rutas desarrolladas en el capítulo anterior entre Valladolid y San Rafael, para el caso de la ruta con distancia mínima había un cambio de vía de una nacional a una autopista de peaje, mientras que para del tiempo mínimo no había cambios entre tipos de vía que supusieran un cambio en la velocidad. Así, el seguimiento de la ruta de distancia mínima entre Valladolid y San Rafael, con las ecuaciones dadas previamente, y para un periodo de actualización de 30 segundos, el error máximo cometido en el seguimiento de la ruta, con una velocidad de 60 km/h ($16,67 \text{ m/s}$) en nacionales y de 80 km/h en autovías y autopistas, será de:

$$\delta = \frac{30 \text{ s} * 16,67 \text{ m/s}}{80 \text{ m/píxel}} = 6,25 \text{ píxeles} \quad (6.4)$$

$$\epsilon = (6,25 \text{ píxeles} * 80 \text{ m/píxel}) - (30 \text{ s} * 22,22 \text{ m/s}) = -166,67 \text{ m} \quad (6.5)$$

Esto implica que en una ruta con una distancia total de $138,47 \text{ km}$, el error máximo de posición que va a aparecer es de 166.67 m , es decir, un error del $0,12 \%$, que es perfectamente asumible a cambio de eliminar el coste computacional de ejecutar 1508 llamadas a la función de selección de velocidad.

- Los errores calculados son los de peor caso. Sin embargo, lo normal será que los errores que aparezcan tengan una entidad mucho menor.

6.5. Algoritmo desarrollado.

Durante el presente proyecto, se ha desarrollado una función aplicando los conceptos previamente mencionados al seguimiento de las rutas calculadas en MATLAB. La función tiene la llamada siguiente:

```
[indice, recorrido] = calcula_siguiete_posicion_estricto...  
...(velocidad_kph, tiempo, ruta, indice, recorrido, profundidad)
```

6.5.1. Entradas y salidas de la función.

Si comparamos esta llamada a la función con el diagrama de la figura 43, podemos agrupar las variables de entrada y de salida a la función en los elementos de entrada y salida de alto nivel del diagrama.

Así, aparte de las variables `velocidad_kph` y `tiempo`, que representan la velocidad de desplazamiento y el intervalo de tiempo para el que se calcula la siguiente posición, aparecen también como entradas a la función el vector `ruta` y la variable `profundidad`, que representan toda la información necesaria acerca de la ruta a seguir, con la sucesión de puntos que forman la ruta y el tamaño de la ruta para detectar cuando se ha llegado al destino.

Por otra parte, las variables `indice` y `recorrido`, que son las variables que definen la posición exacta del vehículo a lo largo de la ruta, tal y como se describió en el apartado 6.3.2. Implementación de la posición actual. Son variables que actúan como entrada a la función, la cual las actualiza y las devuelve como la posición del vehículo después del intervalo de tiempo transcurrido.

6.5.2. Preparación para el bucle del algoritmo.

Los primeros pasos dentro de la función de seguimiento de rutas deben ser obtener la velocidad en metros por segundo a partir de la velocidad del vehículo en kilómetros por hora.

```
velocidad_mps = velocidad_kph/3.6;
```

Además, es importante almacenar a modo de constante el factor de escala del mapa, que para el presente proyecto es el mencionado en el capítulo 4.

```
factor_escala = 81.709626;
```

Una vez determinados dos factores importantes como son la distancia y la velocidad para el algoritmo, vamos a establecer el valor de una nueva variable, de nombre 'restante'. Esta variable contiene la distancia, en metros, que debe transcurrir a partir de una determinada posición para pasar a la celda siguiente. Para ello, lo primero que se debe hacer es comprobar si el píxel siguiente se encuentra en vertical u horizontal con respecto al píxel actual, o bien se encuentra en diagonal.

```
% Avance en horizontal o vertical
if(ruta(indice).fila==ruta(indice+1).fila ||...
...ruta(indice).columna==ruta(indice+1).columna)
    restante=1*factor_escala-recorrido;
% Avance en diagonal
else
    restante=sqrt(2)*factor_escala-recorrido;
end
```

De esta forma, en caso de un avance en horizontal o vertical, la distancia restante hasta el próximo píxel será la longitud del lado de la celda ráster menos lo que ya lleva recorrido dentro del píxel. Se puede ver la diferencia entre las variables restante y recorrido más claramente atendiendo a la figura 45.

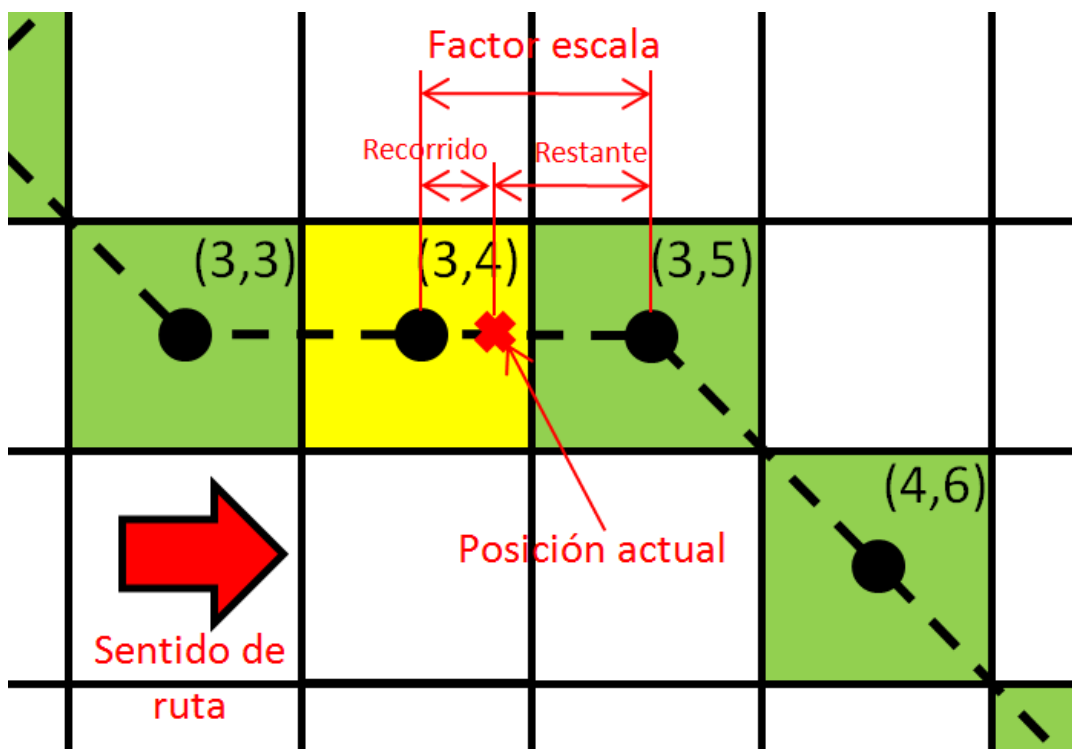


Figura 45 - Variable restante cuando el vehículo avanza en horizontal/vertical

Sin embargo, cuando el desplazamiento se produce en diagonal, la distancia restante hasta el siguiente píxel será el valor de la diagonal de la celda, $\sqrt{2} * factor_escala$, menos la distancia que ya llevamos recorrida dentro del propio píxel. La figura 46 muestra en este caso la diferencia entre las variables restante y recorrido cuando el desplazamiento se produce en diagonal.

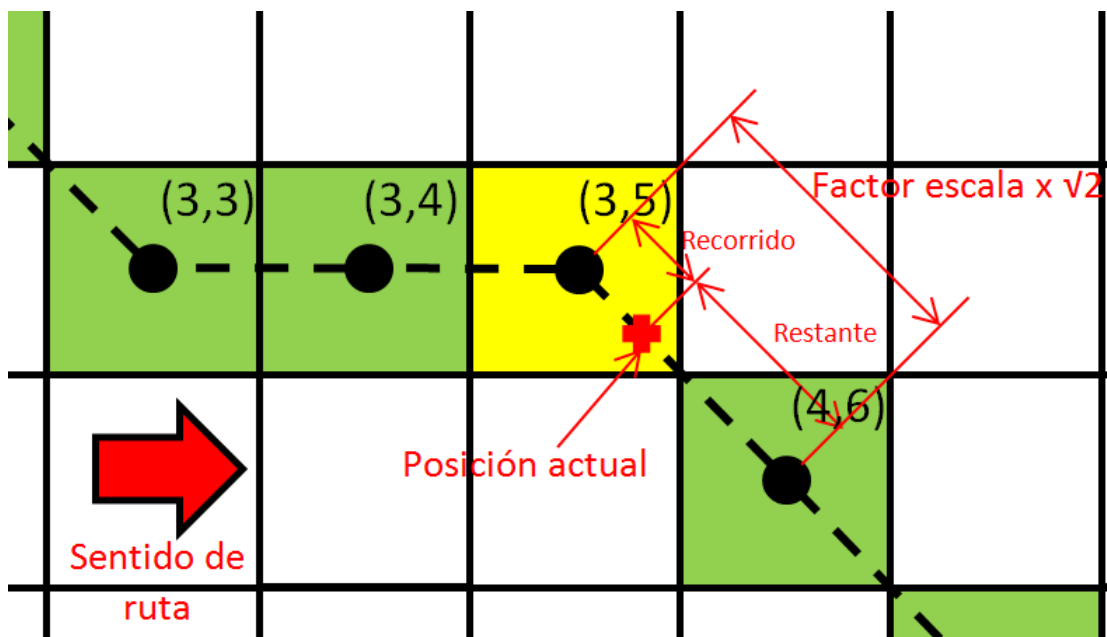


Figura 46 - Variable restante cuando el vehículo avanza en diagonal

Una vez calculada la distancia que queda hasta el siguiente píxel, se calculará el tiempo que se empleará en cubrir esta distancia hasta el siguiente píxel, en la variable consumido, que tendrá un peso clave en el algoritmo:

$$\text{consumido} = \text{restante} / \text{velocidad_mps};$$

La base del bucle del algoritmo, que se explicará en el apartado siguiente, consiste en calcular el tiempo que llevaría avanzar al siguiente píxel de la ruta, acumulándolo en consumido y deteniendo el algoritmo cuando la variable de tiempo consumido supere el valor del intervalo de tiempo para el que se calcula la siguiente posición.

6.5.3. Bucle principal del algoritmo.

Para cada una de las pasadas del bucle principal del algoritmo, se va a calcular el tiempo empleado en avanzar de un píxel al siguiente, de forma que a la hora de dar pasadas al bucle se van a comprobar dos cosas: si se ha superado el tiempo total y si se ha llegado al final de la ruta.

A partir de ahí, se repite la función que hemos visto en el apartado anterior, calculando la distancia restante hasta el próximo píxel en función de que el avance sea en horizontal o vertical, o bien en diagonal, y acumulando a partir de éste el tiempo acumulado consumido en todo el recorrido hasta el momento:

```
%Mientras el tiempo consumido no supere el tiempo total y no se
%llegue al final de la ruta
while(consumido<=tiempo && indice<profundidad-1);

    %Se avanza al píxel siguiente dentro de la ruta
    indice=indice+1;

    %Se calcula la distancia restante del pixel
    if(ruta(indice).fila==ruta(indice+1).fila ||...
    ...ruta(indice).columna==ruta(indice+1).columna)
        restante=1*factor_escala;
    else
        restante=sqrt(2)*factor_escala;
    end

    %Se actualiza el tiempo consumido
    consumido=consumido+restante/velocidad_mps;

end
```

6.5.4. Preparación de las variables de salida de la función.

Una vez se termina el bucle, es necesario comprobar si la salida de éste ha sido provocada porque se ha agotado el intervalo de tiempo o se ha terminado la ruta. Una vez se ha salido del bucle, el único parámetro que resta por determinar será la variable recorrido.

```
%Si se llega al final de la ruta, se devuelve un -1 para indicarlo
if(indice==profundidad-1)
```

```

    recorrido=-1;

    %Si se acaba el tiempo, se calcula el recorrido del píxel actual
    else
        recorrido=restante-(consumido-tiempo)*velocidad_mps;
    end

```

En el caso de que el índice apunte al penúltimo elemento del vector de rutas, se habrá llegado al final de la ruta, por lo que dentro de la variable recorrido se coloca un -1 , un valor negativo, que la función que realiza la llamada al seguimiento de rutas interpretará como que se ha alcanzado el destino.

Por otro lado, en caso contrario, se interpretará que se ha abandonado el bucle porque el tiempo consumido ha superado al intervalo de tiempo para el que se calcula la posición. Así, calcularemos el recorrido que se debe devolver a la función de llamada, descontando de la cantidad restante hasta el siguiente píxel la distancia que se ha recorrido una vez se ha superado el tiempo máximo permitido., distancia que realmente no ha dado tiempo a recorrer.

6.6. Ejemplo de ejecución del algoritmo.

Para cerrar el capítulo, aplicaremos al ejemplo del apartado 6.3. Información de partida. la función `calcula_siguiete_posicion_estricto`, con el algoritmo desarrollado, para calcular posiciones sucesivas dentro de la ruta. Para la llamada a la función, se empleará una velocidad de 90 km/h , que son 25 m/s , y un periodo de actualización de 15 s . Además, la longitud del lado de cada una de las celdas será de 80 m

Tal y como se dijo en el apartado 6.3. Información de partida., en la primera llamada a la función, se utilizará un índice igual a 4 y un recorrido igual a 0. La primera llamada será:

```

[indice,recorrido] = calcula_siguiete_posicion_estricto...
...(90,15,ruta,4,0,16)

```

Puesto que el primer desplazamiento se realizará horizontalmente, la variable restante inicialmente será de 80 m. Por lo tanto, consumido será igual a $80m/25 m/s$, es decir, 3,2 s.

```
consumido = 3.2
```

Una vez dentro del bucle, los valores de las variables de tiempo consumido e índice tomarán los siguientes valores:

```
indice = 5  
consumido = 6.40
```

```
indice = 6  
consumido = 10.93
```

```
indice = 7  
consumido = 15.45
```

En este punto, la variable consumido ha superado la variable tiempo, por lo que se abandona el bucle. Puesto que no se ha abandonado el bucle por haber llegado al final de la ruta, se actualizará la variable recorrido. Dado que el movimiento entre las casillas 7 y 8 es un movimiento diagonal, la variable restante valdrá en esta ocasión $\sqrt{2} * 80 m$:

```
recorrido = 80*sqrt(2)-(15.45-15)*25;  
recorrido = 101.89
```

Así, la función devolverá las variables:

```
indice = 7  
recorrido = 101.89
```

La posición siguiente calculada aparece representada gráficamente en la figura

47.

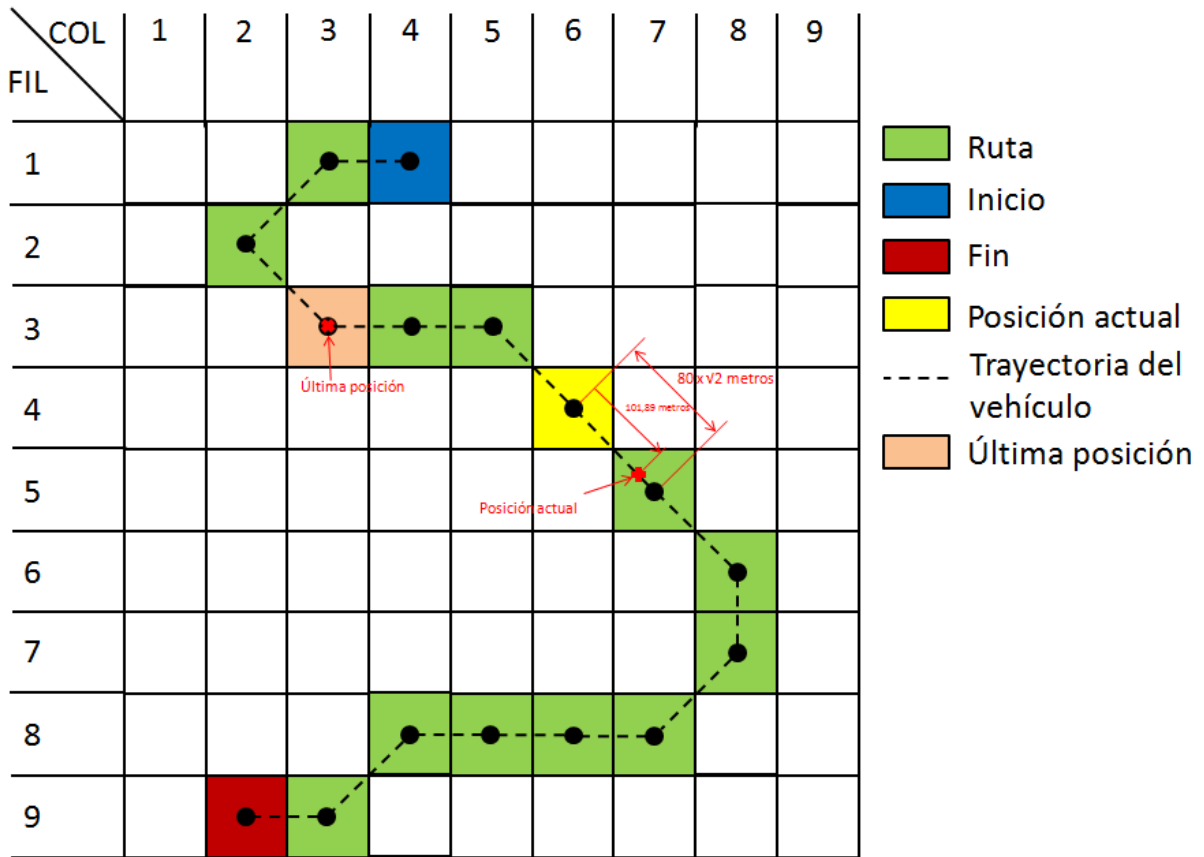


Figura 47 - Nueva posición calculada tras una llamada a la función

Una vez pasados los 15 segundos, podemos repetir la llamada a la función para calcular la nueva posición, a partir de los datos obtenidos en esta pasada del algoritmo. La nueva llamada a la función será:

```
[indice,recorrido] = calcula_siguiente_posicion_estricto...
...(90,15,ruta,7,101.89,16)
```

Previamente a la entrada al bucle, se calculará la distancia restante hasta el siguiente píxel. Teniendo en cuenta que se trata de un desplazamiento diagonal, la variable restante será igual a la longitud de la diagonal de la celda menos el recorrido actual. Se calcula también el tiempo consumido en llegar a la siguiente celda como el cociente entre la distancia restante por la velocidad.

```
restante = 11.25
consumido = 0.45
```


Una vez dentro del bucle, las variables índice y consumido toman los valores siguientes:

```
índice = 8  
consumido = 4.98
```

```
índice = 9  
consumido = 8.18
```

```
índice = 10  
consumido = 12.71
```

```
índice = 11  
consumido = 15.91
```

En este punto, la variable consumido ha superado la variable tiempo, por lo que se abandona el bucle, para posteriormente actualizar el recorrido. Como el movimiento entre las casillas 11 y 12 es un movimiento horizontal, la variable restante valdrá en esta ocasión 80 m:

```
recorrido = 80 - (15.91 - 15) * 25;  
recorrido = 57.25
```

Así, la función devolverá las variables:

```
índice = 11  
recorrido = 57.25
```

La posición siguiente calculada aparece representado gráficamente en la figura

48.

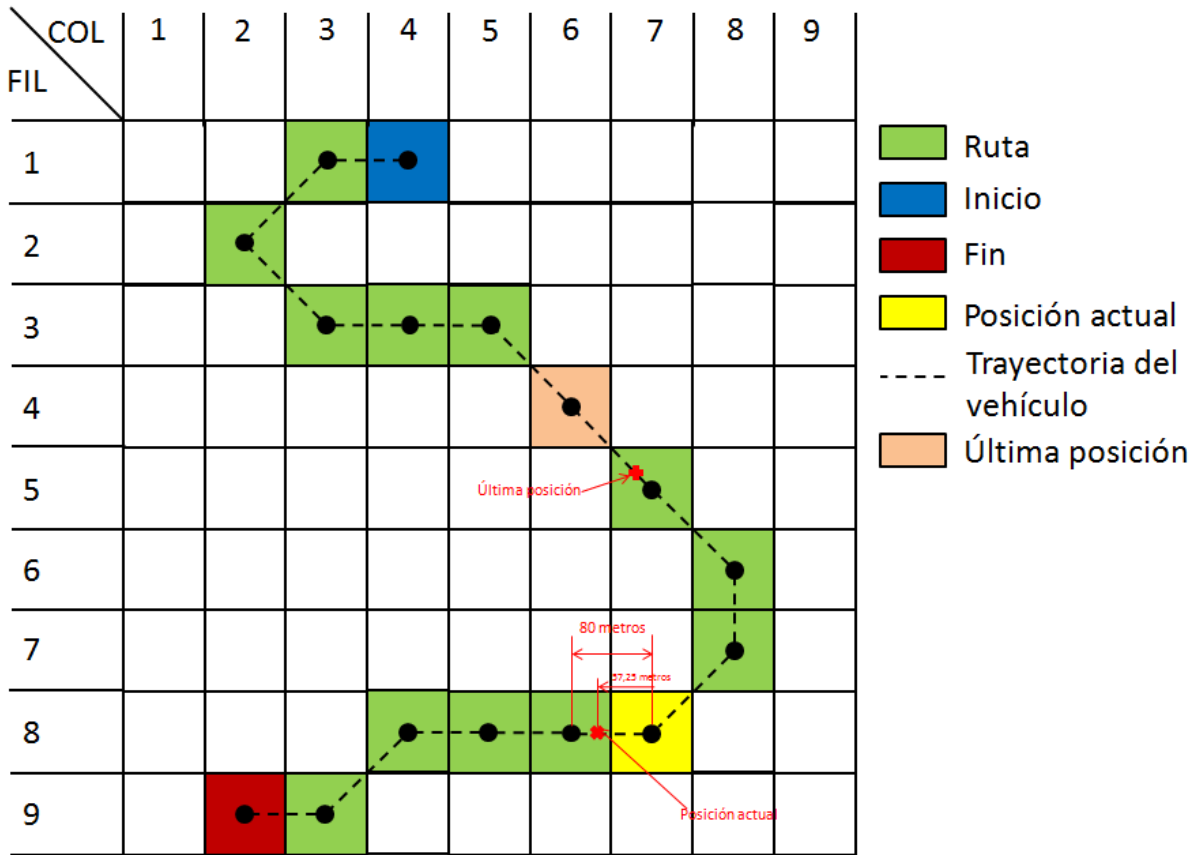


Figura 48 - Nueva posición calculada tras dos llamadas a la función

Las llamadas a la función para calcular la nueva posición se repiten una y otra vez, hasta que se llega al final de la ruta, momento en el que se devuelve un -1 en la variable recorrido para hacer notar que se ha alcanzado el destino.

Es esta aplicación de seguimiento de rutas mediante la cual se consigue generar una simulación de uno o más vehículos sobre un mapa en tiempo real, con un algoritmo relativamente sencillo y ágil.

CAPÍTULO 7: SIMULADOR DE VEHÍCULOS EN TIEMPO REAL.



7.1. Introducción.

Durante el presente capítulo, se integrarán las funciones desarrolladas durante los capítulos 5 y 6 del presente proyecto, de forma que se expliquen claramente como se han utilizado dos algoritmos distintos, uno para planificar rutas y otro para seguirlas en tiempo real, para crear una aplicación que simule un número determinado de vehículos circulando en la red de carreteras de Castilla y León.

Durante los siguientes apartados, se mostrará cómo se han seleccionado una serie de ciudades de Castilla y León para que actúen como orígenes y destinos, formando una red de nodos de comunicación a lo largo y ancho del mapa. También se explicará de qué manera se ha conseguido gestionar las rutas mediante ficheros, para evitar que deban ser calculadas en tiempo real, lo que minimiza el gasto computacional y temporal del simulador. Por último, se mostrará la estructura de información necesaria para generar los vehículos simulados, que son el objetivo final del simulador en tiempo real.

7.2. Esquema básico de la aplicación.

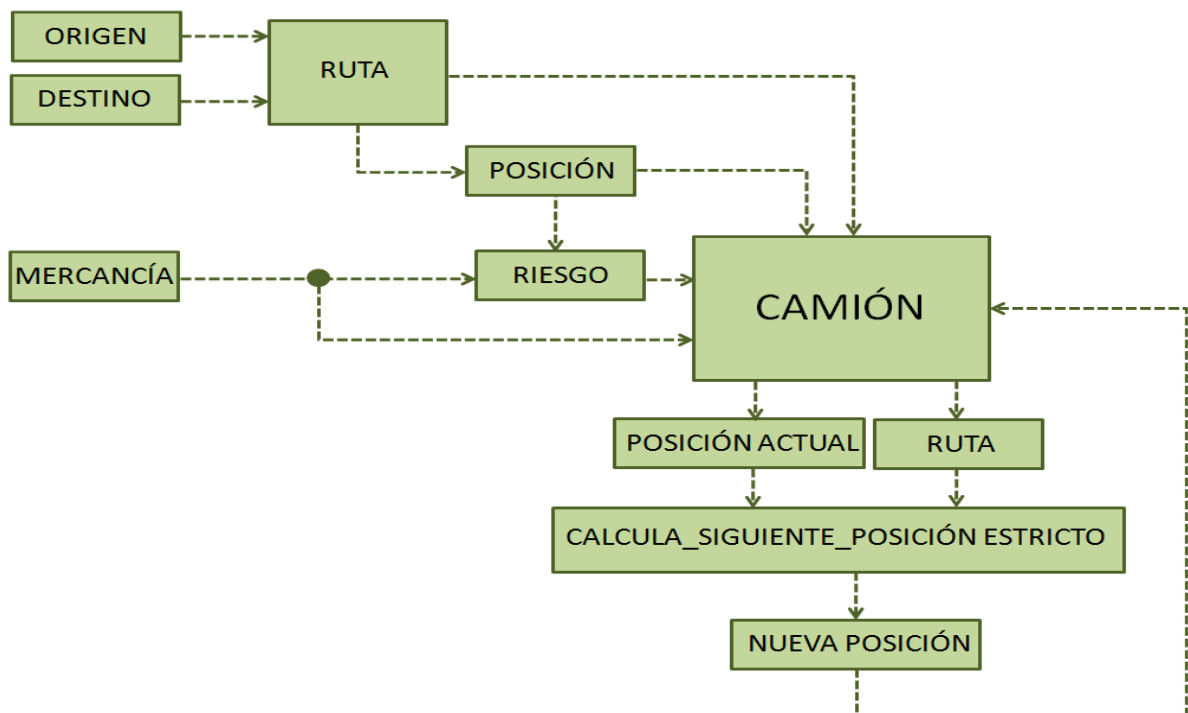


Figura 49 - Esquema básico de la aplicación para simular los vehículos

En la figura 49 podemos observar un diagrama en el que se muestran todos los datos que se emplean en la generación de los camiones simulados. Por un lado, al vehículo se le va a asignar una ciudad origen y una ciudad destino, entre las que se trasladará siguiendo una ruta óptima. Además, dentro de la ruta, se le asignará una posición inicial aleatoria, de forma que al lanzar el simulador se elimina un efecto transitorio que se daría si todos los vehículos simulados comenzarán desde el origen de su ruta, que provocaría una densidad de tráfico en torno a las grandes ciudades irrealmente alta.

También se le deberá asignar al vehículo un tipo de mercancía de los tres presentes en este proyecto, que coinciden con los del proyecto de Á. Arranz Zazo (2013), de forma que a partir del tipo de mercancía y la posición inicial del vehículo se asocie un valor de riesgo inicial al camión.

Una vez generado el vehículo simulado, mediante sucesivas llamadas a la función de seguimiento, la analizada en el capítulo 6, se actualiza la posición a lo largo de la ruta para dar forma al simulador de vehículos en tiempo real.

7.3. Nodos origen y destino del mapa de Castilla y León.

A la hora de simular varios vehículos simultáneamente, se han seleccionado una serie de ciudades o nodos de la red para que sirvan de orígenes y destinos de los camiones. Los criterios seguidos para elegir dichos nodos son dos principalmente, lo cual tiene como resultado que existan dos tipos de nodos en la red del presente proyecto.

7.3.1. Municipios seleccionados por importancia demográfica o administrativa.

Dentro de este grupo se han incluido ciudades elegidas por tener un gran número de habitantes, en comparación con otras poblaciones de Castilla y León, o por importancia administrativa dentro de la Comunidad Autónoma de Castilla y León, como son las capitales de provincia.

En la tabla 25 aparece el ranking de los 20 municipios más poblados de Castilla y León según datos del Instituto Nacional de Estadística del año 2011.

Puesto	Municipio	Provincia	Número de habitantes
1º	Valladolid	Valladolid	313.437
2º	Burgos	Burgos	179.251
3º	Salamanca	Salamanca	153.472
4º	León	León	132.744
5º	Palencia	Palencia	81.552
6º	Ponferrada	León	68.508
7º	Zamora	Zamora	65.525
8º	Ávila	Ávila	59.008
9º	Segovia	Segovia	55.220
10º	Soria	Soria	39.987
11º	Miranda de Ebro	Burgos	38.930
12º	Aranda de Duero	Burgos	33.229
13º	San Andrés del Rabanedo	León	31.562
14º	Laguna de Duero	Valladolid	22.334
15º	Medina del Campo	Valladolid	21.607
16º	Benavente	Zamora	19.187
17º	Villaquilambre	León	18.023
18º	Santa Marta de Tormes	Salamanca	14.853
19º	Béjar	Salamanca	14.511
20º	Arroyo de la Encomienda	Valladolid	14.461

Tabla 25 - Ranking de municipios más poblados de Castilla y León en 2011

Dentro de este grupo, se incluyen 13 nodos que destacan por su importancia administrativa y/o demográfica. Se engloban aquí las 9 capitales de provincia, además de Ponferrada (sexta posición en el ranking), Miranda de Ebro (undécimo puesto en la lista), Aranda de Duero (duodécima posición) y Benavente (posición decimosexta del ranking).

Hay que mencionar que en este grupo no se han incluido aquellas poblaciones que forman parte del área metropolitana de otras ciudades más grandes ya incluidas en la red de nodos, que pese a que por sí mismas tienen un peso demográfico importante, no tiene sentido incluirlas en una red de nodos de comunicación por su proximidad con otros nodos. En la lista de la tabla 25, son ejemplos de municipios que pertenecen al alfoz de otras son Laguna de Duero y Arroyo de la Encomienda, que se ubican en el área metropolitana de Valladolid; San Andrés del Rabanedo y Villaquilambre, que pertenecen al alfoz de León o Santa Marta de Tormes que se ubica en los alrededores de Salamanca. Todas las ciudades mencionadas están en un radio de menos de 20 kilómetros de la capital, por lo que no tiene mucho sentido incluirlas como tal en la red.

Por otra parte, la decisión entre incluir Benavente en lugar de Medina del Campo, que tiene un mayor número de habitantes, responde a que la ciudad zamorana es un nodo en la red de carreteras de la red de Castilla y León, al ser la ciudad en la que se juntan la ruta de la plata, A-66 (que une Benavente con León, y más concretamente Castilla y León con Asturias), la A-52, que une Castilla y León con Ourense y Vigo, y la autovía A-6, que comunica Madrid y A Coruña. Además, Benavente posee una serie de polígonos industriales e industrias a su alrededor que hace que su inclusión como nodo en la red del presente proyecto esté más que justificada.

Así, la totalidad de ciudades seleccionadas para este grupo, elegidas por su importancia demográfica, se muestran en la tabla 26, en la que además se ofrece un pequeño detalle sobre los motivos por los que se han seleccionado para la red de nodos del presente proyecto:

Municipio	Importancia del nodo en la red
Valladolid	Capital de la CyL y de la provincia, ciudad más poblada de la comunidad. Casi en el centro geográfico de CyL. Importantes industrias como Renault-España, Michelin, Iveco, Lauki, Queserías Entrepinares, etc.
Burgos	Capital de provincia, segunda mayor población de CyL, ciudad de carácter industrial, unas 1.500 empresas en sus polígonos industriales.
Salamanca	Capital de provincia, tercera ciudad más poblada de CyL. Las dos empresas más importantes por facturación de la ciudad son Laboratorios Intervet, fabricante de vacunas veterinarias, y S.A. Mirat, fabricante de abonos y fertilizantes.
León	Capital de provincia, cuarta mayor población de CyL, experimentando cierto auge industrial actualmente. Empresas de alta tecnología como Indra, HP, SAP, etc. Tradicionalmente, industrias metalúrgica, química, maquinaria, alimentaria, cerámica, vidrio, papel, textil, etc.
Palencia	Capital de provincia, quinta mayor población e importante centro industrial de CyL, donde destaca la industria del automóvil y auxiliares, con la presencia de Renault-España, así como la industria alimentaria y la de los materiales de construcción.
Zamora	Capital de provincia, séptima mayor población de CyL. Bajo tejido industrial, salvo pequeñas muestras de la industria química y metalúrgica.
Ávila	Capital de provincia, octava mayor población de CyL. Dos polígonos industriales, destaca una fábrica de camiones de la empresa Nissan.
Segovia	Capital de provincia, novena mayor población de CyL, importancia de la industria alimentaria, especialmente la de los embutidos cárnicos, así como la industria de la madera y la industria metalúrgica.
Soria	Capital de provincia, décima ciudad más poblada de CyL. Importancia su situación geográfica en la parte oriental de CyL, para que los vehículos cubran la totalidad de la red de carreteras de CyL.

Ponferrada	Sexta mayor población de CyL, ciudad eminentemente industrial, donde destaca CUPA, que se dedica a la producción de pizarras para cubiertas, así como la fabricación de aerogeneradores, siderurgia, vidrio. Además, también tiene importancia la industria minera y la central térmica de Compostilla II, en la localidad cercana de Cubillos del Sil (León).
Miranda de Ebro	Undécima mayor población de CyL, tejido industrial muy desarrollado por su cercanía con el País Vasco y La Rioja. Tiene importancia la industria agroalimentaria, siderúrgica y energética, así como la aeronáutica.
Aranda de Duero	Duodécima mayor población de CyL, importante centro industrial, donde destacan el Grupo Leche Pascual, GlaxoSmithKline, así como, en los últimos años, la fabricación de torres para aerogeneradores.
Benavente	Decimosexta ciudad más poblada de CyL, importancia por ser la confluencia de la A-6, A-66 y A-52. Además, destaca la industria alimentaria, en particular la producción de harinas, quesos y productos vinícolas, así como la fabricación de polímeros.

Tabla 26 – Municipios seleccionados para la red por su importancia administrativa o demográfica

7.3.2. Municipios seleccionados porque representan el límite con otros territorios.

Por otra parte, paralelamente al estudio demográfico de los municipios castellanoleoneses, se ha realizado un estudio de las principales vías de comunicación por carretera de Castilla y León con otras comunidades autónomas limítrofes, o con Portugal.

Durante la aplicación de simulación del presente proyecto, se ha querido simular no sólo el tráfico interior entre puntos de la comunidad, sino simular vehículos que representen transporte de mercancías entre comunidades o internacional, rutas en las que el origen y/o el destino se encuentre fuera de los límites de la Comunidad.

Dado que para el presente proyecto sólo se dispone de mapa de carreteras exclusivamente de Castilla y León, la solución adoptada es introducir en la red de nodos de comunicación algunos municipios que, aunque no reúnan cualidades por sí mismas para entrar en la lista de nodos, estén situadas en las proximidades de las principales carreteras que comunican con las capitales principales de los territorios colindantes. A lo largo y ancho del mapa, las vías de comunicación seleccionadas para el presente proyecto son las que aparecen en la tabla 27.

Carretera	Territorio colindante	Zonas accesibles desde el territorio	Provincia límite
AP-6	Comunidad de Madrid	Madrid, y autovías radiales (dirección Valencia, Andalucía, etc.)	Segovia

A-66	Extremadura	Plasencia, Cáceres, Mérida, Sevilla, Cádiz, etc.	Salamanca
A-62	Portugal	Guarda, Viseu, Aveiro, etc.	Salamanca
A-52	Galicia (dirección Rías Baixas)	Ourense, Vigo, Pontevedra, Braga, Porto, etc.	Zamora
A-6	Galicia (dirección Rías Altas)	Lugo, A Coruña, etc.	León
AP-66	Asturias	Oviedo, Gijón, Avilés, etc.	León
A-67	Cantabria	Reinosa, Santander, etc.	Palencia
AP-1	País Vasco	Vitoria-Gasteiz, Bilbao, Donostia, Logroño, Francia, etc.	Burgos
N-122	Aragón	Zaragoza, Huesca, Lleida, Barcelona, etc.	Soria

Tabla 27 - Tabla de las principales vías de comunicación con otros territorios colindantes

Tal y como observamos, existen un total de nueve vías de comunicación con otros territorios, que pueden tomar los vehículos que partan desde Castilla y León y se dirijan a uno de los destinos de la tercera columna de la tabla 27, o bien camiones que vengan desde uno de esos lugares de procedencia y tengan como destino una ciudad de Castilla y León.

Tal y como se ha planteado este apartado del presente proyecto, para seleccionar los municipios que se van a añadir a la red de nodos de comunicación, deberemos buscar municipios próximos a las carreteras de la primera columna de la tabla 27 y a la frontera entre el territorio de la segunda columna y la provincia de la cuarta columna de la tabla 27 al mismo tiempo.

Los municipios que se han añadido a la red de comunicaciones que forman parte de este grupo aparecen en la tabla 28.

Municipio	Provincia	Importancia del nodo en la red
San Rafael	Segovia	Representa la comunicación con la comunidad de Madrid a través de la AP-6.
Béjar	Salamanca	Representa la comunicación con Extremadura a través de la A-66.
Ciudad Rodrigo	Salamanca	Representa la comunicación con Portugal a través de la A-62.
Puebla de Sanabria	Zamora	Representa la comunicación con la zona sur de Galicia a través de la A-52.
Ponferrada	León	Representa la comunicación con la zona norte de Galicia a través de la A-6.
Caldas de Luna	León	Representa la comunicación con Asturias a través de la AP-66.

Aguilar de Campoo	Palencia	Representa la comunicación con Cantabria a través de la A-67.
Miranda de Ebro	Burgos	Representa la comunicación con el País Vasco a través de la AP-1
Ágreda	Soria	Representa la comunicación con Aragón a través de la N-122.

Tabla 28 - Municipios incorporados a la red de nodos de comunicación representando el límite con otros territorios

7.3.3. Lista total de nodos de comunicación.

A la hora de elaborar la lista definitiva de nodos de comunicación para el simulador de vehículos del presente proyecto, se combinarán los dos grupos de los apartados anteriores. Tal y como vimos, el primer grupo tenía un total de 13 nodos, mientras que el segundo grupo tenía 9 nodos.

No obstante, es necesario destacar que Ponferrada y Miranda de Ebro, reúnen características para estar en ambos grupos, ya que son al mismo tiempo ciudades que representan vías de comunicación con otros territorios y ciudades que tienen una importancia demográfica y administrativa suficiente como para estar en la lista.

Por lo tanto, los dos grupos de los apartados anteriores al combinarse dejan la lista en un total de veinte nodos, que aparecen en la tabla 29, ordenados alfabéticamente, acompañados del índice y nombre que les corresponde en todas las funciones de la aplicación.

Índice	Municipio	Denominación en el programa
1	Ágreda	Agreda
2	Aguilar de Campoo	Aguilar
3	Aranda de Duero	Aranda
4	Ávila	Avila
5	Béjar	Bejar
6	Benavente	Benavente
7	Burgos	Burgos
8	Caldas de Luna	Caldas
9	Ciudad Rodrigo	Crodrigo
10	León	Leon
11	Miranda de Ebro	Miranda
12	Palencia	Palencia
13	Ponferrada	Ponferrada
14	Puebla de Sanabria	Puebla
15	Salamanca	Salamanca

16	San Rafael	SanRafael
17	Segovia	Segovia
18	Soria	Soria
19	Valladolid	Valladolid
20	Zamora	Zamora

Tabla 29 - Lista total de nodos de comunicación para la aplicación de simulación de vehículos en tiempo real

7.3.4. Función para mostrar la red de comunicación.

Durante el presente proyecto, se ha desarrollado una función para mostrar los nodos de la red de comunicación, para poder estudiar sobre el mapa si los nodos están correctamente repartidos a lo largo y ancho del territorio, de forma que esté cubierta la mayor parte del territorio de la comunidad.

La llamada a la función para mostrar las ciudades es la siguiente:

```
[ ] = muestra_ciudades('columnas.dat','filas.dat','mapa_rgb_1.tif');
```

Observamos que la función tiene tres cadenas de caracteres como argumentos, que son los nombres de tres ficheros. Los dos primeros ficheros se han creado de manera que tengan un valor en la primera línea que contenga el número de nodos a representar, es decir, veinte para el presente proyecto, y a continuación la coordenada fila o columna, según qué fichero sea, de cada una de las ciudades, cada una en una nueva línea, por orden alfabético, tal y como se muestran en la tabla 29.

El contenido del fichero 'columnas.dat' se muestra a modo de ejemplo a continuación:

```
20
5698
3360
3896
2842
1690
1902
3908
1768
942
2024
4658
```

3061
994
913
1867
3394
3461
5151
2815
1803

El tercer fichero contiene la imagen de tipo TIF que se va a emplear para mostrar las ciudades sobre él. En el desarrollo del algoritmo, se abren los dos ficheros de coordenadas, almacenándose en un vector, además de almacenar la imagen TIF en una matriz para su manipulación.

Una vez cargada toda la información, se recorren los vectores de coordenadas y se van marcando sobre el mapa los nodos de la red de comunicaciones. En la figura 50 se muestra el mapa generado por esta función, con los nombres de cada uno de los nodos serigrafiados.

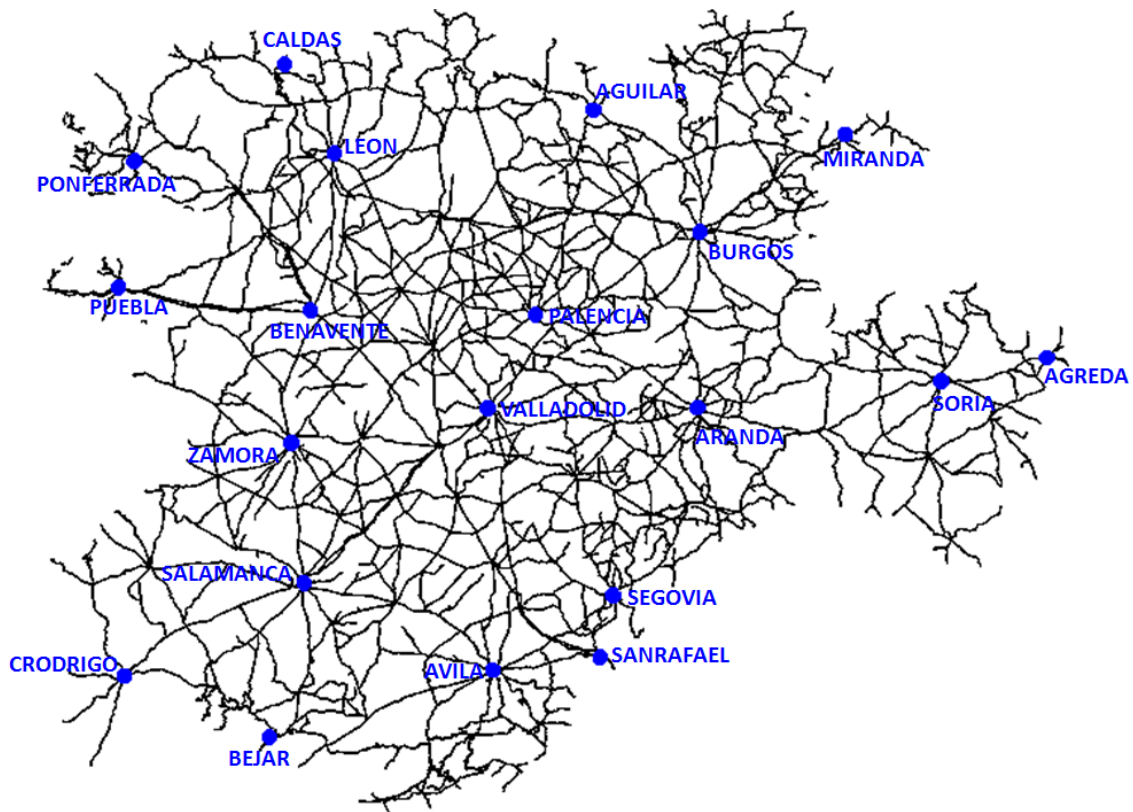


Figura 50 - Nodos de la red de comunicaciones para la aplicación de simulación de vehículos

Tal y como podemos observar, hemos conseguido mediante la elección de nodos cubrir más o menos homogéneamente toda la superficie de la comunidad autónoma de Castilla y León, de forma que cuando se generen rutas entre estos nodos se van a cubrir prácticamente todas las carreteras de la red. Este era uno de los objetivos de la elección de los nodos, conseguir que, a la hora de arrancar simulaciones con un número suficiente de camiones, el reparto de éstos por el territorio sea uniforme, y se acerque lo más posible a un tráfico real de un instante aleatorio.

7.3.5. Implementación de la lista de nodos en el algoritmo de cálculo de rutas.

Partiendo de la lista de municipios válidos como origen y destino de los vehículos, se ha realizado una pequeña modificación de la función de planificación de rutas desarrollada en el capítulo 5, `calcula_ruta`, para que se calculen rutas entre nodos de la red automáticamente únicamente introduciendo el nombre de los nodos.

Para ello, se ha generando una serie de veinte ficheros, cada uno con el nombre de un nodo de la red de comunicaciones, de forma que contienen las coordenadas fila y columna de su ciudad correspondiente. Todos se han almacenado en un directorio llamado `ciudades`, dentro del directorio raíz del programa, con extensión de fichero de datos (`.dat`).

A modo de ejemplo, se muestra el contenido del fichero 'Valladolid.dat' a continuación:

```
2483
2815
```

Lo que hace la función `calcula_ruta`, a partir de los nombres de los nodos origen y destino de la ruta, es realizar una llamada a una nueva función, `lee_coordenadas`, para leer las coordenadas de la posición inicial y objetivo del algoritmo de cálculo de rutas, de la manera siguiente:

```
[fil,col]=lee_coordenadas(nombre_ciudad);
```

Lo que hace la función para leer coordenadas es añadir al nombre de la ciudad dos cadenas de caracteres, para indicar su ubicación dentro del directorio raíz del programa y para indicar su extensión, con las siguientes líneas de código:

```
str_ubicacion='./ciudades/';  
str_extension='.dat';  
nfichero=[str_ubicacion nombre_ciudad str_extension];
```

De esta forma, la cadena de caracteres 'Valladolid', se transforma en el nombre del fichero donde se encuentran las coordenadas del nodo:

```
'./ciudades/Valladolid.dat'
```

A partir de este nombre de fichero, sencillamente lo abre, extrayendo las coordenadas (*fil, col*), que devuelve a la función *calcula_ruta*.

7.4. Gestión de rutas en ficheros.

7.4.1. Justificación.

Una vez creada la lista de nodos de la red de comunicación, hemos acotado el número de rutas distintas que se van a utilizar en el simulador de vehículos. Dado que son 20 nodos, y que cada uno de ellos puede ser origen de una ruta que se dirija a cualquiera de los otros 19 nodos, el número total de rutas que se deberán calcular es de $20 \cdot 19 = 380$ rutas diferentes.

Obviamente, si atendemos a los tiempos aproximados de ejecución del algoritmo de planificación de rutas, no es viable ejecutarlo para calcular cada una de las rutas cada vez que se lance el simulador, ni tampoco utilizarlo en tiempo real. Es necesario adoptar una solución que reduzca la carga computacional del simulador, al mismo tiempo que evite tener que generar las mismas rutas una y otra vez. La solución es almacenar las rutas de manera permanente en el disco duro del ordenador, en forma de ficheros.

7.4.2. Rutas del presente proyecto como rutas de transporte de mercancías peligrosas.

Llegados a este punto, es necesario realizar un apunte importante. En la aplicación de simulación de vehículos de transporte de mercancías peligrosas del presente proyecto, se considerarán como válidas para el transporte de mercancías peligrosas absolutamente todas las carreteras que forman parte de los mapas utilizados, es decir, todas las vías interurbanas y travesías, ya sean autovías y autopistas, o carreteras convencionales de diferentes niveles, desde carreteras locales hasta nacionales.

No obstante, si consultamos el Boletín Oficial del Estado número 29, del 3 de febrero de 2014, que contiene la resolución del 24 de enero de 2014 de la Dirección General de Tráfico que establece las medidas especiales de regulación del tráfico durante el año 2014, podemos encontrar la llamada RIMP, o Red de Itinerarios para Mercancías Peligrosas, que son las vías permitidas para los vehículos de transporte de mercancías peligrosas, que tienen prohibido transitar por otras vías salvo que sea estrictamente imprescindible, como es el caso de para alcanzar los puntos de carga y descarga de mercancías.

En la figura 51 aparece la Red de Itinerarios para Mercancías Peligrosas establecida para el año 2014 para toda España.

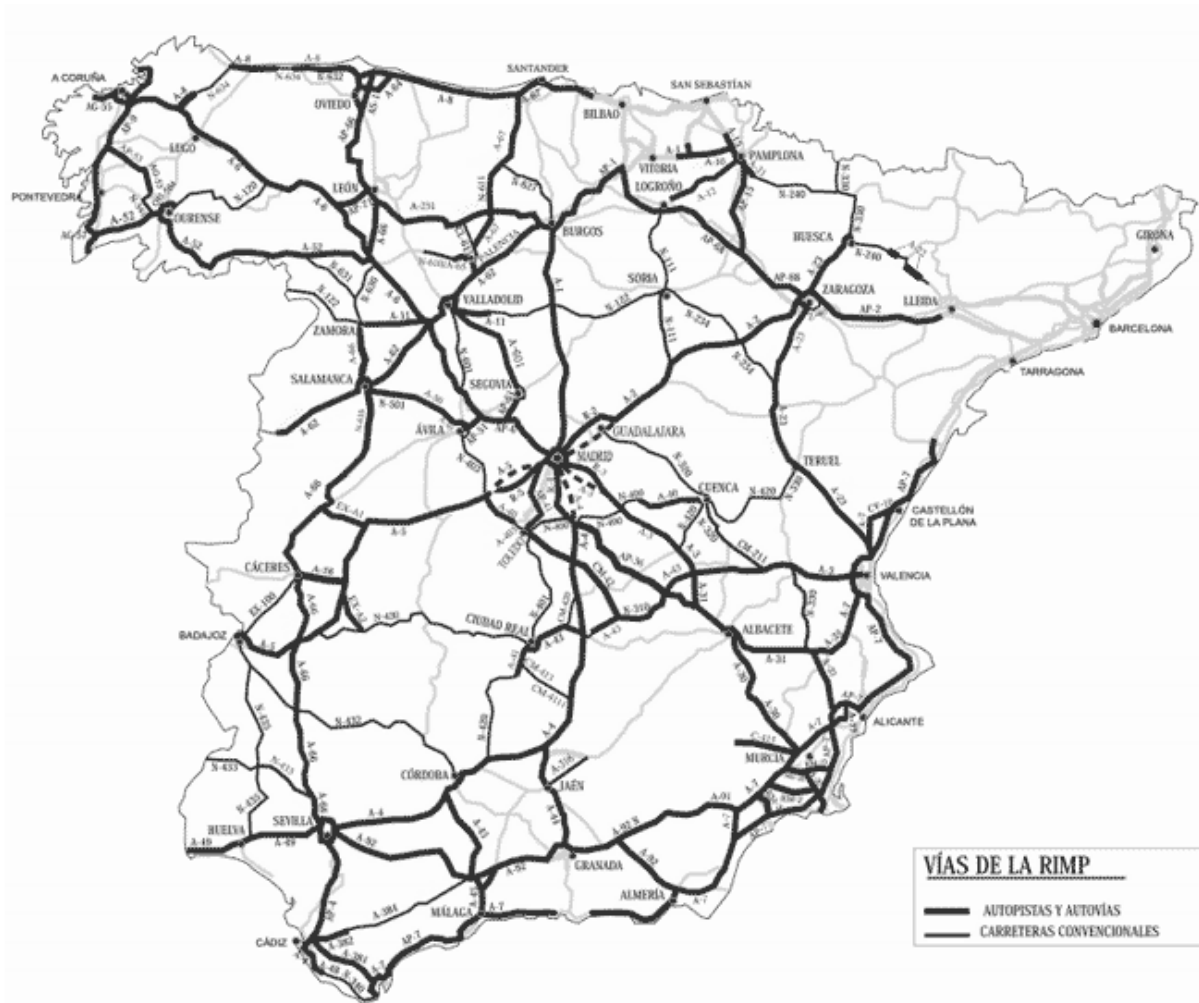


Figura 51 - Red de Itinerarios para Mercancías Peligrosas en 2014

Así, durante este proyecto se han generado una serie de rutas que pueden no ser válidas por transitar por zonas no pertenecientes a la RIMP, pero existen una serie de condicionantes que justifican que esto sea así:

1. Los mapas de riesgo generados durante el proyecto de Á. Arranz Zazo (2013), que sirven como base de consulta del presente proyecto, no solo incluyen las carreteras de la RIMP, sino todas las carreteras de Castilla y León. Así, lo razonable es que este proyecto, en su simulador, explote al máximo la capacidad de estos mapas y utilice todas las carreteras posibles.
2. Dado que esta es una simulación, sin riesgo real para las personas, el medio ambiente o la economía, parece interesante emplear la máxima variedad posible de carreteras y vías de comunicación en las rutas, enriqueciendo así el

análisis, posibilitando que se extraiga, por ejemplo, el riesgo que supondría incluir una cierta carretera en el RIMP; o comprobar claramente que las autovías presentan menos riesgos para un único camión que las carreteras locales, por ejemplo, surtiendo de datos a la elaboración de futuras RIMP.

3. Cuando se planifican las rutas utilizando el criterio de tiempo óptimo, dado que las vías más rápidas son las autovías y autopistas, que forman parte de la RIMP, las rutas resultantes aproximan de una manera bastante exacta la ruta que seguiría un vehículo de transporte de mercancías peligrosas real.

No obstante, en caso de que estas razones no fueran suficientes y se deseara realizar un simulador únicamente con vehículos de transporte de mercancías peligrosas que transcurran por vías pertenecientes a la RIMP, simplemente bastaría con emplear el mapa de la RIMP para planificar las rutas de los vehículos.

7.4.3. Funciones para la gestión de ficheros de rutas.

Durante el presente proyecto, se han desarrollado toda una serie de funciones que permiten gestionar rutas en ficheros, para poder utilizarlas en tiempo real sin necesidad de recurrir al algoritmo de planificación cada vez que sea necesario su uso.

Durante este subapartado, se detallarán todos los algoritmos empleados para la planificación, almacenamiento, referenciación y lectura de las rutas en ficheros.

7.4.3.1. Función para generar todas las combinaciones posibles entre nodos de la red.

El primer paso a la hora de obtener las rutas será crear un algoritmo que automáticamente llame a la función de planificación de rutas para cada una de las 380 posibles combinaciones de orígenes y destinos de la red de nodos de comunicación.

Esta es la función `genera_ficheros_rutas`, cuya llamada se realiza con la siguiente sentencia:

```
genera_ficheros_rutas (fcol, ffil, fnrutas, ficheroTIF, modo)
```

Los dos primeros argumentos de la función son los ficheros donde se encuentran las coordenadas columna y las coordenadas fila de los nodos de la red de comunicación, ya empleados en la función para mostrar los nodos en el mapa explicada en el apartado 7.3.4. Función para mostrar la red de comunicación. de la presente memoria.

El tercer argumento, `fnrutas`, es un fichero que contiene los nombres que van a llevar los 380 ficheros que se generen con las rutas entre los nodos. En el presente proyecto, este argumento hará referencia al fichero 'Nombres_ficheros.dat', que es un fichero generado manualmente, con las rutas alfabéticamente ordenadas en función del origen, con la estructura:

```
./rutas/NodoOrigen_NodoDestino.dat
```

El cuarto argumento es el mapa formato TIF sobre el que se va a calcular la ruta, que para el presente proyecto ha sido el mapa 'carr_homog.tif'. Por último, el último parámetro es, al igual que en el algoritmo de cálculo de rutas, el criterio a optimizar en la planificación de la ruta, o bien el tiempo o bien la distancia.

En el desarrollo del algoritmo, se cargan primeramente el mapa homogéneo para generar un mapa binario, así como también el mapa de tipos de carreteras.

Además, se cargan las coordenadas de todos los nodos de la red de comunicaciones. Se abren además el fichero con los nombres de los ficheros de rutas.

Por último, en un bucle, se llama a una nueva función de planificación, `genera_ruta_origenes_destinos`, un modificado de la función de planificación desarrollada en el Capítulo 5 del presente proyecto, que se analizará en el siguiente subapartado.

El bucle de servicio del algoritmo para generar todas las posibles combinaciones entre nodos de la red es el siguiente:

```
%Bucle de servicio, generando la ruta con origen i y destino j
for i=1:num_ciudades
    for j=1:num_ciudades
```

```

        %Origen y destino deben ser diferentes
        if j~=i

            %Obtención el nombre del fichero a generar
            nfichero=fgetl(rutasID);

            %Llamada a la función para crear el fichero
            genera_ruta_origenes_destinos(filas(i),...
            ...columnas(i),filas(j),columnas(j),mapa,...
            ...mapa_tipo,nfichero,param);

            %Ruta desde i hasta j completada
            disp(sprintf('Ruta desde %d hasta %d ...
            ...completada, con nombre %s',i,j,nfichero));
        end
    end
end
end

```

7.4.3.2. Función para la planificación de todas las rutas entre nodos de la lista.

En este apartado se va a estudiar la función `genera_ruta_origenes_destinos`, un modificado de la función `calcula_ruta` desarrollada en el capítulo 5, omitiendo toda la parte gráfica y la de la carga de mapas a partir de imágenes, que ya está hecha en la función `genera_ficheros_rutas` del apartado anterior.

La función `genera_ruta_origenes_destinos` recibe como argumentos las coordenadas del origen y destino de la ruta, así como la matriz binaria correspondiente al mapa sobre el que se calcularán las rutas, la matriz con el mapa de tipos de carreteras, el nombre del fichero que va a contener la ruta que se genere, y el parámetro que determina si el criterio de optimalidad es el de distancia o el de tiempo.

El bucle para calcular la ruta óptima es idéntico al de la función `calcula_ruta`, pero el tratamiento que se le da a la información obtenida una vez alcanzada la posición objetivo es diferente en este caso. En lugar de llamar a una función para mostrar la ruta, se llama a la función `almacena_ruta_archivo`, que se desarrollará en el apartado siguiente.

7.4.3.3. Función para el almacenamiento de rutas en ficheros.

La llamada a la función `almacena_ruta_archivo` se realiza con la siguiente sentencia:

```
almacena_ruta_archivo(nfichero,ruta,tamaño_ruta);
```

Tal y como se puede observar, la llamada tiene tres argumentos, que son el nombre del fichero a generar, la ruta que se desea guardar y el tamaño de dicha ruta. Una vez dentro de la función, primeramente se crea el fichero para escritura, con la instrucción:

```
fileid = fopen(nfichero,'w+');
```

En la primera línea del fichero se almacenará el tamaño de la ruta, para facilitar su posterior lectura. A continuación, se va almacenando, cambiando a una nueva línea cada vez, la coordenada fila de la posición 1, la coordenada columna de la posición 1, la coordenada fila de la posición 2, la coordenada columna de la posición 2, y así sucesivamente hasta llegar al final de la ruta.

```
while(i<=profundidad)
    fprintf(fileid,'%u \n%u \n',ruta(i).fila,ruta(i).columna);
    i=i+1;
end
```

Por último, se cierra el fichero con la instrucción `fclose`.

7.4.3.4. Función para leer la ruta a partir de un fichero.

Para leer la ruta, se ha desarrollado la función `lee_ruta_fichero`, que realiza el proceso inverso a la función `almacena_ruta_archivo`. La llamada a la función `lee_ruta_fichero` tiene la siguiente sintaxis:

```
[ruta,profundidad]=lee_ruta_fichero(nfichero)
```

La función recibe como argumento el nombre del fichero que debe abrir en una cadena de caracteres, y devuelve el vector `ruta` y su tamaño. Una vez dentro del algoritmo, en primer lugar se abre el fichero en modo sólo lectura, con la instrucción:

```
fileid = fopen(nfichero,'r');
```

A continuación, se realiza el mismo bucle que en el caso de la función de almacenamiento, con la diferencia de que en esta ocasión la información se carga desde el fichero a variables del programa, y no a la inversa como ocurre en la función anterior.

Por último, se cierra el fichero con la instrucción `fclose`.

7.4.3.5. Función para cargar una tabla para indexar rutas.

Para la aplicación de generación de vehículos, va a ser necesaria una tabla de consulta para, a partir del nodo origen y el nodo destino, obtener el nombre del fichero. Así, el objetivo es cargar en una colección, que es una estructura de datos de MATLAB muy similar a un vector pero preparado para cadenas de caracteres, los nombres ordenados alfabéticamente de todos los ficheros de rutas, es decir, el contenido del fichero 'Nombres_ficheros.dat'.

La función para generar la tabla de indexado de ficheros de rutas se denomina `carga_rutas`, y tiene la siguiente llamada:

```
[colección_rutas] = carga_rutas(nfichero, num_ciudades);
```

La función recibe como argumento el fichero con los nombres de los ficheros de rutas, así como el número de nodos de la red nodos de comunicación, y devuelve la colección con los nombres de los ficheros.

Dentro de la función, se abre el fichero con los nombres de las rutas, y se establece el número de elementos que hay que leer del fichero, a partir de la fórmula:

```
tamano_vector = num_ciudades*(num_ciudades-1);
```

A continuación, se recorre la colección, almacenando cada uno de los nombres de ficheros ordenadamente. La única diferencia entre un vector y una colección en MATLAB es que el índice se coloca entre llaves, {}, en lugar de entre paréntesis, ().

```
for i=1:tamano_vector
    coleccion_rutas{i}=fgetl(fileid);
end
```

Por último, se cierra el fichero con los nombres de los ficheros de rutas.

7.4.4. Estructura de información obtenida.

A partir de todas las funciones generadas, el conjunto de información en ficheros que tenemos para utilizar en el simulador en tiempo real es:

- Dos ficheros, 'filas.dat' y 'columnas.dat', que contienen las coordenadas de todos los municipios elegidos como nodos de la red.
- El fichero 'Nombres_ficheros.dat', que contiene los nombres de todos los ficheros con todas las rutas posibles entre los diferentes nodos de la red. El contenido de este fichero se puede cargar al espacio de variables del programa mediante la función `carga_rutas`
- Un directorio llamado `rutas`, con un total de 380 ficheros, con la estructura 'origen_destino.dat', que contienen las 380 rutas posibles entre los nodos de la red. Se han generado llamando a la función `genera_ficheros_rutas`, con un tiempo aproximado de ejecución del algoritmo de unas tres horas y media para los veinte nodos del presente proyecto.

Al ejecutar la función, se muestra en pantalla las rutas que se van calculando, así como el tiempo invertido en cada una de ellas:

```
Elapsed time is 21.888744 seconds.
Ruta desde 13 hasta 7 completada, con nombre
./rutas/Ponferrada_Burgos.dat
Elapsed time is 1.000685 seconds.
Ruta desde 13 hasta 8 completada, con nombre
./rutas/Ponferrada_Caldas.dat
```

Es necesario apuntar que para el presente proyecto, todas las rutas generadas y almacenadas para el simulador en tiempo real se han calculado utilizando el criterio de distancia mínima, para intentar cubrir el máximo porcentaje posible

de territorio del mapa con las rutas, coherentemente con los objetivos perseguidos apuntados en el apartado 7.4.2. Rutas del presente proyecto como rutas de transporte de mercancías peligrosas..

7.5. Generación de vehículos.

En este subapartado se mostrará de qué manera se generan los vehículos simulados, junto con la información que llevan asociada. Se ha desarrollado una función para crear un vehículo, al que se asocia un número de GPS, una mercancía, y una ruta, tal y como se haría si el vehículo fuera un camión de transporte de mercancías peligrosas real.

7.5.1. Estructura de datos a generar.

Para almacenar la información asociada a un camión, se ha generado en MATLAB la estructura de datos 'camion', cuyos campos están recogidos en la tabla 30.

	Campos	Descripción
CAMION	origen	Número correspondiente al nodo de la red de comunicaciones origen.
	destino	Número correspondiente al nodo de la red de comunicaciones destino.
	ruta	Almacena las posiciones sucesivas de la ruta que sigue el vehículo.
	profundidad	Tamaño de la ruta.
	indice	Marca la posición actual del vehículo dentro de la ruta.
	recorrido	Distancia recorrida a partir de la posición apuntada por el campo indice siguiendo la ruta.
	grupo	Grupo al que pertenece la mercancía peligrosa transportada, según la clasificación de CANUTEC.
	riesgo	Es el valor de riesgo asociado al camión, en función de su posición y su mercancía.

Tabla 30 - Estructura de datos para los camiones simulados

Esta estructura de información contiene todos los datos necesarios para simular vehículos en la red de carreteras en tiempo real. Si comparáramos esta estructura de datos con la que supondría un camión real, no simulado, los campos índice y recorrido se obtendrían a partir de una señal GPS, el riesgo sería un valor calculado por la aplicación del presente proyecto, y el resto de campos son datos relativos al propio transporte, de forma que se podrían añadir más campos, como nombre del conductor,

empresa propietaria de la mercancía, empresa propietaria del vehículo, volumen de la mercancía, etc.

Durante la simulación, se generará un vector cuyos elementos se adapten al marco de la estructura de datos camion, de forma que el índice utilizado para referirse a cada uno de los elementos es su identificador único, de forma que en el presente proyecto actuará como si de un número de identidad del GPS se tratase.

7.5.2. Función para crear un vehículo simulado.

Se ha establecido una función que crea aleatoriamente un vehículo de transporte de mercancías peligrosas, asignándole una mercancía, una ruta y una posición aleatorias. La llamada a dicha función es la siguiente:

```
[camion] = genera_camion(coleccion_rutas, num_ciudades, pgrupo2,...  
...pgrupo6, mapg2, mapg6, mapg16)
```

Tal y como se puede observar, la función genera_camion recibe como argumentos la colección que contiene los nombres de todos ficheros con las rutas entre los nodos de la red, el número de nodos que tiene la red; los porcentajes respectivos de mercancías del grupo 2 y del grupo 6 circulando por la red de carreteras (se considera que el restante hasta el 100% de los vehículos llevan una mercancía del grupo 16), así como los mapas de riesgo generados por Á. Arranz Zazo durante su proyecto (2013) para los tres grupos de mercancías peligrosas seleccionados. La función devuelve la variable camión, generada aleatoriamente, y que se adapta al marco de la estructura de datos del apartado anterior.

Dentro de la función para generar un vehículo, el primer paso es seleccionar aleatoriamente dos números enteros aleatorios entre el 1 y el 20, que deben ser distintos y que servirán para seleccionar el origen y el destino:

```
%En primer lugar se crea el origen y el destino  
origen=0;  
destino=0;
```

```
%Se seleccionan aleatoriamente el origen y el destino, que deben ser  
distintos
```

```

while(destino==origen)
    origen=randi(num_ciudades);
    destino=randi(num_ciudades);
end

```

Una vez se ha elegido el origen y destino, se almacenará en los correspondientes campos de la estructura de datos, y se recurrirá a la variable `coleccion_rutas` para localizar el fichero del que se debe cargar la ruta. En función de los números de origen y destino, se obtiene el índice que se va a utilizar para acceder a la colección de información:

```

if(origen<destino)
    indice=(origen-1)*(num_ciudades-1)+destino-1;
else
    indice=(origen-1)*(num_ciudades-1)+destino;
end

```

A continuación, se va a llamar a la función `lee_ruta_fichero` con el nombre obtenido al buscar en el elemento `indice` de la colección de rutas, para obtener la ruta y su profundidad, que son almacenadas en los campos adecuados de la estructura de datos. Además, se genera una posición inicial aleatoria dentro de la ruta para, tal y como se dijo en el apartado 7.2. Esquema básico de la aplicación., evitar concentraciones de tráfico irrealmente altas en torno a los nodos de la red en los primeros instantes de simulación. La variable `recorrido` siempre tendrá un valor nulo en el instante inicial:

```

%Llamada a la función para leer la ruta del fichero correspondiente
[camion.ruta,camion.profundidad] = lee_ruta_fichero...
...(coleccion_rutas{indice});

%La posición inicial será un punto aleatorio dentro de la ruta
camion.indice = randi(camion.profundidad-1);
camion.recorrido = 0;

```

Una vez se ha obtenido el origen, destino, ruta y posición actual del vehículo, el siguiente paso es asignarle una mercancía aleatoriamente. Para ello, se genera un número real aleatorio del 0 al 1, y en función de su valor asignamos un grupo de mercancía u otro. Una vez asignado el tipo de mercancía, y a partir de éste y la posición

actual del vehículo, se busca en el mapa de riesgo adecuado el valor de riesgo correspondiente a la posición del vehículo:

```
if(seleccion_grupo<=pgrupo2)
    camion.grupo=2;
    camion.riesgo=mapg2(camion.ruta(camion.indice).fila, ...
    ...camion.ruta(camion.indice).columna);
else
    if(seleccion_grupo<=pgrupo2+pgrupo6)
        camion.grupo=6;
        camion.riesgo=mapg6(camion.ruta(camion.indice).fila, ...
        ...camion.ruta(camion.indice).columna);
    else
        camion.grupo=16;
        camion.riesgo=mapg16(camion.ruta(camion.indice).fila, ...
        ...camion.ruta(camion.indice).columna);
    end
end
```

7.5.3. Simulación de varios camiones en tiempo real.

7.5.3.1. Diagrama de flujo de la aplicación.

Una vez conocemos de qué manera se generan los vehículos, el flujo de trabajo de la aplicación de simulación de vehículos de transporte de mercancías peligrosas supone generar un determinado número de camiones, cada uno con su ruta, posición y mercancía, que circularán en tiempo real por la red de carreteras de Castilla y León siguiendo su ruta hasta llegar a su nodo destino, momento en el cuál se le asignará un nuevo destino partiendo de la ciudad en la que se encuentra.

El diagrama de flujo de la aplicación de simulación de camiones en tiempo real se muestra en la figura 52.

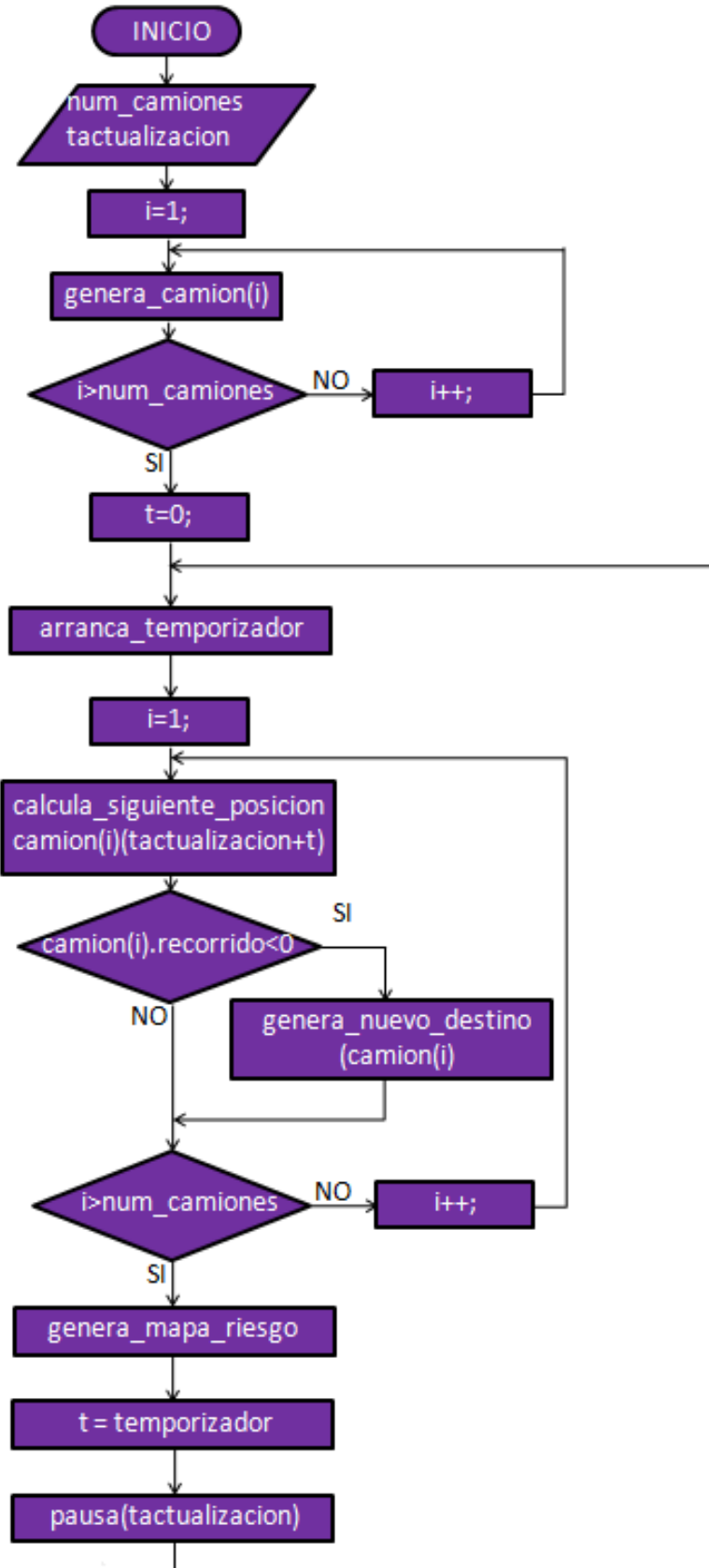


Figura 52 - Diagrama de flujo del simulador de vehículos en tiempo real

7.5.3.2. Función principal del simulador de camiones en tiempo real.

Siguiendo el diagrama de flujo, se ha generado la aplicación principal de este proyecto, `genera_varios_camiones`, cuya llamada se realiza con la siguiente sintaxis:

```
[ ] = genera_varios_camiones(ncamiones,pgrupo2,pgrupo6,tactualizacion)
```

La función recibe como argumentos el número de camiones que se desean simular, así como el porcentaje de camiones que transportan una mercancía del grupo 2, el porcentaje que transporta mercancías del grupo 6, y el periodo de actualización de la posición de los vehículos en tiempo real.

La función, tras cargar todos los mapas necesarios (mapa de tipos de carreteras, los tres mapas de riesgo para los tres grupos de mercancías peligrosas y un mapa RGB para mostrar el mapa definitivo), llama tantas veces como camiones se deseen simular a la función para generar vehículos, cargándolos en un vector de elementos `camion`:

```
for i=1:ncamiones
    camion(i)=genera_camion(coleccion_rutas,20,pgrupo2,pgrupo6,...
        ...mapa_riesgo_g2,mapa_riesgo_g6,mapa_riesgo_g16);
end
```

A continuación, comienza un bucle infinito de servicio, en un `while(1)`, ya que la aplicación de simulación está preparada para funcionar indefinidamente hasta que el usuario la detenga utilizando un `ctrl+C`.

Dentro del bucle de servicio, primeramente se arranca un temporizador con la instrucción `tic`, y se entra en un bucle en el que se actualiza la posición de cada uno de los camiones, utilizando la llamada a la función de seguimiento de rutas desarrollada en el capítulo 6:

```
for i=1:ncamiones
    velocidad = seleccion_velocidad_tramo...
        ...(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila, ...
        ...camion(i).ruta(camion(i).indice).columna, mapa_tipo, ...
        ...v_autovia, v_nacional, v_comarcal, v_local);
    [camion(i).indice,camion(i).recorrido] =...
        ... calcula_siguiete_posicion_estricto(velocidad,...
```

```

...t+tactualizacion, camion(i).ruta, camion(i).indice,...
...camion(i).recorrido, camion(i).profundidad);

if(camion(i).recorrido<0)
    disp(sprintf('El camion numero %d ha llegado a su...
... destino. Cargando nueva ruta',i));
    camion(i) = genera_nuevo_destino(coleccion_rutas, 20, ...
... camion(i));
end
end
end

```

Es necesario hacer notar que la llamada a la función de seguimiento de rutas se realiza con un periodo de tiempo de $t + t_{\text{actualización}}$, siendo t el valor del temporizador para el tiempo total de empleado en la actualización de todas las posiciones de la pasada del bucle anterior más el tiempo empleado en la generación y muestra del mapa de riesgo actual con la posición de los camiones.

De esta forma, para el caso ejemplo de un tiempo de actualización de 20 segundos, en el que para actualizar la posición de todos los camiones y generar el mapa de riesgo se tardan un total de 8 segundos, el tiempo que realmente se introducirá en el algoritmo de seguimiento de rutas será de 28 segundos, haciendo así más realista la simulación.

Otra cosa a destacar de esta parte del algoritmo es que, en caso de que la función de seguimiento devuelva el valor -1 en el campo recorrido de un determinado camión, que como se explicó en el capítulo 6 era interpretado como que el vehículo había llegado a su destino, se llama a una función, `genera_nuevo_destino`, que se encarga de generar un destino nuevo para el vehículo, cargando su ruta correspondiente, a partir de la ciudad en la que se encuentra actualmente. Esta función puede ser consultada en el anexo I de la memoria, presente en el CD.

La ejecución del algoritmo de simulación de vehículos en tiempo real continúa, realizando una llamada a la función `genera_mapa_riesgo`:

```

genera_mapa_riesgo(camion, ncamiones, mapa_riesgo_g2, ...
...mapa_riesgo_g6, mapa_riesgo_g16, mapa_muestra_RGB);

```

Esta función estará claramente detallada en el capítulo 8 de la presente memoria, por lo que en este capítulo únicamente adelantaremos que es la función que genera y muestra los mapas de riesgo en función de las posiciones de los vehículos en el instante actual.

A continuación, el algoritmo detiene el temporizador que había arrancado previamente, almacenando su valor en la variable `t`, que servirá para introducirla en la llamada a la función de seguimiento de rutas para la siguiente iteración del bucle de servicio:

```
t=toc;
```

Finalmente, una llamada a la función `pause` con el tiempo de actualización introducido por el usuario sirve para reducir la carga computacional del algoritmo, así como para que el usuario tenga el tiempo suficiente de consultar la información que desee en el mapa de riesgos generado:

```
pause(tactualizacion);
```


CAPÍTULO 8: GENERACIÓN DE MAPAS DE RIESGO Y LISTAS DE CONFLICTOS.



8.1. Introducción.

Durante este capítulo, se va a desarrollar la aplicación de generación y análisis de mapas de riesgo a partir de los datos y las posiciones de los vehículos de transporte de mercancías peligrosas.

Durante los tres capítulos previos, se ha trabajado sobre una aplicación que simulase camiones, con el objetivo de probar una aplicación de generación de mapas de riesgo en tiempo real, con vistas a aplicarlo a vehículos reales con emisores de señal GPS.

La aplicación que se va a desarrollar en este capítulo va a servir para estudiar en tiempo real el riesgo que supone cada uno de los vehículos para su entorno, así como su interacción entre ellos, elaborando, por una parte, un mapa a colores en función del riesgo de cada vehículo, y por otra parte, una serie de listas de conflictos para ciertos intervalos de riesgo, para que sirvan de resumen de los principales puntos de riesgo de la red para el usuario de la aplicación.

8.2. Diagrama de entradas y salidas de la aplicación.

Se muestra en la figura 53 el diagrama de entradas y salidas de la aplicación, que se ha empleado como punto de partida de la presente aplicación.

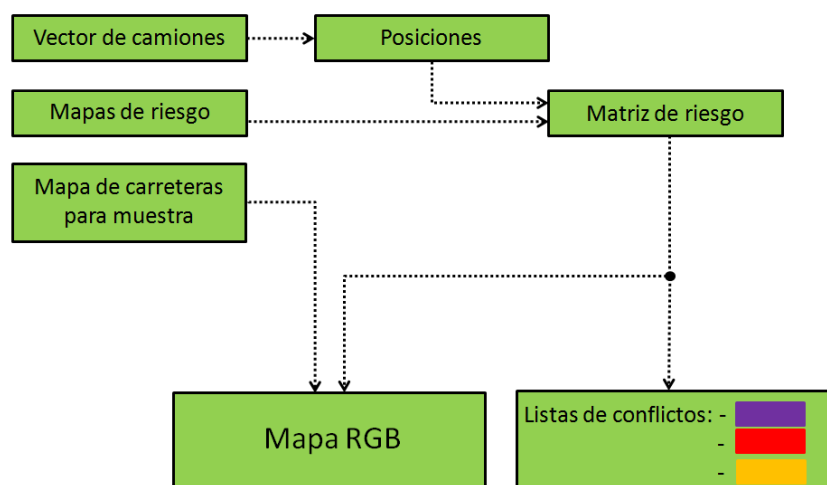


Figura 53 - Diagrama de entradas y salidas de la aplicación para generar mapas

Tal y como observamos en el diagrama, la aplicación parte del vector de camiones, en particular de sus posiciones actuales, y consulta en los mapas de riesgo generados durante el proyecto de Á. Arranz Zazo (2013) para asignar un riesgo y georreferenciarlo en una matriz de riesgo. Esta matriz, de la que se hablará en apartados siguientes, asigna un riesgo a cada uno de los puntos del mapa de carreteras en función de las posiciones de los camiones.

A continuación, una vez se ha actualizado la matriz de riesgo con las posiciones de todos los vehículos del vector, se genera sobre el mapa de muestra el mapa de riesgo en tiempo real, así como tres listas de conflictos, para riesgos extremadamente altos (color violeta), riesgos muy altos (color rojo) y riesgos altos (color naranja), que posteriormente se mostrarán en la interfaz gráfica para mostrar los mapas, desarrollada en el capítulo 9 del presente proyecto.

8.3. Desarrollo teórico del algoritmo.

A partir del diagrama general de entradas y salidas que aparece en el apartado anterior, deberemos construir el algoritmo a partir de la información de partida. El cuerpo del algoritmo será un bucle que recorra el vector de camiones. Para cada uno de los vehículos, el primer paso es calcular el riesgo que supone para el entorno con una llamada a la función `calcula_riesgo`, que devolverá el valor numérico del riesgo a partir de la posición y la mercancía del vehículo.

A continuación, y dentro del bucle que recorre el vector de camiones, se ejecutará un doble bucle, con dos contadores, para realizar operaciones en un entorno de un radio determinado alrededor de la posición de cada uno de los vehículos. En concreto, para cada posición, se comprueba en primer lugar si corresponde a carretera o a fondo, ya que solo deseamos colorear en el mapa los puntos de carretera. Posteriormente, se comprueba si la posición está dentro de la zona de influencia ante un posible accidente del vehículo, de forma que en caso de que sí esté dentro de esa zona se actualiza la matriz de riesgo.

La matriz de riesgo es una matriz, generada inicialmente como una matriz de ceros del mismo tamaño que la matriz del mapa, que va acumulando el valor numérico del riesgo asignado a cada punto.

A continuación de actualizar la matriz de riesgo, se actualiza las listas de conflictos y se colorea la posición en el mapa, algoritmos que se van a desarrollar en los siguientes subapartados.

En la figura 54 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo, a un nivel de abstracción alto al no entrar en el desarrollo de las funciones para actualizar la lista de conflictos y el mapa RGB. Además, la función para mostrar el mapa y las listas de conflictos es una llamada a una interfaz gráfica de usuario, que se desarrollará en el capítulo 9 de la memoria.

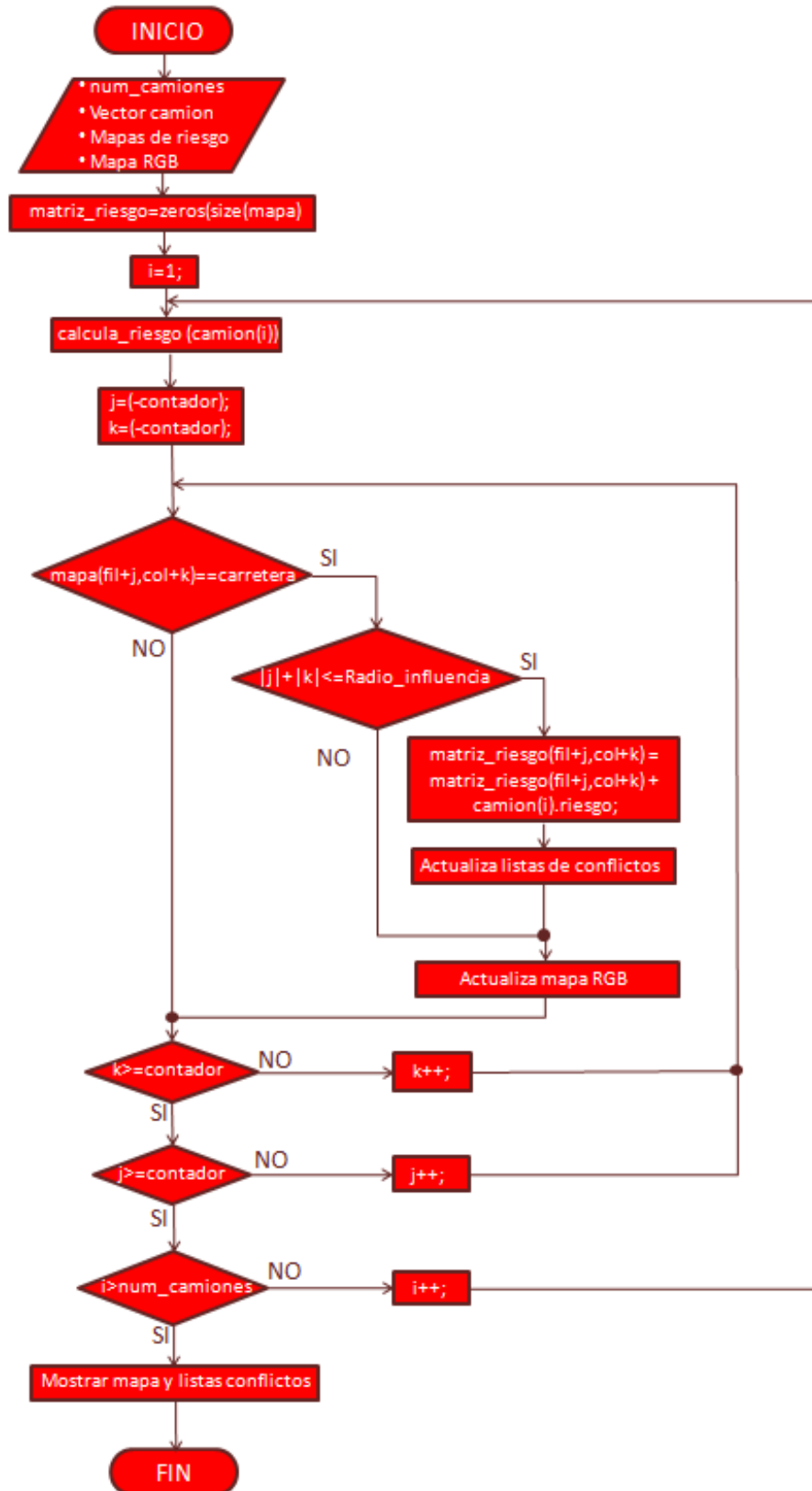


Figura 54 - Diagrama de flujo de la aplicación para generar mapas

8.3.1. Algoritmo para generar de listas de conflictos.

Durante el presente proyecto, se dividirá el mapa por colores, de forma que el riesgo se dividirá en una serie de intervalos en función de su valor numérico. El objetivo será generar listados de los vehículos que generan un riesgo presente en uno de los tres intervalos que representen un riesgo mayor, a las que se asignarán los colores naranja, rojo y violeta, de menor a mayor riesgo.

Además, se van a utilizar dos tipos diferentes de conflictos:

- **Conflicto en el que interviene un único vehículo:** Es aquel conflicto en el que, por circunstancias de la vía por la que circula un camión y por la mercancía que transporta, supone por sí mismo un riesgo suficientemente alto como para ser tomado en consideración y listado para que un operador humano conozca la situación.

Para almacenar conflictos de este tipo, únicamente es necesario guardar en memoria el índice dentro del vector de camión que está generando la alerta.

- **Conflicto en el que intervienen dos vehículos:** Es aquel conflicto en el que dos vehículos que transportan mercancías peligrosas circulan lo suficientemente cerca entre sí para que sus zonas de influencia se superpongan, de manera que el riesgo resultante de la zona de confluencia es lo suficientemente alto para ser tomado en consideración y listado.

Para almacenar conflictos de este tipo en la lista, es necesario guardar en memoria el índice de ambos vehículos.

A la hora de ir generando los distintos conflictos en las listas, hay que tener en cuenta que puede ser necesario hacer uso de algunos elementos auxiliares.

Los conflictos del primer tipo son muy fáciles de detectar y almacenar, sin más que detectar cuando, a la hora de actualizar un determinado elemento de la matriz de riesgo, éste valía cero inicialmente y toma un valor suficientemente alto para entrar en una de las listas tras ser actualizado.

La única precaución que hay que tomar es la de no reintroducir un mismo conflicto una y otra vez en la misma lista, ya que un vehículo genera un riesgo en una serie de posiciones a su alrededor, lo que implica que aunque haya varios elementos de la matriz de riesgo con un valor suficiente para entrar en una lista no significa que haya varios conflictos.

Así, se añade la restricción extra de que cada vehículo únicamente puede participar en cada una de las listas una vez, evitando así que éstas se actualicen una y otra vez con el mismo vehículo

Por otra parte, detectar conflictos entre dos vehículos entraña una dificultad mayor. En este caso, el conflicto aparecerá en el momento en que estemos actualizando el segundo vehículo, cuando al actualizar un elemento de la matriz de riesgo nos encontremos con que el valor que tenía previamente era distinto de cero (lo que significa que el elemento está dentro de la zona de influencia de otro camión) y el valor tras actualizar es suficientemente alto como para estar en una de las listas.

En ese momento, será necesario recuperar el índice del camión que generó el riesgo del elemento actualizado, para almacenarlo en la lista con el índice actual. Para hacer esto de una manera rápida y eficiente, se incorpora al algoritmo otra matriz, la matriz de conflictos.

La matriz de conflictos es una matriz del tamaño de la matriz de riesgo en la que inicialmente todos los elementos valen -1 . Cada vez que se actualiza un elemento de la matriz de riesgo, se comprueba el valor del mismo elemento de la matriz de conflictos. En caso de que este sea -1 , se coloca en el elemento el índice del camión que se está actualizando, y se comprueban si hay que añadir a la lista conflictos de un único camión. En caso de que en el elemento de la matriz de conflicto sea un entero distinto de -1 , quiere decir que el elemento ya pertenece a la zona de influencia de otro vehículo, por lo que se comprueba si hay que añadir un conflicto entre dos camiones a una de las tres listas, y en caso afirmativo, los índices que hay que almacenar en la lista están almacenados en la matriz de conflictos y en la variable que recorre el vector de camiones respectivamente.

8.3.2. Algoritmo para actualizar el mapa RGB.

La segunda funcionalidad del algoritmo será generar los mapas RGB. Cada vez que se actualiza un elemento de la matriz de riesgo, se llamará a una función para seleccionar el color correspondiente al riesgo de ese elemento, y se coloreará adecuadamente en el mapa RGB.

Además, en el caso de que estemos fuera de la zona de influencia de un vehículo (no se haya actualizado la matriz de riesgo) pero dentro del radio de representación, que se explicará en el apartado siguiente, se comprobará primeramente que el valor del elemento de la matriz de riesgo correspondiente a la posición actual es de cero, lo que significa que no se va a sobrescribir un color correspondiente a otro camión anterior en el vector, y se colorea de un color neutro, para facilitar que a primera vista se distingan las posiciones aproximadas de los vehículos en el mapa.

8.4. Consideraciones previas a la implementación del algoritmo.

Previamente a analizar de qué manera se ha llevado a cabo la implementación del algoritmo en MATLAB, es necesario definir tres parámetros fundamentales, que van a ser determinantes para el estilo gráfico del mapa resultante.

8.4.1. Selección de radios de influencia y representación.

Uno de los parámetros a definir previamente al desarrollo del algoritmo son los radios de influencia y representación. Estos dos radios son claves a la hora de la elaboración de la matriz de riesgo y el mapa RGB a mostrar.

Durante el presente proyecto, así como durante el proyecto de Á. Arranz Zazo (2013), se ha supuesto que un vehículo que transporta una determinada mercancía peligrosa y que se encuentra en una determinada posición en un instante dado, genera un riesgo para todos los elementos que se encuentran en su entorno dentro de un radio determinado. Así, siguiendo este razonamiento, a la hora de elaborar la matriz de riesgo, para un determinado camión, se actualizará el riesgo de todos los elementos de la matriz que se encuentren dentro de un radio de influencia determinado alrededor de la posición del vehículo. En el caso de que un determinado píxel del mapa se encuentre

dentro del radio de influencia de dos o más vehículos, los riesgos de ambos vehículos se sumarán en el elemento de la matriz de riesgo correspondiente a este píxel del mapa, aplicando el principio de superposición.

Para determinar este radio de influencia, se ha consultado la “Guía Norteamericana de Respuesta en Caso de Emergencia” (CANUTEC, 2012), de la que se ha extraído la clasificación en grupos de mercancías para el presente proyecto. La guía establece un radio de influencia inmediato, que sería la distancia máxima hasta el vehículo de transporte de mercancías peligrosas a la que un determinado elemento expuesto se vería afectado en el mismo momento en el que se produce el accidente; así como un radio temporal, que establece de que manera crece el radio de afección por el accidente durante las horas o días siguientes al accidente. Estos radios dependen de la mercancía transportada.

El radio de influencia para los mapas elaborados en el presente proyecto se ha establecido en unos 800 metros, es decir, 10 píxeles, una distancia adecuada para mercancías con una peligrosidad media-alta.

Por otra parte, el radio de representación es un radio alrededor de la posición de un vehículo que se marcará con un determinado color neutral en el mapa, y que sirve únicamente para que visualmente se aprecie donde hay un vehículo, ya que un radio de 10 píxeles no alcanza para ver los vehículos a primera vista en el mapa. Esto sucede porque con los monitores con resoluciones convencionales es imposible alcanzar una resolución de 6325×4982 píxeles, por lo que la imagen se muestra a una escala reducida (en concreto, MATLAB muestra la imagen a un tamaño del 8% del original).

Este radio de representación, que no tiene importancia en el análisis de riesgos y que únicamente tiene importancia visual, ha sido elegido de 2,8 kilómetros, es decir, 35 píxeles.

No obstante, también podemos considerar este radio de representación como una zona a la que posiblemente se pueden expandir los riesgos en el futuro, tanto en el caso de un accidente inmediato (radio temporal de CANUTEC, una zona que actualmente no está afectada por las consecuencias de un accidente puede verse

afectado en el futuro) como en el caso de que el camión continúe su ruta, ya que previsiblemente continuará por alguna de las zonas ahora marcadas con color neutro y riesgo nulo, que sí cobrarán un riesgo cuando el vehículo esté circulando por allí.

Por último, se ha definido un contador para el bucle de actualización del mapa RGB, que sea el entero más próximo al radio de representación dividido entre raíz de dos. El objetivo de contar únicamente hasta este valor, que en el caso del presente proyecto es de 25 píxeles, es conseguir una forma octogonal en torno a cada camión, de manera que visualmente el usuario tenga la sensación de que el entorno del vehículo es casi circular.

No obstante, estos valores pueden ser cambiados, sin más que acceder al código de la función `genera_mapa_riesgo` y variar las constantes definidas al principio del algoritmo.

8.4.2. Selección de umbrales de riesgo y colores.

Una vez se actualiza la matriz de riesgo, a la hora de representarlo gráficamente va a ser necesario dividir en intervalos el riesgo, así como asignarle un color a cada intervalo. En la tabla 31 aparecen cuáles son estos intervalos, y qué color se le ha asignado.

Intervalo	Nivel de riesgo	Color asociado	[R,G,B]
0-24	Riesgo muy bajo	Azul cyan	[0,255,255]
24-100	Riesgo bajo	Verde	[0,255,0]
100-150	Riesgo medio	Amarillo	[255,255,0]
150-200	Riesgo alto	Naranja	[255,177,0]
200-288	Riesgo muy alto	Rojo	[255,0,0]
>288	Riesgo extremadamente alto	Violeta	[204,0,204]

Tabla 31 - Umbrales de riesgo y colores para la representación del mapa

Es necesario apuntar que estos umbrales y colores se pueden cambiar también fácilmente, sin más que dirigirse al código de las funciones `genera_mapa_riesgo` y `selecciona_color` y variar los parámetros correspondientes.

8.4.3. Gama de colores del mapa.

El tercer parámetro del que va a depender el aspecto de los mapas generados es la gama de colores que le demos, es decir, el color de fondo, el color de las carreteras y el color de neutro para representar el entorno de los camiones. Es sencillo desarrollar funciones de pocas líneas para generar mapas de múltiples colores, por lo que también es algo personalizable por el usuario.

Para el presente proyecto, en concreto, el principal objetivo ha sido darle todo el protagonismo a los propios vehículos y al riesgo que suponen para elementos del entorno, por encima del propio mapa de carreteras.

Así, se ha elegido un mapa de carreteras con un fondo blanco, un color gris suave para las carreteras y un tono granate para que destaquen los vehículos gracias al contraste entre los colores claros y oscuros.

En la tabla 32 se detallan los colores elegidos.

Componente del mapa	Color	[R,G,B]
Fondo	Blanco	[255,255,255]
Carreteras	Gris	[175,175,175]
Zona de representación de riesgo instantáneo nulo	Granate	[139,0,0]

Tabla 32 - Gama de colores del mapa

8.4.4. Mapa resultante de la elección de parámetros.

Se muestra en la figura 55 un mapa generado con la aplicación con los parámetros elegidos, a modo de ejemplo.

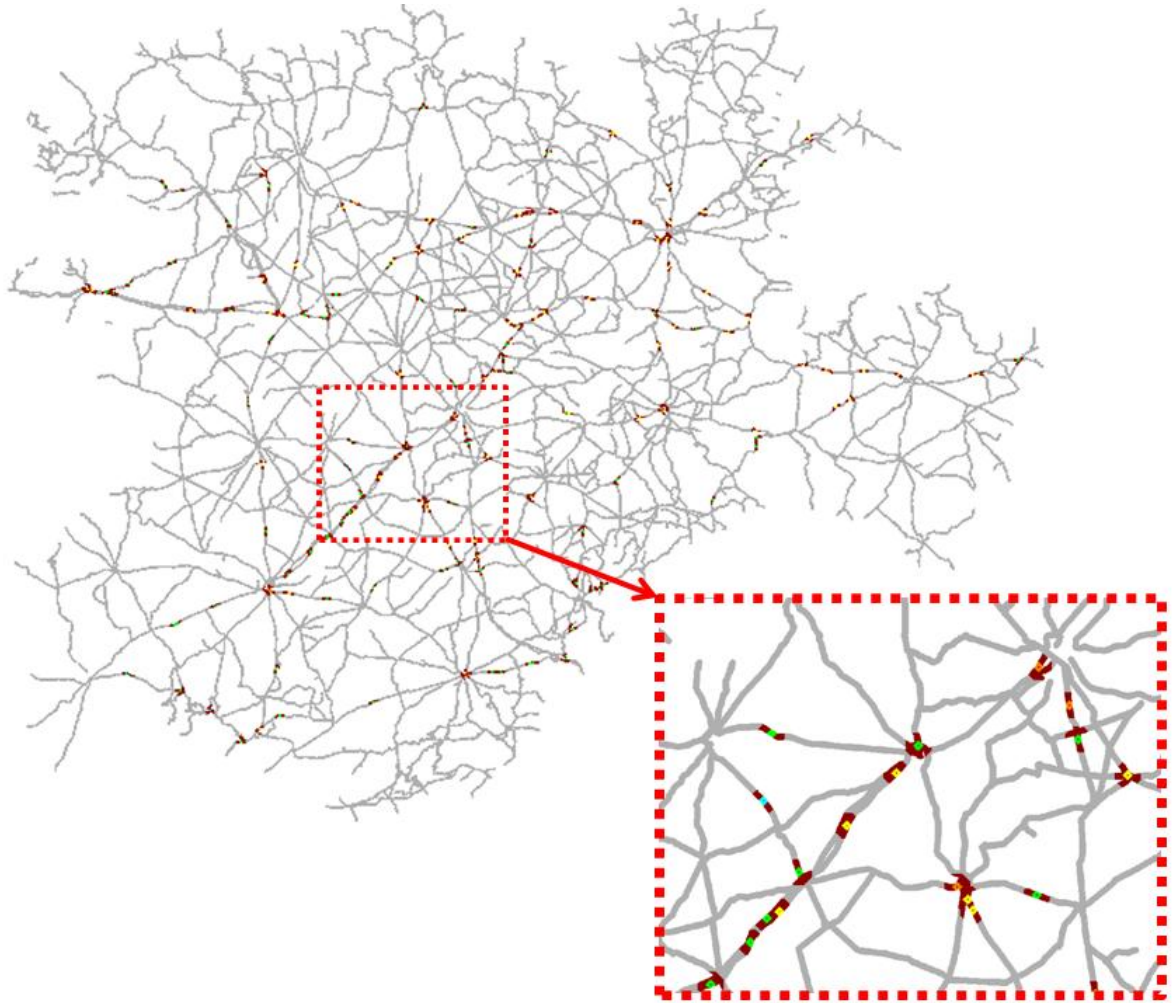


Figura 55 - Mapa generado con los parámetros seleccionados

8.5. Implementación en MATLAB del algoritmo.

La función principal de MATLAB que se ha desarrollado para implementar el algoritmo de generación de mapas de riesgo del que se habla en este capítulo es la función `genera_mapa_riesgo`, y tiene la siguiente llamada:

```
[ ] = genera_mapa_riesgo(camion, ncamiones, mapa_riesgo_g2, ...  
    ... mapa_riesgo_g6, mapa_riesgo_g16, mapaRGB)
```

Tal y como vemos, la función recibe como argumentos el vector de camiones, el número de camiones que introduce el usuario al comienzo de la simulación, los tres mapas correspondientes a los tres grupos de mercancías peligrosas para los que se hace la simulación, desarrollados durante el proyecto de Á. Arranz Zazo (2013), y por

último un mapa RGB, con el fondo en color blanco y las carreteras en color gris, tal y como se definió en el apartado 8.4.3. Gama de colores del mapa..

El primer paso, antes de iniciar el algoritmo, es definir como constantes todos los parámetros de los que se ha hablado en el apartado 8.4. Consideraciones previas a la implementación del algoritmo., para que un usuario pueda variar fácilmente alguno de estos parámetros si lo considera necesario.

```
%CONSTANTE CON EL RADIO DE AFECCIÓN DEL RIESGO Y DE REPRESENTACION
RADIO_RIESGO = 10; %800 metros
RADIO_REPRESENTACION = 35; %2.8 kilómetros
cont_bucle=round(RADIO_REPRESENTACION/sqrt(2));
umbral1=24; %Hasta umbral 1 color azul
umbral2=100; %Hasta umbral 2 color verde
umbral3=150; %Hasta umbral 3 color amarillo
umbral4=200; %Hasta umbral 4 color naranja
umbral5=288; %A partir de umbral 5 color violeta
```

A continuación, se definirán también todos los elementos que se van a usar en la composición del mapa y listas de conflictos. Así, para la elaboración de las listas, se van a emplear tres matrices de tamaño igual al número de camiones más uno filas por tres columnas, y cuyos elementos inicialmente valdrán -1, y que contendrán el índice de cada uno de los elementos que conforman cada conflicto, así como el riesgo de cada conflicto en la tercera columna. Además, se inicializan tres contadores de conflictos, así como la matriz de riesgo y la matriz de conflictos.

```
%Matrices para almacenar los índices de los conflictos
alerta_naranja=-ones(ncamiones+1,3);
alerta_roja=-ones(ncamiones+1,3);
alerta_violeta=-ones(ncamiones+1,3);
```

```
%Contadores de número de conflictos de cada tipo
num_naranja=0;
num_rojo=0;
num_violeta=0;
```

```
%En la matriz de riesgo se almacena el riesgo de cada punto
matrizriesgo=zeros(size(mapa_riesgo_g2));
```

```
%En la matriz de conflictos se almacenará el índice del camión que ha
```

```
%generado el valor del elemento actual de la matriz de riesgo  
matrizconflictos=-ones(size(mapa_riesgo_g2));
```

A continuación, se inicia el recorrido por el vector de camiones, mediante un contador *i* y un bucle *for*. Cada vez que se accede a un nuevo camión, se ponen a cero tres variables para limitar que únicamente se almacene una vez cada conflicto en la lista. A continuación, se realiza una llamada a la función para calcular el riesgo del camión en su posición actual.

```
%Se recorren cada uno de los camiones actualizando el mapa  
for i=1:ncamiones  
    %Cada camión sólo puede participar en un conflicto de cada tipo  
    conflicto_naranja=0;  
    conflicto_rojo=0;  
    conflicto_violeta=0;  
  
    %Llamada a la función para calcular el riesgo del camión  
    camion(i).riesgo = calcula_riesgo(camion(i), mapa_riesgo_g2,...  
    ... mapa_riesgo_g6, mapa_riesgo_g16);
```

Una vez calculado el riesgo del vehículo actual, se inicia el doble bucle *for* para actualizar la matriz de riesgo y el mapa en todas las posiciones en torno a la posición del camión.

```
%Bucle para actualizar la matriz de riesgo y el mapa RGB  
for k=-cont_bucle:cont_bucle  
    for j=-cont_bucle:cont_bucle
```

Una vez dentro del bucle, para cada una de las posiciones que se recorren se comprueba si pertenecen a carretera o no, de forma que en caso de que la posición no pertenezca a la carretera no se realiza ninguna acción y se pasará automáticamente a la siguiente posición del bucle.

Si se comprueba que la posición estudiada pertenece a la carretera, se comprueba si está dentro del radio de influencia del camión actual, en cuyo caso se actualiza la matriz de riesgo y se comprueban los conflictos:

```
%Si la posición corresponde a carretera (color blanco)
```

```

if(mapaRGB(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j, ...
...camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k,1)~=255 ||...
...mapaRGB(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j, ...
...camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k,2)~=255 ||...
...mapaRGB(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j, ...
...camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k,3)~=255 )

%Se actualizan todos los puntos de carretera dentro el radio de
%influencia
if((abs(j)+abs(k)<=RADIO_RIESGO))
    %Actualización de la matriz de riesgo, añadimos al riesgo
    %hasta el momento el riesgo del camión actual
    matrizriesgo(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j, ...
    ...camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k) = ...
    ...matrizriesgo(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j, ...
    ...camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k) + ...
    ...camion(i).riesgo;

```

Una vez actualizada correctamente la matriz de riesgo, se va a comprobar la matriz de conflictos para determinar si va a ser necesario comprobar si existe un conflicto con un único vehículo implicado, si el elemento actual de la matriz de conflictos vale -1, o bien si lo que hay que comprobar es si existe un conflicto entre dos vehículos, en caso de que el elemento actual de la matriz de conflictos tenga un valor mayor de cero, que sería el índice del vehículo en cuya área de influencia se encuentra la posición actual.

Una vez discernido el tipo de conflicto, se comprueba en que intervalo de riesgo se encuentra el riesgo actual, y si ya se ha registrado un conflicto en la lista correspondiente a ese intervalo para el vehículo actual. En caso de que haya que incluir un camión en una lista de conflictos, se pone a uno el avisador que indica que ya está incluido en la lista, se incrementa el contador correspondiente a la lista en la que se incluye, y se actualiza la matriz de alerta correspondiente, almacenando el índice del vehículo actual y, si es necesario, también el índice del vehículo con el que se ha generado un conflicto, así como el riesgo contenido en la posición actual de la matriz de riesgo.

```

%Conflictos formados por un solo camión

if(matrizconflictos(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j, ...
...camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k)==-1)

```


%Actualización de matriz de conflictos

```
matrizconflictos(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j, ...
...camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k)=i;
%Comprobación lista naranja
if(conflicto_naranja==0 &&...
... matrizriesgo(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j, ...
...camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k)>umbral3 ...
...&& matrizriesgo(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j, ...
...camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k)<umbral4)

    conflicto_naranja=1;
    num_naranja=num_naranja+1;
    alerta_naranja(num_naranja,1)=i;
    alerta_naranja(num_naranja,3)=matrizriesgo(camion(i).ruta...
    ... (camion(i).indice).fila+j, camion(i).ruta...
    ... (camion(i).indice).columna+k);

%Comprobación lista roja
elseif(conflicto_rojo==0 && ...
...matrizriesgo(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j, ...
...camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k)>umbral4 ...
...&& matrizriesgo(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j, ...
...camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k)<umbral5)

    conflicto_rojo=1;
    num_rojo=num_rojo+1;
    alerta_rojo(num_rojo,1)=i;
    alerta_rojo(num_rojo,3)=matrizriesgo(camion(i).ruta...
    ... (camion(i).indice).fila+j, camion(i).ruta...
    ... (camion(i).indice).columna+k);

%Comprobación lista violeta
elseif(conflicto_violeta==0 && ...
...matrizriesgo(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j, ...
...camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k)>umbral5)

    conflicto_violeta=1;
    num_violeta=num_violeta+1;
    alerta_violeta(num_violeta,1)=i;
    alerta_violeta(num_violeta,3)=matrizriesgo(camion(i).ruta...
    ... (camion(i).indice).fila+j, camion(i).ruta...
    ... (camion(i).indice).columna+k);
```

end

```
%Conflictos en los que participan dos camiones
else

%Comprobación lista naranja
if(conflicto_naranja==0 && ...
...matrizriesgo(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j, ...
...camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k)>umbral3 ...
...&& matrizriesgo(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j, ...
... camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k)<umbral4)

conflicto_naranja=1;
num_naranja=num_naranja+1;
alerta_naranja(num_naranja,1)=i;
alerta_naranja(num_naranja,2)= ...
...matrizconflictos(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j,...
...camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k);
alerta_naranja(num_naranja,3)=matrizriesgo(camion(i).ruta...
... (camion(i).indice).fila+j, camion(i).ruta...
... (camion(i).indice).columna+k);

%Comprobación lista roja
elseif(conflicto_rojo==0 && ...
...matrizriesgo(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j, ...
...camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k)>umbral4 ...
...&& matrizriesgo(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j, ...
...camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k)<umbral5)

conflicto_rojo=1;
num_rojo=num_rojo+1;
alerta_rojo(num_rojo,1)=i;
alerta_rojo(num_rojo,2)= ...
...matrizconflictos(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j,...
...camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k);
alerta_rojo(num_rojo,3)=matrizriesgo(camion(i).ruta...
... (camion(i).indice).fila+j, camion(i).ruta...
... (camion(i).indice).columna+k);

%Comprobación lista violeta
elseif(conflicto_violeta==0 && ...
...matrizriesgo(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j, ...
...camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k)>umbral5)

conflicto_violeta=1;
num_violeta=num_violeta+1;
alerta_violeta(num_violeta,1)=i;
```

```
alerta_violeta(num_violeta,2)= ...  
...matrizconflictos(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j,...  
...camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k);  
alerta_violeta(num_violeta,3)=matrizriesgo(camion(i).ruta...  
... (camion(i).indice).fila+j, camion(i).ruta...  
... (camion(i).indice).columna+k);  
  
end  
end
```

A continuación, una vez actualizada la lista de conflictos, se va a colorear el mapa, coloreando un punto de color negro para tener la referencia de la posición exacta del camión y llamando a la función para seleccionar el color correspondiente al valor del riesgo que supone el vehículo.

```
%Se colorea de negro la posición exacta del camión  
if(abs(j)+abs(k)<=1)  
  
mapaRGB(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j, ...  
...camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k,1)=0;  
mapaRGB(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j, ...  
...camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k,2)=0;  
  
mapaRGB(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j, ...  
...camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k,3)=0;  
  
%Para el resto de puntos se selecciona color en función del riesgo  
else  
  
if(mapaRGB(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j, ...  
...camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k,1)~=0 || ...  
...mapaRGB(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j, ...  
...camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k,2)~=0 || ...  
...mapaRGB(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j, ...  
...camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k,3)~=0 )  
  
[mapaRGB(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j, ...  
...camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k,:)] = ...  
...selecciona_color (matrizriesgo (camion(i).ruta ...  
...(camion(i).indice).fila+j, camion(i).ruta ...  
...(camion(i).indice).columna+k));  
  
end  
end
```

Previamente a la actualización de la matriz de riesgo, habíamos comprobado que estábamos dentro del radio de influencia del vehículo actual. No obstante, en caso de que no estemos en el área de influencia, pese a no actualizar la matriz de riesgo, sí se debe comprobar si estamos dentro del radio de representación, en cuyo caso se comprueba que no se esté en el área de influencia de otro vehículo comprobando el valor de la matriz de riesgo. En caso de que se cumplan estas dos condiciones, se coloreará la posición del mapa con un color granate, definido en el apartado 8.4.3. Gama de colores del mapa..

```

if(abs(j)+abs(k)<=RADIO_REPRESENTACION && ...
... matrizriesgo(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j, ...
... camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k)==0)

    mapaRGB(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j, ...
    ... camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k,1)=139;
    mapaRGB(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j, ...
    ... camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k,2)=0;
    mapaRGB(camion(i).ruta(camion(i).indice).fila+j, ...
    ... camion(i).ruta(camion(i).indice).columna+k,3)=0;
end

```

Por último, y fuera de todos los bucles, se incluye la llamada a la función `mostrar_mapas`, que es realmente una interfaz gráfica de usuario (GUI) que se encarga de mostrar el mapa y las listas de conflictos generadas, y cuyo desarrollo será convenientemente analizado en el capítulo 9 de la presente memoria. A modo de introducción, aparece a continuación la llamada que se realiza, pasando el mapa coloreado con todos los camiones, el vector de camiones, así como las tres listas y los contadores de elementos de cada una de las listas.

```

mostrar_mapas(mapaRGB, camion, num_naranja, alerta_naranja, ...
... num_rojo, alerta_roja, num_violeta, alerta_violeta);

```

El código completo y comentado de la función para generar los mapas de riesgo y las listas de conflictos aparece en el anexo I en el CD del presente trabajo, pero se ha creído necesario explicar paso a paso las diferentes etapas debido a su importancia crucial dentro del presente proyecto, así como su complejidad.

8.6. Funciones auxiliares en la generación del mapa de riesgo.

Para cerrar este capítulo, se realizará una mención de dos funciones auxiliares que se han empleado en la función `genera_mapa_riesgo`, y que aún no habían aparecido a lo largo de la presente memoria.

El código completo de ambas funciones aparece para su consulta, al igual que el resto, en el anexo I dentro del CD.

8.6.1. Función para calcular el riesgo de un vehículo.

La función que se ha desarrollado para calcular el riesgo para los elementos expuestos que supone un vehículo que transporta una determinada carga en una determinada posición del mapa se denomina `calcula_riesgo`, y tiene la siguiente llamada:

```
[riesgo]=calcula_riesgo(camion,mapg2,mapg6,mapg16);
```

La función recibe como argumentos las matrices correspondientes a los tres mapas de riesgo generados por Á. Arranz Zazo, así como la estructura de datos de un vehículo determinado, para devolver el riesgo.

El algoritmo sencillamente realiza un switch, de manera que en función del valor que tenga el campo grupo de la estructura camión se consulta el valor del riesgo en un mapa u otro. Una vez se ha tomado la decisión adecuada, el valor de riesgo devuelto es el almacenado en la posición del camión en la matriz del mapa elegido.

8.6.2. Función para selección el color.

Se ha desarrollado también para el presente proyecto una función que, a partir de un valor numérico de riesgo, compara con una serie de valores umbral para clasificarlo en su intervalo correspondiente, devolviendo a la función que lo llama el color en un vector [R,G,B] que corresponde al intervalo de riesgo seleccionado.

La llamada a esta función se realiza con la línea de código siguiente:

```
[RGB]=selecciona_color(riesgo);
```

La función tiene como argumento de entrada el valor numérico del riesgo, y como salida el vector de tres elementos RGB, que será el color al que corresponde el valor de riesgo de entrada. La función sencillamente pasa el valor de riesgo por una serie de condicionales que lo comparan con los valores umbrales y lo clasifican en un intervalo, devolviendo el vector de color que corresponda.

CAPÍTULO 9: INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO DE LA APLICACIÓN.



9.1. Introducción.

Una vez se han desarrollado todos los algoritmos de generación de mapas de riesgo y listas de conflictos en tiempo real, así como un simulador completo de vehículos de transporte de mercancías peligrosas, se pueden considerar cubiertos los objetivos del proyecto.

No obstante, una vez alcanzados los objetivos, se ha perseguido diseñar un entorno gráfico para hacer la aplicación más manejable y accesible para el usuario, así como para ornamentarla y acercarla a los tipos de entornos de ventanas que estamos acostumbrados a manejar en los principales sistemas operativos.

Para ello, se ha recurrido a una utilidad de MATLAB llamada GUIDE, que viene de Graphical User Interface Development Environment, o entorno de desarrollo de interfaces gráficas de usuario. Mediante esta herramienta es posible crear interfaces gráficas de usuario, o GUI, que son entornos gráficos que permiten manejar aplicaciones software mediante el uso del ratón, lo cual elimina la necesidad de aprender un lenguaje y escribir comandos para ejecutar una aplicación.

Las GUI pueden incluir controles como menús, barras de herramientas, controles deslizantes, botones, listas, cuadros para introducir texto, etc. La herramienta GUIDE de MATLAB permite diseñar las interfaces gráficamente, colocando los distintos elementos en un fichero con extensión .fig, y al mismo tiempo generando automáticamente el código de MATLAB en un fichero .m que construya la interfaz, código en el que se harán los cambios pertinentes para conseguir que la interfaz de la aplicación tenga el comportamiento deseado.

9.2. Interfaz de control de la aplicación.

En primer lugar, se ha desarrollado una GUI para controlar la aplicación mediante el uso del ratón en lugar de a través de la línea de comandos. Para ello, debemos implementar un sistema que permita modificar los parámetros de la función para generar varios camiones, es decir, el número de camiones simulados, el porcentaje de

vehículos de cada tipo y el tiempo de actualización, así como un botón de inicio que llame a la función `generar_varios_camiones` con los parámetros seleccionados.

Para ello, entre todos los controladores gráficos posibles, se han elegido deslizadores o sliders, acompañados por cuadros de texto editables (edit) para mostrar el valor de la posición del slider, así como poder también mover el slider introduciendo el valor deseado en el cuadro de texto. Estas variables estarán organizadas gráficamente en tres paneles contenedores de actuadores, acompañados de algunas imágenes para mejorar el aspecto general de la aplicación.

En cuanto al apartado visual, se han elegido tonos azules para los elementos de la interfaz y el color blanco para los elementos de texto. El nombre elegido para esta interfaz es un acrónimo del nombre de la aplicación del presente proyecto, la aplicación de seguimiento de mercancías peligrosas, ApSegMMPP. Esta interfaz no va a tener argumentos de entrada, por lo que para ejecutarla sencillamente hay que escribir en la línea de comandos:

```
ApSegMMPP;
```

El código de la aplicación está formado por una `OpeningFcn`, o función de apertura, que se utiliza para mostrar las imágenes decorativas y para establecer los valores predeterminados en los sliders y cuadros de texto para cada una de las variables, seguida de una serie de funciones, llamadas callbacks, que contienen todas las instrucciones a ejecutar cuando el usuario realiza alguna acción sobre alguno de los actuadores de la aplicación.

9.2.1. Panel de selección del número de camiones.

Para la selección del número de camiones, se ha elegido un valor mínimo para la variable de 1 vehículo y un valor máximo de 500 vehículos. Inicialmente, cuando se llama a la aplicación, este valor se establece por defecto en 150 camiones, colocándose el slider en la posición adecuada y escribiéndose el valor en el cuadro de texto mediante código en la `OpeningFcn`.

Cada vez que se mueve el slider, se genera en función de su posición un valor entre el 0 y el 499, que se redondea, se suma una unidad para estar en el intervalo deseado y se escribe en el cuadro de texto correspondiente mediante el código de la función `slider_num_camiones_callback`:

```
num_camiones=round(get(hObject,'Value'))+1;  
set(handles.edit_num_camiones,'String',num_camiones);
```

En el caso de que lo que se modifique sea el cuadro de texto, en la función `edit_num_camiones_callback`, se comprueba inicialmente que el valor introducido por el usuario no excede los límites impuestos a la variable, se redondea, y se coloca el slider en la posición correspondiente:

```
num_camiones = round(str2double(get(hObject,'String')));  
if(num_camiones > (get(handles.slider_num_camiones,'Max')+1))  
    num_camiones = get(handles.slider_num_camiones,'Max')+1;  
elseif(num_camiones < (get(handles.slider_num_camiones,'Min')+1))  
    num_camiones = get(handles.slider_num_camiones,'Min')+1;  
end  
set(hObject,'String',num_camiones);  
set(handles.slider_num_camiones,'Value',num_camiones-1);
```

El aspecto final del panel de selección del número de camiones queda como se muestra en la figura 56.

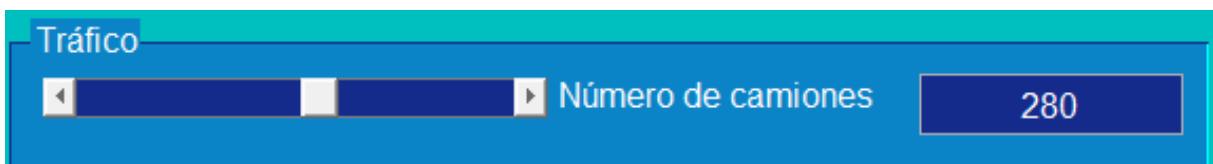


Figura 56 - Panel de control del número de camiones simulados

9.2.2. Panel de selección del tiempo de actualización.

Para el tiempo de actualización, los pasos realizados son muy similares a los del apartado anterior. El intervalo elegido ahora para esta variable es de entre 10 y 90 segundos, estableciéndose inicialmente el valor 30 mediante la función de apertura de la interfaz, valor que se coloca en el slider y en el cuadro de texto.

El slider genera en este caso valores entre 0 y 80, de forma que cada vez que éste se mueve y se realiza una llamada a su callback, el valor del slider se redondea y se le suma 10 segundos para estar en el intervalo deseado, colocándose en el cuadro de texto adecuado este valor, al igual que en el caso anterior.

Análogamente, cuando el valor del tiempo de actualización se introduce mediante el cuadro de texto, este valor se redondea, se comprueba que esté entre los límites del intervalo, y se mueve el slider a la posición correspondiente.

Los códigos de las funciones de callback para el slider y el cuadro de texto editable de la variable tiempo de actualización se pueden consultar en el anexo I, que se incluye dentro del CD.

El aspecto que toma el panel de selección del tiempo de actualización es el que se muestra en la figura 57, muy similar al del apartado anterior.

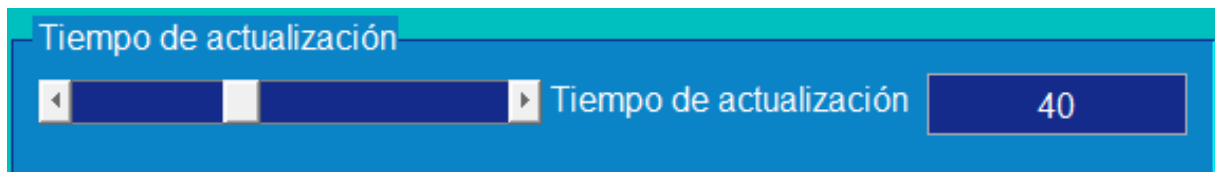


Figura 57 - Panel de control del tiempo de actualización

9.2.3. Panel de selección de los porcentajes de grupos de mercancías peligrosas.

Dentro del panel para controlar los porcentajes de vehículos existentes en la red para cada grupo de mercancías peligrosas aparecen tres variables, cada una con su deslizador y su cuadro de texto. Además, aparece la dificultad añadida de implementar la restricción que supone que entre los tres porcentajes de mercancías peligrosas deben sumar 100 en todo momento.

Inicialmente, se establecen los porcentajes en un 20% para las mercancías explosivas del grupo 2, un 20% para los gases inflamables o tóxicos del grupo 6, y el 60% restante para los líquidos inflamables del grupo 16, cuya presencia en la red de carreteras es generalmente mayor.

Los sliders generan un valor entre 0 y 1, que se multiplica por 100 y se redondea adecuadamente para mostrarlo en forma de porcentaje.

Para cada uno de los callbacks, tanto para los sliders como para los cuadros de texto editables, se lee el nuevo valor introducido por el usuario, así como los valores de los porcentajes de los grupos restantes, y se comprueba la nueva suma de las variables de probabilidad de cada grupo. Si es menor que 1, se le añade a otra variable lo que resta hasta llegar al 1, mientras que si es mayor habrá que quitarle el exceso a otra variables, o a otras dos, en función de en cuanto se sobrepase la unidad.

Se ha elegido que al establecer un nuevo porcentaje para el grupo 2, se modificará para compensar preferentemente el porcentaje del grupo 16, al igual que para el grupo 6, que también modifica preferentemente el grupo 16. Cuando se modifica el grupo 16, será el grupo 6 el que se modifica. A modo de ejemplo, se muestra a continuación el código del slider del porcentaje del grupo 2.

```
pgrupo2=(round(get(hObject, 'Value')*100))/100;
pgrupo6=get(handles.slider_grupo6, 'Value');
pgrupo16=get(handles.slider_grupo16, 'Value');

%Si pgrupo2 aumenta, disminuye pgrupo16 primero y después pgrupo6
if(pgrupo2+pgrupo6+pgrupo16>1)
    if(pgrupo2+pgrupo6<=1)
        pgrupo16=1-(pgrupo2+pgrupo6);
    else
        pgrupo16=0;
        pgrupo6=1-pgrupo2;
    end
%Si pgrupo2 disminuye, aumenta pgrupo16
elseif(pgrupo2+pgrupo6+pgrupo16<1)
    pgrupo16=1-(pgrupo2+pgrupo6);
end

set(handles.edit_grupo2, 'String', round(pgrupo2*100));
set(handles.edit_grupo6, 'String', round(pgrupo6*100));
set(handles.edit_grupo16, 'String', round(pgrupo16*100));
set(handles.slider_grupo2, 'Value', pgrupo2);
set(handles.slider_grupo6, 'Value', pgrupo6);
set(handles.slider_grupo16, 'Value', pgrupo16);
```

La función de llamada de los cuadros de texto para los porcentajes es muy similar a la de los sliders, con el añadido de que hay que comprobar que el valor introducido esté dentro de los límites del intervalo.

Se han introducido además en este panel como imágenes las señales de advertencia de peligro para cada grupo de mercancía peligrosa, así como el dibujo de tres camiones portando la señal de advertencia correspondiente a cada grupo. El aspecto del panel de selección de los porcentajes de cada grupo de mercancías peligrosas se muestra en la figura 58.

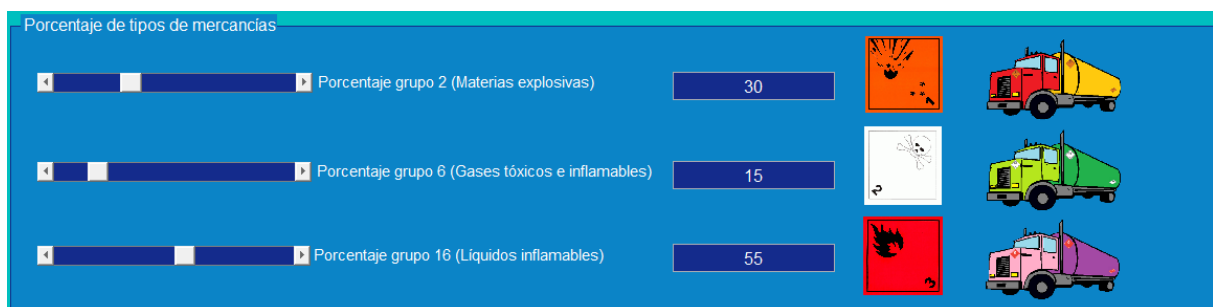


Figura 58 - Panel de control de los porcentajes de cada grupo de mercancías peligrosas

9.2.4. Botón de inicio de la simulación.

Además de los paneles de selección para cada parámetro de la aplicación, el único otro actuador que presenta la interfaz es un botón de inicio de la simulación. Este botón, en su callback, únicamente lee los valores de las variables introducidas por el usuario desde los sliders de los paneles de selección, y realiza la llamada a la función `genera_varios_camiones`:

```
num_camiones=round(get(handles.slider_num_camiones, 'Value'))+1;
pgrupo2=(round(get(handles.slider_grupo2, 'Value')*100))/100;
pgrupo6=(round(get(handles.slider_grupo6, 'Value')*100))/100;
tactualizacion=round(get(handles.slider_tiempo, 'Value'))+10;
genera_varios_camiones(num_camiones,pgrupo2,pgrupo6,tactualizacion);
```

9.2.4. Aspecto global de la interfaz.

A partir de la combinación de estos paneles y del botón de inicio de simulación, el aspecto programático de la interfaz ya estaría perfectamente definido. Añadiendo un título, y distribuyendo adecuadamente los elementos por la ventana ayudándonos de la

herramienta GUIDE de MATLAB, obtenemos el aspecto de la interfaz que se muestra en la figura 59.



Figura 59 - Interfaz de control de la aplicación

9.3. Interfaz para mostrar el mapa y las listas.

Además de una interfaz para controlar y lanzar la aplicación para generar camiones, se ha desarrollado también una interfaz gráfica para mostrar los mapas de riesgo generados, así como para mostrar las listas de conflictos de una manera interactiva, de forma que al pulsar sobre cada uno de los conflictos se muestre un cursor sobre la posición del conflicto en el mapa. Para ello, se ha empleado unos ejes gráficos (axes) para mostrar el mapa, y tres listbox, agrupadas en tres paneles, uno para cada lista de conflictos. Además, se emplean también hasta 7 listas más, que estarán ocultas al usuario, y que sirven para almacenar información de utilidad a la hora de mostrar los cursores que señalan la posición de un conflicto en el mapa.

Esta interfaz gráfica se lanza con la instrucción:

```
mostrar_mapas(mapaRGB, camion, num_naranja, alerta_naranja, ...  
...num_rojo, alerta_roja, num_violeta, alerta_violeta);
```

La función tiene un total de ocho argumentos de entrada, que sin embargo se almacenarán en una estructura de celda llamada `varargin`, de carácter general para funciones con un número de argumentos de entrada variable.

Así, para hacer referencia a cualquiera de las variables que la función recibe por línea de comandos dentro de la propia función, se utilizará el descriptor `varargin` seguido de su posición en la lista de argumentos entre corchetes. De esta forma, para mostrar el mapa de riesgo, que es el primer argumento que recibe la función, se utiliza la instrucción:

```
imshow(varargin{1});
```

Una vez aclarado el uso de `varargin`, los argumentos que recibe la función son el mapa RGB a mostrar, el vector de camiones con toda la información que contiene, el número de conflictos en la lista naranja, la propia lista naranja, el número de conflictos rojos, la lista roja, el número de conflictos violeta y la lista violeta.

Para clarificar la implementación del algoritmo, en la tabla se recogen las equivalencias entre los nombres de las variables en la función de generación de mapas y los nombres de las variables en la GUI.

VARIABLES		Descripción
En genera_mapa_riesgo	En mostrar_mapas	
mapaRGB	<code>varargin{1}</code>	Mapa de riesgo a mostrar
camion	<code>varargin{2}</code>	Vector con la información de los camiones
num_naranja	<code>varargin{3}</code>	Número de conflictos en la lista naranja
alerta_naranja	<code>varargin{4}</code>	Matriz con los índices de los camiones que participan en los conflictos naranjas y el riesgo
num_rojo	<code>varargin{5}</code>	Número de conflictos en la lista roja
alerta_roja	<code>varargin{6}</code>	Matriz con los índices de los camiones que participan en los conflictos rojos y el riesgo
num_violeta	<code>varargin{7}</code>	Número de conflictos en la lista violeta
alerta_violeta	<code>varargin{8}</code>	Matriz con los índices de los camiones que participan en los conflictos violetas y el riesgo

Tabla 33 - Paso de variables entre la aplicación de generación de mapas de riesgo y la GUI

9.3.1. Implementación de las herramientas para la exploración del mapa.

El mapa de riesgos generado se mostrará mediante una llamada a la función `imshow` en la función de apertura (`OpeningFcn`) de la función `mostrar_mapas`, seguido de la instrucción que activa el mantenimiento de la imagen, `hold on`, que permite que los cursores aparezcan sobre el mapa sin que éste desaparezca.

Además, mediante la opción `Toolbar Editor` de la herramienta `GUIDE` de `MATLAB`, incorporamos a la aplicación una barra de herramientas con los botones de `zoom in`, `zoom out`, `arrastre (pan)` y `data cursor`, que mostrará la información de los colores `RGB` del punto del mapa seleccionado por el usuario.

La combinación de todos estos elementos da como resultado la interfaz que se muestra en la figura 60.

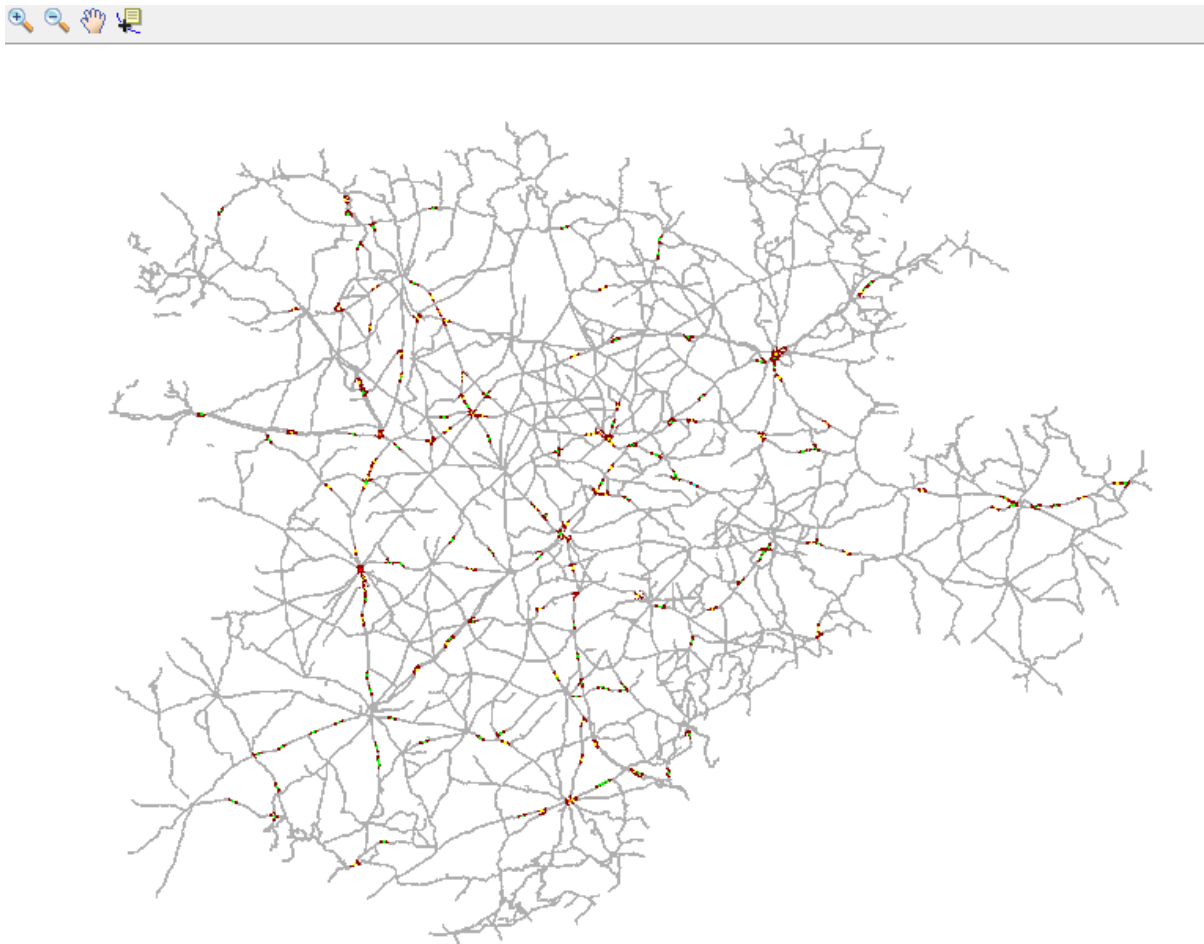


Figura 60 - Mapa de riesgo mostrado mediante la GUI `mostrar_mapas`

9.3.2. Implementación de las listas de conflictos.

Las listas de conflictos se van a implementar como listbox, un elemento de las GUI en MATLAB que muestra un vector columna de elementos celda, que son elementos entre corchetes que van a contener las cadenas de caracteres que deseamos que se muestre en cada uno de los conflictos de la lista.

Durante este apartado, se analizará de qué manera se crean las listas de conflictos en la función de apertura (OpeningFcn), agrupadas en 3 paneles distintos. El objetivo es que en cada línea de cualquiera de las tres listas se muestre:

- Para el caso de conflictos con un único camión involucrado:

Camión nº X de 'Origen' a 'Destino' (g'nº de grupo MMPP') riesgo Z

- Para el caso de conflictos con dos camiones involucrados:

Camión nº X de 'Origen' a 'Destino' (g'nº de grupo MMPP') y Camión nº Y de 'Origen' a 'Destino' (g'nº de grupo MMPP') riesgo Z

De esta forma, lo que habrá que almacenar en las celdas de cada elemento de cada lista de conflictos la cadena de caracteres deseada. Para ello, utilizando la tabla 33, buscaremos donde se encuentra cada elemento de información necesaria:

- El número del camión será el índice contenido en la alerta correspondiente. Para el caso de el elemento i de la lista naranja, el índice del primer camión estará contenido en:

`num2str(varargin{4}(i,1))`

Si buscamos el índice del segundo camión del conflicto i , habrá que buscarlo en:

`num2str(varargin{4}(i,2))`

- La cadena de caracteres correspondiente al nombre de la ciudad origen de un camión determinado, cuyo índice está apuntado por `varargin{4}(i,1)`

(elemento i de la lista naranja del ejemplo anterior), se obtendrá a partir del número de origen, contenido en el vector de camiones:

```
varargin{2} (varargin{4}(i,1)).origen
```

Este número se envía a una nueva función, `selecciona_nombre`, que devuelve la cadena de caracteres correspondiente al nombre del nodo de la lista, a partir del número del nodo en la lista ordenada alfabéticamente. De una manera análoga se obtendrá el destino de cualquier vehículo, siempre que localicemos donde se encuentra contenido su índice dentro del vector de camiones.

- El grupo de mercancía peligrosa se obtendrá de una manera parecida al caso del origen y destino, obteniéndolo a partir del vector de camiones y el índice contenido en la lista de conflictos correspondiente:

```
num2str(varargin{2} (varargin{4}(i,1)).grupo)
```

- El riesgo estará contenido en la tercera columna de la fila correspondiente de la lista de conflictos, que se redondea correctamente para mostrarlo:

```
num2str(round(varargin{4}(i,3)))
```

La actualización de las listas se realiza generando manualmente la cadena de caracteres del primer elemento de la lista en un elemento de nombre `cell`, y a continuación se completa el resto mediante un bucle `for`, que recorra todos los conflictos hasta llegar al número de alertas de cada tipo, añadiendo un elemento celda cada vez a la variable `cell`, empleando las reglas anteriormente enunciadas.

Una vez completado el vector `cell` con las cadenas de caracteres de todos los conflictos, se actualiza la lista con la instrucción, para el caso de la lista naranja:

```
set(handles.lista_naranja, 'String', cell_naranja);
```

El código completo de la `OpeningFcn` de la GUI `mostrar_mapas` se puede consultar en el anexo I de la presente memoria, dentro del CD.

El aspecto final de las listas, una vez habiendo personalizando los colores, se muestra en la figura 61.

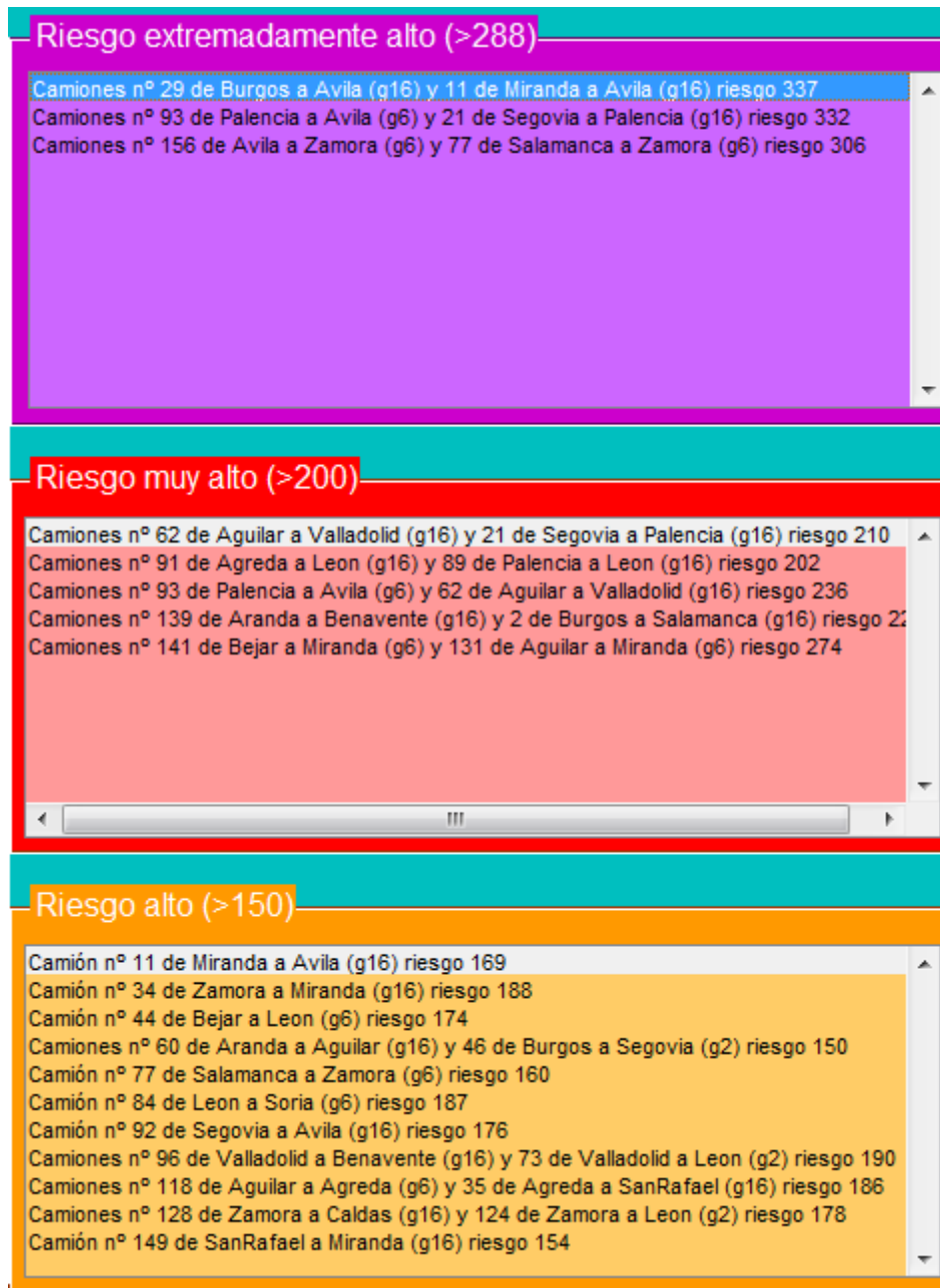


Figura 61 – Listas de conflictos en la interfaz de muestra de mapas

9.3.3. Implementación de los cursores en el mapa.

El último paso para finalizar la posición es utilizar cursores de colores para que, cada vez que se pulse un conflicto de la lista, se señalice en el mapa de riesgo la

posición del conflicto con un cursor redondo del mismo color que la alerta a la que representa.

Para poder implementar los cursores de una manera eficaz, se han incluido en la GUI otras 7 listas, que se han colocado de manera oculta tras el título de la aplicación, para que el usuario no las detecte a simple vista, y que se van a utilizar para almacenar y pasar datos entre las diferentes funciones de la GUI, ya que los argumentos de entrada a la función `OpeningFcn` de `mostrar_mapas` no se pueden utilizar directamente en las distintas funciones de callback de las listas.

Durante la creación de las listas, al mismo tiempo que se actualizan las listas de conflictos que se muestran al usuario, se almacena también como una cadena de caracteres la coordenada fila de cada elemento en una lista oculta y la coordenada columna de cada elemento en otra lista oculta. Así, por ejemplo, mientras se actualiza el elemento i de la lista roja, se almacenará la coordenada fila en el elemento i de la lista `lista_fila_r` y la coordenada columna en el elemento i de la lista `lista_col_r`. En caso de que la lista no tenga elementos, se almacenará en el primer elemento de las listas de coordenadas un `-1` como cadena de caracteres para indicarlo. Puesto que se crean dos listas para las coordenadas de cada una de las listas, habrá un total de 6 listas para almacenar las coordenadas de los conflictos.

La séptima lista oculta es una lista con tres elementos, `lista_ultimos_visitados`, que se inicializan a `-1`, y que contendrá el último elemento seleccionado para cada una de las listas, siendo el primer elemento de la lista el índice del último elemento visitado de la lista violeta y siendo el último elemento el índice del último elemento visitado de la lista naranja.

Una vez inicializadas las siete listas ocultas de la aplicación, se actualizan los callbacks de las listas que sí se muestren. Durante este apartado se va a analizar cómo se ha realizado los callbacks de la lista naranja, aunque los de las listas rojas y violetas son análogas y se pueden consultar en el anexo I en el CD del presente trabajo.

En primer lugar, se obtiene el índice del elemento pulsado y la lista de últimos visitados, de la que se obtiene en concreto el valor del último elemento de la lista

naranja que se visitó. Además, se obtiene las listas de coordenadas fila y columna de los elementos de la lista naranja, de las que se obtienen la posición del elemento que se ha pulsado, apuntado por `indice_naranja`:

```
indice_naranja = get(hObject, 'Value');

u_visitados = get(handles.lista_ultimos_visitados, 'String');
ultimo_visitado = str2double(u_visitados{3});

cell_fila_n = get(handles.lista_fila_n, 'String');
cell_col_n = get(handles.lista_col_n, 'String');
y=str2double(cell_fila_n{indice_naranja});
x=str2double(cell_col_n{indice_naranja});
```

En el caso de que ya se haya pulsado anteriormente otro elemento, es decir, que `ultimo_visitado` sea distinto de `-1`, ya habrá un cursor marcado en el mapa en su posición, por lo que se dibujará sobre él un cursor de color blanco, para que sólo haya un cursor de cada tipo en el mapa.

```
if(ultimo_visitado~-=-1)
    y_ultimo=str2double(cell_fila_n{ultimo_visitado});
    x_ultimo=str2double(cell_col_n{ultimo_visitado});
    plot(x_ultimo,y_ultimo, 'ko', 'markerfacecolor', [1 1 1]);
end
```

A continuación, en el caso de que la coordenada `x` sea válida (mayor que cero), se dibuja el cursor de color naranja en la posición del conflicto. La coordenada `x` únicamente será menor que cero cuando no haya conflictos en la lista y el usuario pulse sobre el mensaje de advertencia.

```
if(x>0)
    plot(x,y, 'ko', 'markerfacecolor', [1 0.5 0]);
end
```

Por último, se actualiza la lista de últimos visitados, y se selecciona la primera posición en la lista naranja. Este paso debe hacerse para evitar que, en caso de que esté seleccionado un elemento de la lista de un determinado índice, y la aplicación principal genere una nueva lista de tamaño menor al índice seleccionado, la lista no se muestre por error.

```
u_visitados{3}=num2str(indice_naranja);  
set(handles.lista_naranja, 'Value',1);  
set(handles.lista_ultimos_visitados, 'String',u_visitados);
```

En la figura 62 aparece un ejemplo sobre el mapa de cómo funcionan los cursores sobre los conflictos.

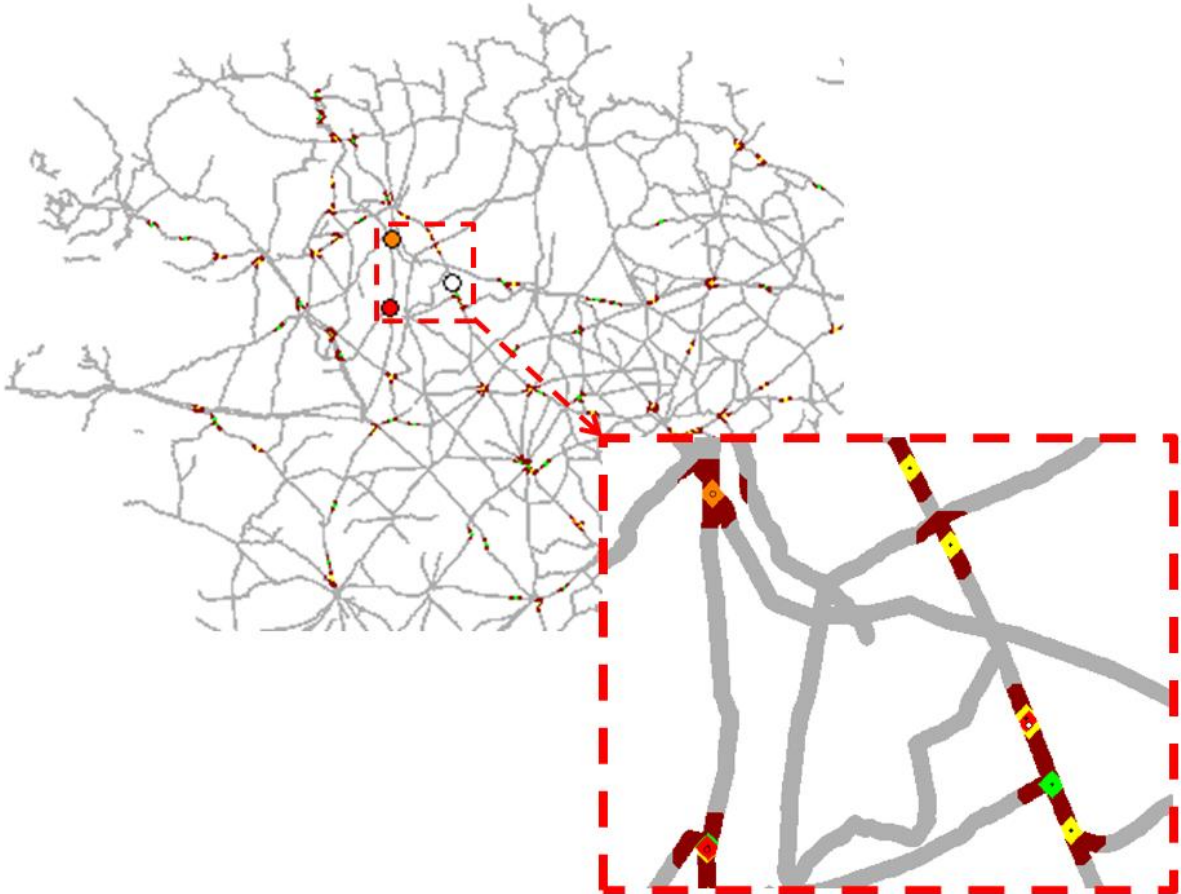


Figura 62 – Cursores indicando sobre el mapa de riesgo la posición de conflictos

Tal y como observamos, los cursores mantienen su tamaño en píxeles aunque hagamos un zoom sobre la zona, lo que supone una gran ventaja, ya que son capaces de señalar los conflictos cuando vemos todo el mapa pero no entorpecen la visión de la zona afectada cuando se realiza un zoom para estudiarla más detalladamente.

9.3.4. Aspecto global de la interfaz.

Una vez definidos los aspectos programáticos de la aplicación de muestra de mapas y listas, distribuimos adecuadamente los elementos por la ventana de la interfaz

empleando la herramienta GUIDE de MATLAB, empleando los mismos tonos azules que para el caso de la interfaz de control de la aplicación. En la figura 63 se puede observar el aspecto definitivo de la aplicación para la muestra de mapas.

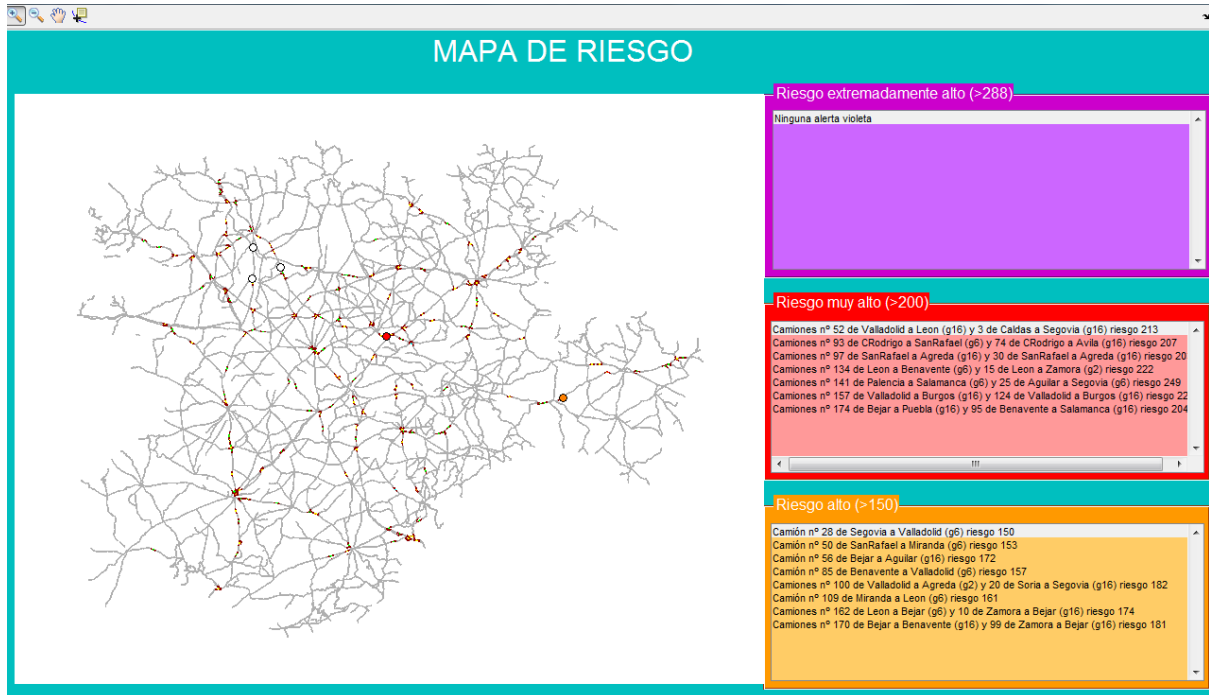


Figura 63 - Aspecto definitivo de la aplicación para muestra de mapas y listas de conflictos

CAPÍTULO 10: CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS.



10.1. Introducción.

En el presente capítulo de la memoria, se van a presentar las conclusiones a las que se ha llegado tras todo el trabajo realizado en el presente proyecto, además de proponer algunas líneas de trabajo que podrían seguir algunos futuros desarrollos que partan del presente proyecto.

Previamente a las conclusiones y futuros desarrollos, además, se presenta un breve resumen del proyecto desarrollado.

El objetivo de este proyecto ha sido el de crear una herramienta informática que permita aplicar un modelo que estima el riesgo ambiental de cada punto del mapa, el desarrollado por Á. Arranz Zazo en su proyecto de 2013, en tiempo real a todos los vehículos que transporten mercancías peligrosas presentes en la red en cada instante de tiempo, cuya posición se actualizará periódicamente mediante emisores GPS equipados en los vehículos. Además, para probar que la aplicación funciona sin necesidad de recurrir a monitorización de vehículos reales, se ha creado también un simulador de vehículos de transporte de mercancías peligrosas en tiempo real.

Para ello, en primer lugar se han transformado los mapas de riesgo ráster de los que partimos en imágenes en formato TIFF, que se transforman en matrices numéricas mediante MATLAB para extraer de ellos la información necesaria.

A partir de un mapa de carreteras homogéneo, se ha empleado un algoritmo de búsqueda A* implementado en MATLAB para calcular la ruta óptima entre dos puntos del mapa siguiendo las carreteras, dejando a elección del usuario si se optimiza la distancia recorrida o el tiempo empleado en la ruta.

Una vez calculada una ruta, se ha desarrollado también un algoritmo de seguimiento de rutas en tiempo real, en el que a partir de una ruta completa, la última posición registrada, y un intervalo de tiempo transcurrido desde la última actualización de posición se calcula la nueva posición del vehículo, previa consulta a un mapa de tipos de carreteras para determinar la velocidad a la que el vehículo se desplaza.

Partiendo de los algoritmos de cálculo y de seguimiento de rutas, se han elegido una serie de municipios importantes de Castilla y León para actuar como origen y destino de todos los vehículos que se simulen, de forma que se calculan todas las rutas posibles entre estos municipios, y se almacenan en ficheros de datos que se cargarán desde la aplicación para generar los vehículos simulados. A partir de ahí, periódicamente se genera una nueva posición para todos los vehículos, para conformar el simulador en tiempo real.

A partir de las posiciones de todos los vehículos a cada momento, se asigna un riesgo consultando en los mapas de riesgo desarrollados por Á. Arranz Zazo, y se elabora un mapa que representa el riesgo que suponen los vehículos de transporte de mercancías peligrosas que circulan en la red de carreteras de Castilla y León, así como una serie de listas de conflictos para detectar situaciones de alto riesgo.

Por último, se ha generado una interfaz gráfica para que el usuario pueda controlar fácilmente la aplicación, así como que el mapa y la información acerca de las principales alertas de riesgo de cada momento pueda ser fácilmente consultada.

10.2. Conclusiones.

La experiencia acumulada durante el desarrollo del presente trabajo, así como los resultados obtenidos en el mismo permiten llegar a las conclusiones generales que se exponen a continuación:

- La aplicación del presente proyecto no es especialmente novedosa en el sentido de monitorizar una serie de vehículos, asociados con un número identificador de señal GPS, cuya posición se muestra en un mapa. De hecho, ya existen varios programas comerciales que permiten que una empresa mantenga monitorizada su flota de vehículos en tiempo real. En este tipo de aplicaciones, el objeto central del seguimiento son los propios vehículos, porque contienen elementos de valor comercial para la empresa, que necesita asegurarse de estar optimizando los costes en el transporte de mercancías.

No obstante, en el presente proyecto, a diferencia de las aplicaciones existentes, el objeto central del estudio no son los vehículos en sí, sino todo el territorio de

Castilla y León, y en particular los elementos ambientales expuestos a daños provocados por un hipotético accidente con mercancías peligrosas en las zonas circundantes de las carreteras.

Prueba de ello es que cuando se generan los mapas de riesgo, únicamente se tiene información acerca de la posición de aquellos vehículos que superen un determinado umbral de riesgo para su entorno. De esta forma, el total de información relativa a los vehículos se ve sometida a un filtrado en función de las características del territorio, preservándose así la privacidad de los vehículos y sus conductores, ya que no se pretende monitorizar sus rutas, paradas o velocidades de crucero.

- El coste computacional de la aplicación actual, en la que se integran el simulador de vehículos en tiempo real y la gestión de rutas en ficheros de datos es mayor que el que tendría la aplicación en el caso de estar trabajando recibiendo señales GPS desde vehículos reales, especialmente al arrancar el programa, ya que no se tendrían que cargar las rutas para los vehículos desde los ficheros de datos, que es lo que más tiempo de computación consume. Además, en caso de que se estuviera trabajando con camiones reales, el coste computacional del algoritmo de seguimiento de rutas se sustituiría por el de un protocolo de comunicación adecuado para recibir las señales GPS y transmitir las órdenes a los conductores, por lo que la aplicación de generación de mapas y listas de riesgo sería mucho más rápida al arrancar y tendría aproximadamente la misma velocidad de respuesta en régimen estacionario en el caso de una implementación con vehículos reales.
- Las decisiones que se pueden tomar apoyándose en los mapas y listas de conflictos generados abarcan un gran abanico de posibilidades, y pueden tener repercusión en una gran variedad de horizontes temporales. Así, se podrán tomar decisiones cortoplacistas, que eviten o reduzcan una situación puntual de riesgo, tales como obligar a un vehículo a detenerse o variar su ruta; decisiones a medio plazo, que afecten a varios vehículos, tanto en el presente como en el futuro, como variar las rutas que una determinada empresa utiliza para sus convoyes; y decisiones a largo plazo, como mejorar

infraestructuras o variar la RIMP en años venideros apoyando la decisión en la información suministrada por la aplicación.

- El comportamiento de la aplicación puede ser fácilmente variado de múltiples formas, al haberse agrupado los parámetros en forma de constantes en el código. Así, es posible que para una determinada aplicación se desee disminuir alguno de los umbrales, cuando los requerimientos de seguridad aumenten; o bien aumentar el radio de la zona de influencia de los vehículos; o variar la velocidad a la que se desplazan los vehículos por la red de carreteras.

Además de los parámetros que son importantes para la respuesta del algoritmo, también son modificables elementos puramente estéticos como son los colores para cada uno de los intervalos de riesgo o la gama de colores del mapa.

Esto responde al objetivo de que la aplicación pueda adaptarse de una manera sencilla a los cambios en el campo del transporte de mercancías, ganando así en versatilidad y robustez.

- El principio de superposición aplicado a la hora de componer los mapas de riesgo de los vehículos, es decir, sumar los valores del riesgo de cada camión cuando las zonas de influencia de dos o más vehículos se superponen es una aproximación bastante grande, y es consecuencia directa del hecho de tratar de darle un valor numérico al riesgo que pueda ser trasladado a cualquier grupo de mercancías.

No obstante, en situaciones complejas como el cruce entre dos vehículos que transportan mercancías peligrosas distintas, el valor de riesgo de la situación completa se verá afectado por la interacción entre las sustancias que estén involucradas. Así, la interacción entre un líquido inflamable del grupo 16 y un explosivo del grupo 2 supondrá un riesgo extra que no aparecerá, por ejemplo, al encontrarse un gas tóxico del grupo 6 con un explosivo.

El desarrollo de un algoritmo que modele las interacciones entre mercancías forma parte de una de las posibles futuras líneas de trabajo propuestas en el siguiente apartado, el de futuros desarrollos, de la presente memoria.

10.3. Futuros desarrollos.

Se presentan a continuación tres líneas de trabajo, que tratan de hacer servir a este proyecto como base para alcanzar otra serie de objetivos más ambiciosos, o bien para seguir con el trabajo comenzado por Á. Arranz Zazo (2013) y continuado a través del presente proyecto.

- Una línea básica de trabajo a seguir a partir del presente proyecto es la de utilizar los contenidos tanto del presente proyecto como del de Á. Arranz Zazo (2013) para ampliar la aplicación a un número de grupos de mercancías peligrosas mucho mayor, o a un mapa más amplio, como puede ser el de la Península Ibérica.

Además, la aplicación se prestaría también a mejorar el simulador de vehículos en tiempo real añadiendo más municipios a la red de nodos origen y destino, o modificar la aplicación de seguimiento de rutas para que varíe su velocidad en travesías y tramos umbrales, o bien modificar el algoritmo de cálculo de rutas para que calcule rutas válidas para transporte de mercancías peligrosas, es decir, utilizando únicamente las vías permitidas salvo cuando sea imprescindible para llegar al destino emplear una carretera secundaria.

Por otra parte, sería interesante el desarrollo de un modelo que estudie la interacción entre los diferentes tipos de mercancías que se transportan, y que se pueda aplicar a la generación de mapas de riesgo sustituyendo al principio de superposición que se emplea actualmente.

Esta sería una línea de trabajo que persiga como objetivo la mejora, ampliación y eliminación de errores de la aplicación desarrollada en el presente proyecto, así como del simulador en tiempo real que sirve para probarla.

- Una segunda línea de trabajo que se puede seguir partiendo del presente proyecto es la del desarrollo de los elementos de hardware necesarios para implementar la aplicación con vehículos reales, así como realizar los cambios necesarios en el código para pasar de una monitorización de una simulación a una monitorización de vehículos reales.

Para servir a este propósito, el dispositivo deberá tener un emisor GPS, preferentemente compatible con coordenadas UTM 30N extendido, así como un

sistema para recibir instrucciones por parte de la administración competente, de forma que se puedan dar las órdenes adecuadas (tales como desviar la ruta, detener el vehículo un tiempo determinado en un área de descanso, etc.) al conductor para prevenir un accidente y evitar situaciones de alto riesgo para el entorno.

A través de esta línea de trabajo, se persigue continuar con el camino arrancado con el proyecto de Á. Arranz Zazo (2013) y continuado en el presente proyecto, y dar un paso más hacia la implantación de un sistema eficaz de control y monitorización de riesgos en el transporte de mercancías peligrosas.

- Otra de las posibles líneas de trabajo futuras es incrementar la funcionalidad del algoritmo de generación de mapas de riesgo, para pasar de una monitorización de riesgos en tiempo real, es decir, riesgos en el presente, a una monitorización de riesgos predictivas, es decir, riesgos en el futuro.

Para llevar a cabo una mejora como esta, sería necesario desarrollar un algoritmo que tenga en cuenta las rutas de cada vehículo, estime las zonas en las que se van a encontrar con otros vehículos de transporte de mercancías peligrosas y advierta de situaciones de riesgo que podrían aparecer en un futuro próximo, de forma que las autoridades puedan actuar sobre los riesgos antes de que estos representen un peligro real para el entorno.

De hecho, la prevención de riesgos es ya una realidad en una gran variedad de entornos industriales y no industriales, por lo que el presente proyecto podría ser la base sobre la que se cimentara un algoritmo eficaz para aplicar la prevención de riesgos al transporte de mercancías peligrosas.

Esta línea de trabajo, la más ambiciosa de las tres, buscaría desarrollar un modelo predictivo en principio independiente del presente proyecto, pero que se pueda integrar en él para aumentar las capacidades de la aplicación desarrollada.

CAPÍTULO 11: ESTUDIO ECONÓMICO DEL PROYECTO.



11.1. Introducción.

Dado que el proyecto realizado es de investigación y desarrollo de una aplicación, todos los costes asociados se originan a partir del coste del personal de desarrollo y el coste de los medios y el equipo empleado.

Para realizar el cálculo de costes, éstos se dividen en dos tipos:

- **Costes directos:** Son aquellos costes directamente identificables y atribuibles a un determinado objetivo o proyecto.
- **Costes indirectos:** Son aquellos costes no identificables con un único objetivo o proyecto, sino que pueden estar compartidos por varios objetivos o proyectos, y no hay forma de establecer directamente qué cantidad de coste es atribuible a un determinado proyecto.

11.2. Costes del proyecto.

Para determinar los costes del presente proyecto, en el presente apartado se considerarán tanto los costes de personal como los costes del material utilizado en la realización del mismo.

11.2.1. Costes de personal.

El único coste de personal existente en el presente proyecto es el originado por el ingeniero que lo ha llevado a cabo.

En primer lugar, se va a obtener el coste por hora de un ingeniero en promedio para efectuar las valoraciones presupuestarias de los salarios y de las amortizaciones del material.

Primero se calcularán las horas efectivas de trabajo anual a partir de datos estadísticos.

11.2.1.1. Horas anuales estimadas.

En la tabla 34 aparecen reflejadas las horas totales que trabaja un ingeniero anualmente con una jornada de 40 horas semanales, a 8 horas al día, excluyendo sábados, domingos y festivos, con un total de 22 días de vacaciones, más 5 días de asuntos propios.

Al final, se calculan los días efectivos de trabajo por año medio, y se multiplican por las horas trabajadas cada día.

Concepto	Días
Año medio	365,25
Días no efectivos	145,36
Sábados y domingos	104,36
Días festivos reconocidos	14
Días de vacaciones	22
Días libres por asuntos propios	5
Días efectivos reconocidos totales	219,89
TOTAL DE HORAS EFECTIVAS AL AÑO (Jornada de 8 horas)	1.759,12

Tabla 34 - Horas anuales efectivas en promedio

11.2.1.2. Coste anual del ingeniero.

Vamos a calcular ahora lo que a una empresa le cuesta un ingeniero en promedio, con un sueldo bruto de 28.000 € anuales divididos en 14 pagas.

La cotización anual de la empresa por trabajador a la Seguridad Social es de un 29.9 %, de los cuales 23,6% es para Contingencias Comunes, un 5,5% para Desempleo, un 0.6 % para Formación Profesional y un 0.2 % para el Fondo de Garantía Salarial. No se han considerado las Contingencias Profesionales, que dependen del convenio existente con la empresa. A partir de estos datos se elabora la tabla 35.

Concepto	Cantidad
Sueldo bruto anual	28.000 €
Sueldo bruto mensual en 14 pagas	2.000 €
Cotización a la Seguridad Social al 29,9%	598 €
Cotización anual a la Seguridad Social	8.372 €
COSTE TOTAL ANUAL	36.372 €

Tabla 35 - Coste anual del ingeniero

11.2.1.3. Coste horario del ingeniero.

Una vez que tenemos las horas efectivas de trabajo anuales del ingeniero y el coste total anual del trabajador para la empresa, podemos calcular el coste para la empresa de una hora de trabajo, simplemente dividiendo el coste total entre el número de horas trabajadas, tal y como se muestra en la tabla 36.

Concepto	Cantidad
Coste total anual	36.372 €
Horas efectivas totales al año	1.759,12 horas
COSTE HORARIO DEL INGENIERO	20,68 €/hora

Tabla 36 - Coste horario del ingeniero

11.2.1.4. Número de horas efectivas de trabajo dedicadas al proyecto.

La cantidad de horas que se han dedicado a la realización de cada una de las etapas del presente proyecto se refleja en la tabla 37.

Etapas	Horas dedicadas
Recopilación de información y estudio de posibilidades	40
Desarrollo del código de la aplicación y batería de pruebas	280
Elaboración de la documentación	220
TOTAL	540

Tabla 37 - Número de horas efectivas de trabajo dedicadas al proyecto

11.2.1.5. Coste total de personal en el proyecto.

Dado que ya tenemos el coste del ingeniero por cada hora trabajada, así como el número de horas de trabajo dedicadas al presente proyecto, podemos calcular el coste total de personal del presente proyecto sin más que multiplicar los dos conceptos, tal y como se puede ver en la tabla 38.

Concepto	Cantidad
Coste horario del ingeniero	20,68 €/hora
Número de horas efectivas de trabajo dedicadas al proyecto	540 horas
COSTE TOTAL DE PERSONAL EN EL PROYECTO	11.167,20 €

Tabla 38 - Coste total de personal en el proyecto

11.2.2. Coste del material.

En el presente estudio económico se va a desglosar el coste del material en dos: el coste de amortización del equipo en el que hemos invertido y los costes del material auxiliar utilizado en el presente proyecto.

11.2.2.1. Coste total de la inversión.

Previamente a calcular los costes de amortización, es necesario conocer el montante total de la inversión en el equipo adquirido, tanto en hardware como en software, lo cual se muestra en la tabla 39.

Material	Precio
Hardware	890 €
Ordenador TOSHIBA Tecra A10-1H5 i2 4GB de RAM Windows 7	890 €
Software	4.624 €
Microsoft Office Professional 2007	709 €
IDRISI	915 €
Licencia individual MATLAB r2013a	2.000 €
Image Processing Toolbox	1.000 €
COSTE TOTAL DE MATERIAL	5.514 €

Tabla 39 - Coste total de la inversión

11.2.2.2. Coste de amortización del equipo.

El coste de amortización del equipo adquirido engloba los costes asociados al empleo del hardware y software utilizados en el proyecto, a consecuencia de la inversión inicial requerida para adquirirlos.

Para el cálculo de la amortización de los equipos, se ha considerado un periodo de amortización de 5 años, habitual para este tipo de equipos, y que el equipo se encuentra disponible para el ingeniero en todas las horas efectivas, lo que implicará considerar que las horas efectivas de trabajo de los equipos son las mismas que las del ingeniero. Además, se va a suponer que al cabo de los 5 años de amortización, el valor residual de los equipos es nulo.

La cuota de amortización anual será del 20%, para que al cabo de 5 años se haya amortizado el 100% del equipo.

Para calcular el coste total de amortización del equipo, habrá que calcular en primer lugar el coste de amortización de cada hora efectiva, para a continuación multiplicarlo por el número de horas efectivas dedicadas al proyecto. Este cálculo aparece reflejado en la tabla 40.

Concepto	Cantidad
Inversión total en el equipo	5.514 €
Cuota anual de amortización	20%
Coste de amortización anual	1.102,80 €
Horas efectivas de trabajo del equipo al año	1759,12 horas
Coste horario de amortización	0,63 €/hora
Total de horas efectivas dedicadas al proyecto	540 horas
COSTE TOTAL DE AMORTIZACIÓN	340,20 €

Tabla 40 - Coste total de amortización del equipo

11.2.2.3. Coste de material auxiliar.

El coste de material auxiliar engloba aquellos gastos que están asociados al empleo de material consumible en el proyecto, como es el papel, DVDs, etc. El valor de estos costes se muestra en la tabla 41.

Concepto	Cantidad
DVDs, papel y demás material fungible	10 €
Costes de impresión y encuadernación de la memoria	250 €
COSTE TOTAL DE MATERIAL AUXILIAR	260 €

Tabla 41 - Coste de material auxiliar

11.2.3. Coste total del proyecto.

Para calcular el coste total del proyecto, deberemos calcular los costes directos, que son la suma de los costes de personal y material, los costes indirectos y los costes totales, como suma de los costes directos e indirectos.

En la tabla 42 aparece el coste total del proyecto desglosado según lo dicho anteriormente.

Concepto	Cantidad
Costes de personal	11.167,20 €
Costes de amortización del equipo	340,20 €
Coste de material auxiliar	260 €
Costes directos totales	11.767,40 €
Consumo de electricidad	50 €
Consumo de combustible en desplazamientos	40 €
Consumo de servicios varios	25 €
Costes indirectos totales	115 €
COSTE TOTAL DEL PROYECTO	11.882,40 €

Tabla 42 - Costes totales del proyecto

Índice de figuras.

Figura 1 - Etiqueta genérica para materiales de clase 1	23
Figura 2 - Etiquetas genéricas para las materias de la clase 2, inflamables, no inflamables o tóxicos .	25
Figura 3 – Etiqueta genérica para mercancías de clase 3	27
Figura 4 - Etiqueta genérica para materias de la clase 4.1	29
Figura 5 - Etiqueta genérica para las sustancias de la clase 4.2	30
Figura 6 - Etiqueta genérica para materias de la clase 4.3	32
Figura 7 – Etiqueta genérica para materias comburentes de la clase 5.1	33
Figura 8 - Etiqueta genérica para las mercancías de la clase 5.2.....	34
Figura 9 – Etiqueta genérica para las materias tóxicas de la clase 6.1	36
Figura 10 – Etiqueta genérica para las materias infecciosas de la clase 6.2	37
Figura 11 - Etiqueta genérica para señalar materias radiactivas de la clase 7.....	39
Figura 12 - Etiqueta genérica que acompaña a las materias corrosivas de la clase 8	41
Figura 13 - Etiqueta genérica que acompaña las mercancías de la clase 9	42
Figura 14 - Panel naranja	61
Figura 15 - Colocación de los paneles naranja y etiquetas de peligro según el tipo de vehículo.....	62
Figura 16 - Colocación de las etiquetas de peligro y paneles naranja en una cisterna	63
Figura 17 - Representación de la función logística	84
Figura 18 - Diagrama de trabajo para determinar el riesgo en una zona determinada.....	94
Figura 19 - Superposición de capas a analizar en un territorio	97
Figura 20 - Probabilidad de accidente en la red de carreteras de Castilla y León.....	100
Figura 21 - Mapa de vulnerabilidad total frente a líquidos inflamables del grupo 16	102
Figura 22 - Gravedad potencial máxima de un accidente de líquidos inflamables del grupo 16.....	103
Figura 23- Mapa de umbrales de riesgo para líquidos inflamables del grupo 16	105
Figura 24 - Proyección cartográfica transversa de Mercator	119
Figura 25 - División en husos UTM del mapamundi	120
Figura 26 - Proyección de la península Ibérica con una proyección UTM 30 N extendida.....	120
Figura 27 - Tabla de información que aporta IDRISI con cada mapa.....	121
Figura 28 - Proceso de transformación de información geográfica para su operación con MATLAB .	124
Figura 29 - Imágenes en color, escala de grises y binaria.....	126
Figura 30 - Mapa binario empleado para el cálculo de rutas	134
Figura 31 - Operadores posibles en la expansión de nodos	138

Figura 32 - Diagrama de flujo de un algoritmo de búsqueda genérico	141
Figura 33 - Construcción del árbol de búsqueda primero en anchura	144
Figura 34 - Construcción del árbol de búsqueda de coste uniforme.....	146
Figura 35 - Construcción del árbol de búsqueda primero en profundidad	148
Figura 36 - Construcción del árbol para búsqueda voraz	150
Figura 37 . Construcción del árbol para una búsqueda A*	152
Figura 38 - Estructura de lista enlazada.....	162
Figura 39 - Ruta de mínima distancia entre Valladolid y San Rafael	168
Figura 40 – Ruta de mínimo tiempo entre Valladolid y San Rafael	169
Figura 41 - Comparativa entre las rutas de distancia mínima y tiempo mínimo.....	170
Figura 42 - Diagrama de entradas y salidas del algoritmo de planificación de rutas	171
Figura 43 - Diagrama de entradas y salidas del algoritmo de seguimiento de rutas	176
Figura 44 - Ruta de ejemplo para el algoritmo de seguimiento	177
Figura 45 - Variable restante cuando el vehículo avanza en horizontal/vertical	183
Figura 46 - Variable restante cuando el vehículo avanza en diagonal	184
Figura 47 - Nueva posición calculada tras una llamada a la función	188
Figura 48 - Nueva posición calculada tras dos llamadas a la función.....	190
Figura 49 - Esquema básico de la aplicación para simular los vehículos.....	193
Figura 50 - Nodos de la red de comunicaciones para la aplicación de simulación de vehículos.....	201
Figura 51 - Red de Itinerarios para Mercancías Peligrosas en 2014.....	205
Figura 52 - Diagrama de flujo del simulador de vehículos en tiempo real	216
Figura 53 - Diagrama de entradas y salidas de la aplicación para generar mapas	223
Figura 54 - Diagrama de flujo de la aplicación para generar mapas	226
Figura 55 - Mapa generado con los parámetros seleccionados	233
Figura 56 - Panel de control del número de camiones simulados.....	247
Figura 57 - Panel de control del tiempo de actualización.....	248
Figura 58 - Panel de control de los porcentajes de cada grupo de mercancías peligrosas	250
Figura 59 - Interfaz de control de la aplicación	251
Figura 60 - Mapa de riesgo mostrado mediante la GUI mostrar_mapas	253
Figura 61 – Listas de conflictos en la interfaz de muestra de mapas	256
Figura 62 – Cursores indicando sobre el mapa de riesgo la posición de conflictos	259
Figura 63 - Aspecto definitivo de la aplicación para muestra de mapas y listas de conflictos.....	260

Índice de tablas.

Tabla 1-Clasificación del ADR/RID.....	20
Tabla 2 - División de materias y objetos explosivos de clase 1	22
Tabla 3 - Grupos de compatibilidad de materias y objetos de clase 1	23
Tabla 4 - Grupos de los gases.....	25
Tabla 5 - División de materias líquidas inflamables de clase 3	26
Tabla 6 - Clasificación de las materias de clase 3 en función de su peligrosidad	27
Tabla 7 - División de materias sólidas inflamables de clase 4.1	28
Tabla 8 - División de materias de la clase 4.2	30
Tabla 9 - División de materiales de la clase 4.3	31
Tabla 10 - División de materias comburentes de la clase 5.1.....	32
Tabla 11 - División de materias tóxicas de clase 6.1.....	35
Tabla 12- Clasificación de las materias tóxicas según DL50 y CL50	36
Tabla 13 – División de materias infecciosas de clase 6.2.....	37
Tabla 14 - División de materias y objetos peligrosos de clase 9.....	42
Tabla 15 - Características y denominación de los RTP.....	44
Tabla 16 – Significado de las cifras del número de identificación de peligro en función de la materia que se transporta.....	64
Tabla 17- Valores de peligrosidad extrínseca (P_e) según el tipo de accidente	89
Tabla 18 - Estimación de los umbrales para la vulnerabilidad ante accidente.....	92
Tabla 19 - Estimación de los umbrales para la gravedad de un accidente	103
Tabla 20 - Umbrales de riesgo	104
Tabla 21 - Estructura de los nodos para el árbol de búsqueda	154
Tabla 22 - Valor de los campos del nodo raíz	156
Tabla 23 - Elementos de la lista de nodos	156
Tabla 24 - Tipos y velocidades de carreteras.....	165
Tabla 25 - Ranking de municipios más poblados de Castilla y León en 2011	195
Tabla 26 – Municipios seleccionados para la red por su importancia administrativa o demográfica	197
Tabla 27 - Tabla de las principales vías de comunicación con otros territorios colindantes.....	198
Tabla 28 - Municipios incorporados a la red de nodos de comunicación representando el límite con otros territorios	199
Tabla 29 - Lista total de nodos de comunicación para la aplicación de simulación de vehículos en tiempo real.....	200

Tabla 30 - Estructura de datos para los camiones simulados.....	212
Tabla 31 - Umbrales de riesgo y colores para la representación del mapa.....	231
Tabla 32 - Gama de colores del mapa.....	232
Tabla 33 - Paso de variables entre la aplicación de generación de mapas de riesgo y la GUI	252
Tabla 34 - Horas anuales efectivas en promedio.....	272
Tabla 35 - Coste anual del ingeniero	272
Tabla 36 - Coste horario del ingeniero	273
Tabla 37 - Número de horas efectivas de trabajo dedicadas al proyecto	273
Tabla 38 - Coste total de personal en el proyecto.....	273
Tabla 39 - Coste total de la inversión	274
Tabla 40 - Coste total de amortización del equipo.....	275
Tabla 41 - Coste de material auxiliar	275
Tabla 42 - Costes totales del proyecto.....	276

Índice de anexos.

Resumen/Abstract de 150 palabras.....	<i>Carpeta Anexos del CD</i>
Anexo I con todo el código fuente desarrollado en pdf.....	<i>Carpeta Anexos del CD</i>
Carpeta 'Código' con los ficheros de código fuente y mapas.....	<i>Carpeta Anexos del CD</i>
Carpeta 'Figuras' con las figuras de la memoria.....	<i>Carpeta Anexos del CD</i>
Carpeta 'Tablas' con las tablas de la memoria.....	<i>Carpeta Anexos del CD</i>
Carpeta 'Ilustraciones Portada' con las ilustraciones de las portadas de los capítulos de la memoria.....	<i>Carpeta Anexos del CD</i>

Bibliografía.

ABKOWITZ, Mark D.; LEPOFSKY, Mark; CHENG, Paul. *Selecting Criteria for Designating Hazardous Materials Highway Routes*. Transportation Research Record, National Academy of Sciences, No 1333, 1993, pp. 30-35.

ABKOWITZ, Mark D.; LEPOFSKY, Mark; CHENG, Paul. *Transportation Hazard Analysis in an Integrated GIS Environment*. Journal of Transportation Engineering, Vol. 119, No 2, 1993, pp. 239-254.

AL ASHI, Refaat Yousef; AL AMERI, Ahmed. *Introduction to Graphical User Interface (GUI)*. United Arab Emirates University, 2003.

ALMAGUER RIVERÓN, Carmen Delia. *El riesgo de desastres, una reflexión filosófica*. Málaga, Universidad de Málaga, 2008.

ARRANZ ZAZO, Ángel. *Análisis de riesgos ambientales en el transporte de mercancías peligrosas con métodos multivariantes. Regresión logística*. Valladolid, Universidad de Valladolid, 2013.

AYALA CARCEDO, Francisco Javier. *Peligros ambientales en las evaluaciones de Impacto*. *Boletín Geológico y Minero.*, 101 (6), 1990, pp. 905 a 918.

BARRAGÁN GUERRERO, Diego Orlando. *Manual de Interfaz Gráfica de Usuario en Matlab*. Ecuador, 2008

BECK, Ulrich. *La sociedad del riesgo. Hacia una nueva modernidad*.(1ª ed.). Madrid, 2002.

BOE. *Real Decreto 407/1992, de 24 de abril, por el que se aprueba la Norma Básica de Protección Civil*. Madrid, BOE Ediciones, 1992.

BOE. *Real Decreto 230/1998, de 16 de febrero, por el que se aprueba el Reglamento de explosivos*. Madrid, BOE Ediciones, 1998, p. 274.

BOE. *Real Decreto 2822/1998, de 23 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento General de Vehículos*. Madrid, BOE Ediciones, 1998.

BOE. *Orden de 24 de abril de 2000 por la que se regula el parte de accidente*. Madrid, BOE Ediciones, 2000.

BOE. *Real Decreto 1256/2003, de 3 de octubre, por el que se determinan las autoridades competentes de la Administración General del Estado en materia de transporte de mercancías peligrosas y se regula la comisión para la coordinación de dicho transporte*. Madrid, BOE Ediciones, 2003.

BOE. *Orden FOM/605/2004 de 27 de febrero 2004 sobre la capacitación profesional de los consejeros de seguridad para el transporte de mercancías peligrosas por carretera, por ferrocarril o por vía navegable*. Madrid, BOE Ediciones, 2004.

BOE. *Real Decreto 948 /2005, de 29 de julio, por el que se modifica el Real Decreto 1254/1999, de 16 de julio, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas*. Madrid, BOE Ediciones, 2005.

BOE. *Resolución de 21 de noviembre de 2005, de la Dirección General de Transportes por Carretera, sobre la inspección y control por riesgos inherentes al transporte de mercancías peligrosas por carretera*. Madrid, BOE Ediciones, 2005.

BOE. *Orden FOM/2924/2006, de 19 de septiembre, por la que se regula el contenido mínimo del informe anual para el transporte de mercancías peligrosas por carretera, por ferrocarril o por vía navegable*. Madrid, BOE Ediciones, 2006.

BOE. *Real Decreto 551/2006 de 5 de mayo, por el que se regulan las operaciones de transporte de mercancías peligrosas por carretera en territorio español (BOE 12)*. Madrid, BOE Ediciones, 2006.

BOE. *Reglamento General de Conductores*. Madrid, BOE Ediciones, 2009.

BOE. *Real Decreto 563/2010, de 7 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento de artículos pirotécnicos y cartuchería*. Madrid, BOE Ediciones, 2010.

BOE. *Orden FOM/2861/2012, de 13 de diciembre, por la que se regula el documento de control administrativo exigible para la realización de transporte público de mercancías por carretera*. Madrid, BOE Ediciones, 2013.

BOE. *Resolución del 24 de enero de 2014, de la Dirección General de Tráfico, por la que se establecen las medidas especiales de regulación del tráfico durante el año 2014*. Madrid, BOE Ediciones, 2014.

BOSQUE SENDRA, Joaquín. *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid, Rialp, 1992.

BRAINARD, Julii; LOVETT, Andrew; PARFITT, Julian. *Assessing hazardous waste transport risks using a GIS*. *International Journal of Geographic Information Systems - IJGIS*, 10 (7), 1996, pp. 831-849.

CANUTEC. *Emergency response guidebook*. Ed. Ottawa, Transport Canada, 2012.

CEE. *Acuerdo Europeo sobre transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera*. 2013 [En línea] Disponible en: <http://www.boe.es/boe/dias/2013/03/14/pdfs/BOE-A-2013-2784.pdf> [Último acceso: 2 de julio de 2014].

CHAPMAN, Stephen J. *MATLAB Programming for Engineers (2nd Edition)*. Brooks Cole Publishing Co, 2001.

MAGRAB, Edward B. *Engineers guide to MATLAB 6*. Prentice Hall, 2000.

EU. *Corine Land Cover*. 2013 [En línea] Disponible en: www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover [Último acceso: 2 de julio de 2014].

GIDDENS, Anthony. *Un mundo desbocado. Los efectos de la globalización en nuestras vidas*. Madrid, Taurus, 2000.

GOBIERNO DE ESPAÑA. *Real Decreto 551/2006 de 5 de mayo, por el que se regulan las operaciones de transporte de mercancías peligrosas por carretera en territorio español*. Madrid, BOE Editores, 2006.

HAHN, Brian D. *Essential MATLAB for scientists and engineers*. Buter-worth-Heinemann, 2002.

HUNT, Brian R. *A guide to MATLAB for beginners and experienced users*. Cambridge University Press, 2001.

INE. *Instituto Nacional de Estadística*. 2012. [En línea] Disponible en: <http://www.ine.es/jaxi/menu.do?type=pcaxis&path=%2Ft20%2Fe260%2Fa2012%2F&file=pcaxis&N=&L=0> [Último acceso: 2 de julio de 2014].

LOVETT, Andrew; PARFITT, Julian; BRAINARD, Julii. *Using GIS in risk analysis: a case study of hazardous waste transport Risk Analysis*. Norwich, School of Environmental Sciences, University of East Anglia, 1997.

MARTÍNEZ-ALEGRÍA LÓPEZ, Roberto; ORDOÑEZ GALÁN, Celestino; TABOADA CASTRO, Javier. *A conceptual model for analyzing the risks involved in the transportation of hazardous goods*. Journal of Human and Ecological Risk Assessment, 2003.

MARTÍNEZ-ALEGRÍA LÓPEZ, Roberto; TABOADA CASTRO, Javier; ORDOÑEZ GALÁN, Celestino. *Riesgos Ambientales en el Tráfico de Mercancías Peligrosas por Carretera*. Vigo, Universidad de Vigo, 2005.

NÚÑEZ CASTRO, Andrés Manuel. *Riesgo e incertidumbre en las sociedades tecnológicas complejas*. 2011.

[En línea] Disponible en: www.ateneodelalaguna.es/pdf/ATENEO30/riesgo.pdf [Último acceso: 2 de julio de 2014].

ORDOÑEZ GALÁN, Celestino; MARTÍNEZ-ALEGRÍA LÓPEZ, Roberto. *Sistemas de Información Geográfica*. Vigo, RA-MA Editorial, 2002.

PARFITT, Julian. *The risk management of hazardous wastes, their transport and disposal*. East Anglia, University of East Anglia, 1993.

RUSSELL, Stuart; NORVIG, Peter. *Artificial Intelligence: A Modern Approach (3rd Edition)*. Prentice Hall, 2009.

THE MATHWORKS Inc. *Image Processing Toolbox For Use with MATLAB: User's Guide*. The MathWorks, Inc, Natick, Massachusetts, 1997.

UN. *UN Recommendations on the Transport of Dangerous Goods - Model Regulations*. 2011 [En línea] Disponible en: http://www.unece.org/trans/danger/publi/unrec/rev17/17files_e.html [Último acceso: 2 de julio de 2014].

UNECE. *Acuerdo Europeo sobre el Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Carretera (ADR)*. Ginebra, 2011.

VICENTE GONZÁLEZ, Alejandro. *Análisis de la probabilidad de ocurrencia de accidentes y cálculo del riesgo en el transporte de mercancías peligrosas. Métodos multivariantes*. Valladolid, Universidad de Valladolid, 2013.