

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES**

**MODELO DE PREDICCIÓN DE OCURRENCIA DE
ACCIDENTES EN TRAMOS DE CARRETERA
MEDIANTE LA MEDICIÓN CONTINUA
DE VARIABLES DE INFLUENCIA**

TESIS DOCTORAL

FRANCISCO JAVIER PÁEZ AYUSO
Ingeniero Industrial por la E.T.S. de
Ingenieros Industriales de Madrid

1999

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y FABRICACIÓN
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**MODELO DE PREDICCIÓN DE OCURRENCIA DE
ACCIDENTES EN TRAMOS DE CARRETERA
MEDIANTE LA MEDICIÓN CONTINUA
DE VARIABLES DE INFLUENCIA**

TESIS DOCTORAL

por

FRANCISCO JAVIER PÁEZ AYUSO
Ingeniero Industrial por la E.T.S. de
Ingenieros Industriales de Madrid

Director de la Tesis:

D. Francisco Aparicio Izquierdo
Doctor Ingeniero Industrial

Madrid, Junio de 1999

ÍNDICE

ÍNDICE DE MATERIAS

| | | |
|---------------------|--|-----------|
| CAPÍTULO 0.- | RESUMEN..... | 1 |
| CAPÍTULO 1.- | ANTECEDENTES..... | 9 |
| 1.1.- | Factores involucrados en el fenómeno accidente de tráfico..... | 14 |
| 1.2.- | El factor humano..... | 17 |
| 1.2.1.- | LA PERCEPCIÓN DEL RIESGO..... | 18 |
| 1.2.1.1.- | <u>Percepción de estímulos exteriores.....</u> | 19 |
| 1.2.1.1.1.- | <i>Nivel y distribución de la atención.....</i> | 19 |
| 1.2.1.1.2.- | <i>Habilidad visual.....</i> | 19 |
| 1.2.1.1.3.- | <i>Percepción de variables de interés.....</i> | 20 |
| 1.2.1.2.- | <u>Estimación del riesgo.....</u> | 21 |
| 1.2.1.2.1.- | <i>Error de la estimación.....</i> | 21 |
| 1.2.1.2.2.- | <i>Teorías de estimación del riesgo.....</i> | 22 |
| 1.2.1.2.3.- | <i>Conclusiones.....</i> | 23 |
| 1.2.2.- | LA TOMA DE DECISIÓN..... | 23 |
| 1.2.3.- | EL TIEMPO DE REACCIÓN..... | 24 |
| 1.2.4.- | CONCLUSIONES..... | 27 |
| 1.3.- | Los factores del medio..... | 29 |
| 1.3.1.- | FACTORES DE INFLUENCIA..... | 29 |
| 1.3.2.- | MODELOS DE PREDICCIÓN DE ACCIDENTES..... | 29 |
| 1.3.2.1.- | <u>Modelización de Mountain, L. y Fawaz, B.....</u> | 30 |
| 1.3.2.2.- | <u>Modelización de Amis, G.....</u> | 32 |
| 1.3.2.3.- | <u>Modelización de Summersgill, I. y Layfield, R. E.....</u> | 34 |
| 1.3.2.4.- | <u>Modelización de Kalakota, K. R.; Nazrul, M. y Seneviratne, P. N.....</u> | 35 |
| 1.3.2.5.- | <u>Modelización de Al-Senan S. H. y Wright, P. H.....</u> | 37 |
| 1.3.3.- | CONCLUSIONES..... | 39 |
| CAPÍTULO 2.- | OBJETIVOS DE LA PRESENTE TESIS..... | 41 |
| CAPÍTULO 3.- | METODOLOGÍA..... | 44 |
| CAPÍTULO 4.- | PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 47 |
| 4.1.- | Introducción..... | 48 |
| 4.1.1.- | APROXIMACIÓN AL PROBLEMA DE LA MODELIZACIÓN: LA GENERACIÓN DE MODELOS DE PREDICCIÓN..... | 49 |
| 4.1.1.1.- | <u>Planteamiento del problema.....</u> | 49 |
| 4.1.1.2.- | <u>Ajuste del modelo.....</u> | 50 |
| 4.1.1.2.1.- | <i>Definición de la muestra.....</i> | 50 |
| 4.1.1.2.2.- | <i>Recogida de la información muestral.....</i> | 50 |
| 4.1.1.2.3.- | <i>Selección del modelo.....</i> | 51 |
| 4.1.1.2.4.- | <i>Estimación de parámetros.....</i> | 51 |
| 4.1.1.2.5.- | <i>Crítica y diagnosis del modelo.....</i> | 51 |
| 4.1.1.3.- | <u>Aplicación del modelo: predicción de la ocurrencia de accidentes.....</u> | 51 |

| | |
|---|-----------|
| 4.1.2.- HIPÓTESIS Y DECISIONES..... | 52 |
| 4.1.2.1.- <u>El contraste de hipótesis</u> | 52 |
| 4.1.2.1.1.- <i>Tipos de hipótesis</i> .. | 52 |
| 4.1.2.1.2.- <i>Metodología</i> | 52 |
| 4.1.2.1.3.- <i>Medidas de discrepancia</i> | 54 |
| 4.1.2.1.4.- <i>Nivel de significación y región de rechazo</i> .. | 55 |
| 4.1.2.1.5.- <i>El nivel crítico “p”</i> .. | 56 |
| 4.1.2.2.- <u>Comparación de dos poblaciones: comparación de dos proporciones</u> .. | 56 |
| 4.2.- Ámbito de aplicación del estudio: la población. | 59 |
| 4.2.1.- INTRODUCCIÓN.. | 59 |
| 4.2.2.- COMPARACIÓN DE POBLACIONES.. | 59 |
| 4.2.2.1.- <u>Influencia del tipo de vía</u> .. | 61 |
| 4.2.2.1.1.- <i>Clasificación de la vía</i> | 61 |
| 4.2.2.1.2.- <i>Definición de subpoblaciones</i> .. | 62 |
| 4.2.2.1.3.- <i>Comparación de poblaciones según configuración de la colisión</i> .. | 63 |
| 4.2.2.1.4.- <i>Comparación de poblaciones según gravedad de la colisión</i> .. | 69 |
| 4.2.2.2.- <u>Influencia del trazado en planta de la calzada</u> .. | 76 |
| 4.2.2.2.1.- <i>Elementos básicos</i> .. | 76 |
| 4.2.2.2.2.- <i>Definición de subpoblaciones</i> .. | 77 |
| 4.2.2.2.3.- <i>Comparación de poblaciones según configuración de la colisión</i> .. | 78 |
| 4.2.2.2.4.- <i>Comparación de poblaciones según gravedad de la colisión</i> .. | 83 |
| 4.2.3.- DEFINICIÓN DEL ÁMBITO DE APLICACIÓN DEL PRESENTE ESTUDIO.. | 88 |
| 4.3.- La variable respuesta. | 92 |
| 4.3.1.- PERÍODO DE ACUMULACIÓN DE ACCIDENTES.. | 92 |
| 4.3.2.- LONGITUD DE TRAMO DE CURVA..... | 93 |
| 4.3.2.1.- <u>Radio de curva crítico</u> | 93 |
| 4.3.2.2.- <u>Longitud de influencia</u> .. | 94 |
| 4.4.- Las variables explicativas del modelo. | 97 |
| 4.4.1.- IDENTIFICACIÓN DE LOS FACTORES PERMANENTES DEL MEDIO.. | 97 |
| 4.4.1.1.- <u>Parámetros geométricos de la calzada</u> .. | 98 |
| 4.4.1.1.1.- <i>Trazado en planta</i> .. | 98 |
| 4.4.1.1.2.- <i>Trazado en alzado</i> | 102 |
| 4.4.1.1.3.- <i>Trazado combinado en planta y alzado</i> .. | 104 |
| 4.4.1.1.4.- <i>Sección transversal</i> .. | 106 |
| 4.4.1.2.- <u>Parámetros de los ramales de acceso/salida</u> .. | 108 |
| 4.4.1.2.1.- <i>Configuración del carril de acceso/salida</i> .. | 108 |
| 4.4.1.2.2.- <i>Punto de intersección con vía principal</i> .. | 112 |
| 4.4.1.3.- <u>Señalización</u> .. | 112 |
| 4.4.1.4.- <u>Visibilidad de elementos de la vía</u> .. | 113 |
| 4.4.1.5.- <u>Intensidad del tráfico</u> .. | 117 |

| | | |
|---------------------|--|-----|
| 4.4.2.- | DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES EXPLICATIVAS DEL MODELO. | 118 |
| 4.4.2.1.- | <u>Variables asociadas a la geometría de la curva...</u> | 119 |
| 4.4.2.1.1.- | <i>Velocidad máxima en curva (v_s)</i> .. | 119 |
| 4.4.2.1.2.- | <i>Velocidad de aproximación (v_{ap})</i> | 119 |
| 4.4.2.1.3.- | <i>Factor de influencia de la velocidad en la curva (F_{vC})</i> . | 121 |
| 4.4.2.1.4.- | <i>Factor de influencia de las curvas precedentes (F_{cp})</i> . | 122 |
| 4.4.2.1.5.- | <i>Factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (F_{visIC})</i> | 123 |
| 4.4.2.1.6.- | <i>Factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (F_{visTC})</i> | 124 |
| 4.4.2.1.7.- | <i>Factor de influencia de la señalización de la curva (F_{sC})</i> | 126 |
| 4.4.2.1.8.- | <i>Longitud de curva (L_c)</i> | 127 |
| 4.4.2.2.- | <u>Variables asociadas a los ramales...</u> | 127 |
| 4.4.2.2.1.- | <i>Factor de influencia de configuración del ramal (F_{cRA}, F_{cRS})</i> | 127 |
| 4.4.2.2.2.- | <i>Factor de influencia de la velocidad en el ramal (F_{vRA}, F_{vRS})</i> | 128 |
| 4.4.2.2.3.- | <i>Factor de influencia de la visibilidad del ramal (F_{visRA}, F_{visRS})</i> | 129 |
| 4.4.2.2.4.- | <i>Factor de influencia de ramales adyacentes (F_r)</i> | 129 |
| 4.4.2.3.- | <u>Variables asociadas a la intensidad del tráfico...</u> | 130 |
| 4.4.2.3.1.- | <i>Intensidad Media Diaria (IMD)</i> | 130 |
| 4.5.- | Resumen del capítulo 4. | 131 |
| CAPÍTULO 5.- | SISTEMA DE MEDIDA DE LOS FACTORES DEL MEDIO. VEHÍCULO INSTRUMENTADO CANE. | 134 |
| 5.1.- | Introducción. | 135 |
| 5.2.- | Sensorización del vehículo. | 136 |
| 5.2.1.- | INSTRUMENTACIÓN EMBARCADA. | 136 |
| 5.2.1.1.- | <u>Equipo de medida de velocidad sin contacto.</u> | 138 |
| 5.2.1.1.1.- | <i>Introducción</i> | 138 |
| 5.2.1.1.2.- | <i>Principio de medida</i> | 140 |
| 5.2.1.2.- | <u>Equipo de medida del ángulo de giro del volante.</u> | 142 |
| 5.2.1.2.1.- | <i>Introducción</i> | 142 |
| 5.2.1.2.2.- | <i>Principio de medida</i> | 142 |
| 5.2.1.3.- | <u>Servo inclinómetro de dos ejes.</u> | 143 |
| 5.2.1.3.1.- | <i>Introducción</i> | 143 |
| 5.2.1.3.2.- | <i>Hipótesis de cálculo de la inclinación de la calzada.</i> | 145 |
| 5.2.1.3.3.- | <i>Principio de medida</i> | 147 |
| 5.2.1.4.- | <u>Cámara de vídeo.</u> | 149 |
| 5.2.1.5.- | <u>Equipo de acondicionamiento y registro.</u> | 150 |

| | |
|---|-----|
| 5.2.1.5.1.- <i>Introducción</i> | 150 |
| 5.2.1.5.2.- <i>Configuración del equipo de acondicionamiento y registro</i> | 151 |
| 5.2.2.- LOCALIZACIÓN DE LOS SENSORES DE MEDIDA.. | 152 |
| 5.2.2.1.- <i>Equipo de medida de velocidad sin contacto</i> .. | 152 |
| 5.2.2.2.- <i>Equipo de medida del ángulo de giro del volante</i> | 153 |
| 5.2.2.3.- <i>Servo inclinómetro</i> | 153 |
| 5.2.2.4.- <i>Cámara de vídeo</i> | 153 |
| 5.3.- Procedimiento de cálculo de los factores permanentes del medio .. | 153 |
| 5.3.1.- CÁLCULO DEL TRAZADO EN PLANTA Y ALZADO..... | 153 |
| 5.3.2.- MODELO DE SIMULACIÓN DE LA DINÁMICA VEHICULAR. | |
| | 165 |
| 5.3.2.1.- <i>Introducción</i> | 165 |
| 5.3.2.2.- <i>Técnica de modelización</i> | 166 |
| 5.3.2.3.- <i>Modelo de suspensión</i> | 167 |
| 5.3.2.4.- <i>Modelo de sólido rígido en el espacio</i> | 167 |
| 5.3.2.5.- <i>Modelo de neumático</i> | 169 |
| 5.3.2.6.- <i>Cambio del sistema de referencia</i> | 170 |
| 5.3.2.7.- <i>Características técnicas del vehículo simulado</i> | 170 |
| 5.3.3.- VISIBILIDAD, SEÑALIZACIÓN DE CURVA, Y RAMALES DE ENTRADA Y SALIDA.. | 172 |
| 5.4.- Programa informático DISET de análisis del itinerario | 173 |
| 5.4.1.- INTRODUCCIÓN..... | 173 |
| 5.4.2.- OBJETIVOS..... | 173 |
| 5.4.3.- ESTRUCTURA DE LA APLICACIÓN INFORMÁTICA DISET. | |
| | 174 |
| 5.4.3.1.- <i>Datos de inicialización</i> | 175 |
| 5.4.3.2.- <i>Corrección del ángulo de giro del volante</i> | 175 |
| 5.4.3.3.- <i>Ubicación de ramales (acceso/salida)</i> | 176 |
| 5.4.3.4.- <i>Señales medidas mediante sensores embarcados</i> | 176 |
| 5.5.- Resumen del capítulo 5 | 178 |
| | |
| CAPÍTULO 6.- ENSAYOS DE VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE MEDIDA DE LOS FACTORES DEL MEDIO | 180 |
| 6.1.- Introducción | 181 |
| 6.2.- Metodología de medición | 181 |
| 6.3.- Validación del sistema de medida | 183 |
| 6.3.1.- CÁLCULO DE LA RELACIÓN DE DESMULTIPLICACIÓN ENTRE VOLANTE Y NEUMÁTICOS..... | 183 |
| 6.3.2.- ENSAYOS DE VALIDACIÓN EN PISTA DEL INTA.. | 186 |
| 6.3.2.1.- <i>Introducción</i> | 186 |
| 6.3.2.2.- <i>Ensayos de validación del cálculo de la distancia recorrida</i> . | |
| | 186 |
| 6.3.2.2.1.- <i>Cálculo del error</i> | 186 |
| 6.3.2.2.2.- <i>Análisis de adecuación a los objetivos del estudio</i> | |
| | 187 |
| 6.3.2.3.- <i>Ensayos de validación del cálculo del radio</i> | 188 |

| | |
|---|-----|
| 6.3.2.3.1.- <i>Cálculo del error</i> | 188 |
| 6.3.2.3.2.- <i>Análisis de adecuación a los objetivos del estudio</i> | 190 |
| 6.3.3.- ENSAYOS DE VALIDACIÓN EN CARRETERA M-607..... | 190 |
| 6.3.3.1.- <u>Introducción</u> | 190 |
| 6.3.3.2.- <u>Ensayos de validación del cálculo de la rampa/pendiente y peralte</u> | 191 |
| 6.3.3.2.1.- <i>Introducción</i> | 191 |
| 6.3.3.2.2.- <i>Procedimiento de evaluación del error</i> | 192 |
| 6.3.3.2.3.- <i>Medida de la rampa mediante el vehículo instrumentado CANE</i> | 194 |
| 6.3.3.2.4.- <i>Incertidumbre de medida del peralte mediante el vehículo instrumentado CANE</i> | 199 |
| 6.3.3.2.5.- <i>Análisis de adecuación a los objetivos del estudio</i> | 204 |
| 6.4.- El problema de la ubicación de los accidentes | 205 |
| 6.5.- Resumen del capítulo 6 | 206 |
| | |
| CAPÍTULO 7.- AJUSTE DEL MODELO DE PREDICCIÓN DE OCURRENCIA DE ACCIDENTES EN CURVA DE AUTOVÍA | 208 |
| 7.1.- Introducción | 209 |
| 7.1.1.- LA INFERENCIA ESTADÍSTICA..... | 209 |
| 7.1.2.- CLASIFICACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS SEGÚN EL OBJETO DEL ESTUDIO..... | 212 |
| 7.1.2.1.- <u>El diseño experimental</u> | 212 |
| 7.1.2.1.1.- <i>El principio de aleatorización</i> | 212 |
| 7.1.2.1.2.- <i>La repetición del experimento</i> | 213 |
| 7.1.2.1.3.- <i>La homogeneidad estadística de las comparaciones: diseños factoriales</i> | 213 |
| 7.1.2.2.- <u>El método de muestreo</u> | 213 |
| 7.1.2.2.1.- <i>Muestreo aleatorio simple</i> | 214 |
| 7.1.2.2.2.- <i>Muestreo estratificado</i> | 214 |
| 7.1.2.2.3.- <i>Muestreo por conglomerados</i> | 215 |
| 7.1.2.2.4.- <i>Muestreo sistemático</i> | 215 |
| 7.1.3.- ESTIMADORES DE MÁXIMA VEROSIMILITUD..... | 216 |
| 7.1.3.1.- <u>La función de verosimilitud y la función soporte</u> | 216 |
| 7.1.3.2.- <u>El método de máxima verosimilitud</u> | 217 |
| 7.1.4.- ESTIMACIÓN PARAMÉTRICA DEL MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE UNA VARIABLE..... | 218 |
| 7.1.5.- LAS COMPONENTES DE UN MODELO LINEAL GENERALIZADO (MLG)..... | 218 |
| 7.1.5.1.- <u>La generalización</u> | 219 |
| 7.1.5.2.- <u>Funciones de unión</u> | 220 |
| 7.1.6.- RESPUESTA BINARIA..... | 220 |
| 7.1.6.1.- <u>Funciones de unión</u> | 221 |
| 7.1.6.2.- <u>Interpretación de parámetros en la función logística</u> | 223 |

| | |
|---|-----|
| 7.1.6.3.- <u>Interpretación de la respuesta del modelo de regresión logística.</u> | 223 |
| 7.1.7.- ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE UN MODELO LINEAL GENERALIZADO.. | 224 |
| 7.2.- Definición de la muestra... | 225 |
| 7.2.1.- TÉCNICA DE RECOGIDA DE INFORMACIÓN MUESTRAL.. | 225 |
| 7.2.2.- CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LA MUESTRA.. | 225 |
| 7.2.3.- DEFINICIÓN DE LA MUESTRA.. | 226 |
| 7.2.4.- ANÁLISIS DE LA MUESTRA.. | 228 |
| 7.2.4.1.- <u>Comparación de subpoblaciones según la geometría del trazado.</u> | 230 |
| 7.2.4.2.- <u>Comparación de subpoblaciones según la configuración de la colisión..</u> | 230 |
| 7.2.5.- CONCLUSIONES DEL PROCESO DE DEFINICIÓN DE LA MUESTRA. | 232 |
| 7.3.- Recogida de información muestral. | 233 |
| 7.3.1.- LA VARIABLE RESPUESTA... | 233 |
| 7.3.1.1.- <u>Frecuencia de accidentes en tramos.</u> | 233 |
| 7.3.1.2.- <u>El modelo de distribución de la frecuencia de accidentes.</u> | 237 |
| 7.3.1.3.- <u>Definición de la variable respuesta binaria “tramo de concentración de accidentes”.</u> | 240 |
| 7.3.1.4.- <u>Tramos de concentración de accidentes.</u> | 243 |
| 7.3.2.- LAS VARIABLES EXPLICATIVAS.. | 244 |
| 7.3.2.1.- <u>Factores permanentes del medio...</u> | 244 |
| 7.3.2.1.1.- <i>Longitud de tramos (recta y curva).</i> | 244 |
| 7.3.2.1.2.- <i>Radio mínimo de tramos de curva.</i> | 248 |
| 7.3.2.1.3.- <i>Trazado conjunto en planta y alzado.</i> | 250 |
| 7.3.2.2.- <u>VARIABLES explicativas.</u> | 263 |
| 7.3.2.2.1.- <i>VARIABLES asociadas a la geometría de la curva: velocidad máxima en curva (v_s).</i> | 263 |
| 7.3.2.2.2.- <i>VARIABLES asociadas a la geometría de la curva: velocidad de aproximación (v_{ap}).</i> | 264 |
| 7.3.2.2.3.- <i>VARIABLES asociadas a la geometría de la curva: factor de influencia de la velocidad en la curva (F_{vC}).</i> | 266 |
| 7.3.2.2.4.- <i>VARIABLES asociadas a la geometría de la curva: factor por influencia de las curvas precedentes (F_{cp}).</i> | 268 |
| 7.3.2.2.5.- <i>VARIABLES asociadas a la geometría de la curva: factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (F_{visIC}).</i> | 270 |
| 7.3.2.2.6.- <i>VARIABLES asociadas a la geometría de la curva: factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (F_{visTC}).</i> | 272 |
| 7.3.2.2.7.- <i>Factor de influencia de la señalización de la curva (F_{sC}).</i> | 274 |
| 7.3.2.2.8.- <i>VARIABLES asociadas a los ramales: factor de influencia de configuración del ramal (F_{cRA}, F_{cRS}).</i> | 275 |

| | | |
|---------------------|--|------------|
| | 7.3.2.2.9.- Variables asociadas a los ramales: factor de influencia de la velocidad en el ramal (F_{vRA} y F_{vRS}).. | 277 |
| | 7.3.2.2.10.- Variables asociadas a los ramales: factor de influencia de la visibilidad del ramal (F_{visRA} , F_{visRS}) | 280 |
| | 7.3.2.2.11.- Variables asociadas a los ramales: factor de influencia de ramales adyacentes (F_T)..... | 282 |
| | 7.3.2.2.12.- Variables asociadas a las condiciones del tráfico: Intensidad Media Diaria (IMD)..... | 283 |
| 7.4.- | Estimación del modelo de predicción.. | 284 |
| | 7.4.1.- METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN..... | 284 |
| | 7.4.2.- MODELO DE ESTIMACIÓN DE LA FRECUENCIA DE ACCIDENTES EN TRAMOS DE CURVA.. | 290 |
| | 7.4.2.1.- <u>Introducción.</u> | 290 |
| | 7.4.2.2.- <u>Ajuste del modelo por eliminación progresiva.</u> | 291 |
| | 7.4.2.2.1.- Variables asociadas a la geometría.. | 291 |
| | 7.4.2.2.2.- Variables asociadas a los ramales de acceso.... | 297 |
| | 7.4.2.2.3.- Variables asociadas a los ramales de salida.... | 300 |
| | 7.4.2.2.4.- Variables asociadas a los ramales..... | 302 |
| | 7.4.2.3.- <u>Ajuste del modelo final.</u> | 302 |
| | 7.4.2.4.- <u>Análisis de multicolinealidad.</u> | 304 |
| | 7.4.2.5.- <u>Diagnóstico de la bondad del ajuste.</u> | 306 |
| | 7.4.2.6.- <u>Análisis de sensibilidad de los coeficientes estimados.</u> | 308 |
| | 7.4.3.- MODELO DE ESTIMACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE ACCIDENTES EN TRAMOS DE CURVA. . | 310 |
| | 7.4.3.1.- <u>Introducción.</u> | 310 |
| | 7.4.3.2.- <u>Ajuste del modelo por eliminación progresiva.</u> | 311 |
| | 7.4.3.2.1.- Variables asociadas a la geometría.. | 311 |
| | 7.4.3.2.2.- Variables asociadas a los ramales de acceso.... | 317 |
| | 7.4.3.2.3.- Variables asociadas a los ramales de salida.... | 321 |
| | 7.4.3.2.4.- Variables asociadas a los ramales..... | 322 |
| | 7.4.3.3.- <u>Ajuste del modelo final.</u> | 323 |
| | 7.4.3.4.- <u>Análisis de multicolinealidad.</u> | 325 |
| | 7.4.3.5.- <u>Diagnóstico de la bondad del ajuste.</u> | 326 |
| | 7.4.3.6.- <u>Análisis de sensibilidad de los coeficientes estimados.</u> | 329 |
| | 7.4.4.- EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES EXPLICATIVAS INCORPORADAS EN LA PARTE SISTEMÁTICA DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN..... | 332 |
| 7.5.- | Resumen del capítulo 7. | 335 |
| CAPÍTULO 8.- | APLICACIÓN DEL MODELO DE PREDICCIÓN DESARROLLADO A UN TRAMO DE LA N-I. | 338 |
| 8.1.- | Introducción. | 339 |
| 8.2.- | Las variables explicativas. | 340 |
| | 8.2.1.- FACTORES PERMANENTES DEL MEDIO..... | 341 |
| | 8.2.1.1.- <u>Longitud de tramos (recta y curva).</u> | 341 |
| | 8.2.1.2.- <u>Radio mínimo de tramos de curva.</u> | 342 |

| | |
|---|-----|
| 8.2.1.3.- <u>Trazado conjunto en planta y alzado.</u> | 343 |
| 8.2.1.3.1.- <u>Peralte máximo en tramos de curva.</u> | 343 |
| 8.2.1.3.2.- <u>Rampa/pendiente promedio de tramo de recta precedente.</u> | 343 |
| 8.2.1.3.3.- <u>Rampa/pendiente promedio de tramo de curva.</u> | 344 |
| 8.2.1.3.4.- <u>Rampa/pendiente máxima de tramo de curva.</u> | 345 |
| 8.2.1.3.5.- <u>Trazado conjunto en planta y alzado.</u> | 346 |
| 8.2.2.- VARIABLES EXPLICATIVAS. | 348 |
| 8.2.2.1.- <u>Variables asociadas a la geometría de la curva: velocidad máxima en curva (v_s).</u> | 348 |
| 8.2.2.2.- <u>Variables asociadas a la geometría de la curva: velocidad de aproximación (v_{ap}).</u> | 348 |
| 8.2.2.3.- <u>Variables asociadas a la geometría de la curva: factor de influencia de la velocidad en la curva (F_{vC}).</u> | 349 |
| 8.2.2.4.- <u>Variables asociadas a la geometría de la curva: factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (F_{visIC})</u> | 350 |
| 8.2.2.5.- <u>Variables asociadas a la geometría de la curva: factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (F_{visTC}).</u> | 351 |
| 8.2.2.6.- <u>Variable de exposición (F_{exp}).</u> | 352 |
| 8.2.2.7.- <u>Variable asociada a los ramales de acceso (F_{RA}).</u> | 352 |
| 8.2.2.8.- <u>Variable de configuración del ramal de salida (F^*_{cRS}).</u> | 353 |
| 8.2.2.9.- <u>Variable asociada a la geometría F^*_{visIC}.</u> | 353 |
| 8.2.2.10.- <u>Variable asociada a la geometría F_{TC}.</u> | 354 |
| 8.2.2.11.- <u>La variable asociada a los ramales de acceso (F_{RA}) en el modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes.</u> | 354 |
| 8.3.- Predicción de ocurrencia de accidentes en curva. | 356 |
| 8.3.1.- MODELO DE ESTIMACIÓN DE LA FRECUENCIA DE ACCIDENTES EN TRAMOS DE CURVA. | 356 |
| 8.3.2.- MODELO DE ESTIMACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE ACCIDENTES EN TRAMOS DE CURVA. | 357 |
| 8.4.- Resumen del capítulo 8. | 359 |
| CAPÍTULO 9.- CONCLUSIONES. | 360 |
| CAPÍTULO 10.- APORTACIONES. | 368 |
| CAPÍTULO 11.- FUTUROS DESARROLLOS. | 371 |
| CAPÍTULO 12.- BIBLIOGRAFÍA. | 374 |
| CURRICULUM VITAE DEL AUTOR. | 379 |
| ANEXO I.- CUESTIONARIO ESTADÍSTICO DE ACCIDENTES DE CIRCULACIÓN CON VÍCTIMAS (D.G.T). | A-1 |

| | | |
|--------------------|---|------|
| ANEXO II.- | ÁMBITO DE APLICACIÓN DE LA TESIS. TABLAS Y FIGURAS DE RESULTADOS. | A-4 |
| II.1.- | Influencia del tipo de vía. | A-5 |
| | II.1.1.- COMPARACIÓN DE POBLACIONES SEGÚN CONFIGURACIÓN DE LA COLISIÓN. | A-5 |
| | II.1.2.- COMPARACIÓN DE POBLACIONES SEGÚN GRAVEDAD DE LA COLISIÓN. | A-10 |
| II.2.- | Influencia del trazado en planta de la calzada. | A-13 |
| | II.2.1.- COMPARACIÓN DE POBLACIONES SEGÚN CONFIGURACIÓN DE LA COLISIÓN. | A-13 |
| | II.2.2.- COMPARACIÓN DE POBLACIONES SEGÚN GRAVEDAD DE LA COLISIÓN. | A-18 |
| ANEXO III.- | CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL VEHÍCULO TIPO CONSIDERADO EN EL MODELO DE PREDICCIÓN. | A-22 |
| III.1.- | Motor. | A-23 |
| III.2.- | Sistema de dirección. | A-23 |
| III.3.- | Sistema de suspensión. | A-24 |
| III.4.- | Transmisión. | A-24 |
| III.5.- | Neumáticos. | A-24 |
| III.6.- | Prestaciones. | A-25 |
| III.7.- | Pesos y dimensiones. | A-25 |
| ANEXO IV.- | SEÑALIZACIÓN DE CARRETERAS. | A-26 |
| IV.1.- | Clasificación de la señalización en función de la información proporcionada | A-27 |
| IV.2.- | Criterio de señalización de carreteras. Instrucción de carreteras 8.1. IC | A-28 |
| | IV.2.1.- PRINCIPIOS DE SEÑALIZACIÓN EN CURVAS. | A-28 |
| | IV.2.2.- VELOCIDAD MÁXIMA EN CURVAS. | A-28 |
| | IV.2.3.- VELOCIDAD MÁXIMA DE APROXIMACIÓN A UNA CURVA | A-28 |
| | IV.2.4.- GRADO DE LA CURVA. SEÑALIZACIÓN Y BALIZAMIENTO. | A-30 |
| ANEXO V.- | PROGRAMA INFORMÁTICO DISET DE ANÁLISIS DEL ITINERARIO. | A-32 |
| V.1.- | Parámetros y variables de entrada. | A-33 |
| | V.1.1.- DATOS DE INICIALIZACIÓN. | A-33 |
| | V.1.2.- CORRECCIÓN DEL ÁNGULO DE GIRO DEL VOLANTE. | A-35 |
| | V.1.3.- UBICACIÓN DE INCORPORACIONES/SALIDAS. | A-36 |
| | V.1.4.- SEÑALES MEDIDAS MEDIANTE SENSORES EMBARCADOS | A-37 |
| V.2.- | Variables de salida. | A-38 |
| | V.2.1.- PREPARAR SEÑALES ➔ ÁNGULO DE VOLANTE. | A-38 |
| | V.2.2.- PREPARAR SEÑALES ➔ ÁNGULO DE RAMPA. | A-40 |
| | V.2.3.- TRAYECTORIAS ➔ EN PLANTA ➔ GENERA. | A-40 |

| | |
|---|-------------|
| V.2.4.- TRAYECTORIAS ➔ EN ALZADO ➔ GENERA.. | A-41 |
| V.2.5.- PREPARAR SEÑALES ➔ RADIO DE TRAYECTORIA.. | A-43 |
| V.2.6.- PREPARAR SEÑALES ➔ ÁNGULO DE PERALTE.. | A-44 |
| V.2.7.- EVALUACIÓN ➔ VEL. MÁXIMA.. | A-44 |
| ANEXO VI.- CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL EQUIPO DE MEDIDA VÍDEO-LÁSER RST.. | A-45 |
| VI.1.- Introducción.. | A-46 |
| VI.2.- Descripción del equipo.. | A-46 |
| VI.3.- Parámetros medidos.. | A-48 |
| ANEXO VII.- DEFINICIÓN DE LA MUESTRA. TABLAS Y FIGURAS DE RESULTADOS. | A-51 |
| VII.1.- Ubicación de los tramos de curva en los itinerarios de autovía de la muestra analizada .. | A-52 |
| VII.2.- Comparación de los itinerarios de la muestra con el resto de itinerarios de autovía de España. | A-54 |
| VII.2.1.- COMPARACIÓN SEGÚN GEOMETRÍA DEL TRAZADO. . . | A-54 |
| ANEXO VIII.- VALORES MEDIDOS DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN EL MODELO DE PREDICCIÓN (AUTOVÍAS N-I, N-401, N-IV Y N-V).. | A-56 |
| VIII.1.- Número de accidentes en los tramos de curva en las autovías analizadas (N- I, N-401, N-IV Y N-V).. | A-57 |
| VIII.2.- Estado de la variable “tramo de concentración de accidentes” en los tramos de curva en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V). | A-58 |
| VIII.3.- Estado de la variable “longitud de tramo de curva” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).. | A-59 |
| VIII.4.- Estado de la variable “longitud de tramo de recta” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).. | A-60 |
| VIII.5.- Estado de la variable “radio mínimo de tramo de curva” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).. | A-61 |
| VIII.6.- Estado de la variable “peralte máximo de tramo de curva” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).. | A-62 |
| VIII.7.- Estado de la variable “rampa/pendiente promedio de tramo de recta precedente” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V). . . . | A-63 |
| VIII.8.- Estado de la variable “rampa/pendiente promedio de tramo de curva” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V). | A-64 |
| VIII.9.- Estado de la variable “rampa/pendiente máxima de tramo de curva” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).. | A-65 |
| VIII.10.- Estado de la variable “Inclinación de línea de máxima pendiente de tramo de curva” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V). | A-66 |
| VIII.11.- Estado de la variable “Velocidad máxima en curva” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).. | A-67 |
| VIII.12.- Estado de la variable “Velocidad de aproximación de tramo de curva” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V). | A-68 |

| | |
|---|-------------|
| VIII.13.- Estado de la variable “Factor de influencia de velocidad de tramo de curva” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).. | A-69 |
| VIII.14.- Estado de la variable “Factor de influencia de las curvas precedentes” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V). | A-70 |
| VIII.15.- Estado de la variable “Factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V) | A-71 |
| VIII.16.- Estado de la variable “Factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V). | A-72 |
| VIII.17.- Estado de la variable “Factor de influencia de la señalización de la curva” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V). | A-73 |
| VIII.18.- Estado de la variable “Factor de influencia de la configuración del ramal de acceso” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).. . . . | A-74 |
| VIII.19.- Estado de la variable “Factor de influencia de la configuración del ramal de salida” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V). | A-75 |
| VIII.20.- Estado de la variable “Factor de influencia de la velocidad en el ramal de acceso” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V)... | A-76 |
| VIII.21.- Estado de la variable “Factor de influencia de la velocidad en el ramal de salida” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V). | A-77 |
| VIII.22.- Estado de la variable “Factor de influencia de la visibilidad en el ramal de acceso” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V)... | A-78 |
| VIII.23.- Estado de la variable “Factor de influencia de la visibilidad en el ramal de salida” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V). | A-79 |
| ANEXO IX.- APLICACIÓN DEL MODELO DE PREDICCIÓN. VALORES MEDIDOS DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS.. | A-80 |
| IX.1.- Estado de la variable “longitud de tramo de curva”..... | A-81 |
| IX.2.- Estado de la variable “longitud de tramo de recta”.. | A-81 |
| IX.3.- Estado de la variable “radio mínimo de tramo de curva”.. | A-82 |
| IX.4.- Estado de la variable “peralte máximo de tramo de curva”..... | A-82 |
| IX.5.- Estado de la variable “rampa/pendiente promedio de tramo de recta precedente”.. | A-83 |
| IX.6.- Estado de la variable “rampa/pendiente promedio de tramo de curva”. | A-83 |
| IX.7.- Estado de la variable “rampa/pendiente máxima de tramo de curva”. | A-84 |
| IX.8.- Estado de la variable “inclinación de línea de máxima pendiente de tramo de curva”.. | A-84 |
| IX.9.- Estado de la variable “velocidad máxima en curva en tramo de curva” | A-85 |
| IX.10.- Estado de la variable “velocidad de aproximación”. | A-85 |
| IX.11.- Estado de la variable “factor de influencia de la velocidad en la curva” | A-86 |
| IX.12.- Estado de la variable “factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva”..... | A-86 |
| IX.13.- Estado de la variable “factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva”..... | A-87 |

| | |
|--|-------------|
| IX.14.- Estado de la variable X_1..... | A-87 |
| IX.15.- Estado de la variable X_2..... | A-88 |
| IX.16.- Estado de la variable X_3..... | A-88 |
| IX.17.- Estado de la variable X_4..... | A-89 |
| IX.18.- Estado de la variable X_5..... | A-89 |
| | |
| ANEXO X.- VARIABLES INVOLUCRADAS EN EL MODELO DE PREDICCIÓN (AUTOVÍAS N-I, N-401, N-IV Y N-V). REPRESENTACIÓN GRÁFICA | A-90 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| <i>Figura 0.1.- Metodología de elaboración de modelos de predicción de accidentes, basados en las variables permanentes del medio..</i> | 8 |
| <i>Figura 1.1.- Sistema hombre-vehículo-medio</i> | 15 |
| <i>Figura 1.2.- Esquema de actuación del hombre durante la conducción..</i> | 17 |
| <i>Figura 1.3.- Modelo simplificado de explicación de los accidentes, en función de las demandas del sistema (Blumenthal, 1968 [5]).</i> | 18 |
| <i>Figura 1.4.- Fijación de los ojos en función de la experiencia de conducción en una carretera "abierta" circulando a 50 m.p.h. (Mourant y Rockwell, 1.972 [35]).</i> | 20 |
| <i>Figura 4.1.- Nivel de significación de un test ..</i> | 55 |
| <i>Figura 4.2.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según tipos principales de vías (1994).</i> | 63 |
| <i>Figura 4.3.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según tipos de vías interurbanas (1994).</i> | 64 |
| <i>Figura 4.4.- Medida de la discrepancia "d" entre P1 y P2 según el atributo "configuración de la colisión"</i> | 65 |
| <i>Figura 4.5.- Medida de la discrepancia "d" entre P21 y P22 según el atributo "configuración de la colisión"</i> | 66 |
| <i>Figura 4.6.- Medida de la discrepancia "d" entre P21 y P23 según el atributo "configuración de la colisión"</i> | 67 |
| <i>Figura 4.7.- Medida de la discrepancia "d" entre P22 y P23 según el atributo "configuración de la colisión"</i> | 69 |
| <i>Figura 4.8.- Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos principales de vías (1994).</i> | 70 |
| <i>Figura 4.9.- Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos de vías interurbanas (1994).</i> | 70 |
| <i>Figura 4.10.- Medida de la discrepancia "d" entre P1 y P2 según el atributo "gravedad de la colisión"</i> | 71 |
| <i>Figura 4.11.- Medida de la discrepancia "d" entre P21 y P22 según el atributo "gravedad de la colisión"</i> | 72 |
| <i>Figura 4.12.- Medida de la discrepancia "d" entre P21 y P23 según el atributo "gravedad de la colisión"</i> | 74 |
| <i>Figura 4.13.- Medida de la discrepancia "d" entre P22 y P23 según el atributo "gravedad de la colisión"</i> | 75 |
| <i>Figura 4.14.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según el tipo de alineación en autopista (1994).</i> | 78 |
| <i>Figura 4.15.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según el tipo de alineación en autovía (1994).</i> | 79 |
| <i>Figura 4.16.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según el tipo de alineación en carretera convencional (1994).</i> | 79 |
| <i>Figura 4.17.- Medida de la discrepancia "d" entre P1' y P2' según el atributo "configuración de la colisión"</i> | 80 |
| <i>Figura 4.18.- Medida de la discrepancia "d" entre P3' y P4' según el atributo "configuración de la colisión"</i> | 81 |

| | |
|---|-----|
| <i>Figura 4.19.- Medida de la discrepancia “d” entre P5' y P6' según el atributo “configuración de la colisión”</i> | 83 |
| <i>Figura 4.20.- Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos de alineación en autopista (1994)</i> | 84 |
| <i>Figura 4.21.- Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos de alineación en autovía (1994)</i> .. | 84 |
| <i>Figura 4.22.- Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos de alineación en carretera convencional (1994)</i> | 84 |
| <i>Figura 4.23.- Medida de la discrepancia “d” entre P1' y P2' según el atributo “gravedad de la colisión”</i> | 85 |
| <i>Figura 4.24.- Medida de la discrepancia “d” entre P3' y P4' según el atributo “gravedad de la colisión”</i> | 86 |
| <i>Figura 4.25.- Medida de la discrepancia “d” entre P5' y P6' según el atributo “gravedad de la colisión”</i> | 87 |
| <i>Figura 4.26.- Número de muertos por accidente por configuración de la colisión, según tipos principales de vías (1994)</i> | 89 |
| <i>Figura 4.27.- Número de muertos por accidente por configuración de la colisión, según tipos de vías interurbanas (1994)</i> .. | 90 |
| <i>Figura 4.28.- Definición de “tramo de curva”</i> | 93 |
| <i>Figura 4.29.- Métodos básicos de transición del peralte</i> | 101 |
| <i>Figura 4.30.- Inclinación límite de la línea de máxima pendiente en las curvas</i> | 105 |
| <i>Figura 4.31.- Configuraciones de ramales adyacentes</i> .. | 110 |
| <i>Figura 4.32.- Porcentaje de número de accidentes en ramal de incorporación/salida, según tipos principales de vías (1994)</i> .. | 111 |
| <i>Figura 4.33.- Porcentaje de número de accidentes en ramal de incorporación/salida, según tipos de vías interurbanas (1994)</i> | 111 |
| <i>Figura 4.34.- Porcentaje de número de accidentes en vía interurbana, según las restricciones a la visibilidad (1994)</i> | 114 |
| <i>Figura 4.35.- Esquema de cálculo del factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (Caso 1)</i> | 125 |
| <i>Figura 4.36.- Esquema de cálculo del factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (Caso 2)</i> | 126 |
| | |
| <i>Figura 5.1.- Sensores embarcados en el sistema CANE de medida de los factores del medio. Esquema general</i> | 137 |
| <i>Figura 5.2.- Sensores embarcados en el sistema CANE de medida de los factores del medio. Fotografías de detalle</i> | 138 |
| <i>Figura 5.3.- Esquema de la cadena de medida de la velocidad angular del neumático en el dispositivo ABS del vehículo instrumentado CANE</i> | 140 |
| <i>Figura 5.4.- Dispositivo de medida de la velocidad sin contacto LC-660S</i> | 141 |
| <i>Figura 5.5.- Dispositivo de medida del ángulo girado por el volante modelo 01027</i> .. | 143 |
| <i>Figura 5.6.- Ángulos de suelo de carrocería medidos mediante el vehículo CANE</i> | 146 |
| <i>Figura 5.7.- Servo inclinómetro de dos ejes modelo SX41400</i> | 148 |
| <i>Figura 5.8.- Sistema electrónico básico de medida</i> .. | 150 |
| <i>Figura 5.9.- Algoritmo de cálculo de parámetros del trazado en planta y alzado de la calzada</i> | 154 |
| <i>Figura 5.10.- Cálculo de la distancia recorrida a partir de la señal de velocidad</i> .. | 155 |

| | |
|--|-----|
| <i>Figura 5.11.- Cálculo de la distancia recorrida en un itinerario de la N-IV (P.K. 15 a P.K. 20)</i> | 156 |
| <i>Figura 5.12.- Cálculo de la aceleración longitudinal a partir de la señal de velocidad...</i> | 157 |
| <i>Figura 5.13.- Corrección dinámica del ángulo de inclinación longitudinal del servo inclinómetro..</i> | 158 |
| <i>Figura 5.14.- Cálculo de la rampa en un itinerario de la N-IV (P.K. 15 a P.K. 20)..</i> | 159 |
| <i>Figura 5.15.- Cálculo del perfil en alzado en un itinerario de la N-IV (P.K. 15 a P.K. 20)</i> | 159 |
| <i>Figura 5.16.- Cálculo de la trayectoria en planta seguida por el vehículo CANE en un itinerario de la N-IV (P.K. 15 a P.K. 20)..</i> | 160 |
| <i>Figura 5.17.- Cálculo del radio de la trayectoria en un punto P.....</i> | 162 |
| <i>Figura 5.18.- Cálculo del radio en un itinerario de la N-IV (P.K. 15 a P.K. 20).....</i> | 162 |
| <i>Figura 5.19.- Corrección dinámica del ángulo de inclinación transversal del servo inclinómetro..</i> | 164 |
| <i>Figura 5.20.- Cálculo del peralte en un itinerario de la N-IV (P.K. 15 a P.K. 20)..</i> | 165 |
| <i>Figura 5.21.- Sistema de referencia y grados de libertad en modelo de sólido rígido....</i> | 167 |
| <i>Figura 5.22.- Diagrama de funcionamiento de la aplicación informática DISET.....</i> | 174 |
| | |
| <i>Figura 6.1.- Relaciones teórica (Ackermann) y real entre el ángulo de giro de la rueda interior y la exterior del eje directriz, en vehículo CANE..</i> | 185 |
| <i>Figura 6.2.- Ensayos de validación del cálculo del radio de la trayectoria en la pista de ensayos del INTA. Velocidad de circulación..</i> | 188 |
| <i>Figura 6.3.- Ensayos de validación del cálculo del radio de la trayectoria en la pista de ensayos del INTA. Trayectoria seguida por el vehículo.....</i> | 189 |
| <i>Figura 6.4.- Velocidad de circulación del vehículo CANE durante los ensayos de calibración en la carretera M-607.....</i> | 194 |
| <i>Figura 6.5.- Valores de rampa medidos con el vehículo CANE durante los ensayos de calibración en la carretera M-607. P.K. 12 a P.K. 16.....</i> | 196 |
| <i>Figura 6.6.- Valor promedio de rampa medido con el vehículo CANE, valor medido con el vehículo de referencia y valor de diseño, durante los ensayos de calibración en la carretera M-607. P.K. 12 a P.K. 16.....</i> | 196 |
| <i>Figura 6.7.- Valores de rampa medidos con el vehículo CANE durante los ensayos de calibración en la carretera M-607. P.K. 16 a P.K. 20.....</i> | 197 |
| <i>Figura 6.8.- Valor promedio de rampa medido con el vehículo CANE, valor medido con el vehículo de referencia y valor de diseño, durante los ensayos de calibración en la carretera M-607. P.K. 16 a P.K. 20.....</i> | 197 |
| <i>Figura 6.9.- Valores de rampa medidos con el vehículo CANE durante los ensayos de calibración en la carretera M-607. P.K. 20 a P.K. 24.....</i> | 198 |
| <i>Figura 6.10.- Valor promedio de rampa medido con el vehículo CANE, valor medido con el vehículo de referencia y valor de diseño, durante los ensayos de calibración en la carretera M-607. P.K. 20 a P.K. 24.....</i> | 198 |
| <i>Figura 6.11.- Trayectoria en alzado de la carretera M-607, en sentido ascendente, entre P.K. 12 y P.K. 24.....</i> | 199 |
| <i>Figura 6.12.- Valores de peralte medidos con el vehículo CANE durante los ensayos de calibración en la carretera M-607. P.K. 12 a P.K. 16.....</i> | 200 |

| | |
|--|-----|
| <i>Figura 6.13.- Valor promedio de peralte medido con el vehículo CANE, valor medido con el vehículo de referencia y valor de diseño, durante los ensayos de calibración en la carretera M-607. P.K. 12 a P.K. 16.....</i> | 200 |
| <i>Figura 6.14.- Valores de peralte medidos con el vehículo CANE durante los ensayos de calibración en la carretera M-607. P.K. 16 a P.K. 20.....</i> | 201 |
| <i>Figura 6.15.- Valor promedio de peralte medido con el vehículo CANE, valor medido con el vehículo de referencia y valor de diseño, durante los ensayos de calibración en la carretera M-607. P.K. 16 a P.K. 20.....</i> | 201 |
| <i>Figura 6.16.- Valores de peralte medidos con el vehículo CANE durante los ensayos de calibración en la carretera M-607. P.K. 20 a P.K. 24.....</i> | 202 |
| <i>Figura 6.17.- Valor promedio de peralte medido con el vehículo CANE, valor medido con el vehículo de referencia y valor de diseño, durante los ensayos de calibración en la carretera M-607. P.K. 20 a P.K. 24.....</i> | 202 |
| <i>Figura 6.18.- Desviaciones entre los hitos kilométricos reales y los hitos kilométricos teóricos, en la carretera N-I..</i> | 205 |
| | |
| <i>Figura 7.1.- Clasificación de los procedimientos de Inferencia.</i> | 211 |
| <i>Figura 7.2.- La función de verosimilitud..</i> | 217 |
| <i>Figura 7.3.- Representación de cuatro funciones de unión (variable respuesta binaria), frente a la probabilidad de respuesta (π)..</i> | 222 |
| <i>Figura 7.4.- Definición de la muestra considerada en el presente estudio..</i> | 227 |
| <i>Figura 7.5.- Medida de la discrepancia según el atributo “geometría del trazado” entre la muestra y el resto de itinerarios de autovía de España (años 1994, 1995 y 1996) ..</i> | 230 |
| <i>Figura 7.6.- Medida de la discrepancia según el atributo “configuración de la colisión” entre la muestra y el resto de itinerarios de autovía de España (años 1994, 1995 y 1996).....</i> | 231 |
| <i>Figura 7.7.- Número de accidentes en tramos de las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V).....</i> | 234 |
| <i>Figura 7.8.- Distribución de accidentes según año.....</i> | 234 |
| <i>Figura 7.9.- Distribución de accidentes según la configuración de colisión.</i> | 235 |
| <i>Figura 7.10.- Distribución de accidentes por número de vehículos implicados en el accidente, según la configuración de la colisión.</i> | 236 |
| <i>Figura 7.11.- Histograma de acumulación de accidentes en tramo de curva de autovía, en muestra analizada.....</i> | 237 |
| <i>Figura 7.12.- Evolución de la función soporte frente al parámetro λ, en muestra analizada.</i> | 238 |
| <i>Figura 7.13.- Distribución de probabilidad muestral y estimada del número de accidentes en tramo de curva de autovía..</i> | 239 |
| <i>Figura 7.14.- Diagrama de estimación del número de accidentes estadísticamente significativo, mediante contraste de hipótesis..</i> | 241 |
| <i>Figura 7.15.- Estado de la variable respuesta binaria “tramo de concentración de accidentes” en tramos de curva de las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V)..</i> | 243 |
| <i>Figura 7.16.- Proporción de tramos por autovía con cada uno de los estados de la variable respuesta binaria “tramo de concentración de accidentes”..</i> | 243 |
| <i>Figura 7.17.- Valores de longitudes de los tramos de curva en los itinerarios analizados ..</i> | 244 |

| | |
|---|-----|
| <i>Figura 7.18.- Distribución de longitudes de los tramos de curva en los itinerarios analizados</i> | 245 |
| <i>Figura 7.19.- Valores de longitudes de los tramos de recta en los itinerarios analizados</i> | 246 |
| <i>Figura 7.20.- Distribución de longitudes de los tramos de recta en los itinerarios analizados</i> | 246 |
| <i>Figura 7.21.- Valores del radio mínimo del tramo de curva en los itinerarios analizados.</i> | 248 |
| <i>Figura 7.22.- Distribución del radio mínimo del tramo de curva en los itinerarios analizados.</i> | 248 |
| <i>Figura 7.23.- Distribución de los tramos de curva según el sentido de giro, en los itinerarios analizados.</i> | 249 |
| <i>Figura 7.24.- Valores del peralte máximo del tramo de curva en los itinerarios analizados.</i> | 251 |
| <i>Figura 7.25.- Distribución del peralte máximo del tramo de curva en los itinerarios analizados.</i> | 251 |
| <i>Figura 7.26.- Relación entre el radio mínimo y el peralte máximo del tramo de curva en los itinerarios analizados.</i> | 253 |
| <i>Figura 7.27.- Valores de rampa/pendiente promedio del tramo de recta precedente en los itinerarios analizados.</i> | 255 |
| <i>Figura 7.28.- Distribución de rampa/pendiente promedio del tramo de recta precedente en los itinerarios analizados.</i> | 255 |
| <i>Figura 7.29.- Valores de rampa/pendiente promedio del tramo de curva en los itinerarios analizados.</i> | 256 |
| <i>Figura 7.30.- Distribución de rampa/pendiente promedio del tramo de curva en los itinerarios analizados.</i> | 256 |
| <i>Figura 7.31.- Valores de rampa/pendiente máxima del tramo de curva en los itinerarios analizados.</i> | 257 |
| <i>Figura 7.32.- Distribución de rampa/pendiente máxima del tramo de curva en los itinerarios analizados.</i> | 257 |
| <i>Figura 7.33.- Trazado conjunto en planta y alzado de los tramos de curva en los itinerarios analizados.</i> | 260 |
| <i>Figura 7.34.- Valores de inclinación de línea de máxima pendiente del tramo de curva en los itinerarios analizados.</i> | 261 |
| <i>Figura 7.35.- Distribución de inclinación de línea de máxima pendiente del tramo de curva en los itinerarios analizados.</i> | 261 |
| <i>Figura 7.36.- Valores de velocidad máxima en curva de los tramos de curva en los itinerarios analizados.</i> | 263 |
| <i>Figura 7.37.- Distribución de velocidad máxima en curva de los tramos de curva en los itinerarios analizados.</i> | 263 |
| <i>Figura 7.38.- Valores de velocidad de aproximación de los tramos de curva en los itinerarios analizados.</i> | 265 |
| <i>Figura 7.39.- Distribución de velocidad de aproximación de los tramos de curva en los itinerarios analizados.</i> | 265 |
| <i>Figura 7.40.- Valores de factor de influencia de la velocidad de los tramos de curva en los itinerarios analizados.</i> | 267 |

| | |
|--|-----|
| Figura 7.41.- Distribución de factor de influencia de la velocidad de los tramos de curva en los itinerarios analizados..... | 267 |
| Figura 7.42.- Valores de factor de influencia de las curvas precedentes de los tramos de curva en los itinerarios analizados..... | 269 |
| Figura 7.43.- Distribución de factor de influencia de las curvas precedentes de los tramos de curva en los itinerarios analizados..... | 269 |
| Figura 7.44.- Valores de factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (s), de los tramos de curva en los itinerarios analizados..... | 271 |
| Figura 7.45.- Distribución de factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (s), de los tramos de curva en los itinerarios analizados..... | 271 |
| Figura 7.46.- Valores de factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (%), de los tramos de curva en los itinerarios analizados.. | 273 |
| Figura 7.47.- Distribución de factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (%), de los tramos de curva en los itinerarios analizados..... | 273 |
| Figura 7.48.- Frecuencia de factor de influencia de la señalización de la curva, de los tramos de curva en los itinerarios analizados.. | 275 |
| Figura 7.49.- Distribución de los tramos de curva con ramales de acceso y salida, en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V).. | 275 |
| Figura 7.50.- Frecuencia de los estados de la variable F_{cRA} , en los tramos de las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V).. | 276 |
| Figura 7.51.- Frecuencia de los estados de la variable F_{cRS} , en los tramos de las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V).. | 276 |
| Figura 7.52.- Valores del factor de influencia de la velocidad en el ramal de acceso, en los tramos de las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V)..... | 277 |
| Figura 7.53.- Distribución del factor de influencia de la velocidad en el ramal de acceso, en los tramos de las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V)..... | 278 |
| Figura 7.54.- Valores del factor de influencia de la velocidad en el ramal de salida, en los tramos de las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V)..... | 278 |
| Figura 7.55.- Distribución del factor de influencia de la velocidad en el ramal de salida, en los tramos de las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V)..... | 279 |
| Figura 7.56.- Valores de factor de influencia de la visibilidad del ramal de acceso en tramos de las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V)..... | 280 |
| Figura 7.57.- Distribución de factor de influencia de la visibilidad del ramal de acceso en tramos de las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V)..... | 280 |
| Figura 7.58.- Valores de factor de influencia de la visibilidad del ramal de salida en tramos de las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V).. | 281 |
| Figura 7.59.- Distribución de factor de influencia de la visibilidad del ramal de salida en tramos de las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V)..... | 281 |
| Figura 7.60.- Frecuencia de los estados de la variable “factor de influencia de ramales adyacentes” en tramos de las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V). | 283 |
| Figura 7.61.- IMD en tramos de las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V).. | 283 |
| Figura 7.62.- Proceso iterativo de selección de variables explicativas significativas en el modelo de predicción.. | 286 |
| Figura 7.63.- Representación de la mejora del parámetro “-2.L($\hat{\theta}$)” por incorporación sucesiva de variables explicativas en el modelo. Modelo final de estimación de la frecuencia de accidentes..... | 306 |

| | |
|--|-----|
| <i>Figura 7.64.- Relación lineal entre la variable respuesta predicha y la variable respuesta observada. Modelo final de estimación de la frecuencia de accidentes...</i> | 307 |
| <i>Figura 7.65.- Análisis de sensibilidad de los coeficientes estimados de las variables explicativas. Modelo final de estimación de la frecuencia de accidentes. .</i> | 308 |
| <i>Figura 7.66.- Representación de la mejora del parámetro “-2.L(ϕ)” por incorporación sucesiva de variables explicativas en el modelo final de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva..</i> | 327 |
| <i>Figura 7.67.- Representación del ajuste global entre la probabilidad predicha y los valores observados de la variable binaria “tramo de concentración de accidentes”</i> | 328 |
| <i>Figura 7.68.- Análisis de sensibilidad de los coeficientes estimados de las variables explicativas en el modelo final de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva.....</i> | 330 |
| <i>Figura 8.1.- Valores de longitudes de los tramos de curva..</i> | 341 |
| <i>Figura 8.2.- Valores de longitudes de los tramos de recta.....</i> | 341 |
| <i>Figura 8.3.- Valores del radio mínimo de los tramos de curva..</i> | 342 |
| <i>Figura 8.4.- Valores del peralte máximo de los tramos de curva.....</i> | 343 |
| <i>Figura 8.5.- Valores de la rampa/pendiente promedio del tramo de recta precedente..</i> | 344 |
| <i>Figura 8.6.- Valores de la rampa/pendiente promedio del tramo de curva.....</i> | 345 |
| <i>Figura 8.7.- Valores de la rampa/pendiente máxima del tramo de curva..</i> | 345 |
| <i>Figura 8.8.- Trazado conjunto en planta y alzado de los tramos de curva..</i> | 346 |
| <i>Figura 8.9.- Valores de inclinación de línea de máxima pendiente del tramo de curva..</i> | 347 |
| <i>Figura 8.10.- Valores de velocidad máxima en curva del tramo de curva.....</i> | 348 |
| <i>Figura 8.11.- Valores de velocidad de aproximación al tramo de curva.....</i> | 349 |
| <i>Figura 8.12.- Valores de factor de influencia de la velocidad en la curva.....</i> | 350 |
| <i>Figura 8.13.- Valores de factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva</i> | 350 |
| <i>Figura 8.14.- Valores de factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva..</i> | 351 |
| <i>Figura 8.15.- Variable explicativa F_{exp} en tramos de curva del itinerario analizado..</i> | 352 |
| <i>Figura 8.16.- Variable explicativa F_{RA} en tramos de curva del itinerario analizado. . . .</i> | 352 |
| <i>Figura 8.17.- Variable explicativa F_{CRS}^* en tramos de curva del itinerario analizado.. . .</i> | 353 |
| <i>Figura 8.18.- Variable explicativa F_{visIC}^* en tramos de curva del itinerario analizado. . .</i> | 353 |
| <i>Figura 8.19.- Variable explicativa F_{TC} en tramos de curva del itinerario analizado. . . .</i> | 354 |
| <i>Figura 8.20.- Variables explicativas F_{RA2}, F_{RA3}, F_{RA4} en tramos de curva del itinerario analizado</i> | 355 |
| <i>Figura 8.21.- Relación entre número de accidentes observados y predichos por el modelo</i> | 356 |
| <i>Figura 8.22.- Representación del ajuste global entre la probabilidad predicha y los valores observados de la variable binaria “tramo de concentración de accidentes”</i> | 357 |
| <i>Figura II.1.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según tipos principales de vías (1995).....</i> | A-6 |
| <i>Figura II.2.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según tipos de vías interurbanas (1995)..</i> | A-6 |

| | |
|--|------|
| <i>Figura II.3.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según tipos principales de vías (1996).</i> | A-7 |
| <i>Figura II.4.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según tipos de vías interurbanas (1996).</i> | A-7 |
| <i>Figura II.5.- Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos principales de vías (1995).</i> | A-10 |
| <i>Figura II.6.- Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos de vías interurbanas (1995).</i> | A-10 |
| <i>Figura II.7.- Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos principales de vías (1996).</i> | A-11 |
| <i>Figura II.8.- Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos de vías interurbanas (1996).</i> | A-11 |
| <i>Figura II.9.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según el tipo de alineación en autopista (1995).</i> | A-13 |
| <i>Figura II.10.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según el tipo de alineación en autovía (1995).</i> | A-14 |
| <i>Figura II.11.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según el tipo de alineación en carretera convencional (1995).</i> | A-14 |
| <i>Figura II.12.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según el tipo de alineación en autopista (1996).</i> | A-15 |
| <i>Figura II.13.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según el tipo de alineación en autovía (1996).</i> | A-15 |
| <i>Figura II.14.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según el tipo de alineación en carretera convencional (1996).</i> | A-16 |
| <i>Figura II.15.- Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos de alineación en autopista (1995).</i> | A-19 |
| <i>Figura II.16.- Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos de alineación en autovía (1995).</i> | A-19 |
| <i>Figura II.17.- Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos de alineación en carretera convencional (1995).</i> | A-19 |
| <i>Figura II.18.- Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos de alineación en autopista (1996).</i> | A-19 |
| <i>Figura II.19.- Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos de alineación en autovía (1996).</i> | A-20 |
| <i>Figura II.20.- Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos de alineación en carretera convencional (1996).</i> | A-20 |
| | |
| <i>Figura III.1.- Dimensiones exteriores del vehículo Fiat tipo 1.6.</i> | A-25 |
| | |
| <i>Figura IV.1.- Criterio de frenado en vehículo tipo según la Instrucción de Carreteras 8.1. IC.</i> | A-29 |
| <i>Figura IV.2.- Criterio de aceleración en vehículo tipo según la Instrucción de Carreteras 8.1. IC.</i> | A-30 |
| | |
| <i>Figura V.1.- Ventana de la aplicación informática DISET para la introducción de los datos de inicialización.</i> | A-33 |

| | | |
|----------------------|--|--------------|
| <i>Figura V.2.-</i> | <i>Ventana de mensaje de error en la aplicación informática DISET debido a la no introducción de los datos de inicialización..</i> | <i>A-35</i> |
| <i>Figura V.3.-</i> | <i>Ventana de la aplicación informática DISET para la introducción del factor de corrección del ángulo de volante en cada tramo de recta..</i> | <i>A-36</i> |
| <i>Figura V.4.-</i> | <i>Ventana de la aplicación informática DISET para la introducción de la ubicación de las incorporaciones/salidas..</i> | <i>A-37</i> |
| <i>Figura V.5.-</i> | <i>Ventana de la aplicación informática DISET para la visualización de los parámetros geométricos calculados (opción: pantalla)..</i> | <i>A-39</i> |
| <i>Figura V.6.-</i> | <i>Ventana de la aplicación informática DISET para la visualización de la trayectoria en planta seguida por el vehículo (opción: pantalla)..</i> | <i>A-41</i> |
| <i>Figura V.7.-</i> | <i>Ventana de la aplicación informática DISET para la visualización de la trayectoria en alzado seguida por el vehículo (opción: pantalla)..</i> | <i>A-42</i> |
| <i>Figura V.8.-</i> | <i>Ventana de la aplicación informática DISET para la visualización del radio de la trayectoria en planta (opción: pantalla)..</i> | <i>A-43</i> |
| <i>Figura VI.1.-</i> | <i>Disposición y frecuencias de las cámaras láser del equipo RST..</i> | <i>A-47</i> |
| <i>Figura VI.2.-</i> | <i>Distribución de las cámaras láser requeridas para la obtención de cada uno de los parámetros de la calzada..</i> | <i>A-48</i> |
| <i>Figura X.1.-</i> | <i>Localización de factores del medio en itinerario inicial de la carretera N-I</i> | <i>A-91</i> |
| <i>Figura X.2.-</i> | <i>Localización de accidentes y de factores del medio en Tramo 1 de la carretera N-I.</i> | <i>A-92</i> |
| <i>Figura X.3.-</i> | <i>Localización de accidentes y de factores del medio en Tramo 2 de la carretera N-I.</i> | <i>A-93</i> |
| <i>Figura X.4.-</i> | <i>Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 3 y 4 de la carretera N-I.</i> | <i>A-94</i> |
| <i>Figura X.5.-</i> | <i>Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 5 y 6 de la carretera N-I.</i> | <i>A-95</i> |
| <i>Figura X.6.-</i> | <i>Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 7 y 8 de la carretera N-I.</i> | <i>A-96</i> |
| <i>Figura X.7.-</i> | <i>Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 9 y 10 de la carretera N-I.</i> | <i>A-97</i> |
| <i>Figura X.8.-</i> | <i>Localización de accidentes y de factores del medio en Tramo 11 de la carretera N-I.</i> | <i>A-98</i> |
| <i>Figura X.9.-</i> | <i>Localización de accidentes y de factores del medio en Tramo 12 de la carretera N-I.</i> | <i>A-99</i> |
| <i>Figura X.10.-</i> | <i>Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 13 y 14 de la carretera N-I.</i> | <i>A-100</i> |
| <i>Figura X.11.-</i> | <i>Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 15 y 16 de la carretera N-I.</i> | <i>A-101</i> |
| <i>Figura X.12.-</i> | <i>Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 17 y 18 de la carretera N-I.</i> | <i>A-102</i> |
| <i>Figura X.13.-</i> | <i>Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 19, 20 y 21 de la carretera N-I.</i> | <i>A-103</i> |
| <i>Figura X.14.-</i> | <i>Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 22, 23, 24 y 25 de la carretera N-I.</i> | <i>A-104</i> |

| | |
|--|-------|
| <i>Figura X.15.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 26, 27, 28, 29 y 30 de la carretera N-I.</i> | A-105 |
| <i>Figura X.16.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 31, 32 y 33 de la carretera N-I.</i> | A-106 |
| <i>Figura X.17.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 34, 35, 36 y 37 de la carretera N-I.</i> | A-107 |
| <i>Figura X.18.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 38, 39, 40 y 41 de la carretera N-I.</i> | A-108 |
| <i>Figura X.19.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 42 y 43 de la carretera N-I.</i> | A-109 |
| <i>Figura X.20.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 44, 45 y 46 de la carretera N-I.</i> | A-110 |
| <i>Figura X.21.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramo 47 de la carretera N-I.</i> | A-111 |
| <i>Figura X.22.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramo 48 de la carretera N-I.</i> | A-112 |
| <i>Figura X.23.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 49, 50, 51, 52 y 53 de la carretera N-I.</i> | A-113 |
| <i>Figura X.24.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 54 y 55 de la carretera N-I.</i> | A-114 |
| <i>Figura X.25.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramo 1 de la carretera N-401.</i> | A-115 |
| <i>Figura X.26.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 2 y 3 de la carretera N-401.</i> | A-116 |
| <i>Figura X.27.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 4 y 5 de la carretera N-401.</i> | A-117 |
| <i>Figura X.28.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 6, 7 y 8 de la carretera N-401.</i> | A-118 |
| <i>Figura X.29.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 9 y 10 de la carretera N-401.</i> | A-119 |
| <i>Figura X.30.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 11 y 12 de la carretera N-401.</i> | A-120 |
| <i>Figura X.31.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramo 13 de la carretera N-401.</i> | A-121 |
| <i>Figura X.32.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 14 y 15 de la carretera N-401.</i> | A-122 |
| <i>Figura X.33.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 16, 17 y 18 de la carretera N-401.</i> | A-123 |
| <i>Figura X.34.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 19 a 26 de la carretera N-401.</i> | A-124 |
| <i>Figura X.35.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramo 27 de la carretera N-401.</i> | A-125 |
| <i>Figura X.36.- Localización de factores del medio en itinerario inicial de la carretera N-IV</i> | A-126 |
| <i>Figura X.37.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 1, 2 y 3 de la carretera N-IV.</i> | A-127 |

| | |
|--|--------------|
| <i>Figura X.38.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 4 y 5 de la carretera N-IV.</i> | <i>A-128</i> |
| <i>Figura X.39.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 6, 7, 8 y 9 de la carretera N-IV.</i> | <i>A-129</i> |
| <i>Figura X.40.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 10 a 14 de la carretera N-IV.</i> | <i>A-130</i> |
| <i>Figura X.41.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 15 a 18 de la carretera N-IV.</i> | <i>A-131</i> |
| <i>Figura X.42.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 19 a 21 de la carretera N-IV.</i> | <i>A-132</i> |
| <i>Figura X.43.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramo 22 de la carretera N-IV.</i> | <i>A-133</i> |
| <i>Figura X.44.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 23 y 24 de la carretera N-IV.</i> | <i>A-134</i> |
| <i>Figura X.45.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 25, 26 y 27 de la carretera N-IV.</i> | <i>A-135</i> |
| <i>Figura X.46.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramos 28 y 29 de la carretera N-IV.</i> | <i>A-136</i> |
| <i>Figura X.47.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramo 1 de la carretera N-V.....</i> | <i>A-137</i> |
| <i>Figura X.48.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramo 2 de la carretera N-V.....</i> | <i>A-138</i> |
| <i>Figura X.49.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramo 3 de la carretera N-V.....</i> | <i>A-139</i> |
| <i>Figura X.50.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramo 4 de la carretera N-V.....</i> | <i>A-140</i> |
| <i>Figura X.51.- Localización de accidentes y de factores del medio en Tramo 5 de la carretera N-V.....</i> | <i>A-141</i> |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|-------------|---|-----|
| Tabla 1.1.- | <i>Muertos en accidentes de tráfico en varios países (fuente: L. Evans, 1991 [12]).</i> | 11 |
| Tabla 1.2.- | <i>Tasas de accidentes y víctimas -muertos y heridos- en España, entre 1972 y 1995 (fuente: Boletín Informativo de la D.G.T., 1995 [29]).</i> | 12 |
| Tabla 1.3.- | <i>Tiempos de reacción medidos en simulador de conducción (Lechner y Ferrandez, 1983 [23]).</i> | 27 |
| Tabla 1.4.- | <i>Modelos predictivos de accidentes en intersecciones (Mountain y Fawaz, 1996 [34]).</i> | 31 |
| Tabla 1.5.- | <i>Modelos predictivos de accidentes en intersecciones (Amis, G. 1996 [2]).</i> | 34 |
| Tabla 1.6.- | <i>Modelos predictivos de accidentes en intersecciones (Kalakota, Seneviratne y Nazrul, 1990 [21]).</i> | 37 |
| Tabla 4.1.- | <i>Número de accidentes por kilómetro en vías interurbanas (1994).</i> | 89 |
| Tabla 4.2.- | <i>Factores permanentes del medio de influencia en la ocurrencia de accidentes en tramos de curva en autovía.</i> | 97 |
| Tabla 4.2.- | <i>Factores permanentes del medio de influencia en la ocurrencia de accidentes en tramos de curva en autovía (cont.).</i> | 98 |
| Tabla 4.3.- | <i>Rampas máximas admisibles.</i> | 103 |
| Tabla 4.4.- | <i>Ancho de carril en función del IMD.</i> | 106 |
| Tabla 4.5.- | <i>Condicionantes de velocidad para la existencia de vías lentas.</i> | 107 |
| Tabla 4.6.- | <i>Restricciones sobre la distancia de visibilidad mínima en el trazado de la calzada.</i> | 116 |
| Tabla 4.7.- | <i>Restricciones sobre la distancia de visibilidad mínima en el trazado de calzadas de 2 carriles.</i> | 117 |
| Tabla 4.8.- | <i>Variables explicativas objetivas consideradas en el desarrollo del modelo de predicción de la ocurrencia de accidentes.</i> | 118 |
| Tabla 4.9.- | <i>Definición de los estados de la variable discreta "Factor de influencia de configuración del ramal".</i> | 128 |
| Tabla 5.1.- | <i>Parámetros del vehículo Fiat Tipo 1.6 considerados en el modelo de simulación de la dinámica vehicular.</i> | 171 |
| Tabla 6.1.- | <i>Ensayos de validación del cálculo de la distancia recorrida en la pista del INTA.</i> | 187 |
| Tabla 6.2.- | <i>Ensayos de validación del cálculo del radio de la trayectoria en la pista de ensayos del INTA. Análisis del radio calculado.</i> | 189 |
| Tabla 6.3.- | <i>Parámetros de centrado y dispersión de la velocidad de circulación del vehículo CANE durante los ensayos de calibración en la carretera M-607.</i> | 194 |
| Tabla 6.4.- | <i>Ensayos de validación del cálculo de la rampa en la carretera M-607. Error y corrección.</i> | 199 |
| Tabla 6.5.- | <i>Ensayos de validación del cálculo del peralte en la carretera M-607. Error y corrección.</i> | 203 |
| Tabla 6.6.- | <i>Ensayos de validación del cálculo del peralte en la carretera M-607. Desviación típica.</i> | 203 |

| | | |
|--------------|---|-----|
| Tabla 7.1.- | <i>Funciones de unión según la distribución de la componente aleatoria (variable respuesta)..</i> | 220 |
| Tabla 7.2.- | <i>Definición de la muestra considerada en el presente estudio..</i> | 227 |
| Tabla 7.3.- | <i>Distribución de accidentes según el año..</i> | 234 |
| Tabla 7.4.- | <i>Distribución de accidentes la configuración de la colisión..</i> | 235 |
| Tabla 7.5.- | <i>Distribución de accidentes por número de vehículos implicados en el accidente, según la configuración de la colisión..</i> | 235 |
| Tabla 7.6.- | <i>Distribución de frecuencias del número de accidentes en tramo de curva de autovía en muestra analizada..</i> | 237 |
| Tabla 7.7.- | <i>Medida de centralización de la longitud de los tramos de curva en la muestra analizada..</i> | 245 |
| Tabla 7.8.- | <i>Medida de centralización de la longitud de los tramos de recta en la muestra analizada..</i> | 247 |
| Tabla 7.9.- | <i>Medidas de centralización y dispersión del radio mínimo de los tramos de curva en la muestra analizada..</i> | 250 |
| Tabla 7.10.- | <i>Medidas de centralización y dispersión del peralte máximo de los tramos de curva en la muestra analizada..</i> | 252 |
| Tabla 7.11.- | <i>Coefficiente de correlación para el ajuste entre las variables radio mínimo y peralte máximo del tramo de curva..</i> | 254 |
| Tabla 7.12.- | <i>Medidas de centralización y dispersión de la rampa/pendiente promedio de todos los tramos de rectas precedentes a las curvas en la muestra analizada..</i> | 258 |
| Tabla 7.13.- | <i>Medidas de centralización y dispersión de la rampa/pendiente promedio de todos los tramos de curvas en la muestra analizada..</i> | 258 |
| Tabla 7.14.- | <i>Medidas de centralización y dispersión de la rampa/pendiente máximas de todos los tramos de curvas en la muestra analizada..</i> | 259 |
| Tabla 7.15.- | <i>Medidas de centralización y dispersión de la inclinación de la línea de máxima pendiente del tramo de curva en la muestra analizada..</i> | 262 |
| Tabla 7.16.- | <i>Medidas de centralización y dispersión de la velocidad máxima en curva del tramo de curva en la muestra analizada..</i> | 264 |
| Tabla 7.17.- | <i>Medidas de centralización y dispersión de la velocidad de aproximación del tramo de curva en la muestra analizada..</i> | 266 |
| Tabla 7.18.- | <i>Medidas de centralización y dispersión del factor de influencia de la velocidad del tramo de curva en la muestra analizada..</i> | 268 |
| Tabla 7.19.- | <i>Medidas de centralización y dispersión del factor de influencia de las curvas precedentes del tramo de curva en la muestra analizada..</i> | 270 |
| Tabla 7.20.- | <i>Medidas de centralización y dispersión del factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva en la muestra analizada..</i> | 272 |
| Tabla 7.21.- | <i>Medidas de centralización y dispersión del factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva en la muestra analizada..</i> | 274 |
| Tabla 7.22.- | <i>Medidas de centralización y dispersión del factor de influencia de la velocidad en el ramal en la muestra analizada..</i> | 279 |
| Tabla 7.23.- | <i>Medidas de centralización y dispersión del factor de influencia de la visibilidad en el ramal en la muestra analizada..</i> | 282 |
| Tabla 7.24.- | <i>Coefficientes estimados en el modelo de estimación de la frecuencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a la geometría. FASE 1..</i> | 292 |
| Tabla 7.25.- | <i>Coefficientes estimados en el modelo de estimación de la frecuencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a la geometría. FASE 2..</i> | 293 |

| | | |
|--------------|---|-----|
| Tabla 7.26.- | <i>Coefficientes estimados en el modelo de estimación de la frecuencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a la geometría. FASE 3.</i> | 294 |
| Tabla 7.27.- | <i>Coefficientes estimados en el modelo de estimación de la frecuencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a la geometría. FASE 4.</i> | 296 |
| Tabla 7.28.- | <i>Coefficientes estimados en el modelo de estimación de la frecuencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a la geometría. FASE 5.</i> | 297 |
| Tabla 7.29.- | <i>Coefficientes estimados en el modelo de estimación de la frecuencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a los ramales de acceso. FASE 6</i> | 298 |
| Tabla 7.30.- | <i>Coefficientes estimados en el modelo de estimación de la frecuencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a los ramales de acceso. FASE 7</i> | 299 |
| Tabla 7.31.- | <i>Coefficientes estimados en el modelo de estimación de la frecuencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a los ramales de acceso. FASE 8</i> | 300 |
| Tabla 7.32.- | <i>Coefficientes estimados en el modelo de estimación de la frecuencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a los ramales de salida. FASE 9</i> | 301 |
| Tabla 7.33.- | <i>Coefficientes estimados en el modelo de estimación de la frecuencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a los ramales. FASE 10.</i> | 302 |
| Tabla 7.34.- | <i>Coefficientes estimados en el modelo de estimación de la frecuencia de accidentes en tramos de curva. Modelo final.</i> | 303 |
| Tabla 7.35.- | <i>Matriz de correlación de los coeficientes estimados en el modelo. Modelo final de estimación de la frecuencia de accidentes.</i> | 304 |
| Tabla 7.36.- | <i>Matriz inversa de la matriz de correlación de los coeficientes estimados en el modelo. Modelo final de estimación de la frecuencia de accidentes.</i> | 305 |
| Tabla 7.37.- | <i>Mejora del parámetro “-2.L(θ)” por incorporación sucesiva de variables explicativas en el modelo. Modelo final de estimación de la frecuencia de accidentes.</i> | 306 |
| Tabla 7.38.- | <i>Valores de los coeficientes estimados de las variables explicativas en el análisis de sensibilidad. Modelo final de estimación de la frecuencia de accidentes</i> | 309 |
| Tabla 7.39.- | <i>Intervalos de confianza para los valores de los coeficientes estimados en el análisis de sensibilidad. Modelo final de estimación de la frecuencia de accidentes.</i> | 309 |
| Tabla 7.40.- | <i>Coefficientes estimados en el modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a la geometría. FASE 1.</i> | 312 |
| Tabla 7.41.- | <i>Coefficientes estimados en el modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a la geometría. FASE 2.</i> | 314 |
| Tabla 7.42.- | <i>Coefficientes estimados en el modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a la geometría. FASE 3.</i> | 315 |
| Tabla 7.43.- | <i>Coefficientes estimados en el modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a la geometría. FASE 4.</i> | 316 |

| | | |
|--------------|--|-----|
| Tabla 7.44.- | <i>Coefficientes estimados en el modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a la geometría. FASE 5.</i> | 317 |
| Tabla 7.45.- | <i>Variables binarias creadas a partir de la variable discreta de configuración del ramal de acceso en el modelo de regresión logística.</i> | 318 |
| Tabla 7.46.- | <i>Coefficientes estimados en el modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a los ramales de acceso. FASE 6.</i> | 318 |
| Tabla 7.47.- | <i>Coefficientes estimados en el modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a los ramales de acceso. FASE 7.</i> | 319 |
| Tabla 7.48.- | <i>Coefficientes estimados en el modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a los ramales de acceso. FASE 8.</i> | 320 |
| Tabla 7.49.- | <i>Coefficientes estimados en el modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a los ramales de salida. FASE 9.</i> | 322 |
| Tabla 7.50.- | <i>Coefficientes estimados en el modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a los ramales. FASE 10.</i> | 323 |
| Tabla 7.51.- | <i>Coefficientes estimados en el modelo final de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva.</i> | 324 |
| Tabla 7.52.- | <i>Matriz de correlación de los coeficientes estimados en el modelo final de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva</i> | 325 |
| Tabla 7.53.- | <i>Matriz inversa de la matriz de correlación de los coeficientes estimados en el modelo final de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva.</i> | 326 |
| Tabla 7.54.- | <i>Mejora del parámetro “-2.L(̸)” por incorporación sucesiva de variables explicativas en el modelo final de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva.</i> | 327 |
| Tabla 7.55.- | <i>Tabla de clasificación del modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva.</i> | 329 |
| Tabla 7.56.- | <i>Valores de los coeficientes estimados de las variables explicativas en el análisis de sensibilidad en el modelo final de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva.</i> | 330 |
| Tabla 7.57.- | <i>Intervalos de confianza para los valores de los coeficientes estimados en el análisis de sensibilidad en el modelo final de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva.</i> | 331 |
| Tabla 8.1.- | <i>Itinerario de autovía al que se aplica los modelos de predicción desarrollados.</i> | 339 |
| Tabla 8.2.- | <i>Número de tramos de curva en el itinerario de autovía analizado.</i> | 340 |
| Tabla 8.3.- | <i>Tabla de clasificación del modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva.</i> | 358 |

| | | |
|---------------|---|------|
| Tabla II.1.- | Proporciones de accidentes según el atributo “configuración de la colisión” para cada tipo de vía considerada..... | A-5 |
| Tabla II.2.- | Número total de accidentes para cada tipo de vía considerada..... | A-5 |
| Tabla II.3.- | Medida de la discrepancia “d” entre P1 y P2 según el atributo “configuración de la colisión”..... | A-8 |
| Tabla II.4.- | Medida de la discrepancia “d” entre P21 y P22 según el atributo “configuración de la colisión”..... | A-8 |
| Tabla II.5.- | Medida de la discrepancia “d” entre P21 y P23 según el atributo “configuración de la colisión”..... | A-9 |
| Tabla II.6.- | Medida de la discrepancia “d” entre P22 y P23 según el atributo “configuración de la colisión”..... | A-9 |
| Tabla II.7.- | Proporciones de accidentes según el atributo “gravedad de la colisión” para cada tipo de vía considerada.. | A-10 |
| Tabla II.8.- | Medida de la discrepancia “d” entre P1 y P2 según el atributo “gravedad de la colisión”..... | A-11 |
| Tabla II.9.- | Medida de la discrepancia “d” entre P21 y P22 según el atributo “gravedad de la colisión”..... | A-11 |
| Tabla II.10.- | Medida de la discrepancia “d” entre P21 y P23 según el atributo “gravedad de la colisión”..... | A-12 |
| Tabla II.11.- | Medida de la discrepancia “d” entre P22 y P23 según el atributo “gravedad de la colisión”..... | A-12 |
| Tabla II.12.- | Proporciones de accidentes según el atributo “configuración de la colisión” para cada tipo de alineación y vía.. | A-13 |
| Tabla II.13.- | Número total de accidentes para cada tipo de alineación y vía considerados. | A-16 |
| Tabla II.14.- | Medida de la discrepancia “d” entre P1' y P2' según el atributo “configuración de la colisión”..... | A-17 |
| Tabla II.15.- | Medida de la discrepancia “d” entre P3' y P4' según el atributo “configuración de la colisión”..... | A-17 |
| Tabla II.16.- | Medida de la discrepancia “d” entre P5' y P6' según el atributo “configuración de la colisión”..... | A-18 |
| Tabla II.17.- | Proporciones de accidentes según el atributo “gravedad de la colisión” para cada tipo de alineación y vía.. | A-18 |
| Tabla II.18.- | Medida de la discrepancia “d” entre P1' y P2' según el atributo “gravedad de la colisión”..... | A-20 |
| Tabla II.19.- | Medida de la discrepancia “d” entre P3' y P4' según el atributo “gravedad de la colisión”..... | A-20 |
| Tabla II.20.- | Medida de la discrepancia “d” entre P5' y P6' según el atributo “gravedad de la colisión”..... | A-21 |
| Tabla III.1.- | Características técnicas del motor del vehículo Fiat Tipo 1.6 considerado en el modelo de simulación de la dinámica vehicular. | A-23 |
| Tabla III.2.- | Relaciones de caja de velocidades y diferencial del vehículo Fiat Tipo 1.6 | A-24 |
| Tabla III.3.- | Neumáticos del vehículo Fiat Tipo 1.6. | A-24 |
| Tabla III.4.- | Velocidades máximas a plena carga del vehículo Fiat Tipo 1.6, para cada relación de velocidad..... | A-25 |

| | |
|---|-------------|
| <i>Tabla IV.1.- Balizamiento y señalización según el grado de la curva.....</i> | <i>A-30</i> |
| <i>Tabla VI.1.- Escalas de medida de la textura de la calzada en el equipo RST.....</i> | <i>A-49</i> |
| <i>Tabla VII.1.- Ubicación de los tramos de curva en los itinerarios de la muestra.....</i> | <i>A-52</i> |
| <i>Tabla VII.1.- Ubicación de los tramos de curva en los itinerarios de la muestra (cont.)..</i> | <i>A-53</i> |
| <i>Tabla VII.2.- Proporciones de accidentes según el atributo “geometría del trazado” para la muestra y el resto de itinerarios de autovía de España (años 1994, 1995 y 1996)</i> | <i>A-54</i> |
| <i>Tabla VII.3.- Número de accidentes en la muestra y en el resto de itinerarios de autovía de España (años 1994, 1995 y 1996).....</i> | <i>A-54</i> |
| <i>Tabla VII.4.- Medida de la discrepancia según el atributo “geometría del trazado” entre la muestra y el resto de itinerarios de autovía de España (años 1994, 1995 y 1996)</i> | <i>A-54</i> |
| <i>Tabla VII.5.- Proporciones de accidentes según el atributo “configuración de colisión” para la muestra y el resto de itinerarios de autovía de España (años 1994, 1995 y 1996).....</i> | <i>A-55</i> |
| <i>Tabla VII.6.- Medida de la discrepancia según el atributo “configuración de la colisión” entre la muestra y el resto de itinerarios de autovía de España (años 1994, 1995 y 1996).</i> | <i>A-55</i> |
| <i>Tabla VIII.1.- Número de accidentes en los tramos de curva en las autovías analizadas.</i> | <i>A-57</i> |
| <i>Tabla VIII.2.- Estado de la variable “tramo de concentración de accidentes” en los tramos de curva en las autovías analizadas..</i> | <i>A-58</i> |
| <i>Tabla VIII.3.- Estado de la variable “longitud de tramo de curva (metros)” en las autovías analizadas.....</i> | <i>A-59</i> |
| <i>Tabla VIII.4.- Estado de la variable “longitud de tramo de recta (metros)” en las autovías analizadas.....</i> | <i>A-60</i> |
| <i>Tabla VIII.5.- Estado de la variable “radio mínimo de tramo de curva (metros)” en las autovías analizadas.....</i> | <i>A-61</i> |
| <i>Tabla VIII.6.- Estado de la variable “peralte máximo de tramo de curva (%)” en las autovías analizadas.....</i> | <i>A-62</i> |
| <i>Tabla VIII.7.- Estado de la variable “rampa/pendiente promedio de tramo de recta precedente (%)” en las autovías analizadas.....</i> | <i>A-63</i> |
| <i>Tabla VIII.8.- Estado de la variable “rampa/pendiente promedio de tramo de curva (%)” en las autovías analizadas.....</i> | <i>A-64</i> |
| <i>Tabla VIII.9.- Estado de la variable “rampa/pendiente máxima de tramo de curva (%)” en las autovías analizadas.....</i> | <i>A-65</i> |
| <i>Tabla VIII.10.- Estado de la variable “Inclinación de línea de máxima pendiente de tramo de curva (%)” en las autovías analizadas.....</i> | <i>A-66</i> |
| <i>Tabla VIII.11.- Estado de la variable “Velocidad máxima en curva de tramo de curva (km/h)” en las autovías analizadas..</i> | <i>A-67</i> |
| <i>Tabla VIII.12.- Estado de la variable “Velocidad de aproximación de tramo de curva (km/h)” en las autovías analizadas..</i> | <i>A-68</i> |
| <i>Tabla VIII.13.- Estado de la variable “Factor de influencia de velocidad de tramo de curva” en las autovías analizadas.....</i> | <i>A-69</i> |

| | |
|--|------|
| <i>Tabla VIII.14.- Estado de la variable “Factor de influencia de las curvas precedentes” en las autovías analizadas...</i> | A-70 |
| <i>Tabla VIII.15.- Estado de la variable “Factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (s)” en las autovías analizadas..</i> | A-71 |
| <i>Tabla VIII.16.- Estado de la variable “Factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (%)” en las autovías analizadas.....</i> | A-72 |
| <i>Tabla VIII.17.- Estado de la variable “Factor de influencia de la señalización de la curva” en las autovías analizadas.....</i> | A-73 |
| <i>Tabla VIII.18.- Estado de la variable “Factor de influencia de la configuración del ramal de acceso” en las autovías analizadas..</i> | A-74 |
| <i>Tabla VIII.19.- Estado de la variable “Factor de influencia de la configuración del ramal de salida” en las autovías analizadas.....</i> | A-75 |
| <i>Tabla VIII.20.- Estado de la variable “Factor de influencia de la velocidad en el ramal de acceso (km/h)” en las autovías analizadas.....</i> | A-76 |
| <i>Tabla VIII.21.- Estado de la variable “Factor de influencia de la velocidad en el ramal de salida (km/h)” en las autovías analizadas..</i> | A-77 |
| <i>Tabla VIII.22.- Estado de la variable “Factor de influencia de la visibilidad en el ramal de acceso (s)” en las autovías analizadas.....</i> | A-78 |
| <i>Tabla VIII.23.- Estado de la variable “Factor de influencia de la visibilidad en el ramal de salida (s)” en las autovías analizadas..</i> | A-79 |
| | |
| <i>Tabla IX.1.- Estado de la variable “longitud de tramo de curva (metros)”.....</i> | A-81 |
| <i>Tabla IX.2.- Estado de la variable “longitud de tramo de recta (metros)”.....</i> | A-81 |
| <i>Tabla IX.3.- Estado de la variable “radio mínimo de tramo de curva (metros)”..</i> | A-82 |
| <i>Tabla IX.4.- Estado de la variable “peralte máximo de tramo de curva (%)”.....</i> | A-82 |
| <i>Tabla IX.5.- Estado de la variable “rampa/pendiente promedio de tramo de recta precedente (%)”..</i> | A-83 |
| <i>Tabla IX.6.- Estado de la variable “rampa/pendiente promedio de tramo de curva (%)”</i> | A-83 |
| <i>Tabla IX.7.- Estado de la variable “rampa/pendiente máxima de tramo de curva (%)”</i> | A-84 |
| <i>Tabla IX.8.- Estado de la variable “inclinación de línea de máxima pendiente de tramo de curva (%)”..</i> | A-84 |
| <i>Tabla IX.9.- Estado de la variable “velocidad máxima en curva en tramo de curva (km/h)”</i> | A-85 |
| <i>Tabla IX.10.- Estado de la variable “velocidad de aproximación (km/h)”..</i> | A-85 |
| <i>Tabla IX.11.- Estado de la variable “factor de influencia de la velocidad en la curva”</i> | A-86 |
| <i>Tabla IX.12.- Estado de la variable “factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (s)”.....</i> | A-86 |
| <i>Tabla IX.13.- Estado de la variable “factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (%)”..</i> | A-87 |
| <i>Tabla IX.14.- Estado de la variable X_1.....</i> | A-87 |
| <i>Tabla IX.15.- Estado de la variable X_2.....</i> | A-88 |
| <i>Tabla IX.16.- Estado de la variable X_3.....</i> | A-88 |
| <i>Tabla IX.17.- Estado de la variable X_4.....</i> | A-89 |
| <i>Tabla IX.18.- Estado de la variable X_5.....</i> | A-89 |

CAPÍTULO 0.- RESUMEN

0.- RESUMEN.

El fenómeno accidente de tráfico constituye un hecho de notable significación, especialmente debido a las consecuencias negativas que provoca para personas, vehículos e instalaciones. En las últimas décadas, a pesar de la mejora de las condiciones de seguridad de las carreteras, se ha producido un aumento notable del número de accidentes, debido en gran parte al incremento del parque automovilístico y de la movilidad de la población.

Ante esta evidencia, sigue vigente la necesidad de un incremento de la seguridad en dichas carreteras. La aproximación a este problema puede ser analizada desde una doble perspectiva:

- *Reducción del número de accidentes.*
- *Reducción de la gravedad de los mismos.*

Dentro de este esquema conceptual la presente Tesis Doctoral se encuadra en el primero de los bloques, abordando el problema de *la prevención del accidente*, dado que ésta constituye la manera más efectiva para la mejora de la seguridad del tráfico. El proceso de prevención requiere la identificación de las causas del accidente, lo cual resulta de gran complejidad debido a que en él confluyen tres elementos -el hombre, el vehículo y el medio-, que interaccionan entre sí.

El fenómeno del accidente tiene lugar cuando se producen determinadas asociaciones de actos inseguros por parte de los conductores y condiciones inseguras en los factores asociados al vehículo y al medio.

La influencia del conductor como parte fundamental de la función de control del sistema hace prácticamente imposible la definición de un número finito de tales asociaciones para explicar la mayoría de los accidentes. Por el contrario, se constata que condiciones objetivamente análogas pueden ocasionar accidentes en unas ocasiones y no en otras.

No obstante lo anterior, cabe formular modelos que permitan ciertas aproximaciones al conocimiento de la influencia de algunas variables del sistema hombre-vehículo-medio, tomando en consideración los accidentes ya ocurridos y aplicando métodos estadísticos capaces de valorar dicha influencia con determinados niveles de significación.

En el caso de las infraestructuras, es cierto que en un mismo tramo, curva, intersección, etc., unos conductores sufren accidentes y otros no. La mayoría circula con seguridad, pero no es menos cierto que en determinados tramos, curvas, intersecciones u otros lugares la acumulación de accidentes es mayor que en el resto. La identificación y evaluación de los factores que diferencian estos lugares de la vía de aquellos que presentan menor accidentalidad es de gran interés para la mejora técnica de la misma, aunque no se resuelva el problema de forma global.

Ante esto, se propone como objetivo de esta Tesis la generación de modelos de predicción de la ocurrencia de accidentes en tramos de carretera basados en variables explicativas objetivas definidas a partir de los factores permanentes del medio. Dichos factores serán evaluados

mediante un sistema de medida en continuo, soportado en un vehículo turismo de serie, desarrollado durante la presente investigación.

Frente a esto, existe un conjunto de factores transitorios del medio que influyen sobre la ocurrencia de accidentes (condiciones climatológicas, obras en la calzada,...) no considerados en la presente Tesis Doctoral, y que provocarán errores en la predicción de la ocurrencia de accidentes a partir de los modelos estimados.

La fase inicial del proceso de generación requiere *el planteamiento del problema*. Esto precisa de la definición del mismo en términos precisos, indicando:

- El ámbito de aplicación del estudio.
- Las variables que deben ser observadas y cómo medirlas.

La etapa de determinación del ámbito de aplicación, esto es, *la población* que se pretende analizar, es fundamental ya que las conclusiones obtenidas sólo se aplicarán a los miembros de la misma. De este modo, la población considerada en el presente trabajo quedará definida como sigue:

Tramos en curva de autovías españolas, donde serán identificados los principales factores de riesgo potencial asociados a las condiciones permanentes del medio presentes en los mismos, los cuales condicionan el comportamiento de los conductores influyendo sobre la ocurrencia de accidentes de tráfico.

Seguidamente, debe ser definida la propiedad observada en dicha población y cuya variabilidad habrá de ser explicada por el modelo, la cual constituye *la variable respuesta*. Durante este trabajo, serán analizadas dos variables respuesta de distinta naturaleza:

- *Variable respuesta discreta*: frecuencia de accidentes en tramos de curva en autovía.
- *Variable respuesta binaria*: tramo de curva de concentración de accidentes.

La etapa final de la fase de planteamiento del problema consiste en la determinación de las variables explicativas objetivas integrantes de la parte sistemática o previsible del modelo. Dichas variables son definidas a partir de los principales factores permanentes del medio de influencia en la ocurrencia de accidentes en la población en estudio. Así, los factores considerados son presentados seguidamente:

- *Parámetros geométricos de la calzada*:
 - ▶ Trazado en planta:
 - Longitud de recta y curva.
 - Radio.
 - Peralte.
 - Transiciones de radio y peralte.
 - ▶ Trazado en alzado:
 - Longitud de la rasante.
 - Inclinación de la rasante: rampa y pendiente.

- Acuerdos de las rasantes.
- ▶ Trazado combinado en planta y alzado.
- ▶ Sección transversal:
 - Número y anchura de carriles.
 - Anchura de arcén.
 - Vías adicionales: vías lentas, carril para bicicletas y ciclomotores.
- *Parámetros de los ramales:*
 - ▶ Configuración del carril de acceso/salida.
 - ▶ Punto de intersección con vía principal.
- *Señalización.*
- *Visibilidad geométrica de elementos de la vía:*
 - ▶ Tramo de curva.
 - ▶ Ramales.
 - ▶ Señalización.
 - ▶ Distancia máxima de visibilidad.
- *Intensidad del tráfico.*

A partir de estos factores son definidas las variables explicativas consideradas durante el proceso de estimación del modelo de predicción de la ocurrencia de accidentes, las cuales dependen en gran medida del tipo de vía analizado. El presente trabajo de investigación aborda la aplicación del proceso de modelización a tramos de curva de autovía. Las variables identificadas inicialmente se listan seguidamente:

- *Variables asociadas a la geometría.*
 - ▶ Velocidad máxima en curva.
 - ▶ Velocidad de aproximación.
 - ▶ Factor de influencia de la velocidad en la curva.
 - ▶ Factor de influencia de las curvas precedentes.
 - ▶ Factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva.
 - ▶ Factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva.
 - ▶ Factor de influencia de la señalización de la curva.
 - ▶ Longitud de curva.
- *Variables asociadas a los ramales.*
 - ▶ Factor de influencia de configuración del ramal.
 - ▶ Factor de influencia de la velocidad en el ramal.
 - ▶ Factor de influencia de la visibilidad del ramal.
 - ▶ Factor de influencia de ramales adyacentes.
- *Variables asociadas a la intensidad del tráfico.*
 - ▶ Intensidad Media Diaria.

Posteriormente y durante el proceso de ajuste del modelo, serán generadas nuevas variables como resultado de la combinación de las anteriores.

La bondad del análisis de significación de dichas variables se fundamenta en la precisión en la medida de los factores permanentes del medio. Esta medición constituye habitualmente una tarea laboriosa, no existiendo sistemas de medida específicos de aplicación a la investigación accidentológica para el registro en continuo de dichos factores.

Ante esto, se lleva a cabo una segunda fase de desarrollo de un sistema para la medida en continuo de estos factores del medio, basado en un vehículo instrumentado. Para ello, es empleado como plataforma un vehículo turismo de serie. Dicho vehículo es equipado con los siguientes equipos de medida, definidos a partir de los factores del medio previamente identificados:

- *Equipo de medida de la velocidad sin contacto*. Esta señal, de elevada precisión, permite el posicionamiento del vehículo en la trayectoria recorrida.
- *Volante instrumentado*, para la adquisición del ángulo girado por el conductor. A partir de esta medida, es calculado el ángulo girado por las ruedas directrices del vehículo.
- *Servo-inclinómetro de dos ejes* para la medida de los ángulos de inclinación longitudinal y transversal (ángulos de cabeceo y balanceo, respectivamente) girados por la carrocería del vehículo durante la marcha.
- *Ordenador embarcado* para el registro de las señales adquiridas y el posterior procesamiento de las mismas.
- *Cámara de vídeo*, para la grabación del trazado de la calzada desde, aproximadamente, el punto de vista del conductor. El análisis de estas imágenes posibilita la obtención de algunas variables las cuales no pueden ser medidas directamente mediante el resto de los sensores embarcados.

Al mismo tiempo, permite el posicionamiento de los hitos kilométricos reales en la trayectoria adquirida, lo cual es requerido para la localización de los accidentes acaecidos en la misma.

Posteriormente, dichas señales son procesadas mediante un programa informático generado durante el presente trabajo, el cual realiza las siguientes acciones:

- Acondicionamiento y cambio de referencia de las señales, pasando del dominio del tiempo al dominio del espacio.
- Implementación de dichas señales en un modelo de simulación de la dinámica vehicular de 10 grados de libertad, el cual incluye el modelo de Dugoff de comportamiento del neumático frente a esfuerzos longitudinales y transversales. A partir de éste, es generada la trayectoria en planta de la calzada.
- Generación de la trayectoria en alzado de la misma.

La etapa final de esta segunda fase consiste en la validación del sistema de medida en continuo desarrollado, mediante el contraste de los factores del medio adquiridos en ensayos dinámicos en pista de pruebas y en carretera.

Seguidamente se aborda una tercera fase de modelización que comienza con la selección de la muestra sobre la cual es llevada a cabo la medición, mediante el sistema de medida desarrollado, de los factores del medio previamente identificados. Durante este trabajo, se ha analizado 116 tramos de curva de las autovías N-I, N-401, N- IV y N-V, con un total de 225 kilómetros.

A partir de la información adquirida mediante los sensores embarcados sobre los factores del medio, son calculadas las variables explicativas consideradas durante el proceso de estimación del modelo de predicción de la ocurrencia de accidentes.

El proceso de modelización continúa con la selección del modelo de predicción más adecuado en función de la distribución de la variable respuesta considerada. El objeto del modelo de predicción pretendido en el presente trabajo consiste en el análisis de las diferencias de la frecuencia media de accidentes entre los tramos considerados, con valores de los factores del medio variables entre ellos. Las variaciones en dicha frecuencia media siguen una distribución Gamma, la cual será aproximada por simplicidad a una *distribución de Poisson*.

Teniendo en cuenta dicha distribución, la aproximación estadística al problema de la modelización de la accidentalidad es abordada desde una doble perspectiva:

- a) Predicción de *la frecuencia de accidentes* acumulados en un tramo de curva de autovía. En este caso, la distribución de la frecuencia de accidentes entre tramos es aproximada mediante una distribución de Poisson, siendo la *función logarítmica* la función de unión empleada.
- b) Predicción de la *probabilidad de ocurrencia de accidentes* en un tramo de curva de autovía. En esta segunda aproximación, dicha predicción de la probabilidad requiere la definición de la variable respuesta binaria “tramo de curva de concentración de accidentes”, la cual es estimada conforme a un modelo de *regresión logística*.

De este modo, y tomando en consideración las variables explicativas definidas al comienzo de esta Tesis así como el número de accidentes acumulados durante los años de 1994, 1995 y 1996, son estimados los parámetros del modelo, junto a un análisis de significación de las variables incorporadas al mismo. Durante este proceso, y aplicando un procedimiento de *eliminación progresiva*, son excluidas de la parte sistemática de dicho modelo aquellas variables que no resulten significativas.

Una vez que el modelo más apropiado ha sido ajustado a los accidentes contabilizados, se lleva a cabo un análisis para la evaluación de la bondad de dicho ajuste mediante el parámetro $-2.L(\hat{\theta})$ (parámetro proporcional a la *tasa de discriminación*). Así, el modelo estimado será óptimo cuando minimice dicho parámetro de evaluación.

Posteriormente y como etapa final del proceso de ajuste del modelo, se aborda la diagnosis del mismo. Para ello, se aplican las siguientes técnicas estadísticas sobre los coeficientes estimados en dicho proceso:

- *Análisis de multicolinealidad*: evaluación de la dependencia entre las variables explicativas.
- *Análisis de sensibilidad*: estudio de la variabilidad inducida en el resto de los coeficientes estimados de las variables explicativas, cuando alguna de ellas es excluida del modelo.

La fase final del presente trabajo de investigación consiste en la extracción de conclusiones a partir de los modelos generados. De este modo, serán abordados los siguientes aspectos:

- Evaluación de los resultados de significación de las variables explicativas consideradas (basadas en factores permanentes del medio) sobre el fenómeno de ocurrencia de accidentes de tráfico, en relación al tipo de vía estudiado.
- Aplicación de los modelos obtenidos a la predicción de la ocurrencia de accidentes en itinerarios no considerados durante su estimación. Dichos itinerarios deben pertenecer a vías con igual configuración (de igual tipo) que las analizadas durante el proceso de modelización.

Como síntesis general de la presente Tesis Doctoral, es mostrada la metodología de elaboración de modelos de predicción de la ocurrencia de accidentes en tramos de carretera seguida en este trabajo, basada en la medición en continuo de las variables permanentes del medio de influencia. Dicha metodología, cuya estructura se muestra en la siguiente figura (*Figura 0.1.*), constituye una herramienta de investigación accidentológica de gran utilidad, que permitirá el estudio en profundidad de estos factores del medio para la propuesta de posibles acciones correctoras tendentes a la mejora de las condiciones de seguridad del tráfico.

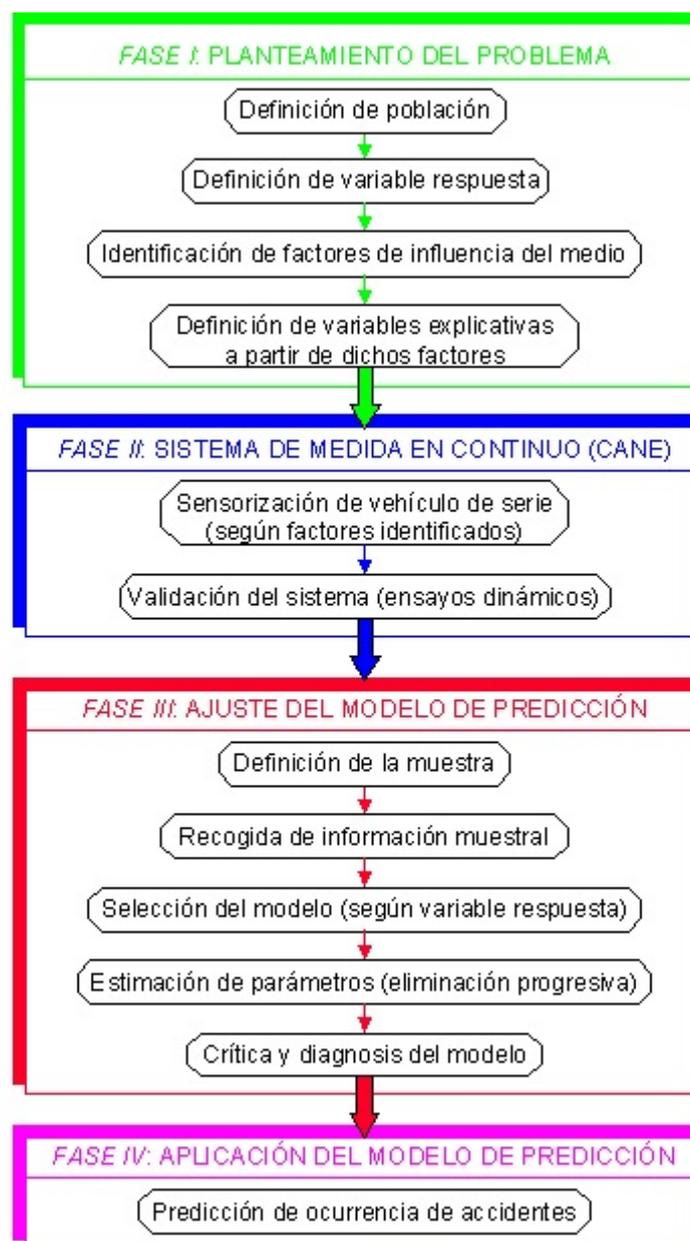


Figura 0.1.- Metodología de elaboración de modelos de predicción de accidentes, basados en las variables permanentes del medio.

CAPÍTULO 1.- ANTECEDENTES

CAPÍTULO 1.- ANTECEDENTES.

La seguridad en el transporte por carretera se fundamenta en el análisis de los daños producidas a personas y mercancías transportadas así como a otras personas o elementos ajenos al mismo, como consecuencia del tránsito de vehículos, manipulación de mercancías u otras acciones asociadas al conjunto de operaciones que dicho transporte involucra.

La mayor parte de tales daños son debidos a los accidentes de tráfico, por lo que suele establecerse una asociación lógica entre éstos y la seguridad en el transporte.

El fenómeno accidente de tráfico constituye un hecho de notable significación, especialmente debido a las consecuencias negativas que provoca para personas, vehículos e instalaciones. La gravedad de dichas consecuencias dependerá principalmente de los vehículos y sus características, de la severidad del accidente, y del riesgo que pueda entrañar en tales circunstancias la propia carga. Éste último aspecto está fundamentalmente relacionado con las denominadas mercancías peligrosas las cuales, en situaciones como colisiones, vuelcos o despeñamientos de vehículos, pueden originar situaciones de extrema gravedad.

La importancia de la siniestralidad que se produce en las carreteras queda de manifiesto a través de algunos datos generales como los siguientes:

- Referidos a E.E.U.U.:

- Entre los hombres jóvenes, se producen tantas muertes como consecuencia de los accidentes de tráfico como por el resto de las causas.
- Entre 1928 y 1988 han muerto 2.500.000 personas en accidentes de carretera.
- En la actualidad, se producen unas 50.000 víctimas mortales al año.
- El coste económico estimado como consecuencia de los accidentes de tráfico ascendió en 1988 a unos 70.000 billones de dólares.

- Referidos a Europa y el resto de países:

- En 19 países pertenecientes a la Conferencia Europea de Ministros de Transporte se producen más de 60.000 muertos y casi dos millones de heridos al año.
- En el mundo, son unas 500.000 las víctimas mortales anuales.

El análisis de la siniestralidad puede hacerse a través de índices que relacionen el número de víctimas con la motorización del país o con los habitantes. Así, en la tabla siguiente (*Tabla 1.1.*) se ofrecen algunos datos reproducidos de *Evans, L., 1991 [12]*, a los cuales se han añadido los datos correspondientes a España en el año 1990, considerando 6.948 muertos en carretera y zona urbana, 15.696.715 vehículos de todas las categorías y 39.000.000 de habitantes.

| <i>País</i> | <i>Vehículos por 1000 hab.</i> | <i>Muertos por 1000 veh.</i> | <i>Muertos por millón pers.</i> | <i>Muertos por año</i> | <i>Año</i> |
|-------------|--------------------------------|------------------------------|---------------------------------|------------------------|------------|
| EEUU | 778 | 0.24 | 184 | 45.500 | 1989 |
| Canadá | 561 | 0.28 | 158 | 4.120 | 1984 |
| Australia | 540 | 0.34 | 186 | 2.821 | 1984 |
| Japón | 403 | 0.26 | 103 | 12.456 | 1985 |
| España | 402 | 0.44 | 178 | 6.948 | 1990 |
| Holanda | 355 | 0.32 | 113 | 1.625 | 1984 |
| R. Unido | 322 | 0.32 | 103 | 5.788 | 1984 |
| Grecia | 176 | 1.20 | 211 | 2.091 | 1984 |
| Israel | 147 | 0.74 | 109 | 436 | 1981 |
| Sur Africa | 123 | 2.5 | 305 | 9.621 | 1984 |
| USSR | 76 | 2.7 | 204 | 58.651 | 1989 |
| Chile | 74 | 1.8 | 133 | 1.552 | 1983 |
| Colombia | 35 | 2.6 | 89 | 2.383 | 1981 |
| Turquía | 27 | 4.4 | 118 | 5.677 | 1984 |
| Egipto | 19 | 6.0 | 114 | 5.092 | 1982 |
| Tailandia | 17 | 5.0 | 84 | 4.315 | 1985 |
| Kenya | 12 | 11.3 | 134 | 2.228 | 1980 |
| Nigeria | 7 | 14.5 | 107 | 9.150 | 1980 |
| Corea Sur | 5 | 5.2 | 171 | 6.834 | 1983 |
| India | 4 | 10.9 | 42 | 30.471 | 1983 |
| Etiopía | 1 | 17 | 25 | 1.016 | 1983 |
| Liberia | 1 | 36 | 39 | 97 | 1981 |

Tabla 1.1.- Muertos en accidentes de tráfico en varios países (fuente: L. Evans, 1991 [12]).

A partir de los datos mostrados en la tabla precedente puede concluirse que el incremento de la motorización de un país (con frecuencia, directamente proporcional al nivel de desarrollo del mismo) hace disminuir, en general, el número de víctimas mortales por vehículo.

Estos datos ponen de manifiesto la importancia del fenómeno accidente de tráfico y justifican los esfuerzos realizados en las últimas décadas encaminados a su reducción. Debido a ello se ha producido un progresivo incremento de las condiciones de seguridad de las carreteras, a través de la mejora de su diseño y de los vehículos, y el incremento del nivel de destreza de los conductores. Sirva como muestra los datos recogidos en la tabla siguiente (*Tabla 1.2.*), correspondiente a los accidentes acaecidos en las carreteras de España durante el período de 1972 a 1995.

| <i>Año</i> | <i>Parque de vehículos</i> | <i>Accid. por 10.000 veh. del parque</i> | <i>Muertos por 10.000 veh. del parque</i> | <i>Muertos por 1.000 accidentes</i> | <i>Heridos por 1.000 accidentes</i> | <i>Muertos por 10.000 habitantes</i> |
|------------|----------------------------|--|---|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 1972 | 5.334.633 | 117 | 8 | 72 | 1.523 | 1,295 |
| 1973 | 5.936.819 | 112 | 8 | 72 | 1.515 | 1,373 |
| 1974 | 6.487.113 | 97 | 7 | 69 | 1.518 | 1,233 |
| 1975 | 7.018.906 | 89 | 6 | 72 | 1.502 | 1,267 |
| 1976 | 7.600.532 | 86 | 6 | 73 | 1.511 | 1,328 |
| 1977 | 8.269.311 | 80 | 6 | 73 | 1.556 | 1,336 |
| 1978 | 8.952.628 | 78 | 6 | 76 | 1.578 | 1,461 |
| 1979 | 9.586.802 | 74 | 5 | 73 | 1.605 | 1,404 |
| 1980 | 10.192.748 | 67 | 5 | 74 | 1.588 | 1,347 |
| 1981 | 10.666.714 | 63 | 5 | 74 | 1.585 | 1,306 |
| 1982 | 11.170.404 | 57 | 4 | 71 | 1.575 | 1,181 |
| 1983 | 11.628.151 | 63 | 4 | 64 | 1.542 | 1,222 |
| 1984 | 11.190.564 | 66 | 4 | 65 | 1.559 | 1,259 |
| 1985 | 11.716.339 | 69 | 4 | 60 | 1.561 | 1,273 |
| 1986 | 12.284.080 | 71 | 4 | 62 | 1.564 | 1,401 |
| 1987 | 13.068.840 | 75 | 4 | 60 | 1.562 | 1,508 |
| 1988 | 13.881.323 | 77 | 5 | 60 | 1.551 | 1,628 |
| 1989 | 14.870.484 | 74 | 5 | 65 | 1.543 | 1,836 |
| 1990 | 15.696.715 | 65 | 4 | 68 | 1.532 | 1,767 |
| 1991 | 16.528.396 | 59 | 4 | 69 | 1.513 | 1,740 |
| 1992 | 17.347.203 | 50 | 3 | 69 | 1.489 | 1,537 |
| 1993 | 17.809.987 | 45 | 4 | 80 | 1.466 | 1,628 |
| 1994 | 18.218.924 | 43 | 3 | 72 | 1.449 | 1,432 |
| 1995 | 18.847.245 | 44 | 3 | 69 | 1.453 | 1,465 |

Tabla 1.2.- Tasas de accidentes y víctimas -muertos y heridos- en España, entre 1972 y 1995 (fuente: Boletín Informativo de la D.G.T., 1995 [29]).

De este modo, a pesar del notable incremento del parque automovilístico durante este período de 24 años (dicho parque se ha triplicado en este período), el número de accidentes por vehículo del parque así como la lesividad por accidente se han reducido, lo cual ratifica el fenómeno observado en la *Tabla 1.1*. No obstante, el número total de accidentes aumenta constantemente por el notable incremento de dicho parque y de la movilidad de la población.

Ante esta evidencia, sigue vigente la necesidad de un incremento de la seguridad de las carreteras. La aproximación a este problema puede ser efectuada desde una doble perspectiva:

- *Reducción del número de accidentes*: la prevención de los accidentes es la manera más efectiva para la mejora de la seguridad del tráfico. No obstante, la adopción de medidas eficaces requiere la identificación de sus causas, lo cual resulta de gran complejidad debido a la naturaleza intrínseca del fenómeno accidente de tráfico.

- *Reducción de la gravedad de los accidentes*: frente a la complejidad de análisis del proceso de prevención, existe gran cantidad de medidas, tanto en la infraestructura como en el vehículo, encaminadas a la disminución de gravedad del accidente una vez desencadenado.

Así, en la calzada y sus aledaños se disponen áreas de escape de frenado de emergencia tras descensos pronunciados; barreras de separación de carriles de sentidos opuestos; barreras metálicas de protección... Al mismo tiempo, se diseñan los vehículos para la absorción de la máxima cantidad de energía, preservando el habitáculo de pasajeros; cinturones de seguridad con sistema pretensor; cinturones de seguridad suplementados con bolsa de aire...

Dentro de este esquema conceptual, la presente Tesis aborda el problema de *la prevención del accidente*. En esta línea de investigación, se muestra seguidamente el estado del arte, así como el planteamiento de las dificultades existentes.

1.1.- Factores involucrados en el fenómeno accidente de tráfico.

Como ha sido indicado en el apartado precedente la prevención del accidente se basa en la identificación de sus causas, esto es, los factores que lo condicionan.

El accidente es un fenómeno de elevada complejidad, debido a que en él confluyen tres elementos: el hombre, el vehículo y el medio. Estos elementos interactúan entre sí, integrando un sistema de control cerrado, como se muestra en la siguiente figura (*Figura 1.1.*).

- *El conductor* recibe constantemente la información del exterior, procedente del medio (geometría, condiciones medioambientales, condiciones del tráfico...), y del propio vehículo (indicadores interiores, respuesta dinámica del vehículo...). Toda esta información es recibida por diferentes sentidos, y debe ser percibida, identificada y analizada por dicho conductor para, en función de ella, tomar la decisión adecuada, elaborar una respuesta y actuar sobre el vehículo.

- *El vehículo*, por otro lado, interactúa con el medio a través del contacto neumático-calzada, y sufre los efectos aerodinámicos del aire o del viento. Como consecuencia de esta interacción, combinada con las acciones del conductor, dicho vehículo genera una respuesta dinámica.

- *El medio*, por su parte, no sólo proporciona un nivel de adherencia, sino que combinando geometría, estado de superficie, condiciones ambientales, señalización..., genera unas determinadas condiciones de seguridad.

Finalmente, como consecuencia de las interacciones recíprocas entre estos tres elementos el sistema da lugar a una respuesta caracterizada por un movimiento del vehículo, que será seguro en la medida en que su trayectoria no le haga abandonar involuntariamente la carretera, ni colisionar con otros vehículos, objetos o personas.

Esta estructura de interacción motiva que el análisis de factores que influyen en el accidente de tráfico deba efectuarse a través de los parámetros asociados a cada uno de los tres elementos integrantes del sistema y, sobre todo, de la interacción entre ellos.

De este modo, el accidente suele ser la consecuencia de la asociación de actos y condiciones inseguras que alteran las condiciones normales de la circulación. Así, los *actos inseguros* son atribuibles a las personas que intervienen como conductores o peatones, mientras que las *condiciones inseguras* proceden del medio (calzada, condiciones ambientales...) y del vehículo. En último extremo, en la mayoría de los accidentes intervienen, como causa directa o indirecta, más de un factor relacionado con cualquiera de los elementos del sistema hombre-vehículo-medio, tanto desde el punto de vista de las condiciones que lo hicieron inevitable como de aquellas que afectan a las consecuencias o daños producidos.

Figura 1.1.- Sistema hombre-vehículo-medio.

En las estadísticas sobre accidentes elaboradas por las Administraciones de los diferentes países así como en los numerosos trabajos de investigación realizados, el factor humano aparece como causa principal del accidente en mayor medida que el medio, y éste con mucha más frecuencia que el vehículo. No obstante, resulta arriesgado aportar valores sobre la contribución de cada uno de los elementos del sistema, dado que en la mayoría de los accidentes existe más de una causa implicada, y la metodología de recogida y análisis de datos ejerce una gran influencia sobre el resultado.

A pesar de las discrepancias, la mayoría de los estudios coinciden que el vehículo interviene como causa principal o secundaria de los accidentes en un grado mucho menor que los otros elementos, especialmente como causa única. Esto es debido a las importantes mejoras técnicas introducidas en su diseño, consecuencia de la competitividad del sector de automoción y de la labor de reglamentación realizada por las Administraciones de los países más avanzados y los Organismo Internacionales.

Debido a esta falta de significación del vehículo como causa desencadenante del accidente, este elemento no será considerado en el análisis mostrado seguidamente. Así, se presenta a continuación algunos trabajos de investigación relacionados con el estudio de los factores humano y del medio involucrados en la ocurrencia del fenómeno del accidente.

1.2.- El factor humano.

Como ha sido mostrado en el *Apartado 1.1.*, el hombre constituye la causa directa o indirecta más importante de ocurrencia del accidente de tráfico.

Así, el conductor recoge información de la carretera, las condiciones de tráfico, de otros usuarios y de su propio vehículo a través de sus sentidos, fundamentalmente la visión. Esta información es elaborada por el sistema nervioso central donde se estima, se predice y se decide qué hacer. A continuación, estas decisiones serán ejecutadas por los distintos sistemas musculares. Dicha acción cambiará la información recogida en el siguiente instante.

El sistema hombre-vehículo-medio (*Figura 1.1.*) es muy flexible, donde el conductor puede en diferentes momentos incrementar su esfuerzo y disminuir el confort. En el seno de este sistema, y considerando los estímulos exteriores (fundamentalmente los procedentes del medio), el hombre efectúa dos funciones básicas hasta la ejecución de las acciones pertinentes sobre el vehículo -percepción del riesgo y toma de decisión-, como se muestra en la siguiente figura (*Figura 1.2.*).

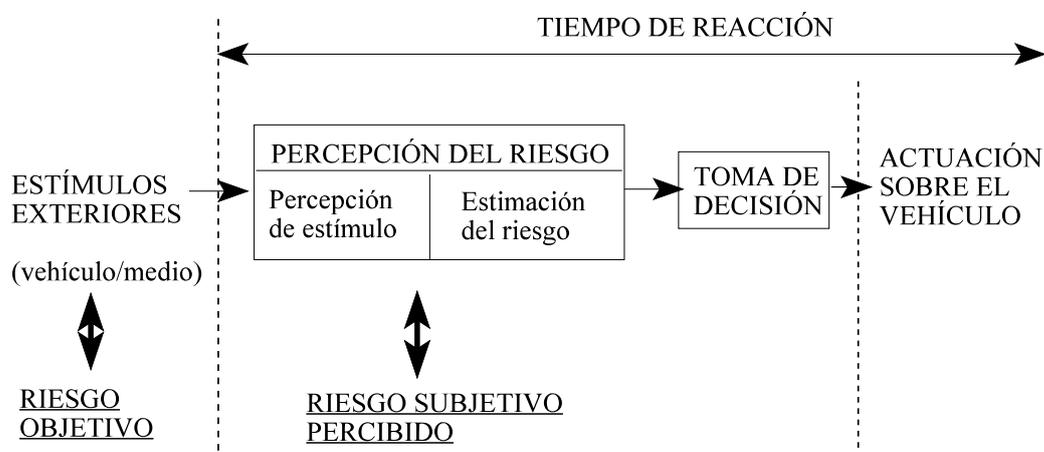


Figura 1.2.- Esquema de actuación del hombre durante la conducción.

Las condiciones instantáneas exigen diferentes acciones por parte del conductor: las demandas. A veces, dichas demandas son muy sencillas y dicho conductor no tiene problemas para cumplirlas. No obstante, cuando las demandas son superiores al comportamiento del conductor el accidente ocurre (*Blumenthal, 1968 [5]*), como se muestra en la siguiente figura (*Figura 1.3.*).

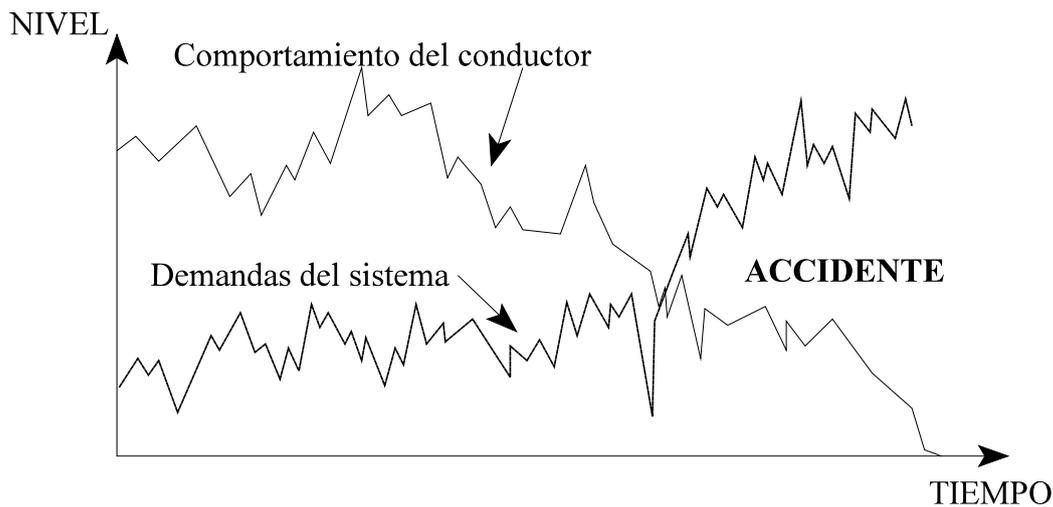


Figura 1.3.- Modelo simplificado de explicación de los accidentes, en función de las demandas del sistema (Blumenthal, 1968 [5]).

Es la situación percibida (RIESGO SUBJETIVO PERCIBIDO) y no la realidad física (RIESGO OBJETIVO) la que determina el comportamiento del conductor. En función de dicha percepción del riesgo, este conductor toma su decisión de actuación. En todo el proceso, desde la llegada de los estímulos exteriores hasta la actuación sobre el vehículo, juega un papel primordial la velocidad de procesamiento de dicha información por el conductor, la cual es evaluada a través del tiempo de reacción.

Por todo ello, se ha llevado a cabo un intenso trabajo de investigación para el análisis de los factores condicionantes de estos procesos de percepción del riesgo y de toma de decisión, así como del tiempo de reacción. Seguidamente se muestra alguno de dichos trabajos.

1.2.1.- LA PERCEPCIÓN DEL RIESGO.

Como ha sido mostrado en la *Figura 1.2.*, el proceso de percepción del riesgo incluye dos fases:

- *Percepción de los estímulos exteriores:* la percepción puede definirse como la asignación de significado a las señales recibidas. Este proceso está estrechamente relacionado con las capacidades sensoriales y la habilidad del conductor.
- *Estimación del riesgo:* esta fase es determinada por la estructura de comportamiento individual del conductor.

1.2.1.1.- Percepción de estímulos exteriores.

1.2.1.1.1.- *Nivel y distribución de la atención.*

Algunos estudios sobre accidentes ponen de manifiesto que aproximadamente el 45% de los mismos podrían haber sido evitados si todos los conductores implicados hubiesen estado atentos a la situación crítica inmediatamente antes del accidente (*Treat, J.R. y otros, 1977 [50]*).

Por otro lado, la atención puede ser contemplada a través de sus principales características: nivel y distribución, y queda afectada por el cansancio, preocupación o distracciones originadas por acontecimientos o señales procedentes del exterior y/o interior del vehículo (*Shinar, D., 1978 [47]*).

Respecto al nivel de atención, se ha puesto de manifiesto que éste varía paralelamente a las demandas del tráfico y del medio. Por otra parte, a menos que el conductor esté sometido a unas condiciones extremadamente exigentes, dispone siempre de una capacidad de atención de reserva que le permite realizar otras tareas mentales sin poner en riesgo la principal tarea de la conducción (*Johansson y Rumar, 1966 [18]*).

En cuanto a la distribución de la atención, varios estudios experimentales han puesto de manifiesto que, entre conductores experimentados, la eficacia con la que son capaces de distribuir su atención selectivamente es de gran importancia en la seguridad de su conducción (*Kaheneman, D., Ben-Ishai, R., Lotan, M., 1973 [20]*).

1.2.1.1.2.- *Habilidad visual.*

Dentro del concepto “habilidad visual” cabe distinguir dos acciones desarrolladas por el conductor:

- Búsqueda visual: la importancia del sentido de la vista para la adquisición de información ha motivado el desarrollo de estudios del movimiento de los ojos en conductores, con objeto de analizar hacia dónde concentran la atención. Estos estudios se basan en la determinación de la orientación de la mirada y la duración de la observación hecha en cada posición, en función de la experiencia del conductor (*Mourant y Rockwell, 1972 [35]*). Los resultados de este estudio se muestran en la siguiente figura (*Figura 1.4.*).

Por otra parte, otros estudios concluyen que la experiencia y otros factores de personalidad, hábitos, etc. influyen en la búsqueda visual. Así, la inexperiencia conduce a una sobrecarga en la tarea de adquisición de datos. En este caso, casi toda la capacidad se concentra en la tarea de mantener el vehículo dentro de la calzada (*Evans, L., 1991 [12]*).

- Capacidad visual: algunos estudios han demostrado la ausencia de correlación significativa entre la ocurrencia de accidentes y la agudeza visual, agudeza dinámica, campo visual, recuperación entre deslumbramientos y reconocimiento en condiciones de baja iluminación, analizando grupos de conductores menores de 25 años y mayores de

54 (*Davison, 1978 [9]*).

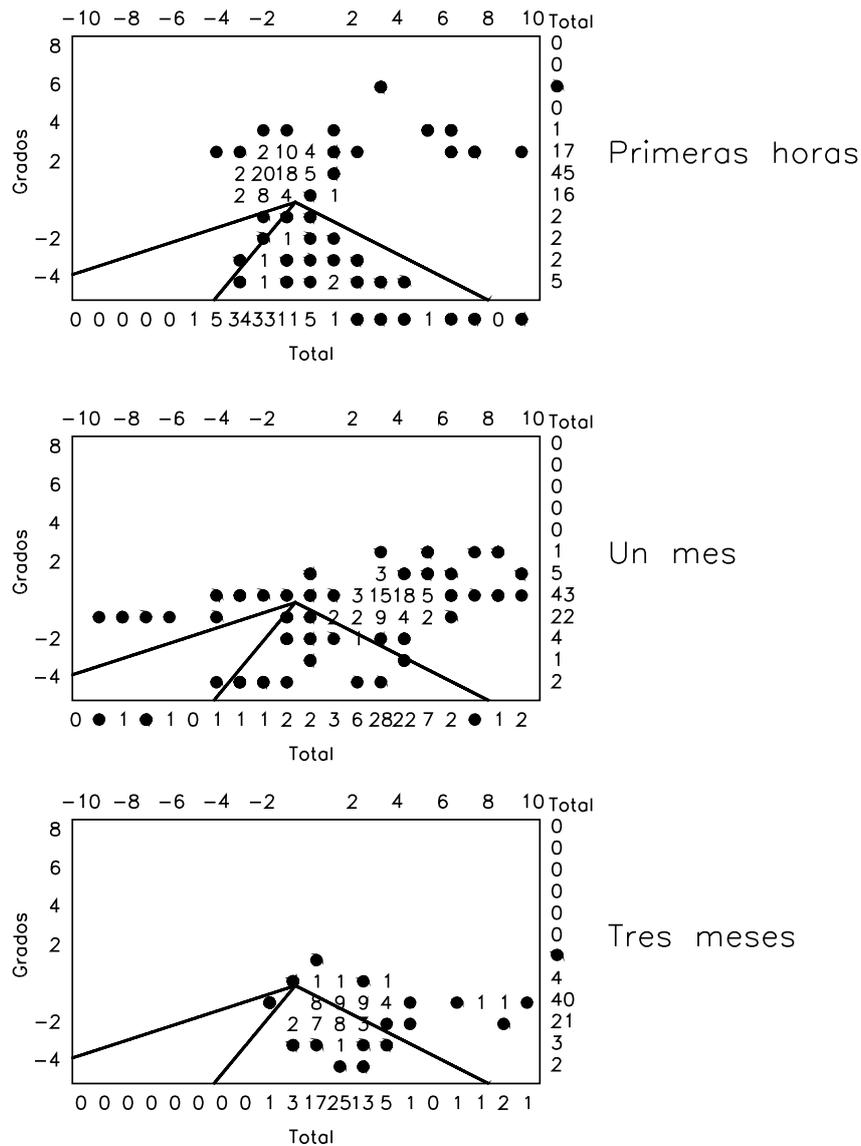


Figura 1.4.- Fijación de los ojos en función de la experiencia de conducción en una carretera "abierto" circulando a 50 m.p.h. (Mourant y Rockwell, 1.972 [35]).

1.2.1.1.3.- Percepción de variables de interés.

En esta línea de investigación, han sido llevados a cabo trabajos acerca de la percepción de alguna de las variables involucradas en la ocurrencia del accidente de tráfico, como se muestra seguidamente:

- Percepción de la geometría de la carretera: normalmente, la percepción de los conductores relativa a la geometría de la calzada suele ser suficientemente buena para lograr una conducción segura. No obstante, en determinadas circunstancias se producen algunas formas de ilusión visual capaces de confundir a los conductores (Shinar, D., 1978 [47]).

- Percepción de la velocidad: existe un gran número de parámetros que condicionan la estimación de la velocidad. Así, aunque numerosos autores admiten que la visión periférica es la principal implicada en la predicción de la velocidad, el fenómeno es más complejo e incluye referencias geométricas aprendidas (*Evans, L., 1991 [12]*).

- Percepción de la velocidad relativa: los resultados de algunos experimentos muestran que la habilidad para estimar la velocidad relativa es inversamente proporcional a la distancia entre vehículos. En cuanto al signo, acercamiento o alejamiento entre vehículos, se ha encontrado una buena capacidad de predicción entre los conductores.

Sirva como ejemplo el siguiente: con un espacio entre vehículos de 60 m., una velocidad relativa de acercamiento de 5 km/h fue correctamente identificada como negativa (acercamiento) en el 99% de los casos (*Evans L., 1.991 [12]*).

- Percepción de la distancia entre vehículos: algunos estudios han abordado el análisis de los factores que influyen en la estimación de la distancia entre vehículos, mediante la proyección de las imágenes obtenidas desde el vehículo que circula detrás. Así, se destaca la falta de influencia del tamaño o forma del vehículo que circula delante, aunque sí afecta las características del vehículo desde el que se toman las fotografías (*Evans y Rothery, 1977 [11]*).

1.2.1.2.- Estimación del riesgo.

Una vez percibidos los estímulos exteriores, esto es, tras la asignación de significado a los mismos, el conductor lleva a cabo la estimación del riesgo ocasionado por dichas circunstancias de la circulación.

1.2.1.2.1.- *Error de la estimación.*

El análisis del error cometido en esta estimación, como factor desencadenante de los accidentes, ha sido abordado por diversos investigadores.

Así, *Harvey y otros, 1975 [16]* llevan a cabo un estudio de análisis de los errores cometidos por una muestra de conductores, definiendo el error como la realización de una acción que exigirá por el mismo o por otros usuarios de otra acción correctora posterior para restaurar las condiciones de seguridad originales.

Como resultado de este estudio, estos autores concluyen la validez de los errores de estimación como medida de la peligrosidad del comportamiento del conductor. Asimismo, puede establecerse correlaciones significativas entre el número de errores cometidos, su nivel de peligrosidad y la ocurrencia del accidente.

Por otro lado, *Groeger y Brown, 1989 [13]* desarrollan el concepto de “margen de seguridad del conductor” como una función de su percepción del riesgo en las circunstancias del tráfico en que se encuentra, junto al “riesgo subjetivo” como función del riesgo percibido y de la estimación de sus propias habilidades.

Las conclusiones de este estudio ratifican la validez del análisis del error de estimación del riesgo como parámetro indicativo de la probabilidad de ocurrencia del accidente. Al mismo tiempo, señalan que el conductor tiende a estimar márgenes de seguridad erróneos, debido a una subestimación del riesgo y/o sobreestimación de sus propias destrezas de conducción.

1.2.1.2.2.- *Teorías de estimación del riesgo.*

Junto a estos estudios de análisis del error, se han desarrollado varias teorías basadas en la estimación del riesgo como causa primordial de ocurrencia del accidente.

En esta línea, ha surgido “la teoría del riesgo homeostático (RHT)” (*Wilde, 1982 [54]*). Ésta establece que el conductor, en un instante determinado, se caracteriza por estar dispuesto a aceptar un cierto nivel de riesgo de accidente. Así, el individuo experimenta un cierto nivel subjetivo de riesgo, el cual compara en cada instante con su nivel aceptado. La habilidad del individuo para mantener el equilibrio entre riesgo aceptado y experimentado dependerá de su destreza para identificar correctamente dicho nivel experimentado.

Como consecuencia de estas proposiciones, cualquier intervención de tipo educativo, recomendaciones, enseñanzas u órdenes que propongan una conducta de conducción prudente podrá modificar la frecuencia de alguna de las acciones a las que se dirige, pero no reducirá la tasa per cápita de accidentes si no modifica el nivel de riesgo aceptado por los conductores. No obstante, la RHT propone que las pérdidas por accidentes de tráfico y las experiencias diarias relacionadas con ellas de una población en conjunto, influyen sobre el nivel de riesgo percibido por los supervivientes, y esto a su vez influye sobre su conducta en la carretera y la tasa de producción de accidentes.

Como alternativa a la RHT se ha desarrollado la “teoría del riesgo cero” (*Näätänen y Summala, 1976 [36]*). Ésta propugna que el conductor desvirtúa el riesgo percibido, de tal manera que su contribución al coste subjetivo del comportamiento quede reducido a cero. El comportamiento resultante no depende del riesgo, sino que sigue patrones automáticos pre-programados.

La diferencia entre ambas teorías del riesgo está en lo que cada una considera como “causa” del accidente:

- *Wilde* efectúa un análisis coste-beneficio (aceptación de un nivel de riesgo-ventajas de dicha acción), y consecuentemente considera el riesgo como la causa que explica muchos o la mayoría de los accidentes de tráfico.
- *Näätänen y Summala* definen como causa la adaptación al riesgo por el conductor, lo cual motiva que éste distorsione la percepción del riesgo.

La razón de la importancia de esta diferencia entre ambas teorías radica en que conducen a distintas soluciones. Así, *Summala* ha sugerido que los límites de velocidad son una condición necesaria para la disminución del número de accidentes debido a que los conductores no perciben el riesgo de la circulación a velocidad elevada. A diferencia de esto, la RHT concluiría que el conductor percibe y asume el riesgo de la velocidad elevada, como el coste de una mayor movilidad.

1.2.1.2.3.- Conclusiones.

Los factores considerados de error humano y de análisis del riesgo son aceptados por la mayoría de los investigadores como variables de control significativas en el fenómeno de ocurrencia de accidentes. No obstante, las dificultades teóricas y prácticas de aplicación de las modelizaciones mostradas en los apartados precedentes han sido evidenciadas en algunos trabajos de investigación.

De este modo, *Hale y otros, 1990 [14]* analizan la validez de los modelos de error humano. Dichos modelos han sido empleados retrospectivamente para la explicación de accidentes ya ocurridos. No obstante, al ser aplicadas como predictores de escenarios de accidentes, su utilidad es limitada. Por ello, deberían ser generadas leyes prácticas de descripción del comportamiento del conductor, acompañadas de un índice de incertidumbre de las mismas.

Otros autores ponen en entredicho la validez general de la teoría del riesgo homeostático. Así, *Evans, 1991 [12]* afirma que el conductor, tras verse implicado en alguna situación comprometida, incrementa su prevención durante algún tiempo.

Jorgensen, 1988 [19] analiza el comportamiento de una muestra de conductores ante un semáforo. Así, su estudio se basa en el hecho que, a una velocidad crítica de aproximación, existe una zona crítica en la cual no sería posible detener el vehículo antes de dicho semáforo, ni podría cruzarse antes que la luz cambiara a rojo. El autor emplea este hecho para la realización de un experimento sencillo de intersección regulada con semáforo, controlado éste por un botón de paso de peatones.

Cuando un vehículo con suficiente velocidad se aproxima a la zona crítica, se presiona el botón y se mide la reacción del conductor. Tras una muestra de 50 vehículos, ningún conductor ha efectuado maniobras de frenado. En este estudio, si el riesgo hubiese sido la causa de la decisión (RHT), se esperaría que alguno de los conductores hubiese intentado detener el vehículo con el semáforo en ámbar, lo cual no ha sucedido.

Finalmente, *Denis, 1988 [10]* concluye que la RHT es aplicable únicamente a un dominio limitado. Así, aunque el análisis del tráfico mediante dicha teoría es agradecida, apenas permite conclusiones sobre el comportamiento del conductor en una situación real de conducción.

1.2.2.- LA TOMA DE DECISIÓN.

La diferencia entre la percepción y la decisión puede ser muy reducida. Así, *Shinar, 1978 [47]* concluye que la percepción se basa fundamentalmente en informaciones sensoriales, en tanto que la decisión está más relacionada con la experiencia, expectativas respecto a las situaciones previsibles o presentes y los hábitos de actuación del conductor. Esta es la razón por la cual se aprecian más diferencias entre conductores en cuanto a la toma de decisiones que respecto a sus estimaciones de percepción.

El proceso de toma de decisión implica dos factores importantes:

- La idoneidad para la situación.
- El tiempo destinado a ella, que está integrado en el tiempo de reacción, el cual es descrito seguidamente.

1.2.3.- EL TIEMPO DE REACCIÓN.

Se consideran tres aspectos influyentes en el tiempo de reacción: la experiencia del conductor, el grado de compatibilidad entre el estímulo y la respuesta, y la incertidumbre asociada a dicho estímulo (*Shinar, 1978 [47]*).

- *La experiencia*: es un hecho constatado que en la conducción como en otras actividades, la ejecución repetitiva de tareas que reclama toma de decisión produce un acortamiento del tiempo destinado a ésta, e incluso, reacciones “automáticas” ante ciertos estímulos, que acorta aún más dicho tiempo. Una característica de los conductores inexpertos es, precisamente, su retraso en la toma de decisiones ante circunstancias más o menos conflictivas.

- El problema de *compatibilidad estímulo-respuesta* está asociado con la “naturalidad” con que afronta el conductor la actuación (respuesta) que le demanda una situación concreta. En este sentido, el diseño de los vehículos, calzadas y sistemas de control de tráfico juega un papel importante.

Así, resulta natural la respuesta que le demanda sobre el volante la gestión de una curva, aunque ésta no lo será tanto si el vehículo es sobrevirador y es necesario acelerar para realizar una maniobra de evasión; o la reacción del vehículo y conductor en curva bien peraltada, frente a la existencia de peralte negativo.

- *La incertidumbre de los estímulos*: estos crean una expectativa que prepara y adelanta la decisión o la retrasa, pudiendo sorprender y originar una respuesta tardía. De alguna forma se relaciona con la probabilidad que otorgamos a ciertos sucesos.

Por ejemplo, si un conductor circula detrás de otro mientras se aproxima a un semáforo en verde, la incertidumbre frente al mantenimiento de la marcha del vehículo que le precede es baja. Si el conductor frenase bruscamente sin que el semáforo cambie a ámbar o se produzca otro suceso que lo justifique, la decisión de frenar que ha de tomar el conductor de atrás puede verse retrasada debido a la sorpresa, a menos que experiencias previas le hagan desconfiar y prestar especial atención cada vez que se repita una situación tan natural como pasar un semáforo en verde.

Otros factores, como el número de estímulos simultáneos que recibe el conductor, influirán, también, en el tiempo de reacción.

El tiempo de reacción puede, a su vez, ser dividido en dos partes:

- Tiempo de percepción y decisión.
- Tiempo de actuación sobre el elemento de control del vehículo.

Se han realizado numerosas determinaciones de tiempos de reacción tanto en laboratorio como en la carretera. De este modo *Evans, L., 1991 [12]*, en ensayos de seguimiento de vehículos con conductores observando al vehículo precedente, ha encontrado un tiempo medio de reacción de 1.6 s.

Olson y Sivac, 1986 [38] realizaron experiencias con conductores jóvenes y mayores, analizando su reacción ante objetos que aparecían repentinamente delante del vehículo. Cada conductor repitió varias veces la experiencia. La primera vez desconocía el objetivo de la prueba, apareciendo el objeto entre 10 y 15 minutos después de iniciada. Las veces siguientes estaba avisado aunque el objeto aparecía en lugares diferentes. Los resultados pueden resumirse en los siguientes:

- El tiempo de reacción es considerablemente más alto en el primer ensayo (conductor no alertado) que en los siguientes.
- Aumenta con la edad de los conductores.
- El valor medio para todos los conductores en las primeras pruebas (no alertados) fue de 1.6 s.
- Considerando que el hecho de tratarse de un vehículo instrumentado ya suponía una cierta alerta de los conductores, aunque estos no conociesen el objeto de la prueba, el autor recomienda considerar como media un valor superior al anterior (2.5 s) para situaciones inesperadas.

Sumala realizó un experimento en forma muy realista. Consistió en abrir una puerta de un vehículo aparcado en el arcén de una carretera en forma inesperada al aproximarse otro vehículo, y la detección del retraso con el que este vehículo iniciaba un cambio de su trayectoria (respuesta del conductor más el vehículo). Se efectuaron 1326 medias encontrándose un tiempo de respuesta medio de 2.5 s, y medidas entre 1.4 y 4 s.

El valor 2.5 s es, probablemente, el más aceptado como valor medio para muchas predicciones y es comúnmente utilizado por algunas administraciones de tráfico para tomar decisiones de diseño de las infraestructuras.

Finalmente, *Lechner y Ferrandez, 1983 [23]* evalúan los tiempos de reacción medidos en 23 conductores para la realización de una maniobra de frenado debido a la aparición de un obstáculo delante del vehículo.

Este tiempo de reacción incluye el tiempo desde la aparición del obstáculo frente al conductor hasta el inicio de la maniobra por parte del mismo. Las mediciones han sido efectuadas en el simulador de conducción de Daimler-Benz (Alemania).

En dicho estudio, la velocidad inicial de los distintos conductores en el instante de aparición del obstáculo no es constante. Por ello, para caracterizar las diferentes situaciones, son definidos los siguientes parámetros:

- T_{obs} : tiempo invertido por el vehículo para alcanzar el obstáculo en el instante de su aparición, si dicho vehículo no modifica su velocidad.
- T_r : tiempo de reacción, esto es, tiempo desde la aparición del obstáculo frente al conductor hasta el inicio de la maniobra por parte del mismo.
- v_{init} : velocidad del vehículo en el instante de aparición del obstáculo.
- v_r : velocidad del vehículo tras el tiempo de reacción.
- Grado de urgencia inicial (GUI):

Deceleración que debería aplicar el conductor al vehículo para poder detenerlo antes del obstáculo, en el instante de aparición del mismo.

$$GUI = \frac{v_{init}}{2 \cdot T_{obs}} \quad (1.1.)$$

- Grado de urgencia efectiva (GUE):

Deceleración que debería aplicar el conductor al vehículo para poder detenerlo antes del obstáculo, una vez transcurrido el tiempo de reacción desde la aparición del mismo.

$$GUI = \frac{v_r}{2 \cdot (T_{obs} - T_r)} \quad (1.2.)$$

Teniendo en cuenta los parámetros definidos, se muestra en la siguiente tabla (*Tabla 1.3.*) los tiempos de reacción medidos en el simulador, en función de las características de la maniobra de frenado efectuada.

| <i>Ensayo</i> | T_{obs} (s) | v_{init} (km/h) | $GVI(m/s^2)$ | $GUE(m/s^2)$ | GUE/GVI | T_r (s) |
|---------------|---------------|-------------------|--------------|--------------|-----------|-----------|
| 1 | 2,4 | 100,4 | 6,06 | 9,40 | 1,55 | 0,82 |
| 2 | 2,4 | 114,0 | 6,48 | 10,85 | 1,67 | 0,92 |
| 3 | 2,8 | 106,8 | 5,44 | 9,12 | 1,68 | 1,06 |
| 4 | 2,8 | 105,2 | 5,00 | 7,53 | 1,51 | 0,98 |
| 5 | 2,4 | 98,6 | 6,00 | 9,07 | 1,51 | 0,84 |
| 6 | 2,8 | 101,2 | 5,22 | 11,41 | 2,19 | 1,50 |
| 7 | 2,0 | 108,3 | 7,94 | 16,46 | 2,07 | 0,98 |
| 8 | 2,4 | 95,8 | 5,80 | 13,14 | 2,27 | 1,32 |
| 9 | 2,8 | 114,6 | 5,89 | 12,87 | 2,19 | 1,55 |
| 10 | 2,8 | 99,1 | 5,13 | 8,56 | 1,67 | 1,09 |
| 11 | 2,0 | 77,9 | 5,75 | 10,31 | 1,79 | 0,88 |
| 12 | 2,8 | 100,3 | 5,17 | 7,62 | 1,47 | 0,92 |
| 13 | 2,8 | 92,7 | 4,79 | 7,93 | 1,66 | 1,13 |
| 14 | 2,4 | 90,7 | 5,52 | 8,73 | 1,58 | 0,85 |
| 15 | 2,8 | 90,3 | 4,66 | 11,91 | 2,56 | 1,54 |
| 16 | 2,8 | 104,9 | 5,39 | 8,82 | 1,64 | 1,07 |
| 17 | 2,0 | 101,8 | 7,50 | 13,82 | 1,84 | 0,87 |
| 18 | 2,4 | 90,0 | 5,47 | 10,04 | 1,84 | 1,06 |
| 19 | 2,8 | 101,8 | 5,24 | 7,69 | 1,47 | 0,92 |
| 20 | 2,8 | 101,4 | 5,22 | 9,45 | 1,81 | 1,25 |
| 21 | 2,4 | 87,0 | 5,26 | 10,08 | 1,92 | 1,12 |
| 22 | 2,8 | 96,5 | 4,94 | 8,31 | 1,68 | 1,16 |
| 23 | 2,8 | 98,8 | 5,09 | 8,68 | 1,71 | 1,18 |
| Media | 2,57 | 99 | 5,61 | 10,08 | 1,79 | 1,09 |

Tabla 1.3.- *Tiempos de reacción medidos en simulador de conducción (Lechner y Ferrandez, 1983 [23]).*

1.2.4.- CONCLUSIONES.

El hombre, como unidad de procesamiento de información y como ejecutor de las acciones de control del vehículo, desempeña un papel prioritario en el mecanismo de ocurrencia del accidente de tráfico. No obstante, existe un gran número de factores subjetivos variables entre conductores e incluso cambiantes para un mismo conductor a lo largo del tiempo, que ha imposibilitado el desarrollo de modelos de comportamiento del conductor de utilidad práctica para la predicción del accidente.

Por ello, los estudios de generación de modelos predictivos usualmente no tienen en consideración el factor humano.

A diferencia de esto, se tiene en cuenta que la información objetiva procedente del medio condiciona en gran medida el comportamiento del conductor. Así, un empeoramiento de estos factores del medio puede inducir una respuesta inadecuada por parte del conductor, incrementando la probabilidad de ocurrencia del accidente.

Debido a ello, seguidamente se presenta algunos trabajos de investigación relacionados con el desarrollo de modelos de predicción de accidentes, basados en los factores significativos del medio.

1.3.- Los factores del medio.

El medio proporciona al conductor una parte muy importante de los estímulos externos. Dicha información condicionará en gran medida el comportamiento de este conductor. Debido a ello, numerosos autores han abordado el problema de la generación de modelos predictivos de accidentes, basados en los factores definatorios de las características de dicho medio.

Seguidamente, se presenta alguno de los trabajos de investigación desarrollados hasta el momento en esta línea de investigación.

1.3.1.- FACTORES DE INFLUENCIA.

Desde el punto de vista de su permanencia en el tiempo, los factores del medio pueden ser clasificados en dos grandes grupos:

- *Factores permanentes*: su valor se mantiene estable a corto, medio e incluso a largo plazo. Dicho grupo incluye los siguientes:

- * Tipo de vía.
- * Parámetros geométricos definatorios del trazado de la vía, como son:
 - . Sección longitudinal en planta: radio, ramales de acceso/salida.
 - . Sección en alzado: rampa.
 - . Sección transversal: peralte, número y anchura de carriles.
- * Estado del pavimento.
- * Señalización permanente.
- * Elementos de seguridad de la vía.
- * Restricciones geométricas de visibilidad.

- *Factores transitorios*: su valor se altera a corto plazo. En este grupo se considera:

- * Luminosidad.
- * Factores atmosféricos.
- * Estado de la superficie de la calzada.
- * Señalización transitoria.
- * Condiciones del tráfico.

1.3.2.- MODELOS DE PREDICCIÓN DE ACCIDENTES.

Tomando como punto de partida los factores mostrados en el apartado precedente (*Apartado 1.3.1.*), diversos autores han desarrollado modelos de predicción de la ocurrencia de accidentes. La metodología seguida para la elaboración de dichos modelos consta de las siguientes fases comunes:

- *Selección de la variable respuesta*: usualmente, la variable a explicar es la frecuencia de accidentes acumulados durante un período de tiempo.

En algunos estudios, se sustituye la variable continua “frecuencia de accidentes”, por la variable discreta “acumulación de un número significativo de accidentes”, definida a partir de la anterior.

- *Configuración del tipo de accidente*: es necesario la definición de los criterios de selección de los accidentes considerados en el estudio. Dichos criterios deben acotar los factores del medio, del vehículo y de las personas involucradas concurrentes en el tipo de accidente buscado.

- *Identificación de las variables explicativas del medio*: tomando en consideración los criterios de selección previamente definidos, se efectuará la identificación de las variables del medio previsiblemente involucradas como parámetros explicativos del siniestro.

- *Selección del modelo de ajuste*: en función de la distribución de la población analizada, se determina el modelo más adecuado de ajuste de la variable respuesta a partir de las variables explicativas.

- *Elaboración del modelo predictivo*: empleando los datos de una muestra de la población considerada, se llevará a cabo el proceso de ajuste, diagnóstico y validación del modelo de predicción de la ocurrencia de accidentes.

Conforme a esta metodología de análisis, seguidamente se presenta algunos de los trabajos de investigación realizados hasta el momento.

Uno de los elementos de la infraestructura de concentración de accidentes lo constituye *la intersección*, debido a que se produce la confluencia de distintos flujos de tráfico. Esto ha motivado un tratamiento independiente de dicho elemento, como se presenta seguidamente.

1.3.2.1.- Modelización de Mountain, L. y Fawaz, B.

Dichos autores realizan un estudio de los accidentes ocurridos en el Reino Unido en intersecciones, en carreteras interurbanas. Dicho estudio ha comprendido una muestra de 662 intersecciones, compuestas de 111 reguladas por señalización, 161 rotondas y 390 con prioridad de la vía principal, con un total de 4600 accidentes con lesiones. Los datos recogidos comprenden accidentes e información de las características de la intersección, a lo largo de un período comprendido entre 5 y 15 años.

En el desarrollo del modelo de predicción, la modelización clásica basada en ajuste por mínimos cuadrados no resulta apropiada, debido a que la frecuencia de accidentes presenta una distribución no Normal y no negativa. Así, la estructura de error binomial negativa es generalmente aceptada como distribución adecuada para la modelización de accidentes. Esto se basa en la consideración que el número de accidentes acumulados en un tramo sigue una distribución de Poisson, mientras que las variaciones entre tramos sigue una distribución Gamma. Por ello, se desarrolla modelos efectuando una aproximación a los modelos lineales generalizados.

El modelo incorpora como variables explicativas las componentes del flujo del tráfico en cada una de las vías. Así, se define:

- t_1 : vehículos por día en la vía principal.
- t_2 : vehículos por día en la vía secundaria.

Al mismo tiempo, y para considerar la influencia del tipo de intersección (regulación con señalización, rotondas, prioridad en vía principal), son generados tres modelos diferentes, previa separación de las intersecciones consideradas de acuerdo a su tipo. Los modelos finalmente ajustados responden a la siguiente expresión:

$$\mu = \alpha \cdot t_1^{\beta_1} \cdot t_2^{\beta_2} \quad (1.3.)$$

Y de este modo, y según el tipo de intersección, se obtiene los modelos ajustados mostrados en la tabla siguiente (*Tabla 1.4.*).

La bondad del ajuste es evaluada mediante dos parámetros:

- *Índice de Elvik*: basado en el parámetro de sobredispersión.
- R^2 de *Freeman-Tukey*: basado en la transformación de residuos de Freeman-Tukey.

El análisis de los resultados obtenidos muestra que, aunque existe una ligera diferencia entre los resultados aportados por ambos índices, los modelos explican del orden del 50% de la variación sistemática.

| Tipo de intersección | Modelo ajustado | Variación sistemática explicada | |
|-----------------------------|--|---------------------------------|---------------------|
| | | Índice de Elvik | R^2 Freeman-Tukey |
| Prioridad en vía principal | $\mu = 0.14 \cdot t_1^{0.64} \cdot t_2^{0.24}$ | 53 % | 44% |
| Regulación con señalización | $\mu = 0.18 \cdot t_1^{0.64} \cdot t_2^{0.24}$ | | |
| Rotonda | $\mu = 0.17 \cdot t_1^{0.64} \cdot t_2^{0.24}$ | | |

Tabla 1.4.- Modelos predictivos de accidentes en intersecciones (Mountain y Fawaz, 1996 [34])

Durante el desarrollo de este estudio, y junto al factor “tipo de intersección”, ha sido evaluada la influencia de otras variables características de la intersección, obteniéndose resultados menos significativos que los mostrados en la *Tabla 1.4*. Dichas variables han sido:

- Tipo de carretera.
- Número de ramales que acceden a la vía principal en el mismo punto.
- Límite de velocidad.
- Variaciones entre regiones.

1.3.2.2.- Modelización de Amis, G.

Este autor efectúa también un estudio de los accidentes ocurridos en el Reino Unido en intersecciones de carreteras interurbanas. En el mismo, es considerado una muestra de 45 intersecciones con un total de 172 accidentes. Dichos accidentes corresponden a un período de muestreo de 7 años.

En este análisis, y considerando la hipótesis que el número de accidentes acumulados en un período de tiempo, en un tramo dado, sigue una distribución de Poisson, se lleva a cabo una aproximación a los modelos lineales generalizados. Y de este modo, el autor elige la función logarítmica como lazo de unión entre la combinación lineal de las variables explicativas y la variable respuesta “frecuencia de accidentes”. El modelo así definido vendrá dado por la siguiente expresión, donde M es el período de tiempo:

$$\mu = M \cdot e^{\alpha + \sum \beta_i \cdot x_i} \quad (1.4.)$$

A lo largo del estudio, el autor tiene en cuenta un total de 70 variables explicativas, definitorias de los parámetros del medio presentes en las intersecciones. Finalmente, y tras el proceso de ajuste, el modelo de predicción vendrá dado por la siguiente expresión:

$$\hat{y}_i = M_i \cdot e^{-4.703 + 0.061 \cdot x_{1i} + 0.624 \cdot x_{2i} - 0.053 \cdot x_{3i}} \quad (1.5.)$$

donde:

- M_i : número de meses durante los cuales se ha recogido datos de accidentes.
- x_{1i} : flujo de tráfico en la vía principal (vehículos por día x 10^{-3})
- x_{2i} : categoría del flujo de tráfico en la vía secundaria (1 - 4). En este caso, el ajuste del modelo empleando una variable discreta permite mejor ajuste que con la utilización de una variable continua.

- x_{3i} : anchura de la vía (m).

El resto de variables explicativas consideradas no presenta relación significativa con la variable respuesta en la muestra considerada. Este hecho no significa, necesariamente, que los factores excluidos del modelo no tengan influencia real sobre la frecuencia de accidentes, dado que la muestra analizada puede no ser válida para la detección de dicho efecto.

Seguidamente, el autor lleva a cabo un segundo proceso de modelización. En este caso, aborda el desarrollo de modelos según el tipo de accidentes. Los tipos considerados son los siguientes:

- 1.- Salida de la vía por la izquierda.
- 2.- Salida de la vía por la derecha.
- 3.- Vehículo que gira a la derecha abandonando la vía principal, y es alcanzado.
- 4.- Vehículo que gira a la derecha abandonando la vía principal, y es golpeado por la izquierda.
- 5.- Vehículo que gira a la derecha abandonando la vía principal, y es golpeado por la derecha.
- 6.- Vehículo que gira a la izquierda abandonando la vía principal, y es golpeado por la derecha.
- 7.- Vehículo proyectado más allá de la intersección.
- 8.- Vehículo que gira a la derecha abandonando la vía principal, y es golpeado por vehículo realizando un adelantamiento.
- 9.- Otro.

Para ello, será empleada como técnica de ajuste la regresión logística, aplicada a la misma muestra de intersecciones anteriormente definida. Y así, el modelo buscado vendrá dado por la siguiente expresión:

$$\ln \left[\frac{\text{probabilidad de accidente de tipo } i}{\text{probabilidad de accidente de otro tipo}} \right] = \alpha + \sum \beta_i \cdot x_i \quad (1.6.)$$

Las variables explicativas consideradas son las mismas que en el estudio previo. Finalmente, y tras el proceso de ajuste, se obtienen los modelos ajustados mostrados en la siguiente tabla (*Tabla 1.5.*), donde:

- X_1 : rotonda.
- X_2 : flujo de vía secundaria mayor de 2500 vehículos/día.
- X_3 : visibilidad de la vía secundaria menor de 580 m.
- X_4 : curva (radio menor de 2.880 m).
- X_5 : capacidad.
 - $X_{5(1)}$: efecto de vía donde la capacidad real es igual o inferior a la de diseño.
 - $X_{5(2)}$: efecto de vía donde la capacidad real es superior a la de diseño.

| <i>Tipo de accidente</i> | <i>Modelo ajustado</i> | <i>Parámetros estimados</i> | <i>Error estándar</i> |
|--------------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| <i>Tipo 1 ó 2</i> | $2.029+X_1+X_2+X_5$ | $X_1: -1.311$ | 0.433 |
| | | $X_2: -1.701$ | 0.461 |
| | | $X_{5(1)}: 2.547$ | 1.116 |
| | | $X_{5(2)}: 2.160$ | 1.113 |
| <i>Tipo 4 ó 6</i> | $-3.197+X_1+X_2+X_4$ | $X_1: 1.292$ | 0.411 |
| | | $X_2: 1.890$ | 0.438 |
| | | $X_4: 1.339$ | 0.415 |
| <i>Tipo 5</i> | $-5.159+X_1+X_2+X_3$ | $X_1: 1.910$ | 0.493 |
| | | $X_2: 1.684$ | 0.545 |
| | | $X_3: 2.130$ | 0.598 |
| <i>Tipo 8</i> | $-1.244+X_1+X_4$ | $X_1: -1.959$ | 0.802 |
| | | $X_4: -1.935$ | 0.802 |
| | $-1.044+X_1+X_3$ | $X_1: -2.037$ | 0.807 |
| | | $X_3: -1.647$ | 0.657 |

Tabla 1.5.- Modelos predictivos de accidentes en intersecciones (Amis, G. 1996 [2])

Continuando con la metodología presentada al comienzo del presente apartado, se ha abordado la modelización de la frecuencia de accidentes en tramos de carretera sin intersecciones. Seguidamente se presenta algunos de los trabajos de investigación realizados.

1.3.2.3.- Modelización de Summersgill, I. y Layfield, R. E.

Ambos autores efectúan un estudio de los accidentes ocurridos en el Reino Unido en carreteras urbanas. En dicho estudio, se toma una muestra de 970 secciones con una longitud total de 87 kilómetros, en las cuales no existen intersecciones. El tipo de vía considerada incluye calzadas de doble sentido de circulación con límite de velocidad de 30 y 40 mph, y calzadas de un sentido de circulación con limitación de velocidad de 30 mph. El número total de accidentes tomados en cuenta en este estudio es de 1590, recogidos durante un período de 5 años (1983 - 1988).

En este análisis, y considerando la hipótesis que el número de accidentes acumulados en un período de tiempo, en un tramo dado, sigue una distribución de Poisson, se lleva a cabo una aproximación a los modelos lineales generalizados (GLM).

El estudio indicado tiene en consideración un elevado número de variables explicativas relacionadas con la generación de situaciones de riesgo en este tipo de vía, incluyendo la generación de modelos de predicción de flujos de vehículos y de peatones. Las variables más significativas empleadas se muestran seguidamente:

- Período de tiempo.
- Longitud de sección.
- Flujo de vehículos.
- Flujo de peatones que atraviesa la sección considerada.
- Existencia de paso de peatones.
- Limitación de velocidad
- Sentido de circulación de vehículos por la calzada.

Tras el proceso de modelización, se alcanza las siguientes conclusiones:

- La función de flujo de peatones empleada ha sido la densidad (número de peatones que cruzan por unidad de longitud de sección).
- La frecuencia de accidentes es proporcional a la longitud de la sección considerada.
- El modelo predice un incremento de la frecuencia de accidentes con la existencia de paso de peatones.
- Los accidentes por alcance y por cambio de carril aumentan con la existencia de paso de peatones.
- Existe un número importante de variables de influencia no consideradas en este estudio, como son: existencia de carril-bus, existencia de carril para bicicletas, cámaras de control de velocidad, elementos sobre la calzada para la reducción de la velocidad de los vehículos.
- No aparecen diferencias significativas en los accidentes ocurridos en calzadas con un único sentido o con doble sentido de circulación.

1.3.2.4.- Modelización de Kalakota, K. R.; Nazrul, M. y Seneviratne, P. N.

Dichos autores efectúan un estudio de los accidentes ocurridos en E.E.U.U. en itinerarios interurbanos sin intersecciones. En el mismo, es considerado una muestra de 144 millas. Dichos accidentes corresponden a un período de muestreo de 4 años (1986-1989).

En este análisis, los autores optan por un modelo de regresión lineal. El modelo así definido vendrá dado por la siguiente expresión:

$$\mu = \sum \beta_i \cdot x_i \quad (1.7.)$$

Como variable respuesta, es empleado el número de accidentes por 1000 vehículos y por año (AR). Por otro lado, son consideradas las siguientes variables explicativas:

- *Volumen de tráfico*: el volumen de tráfico es incorporado en el modelo como una variable de exposición. Ésta es tenida en cuenta para la corrección de la variable respuesta.

- *Grado de curvatura (X_1)*: este valor es nulo en caso de tramos de recta.

- *Longitud de la sección en millas (X_2)*: en el estudio se distingue entre tramo recto y tramo de curva. Posteriormente, al efectuar el proceso de ajuste, se abordará el desarrollo de tres modelos de predicción:

- Modelo completo (incluyendo tramos rectos y tramos de curva).
- Modelo con tramos rectos.
- Modelo con tramos de curva.

- *Inclinación de la rasante*.

- *Número de carriles*: en este caso, se tiene en consideración la existencia de carril adicional de vehículos lentos en terreno ascendente.

- *Anchura del arcén*.

Junto a estas variables, se definen otras como combinación de las anteriores. Y así, resultarán significativas en los modelos desarrollados las siguientes:

- X_3 : grado de curvatura * longitud de sección.

- X_4 : grado de curvatura * inclinación de la rasante.

- X_5 : grado de curvatura * anchura de arcén.

- X_6 : longitud de sección * anchura de arcén.

- X_7 : longitud de sección * inclinación de la rasante * grado de curvatura

- X_8 : longitud de sección * inclinación de la rasante * anchura de arcén * grado de curvatura

Finalmente, la verificación de la bondad del ajuste del modelo es llevada a cabo mediante el factor de correlación (R^2). Así, se obtienen los modelos ajustados mostrados en la siguiente tabla (*Tabla 1.6.*).

| <i>Tipo de itinerario</i> | <i>Modelo ajustado</i> | <i>Parámetros estimados</i> | <i>Error estándar</i> | <i>R²</i> |
|---------------------------|---|-----------------------------|-----------------------|----------------------|
| <i>Rectas y curvas</i> | $AR = 8.7 \cdot 10^{-6} + X_1 + X_2 + X_6 + X_8$ | $X_1: 1.6 \cdot 10^{-5}$ | $6 \cdot 10^{-6}$ | 0.74 |
| | | $X_2: 3.5 \cdot 10^{-3}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | |
| | | $X_6: -2 \cdot 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-5}$ | |
| | | $X_8: -6 \cdot 10^{-6}$ | $3 \cdot 10^{-6}$ | |
| <i>Curvas</i> | $AR = -3 \cdot 10^{-4} + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_7$ | $X_2: 3.8 \cdot 10^{-3}$ | $1 \cdot 10^{-3}$ | 0.28 |
| | | $X_3: 3.7 \cdot 10^{-4}$ | $9 \cdot 10^{-5}$ | |
| | | $X_4: 1.1 \cdot 10^{-5}$ | $3 \cdot 10^{-6}$ | |
| | | $X_5: 4 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-6}$ | |
| | | $X_7: -1.2 \cdot 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-5}$ | |
| <i>Rectas</i> | $AR = 1 \cdot 10^{-4} + X_2 + X_6$ | $X_2: 3.4 \cdot 10^{-3}$ | $2 \cdot 10^{-4}$ | 0.84 |
| | | $X_6: -2 \cdot 10^{-3}$ | $4 \cdot 10^{-5}$ | |

Tabla 1.6.- Modelos predictivos de accidentes en intersecciones (Kalakota, Seneviratne y Nazrul, 1990 [21])

1.3.2.5.- Modelización de Al-Senan S. H. y Wright, P. H.

Estos autores efectúan un estudio de los accidentes ocurridos en E.E.U.U. en itinerarios interurbanos. En el mismo, son consideradas vías de doble sentido de circulación, con un carril por sentido, y con un promedio de flujo diario de vehículos de 2000. Dichos accidentes corresponden a un período de muestreo de 3 años (1982-1984).

Este estudio no considera como variable respuesta la frecuencia de accidentes. A diferencia de esto, se define una variable discreta, la cual es determinada a partir de dicha frecuencia. Dicha variable respuesta discreta presenta dos estados, definidos como sigue:

- *Lugar de concentración de accidentes*: los accidentes han sido recogidos durante un período de 3 años. Al mismo tiempo, y dada la influencia de la longitud de la sección sobre el número de accidentes, ha sido fijada una longitud de 1 milla, para mantener constante la influencia de dicha variable.

Así, ha sido seleccionada una frecuencia mínima de 3 accidentes durante el período de 3 años, como definitoria de este estado de la variable respuesta. Esta elección se basa en la justificación estadística que este número hace este lugares significativamente distintos de la población general.

- *Lugar de no-concentración de accidentes*: estos lugares son necesarios para la identificación de efectos de variables irrelevantes.

Como consecuencia de esto, será abordado un análisis de discriminación entre los dos estados de esta variable respuesta definida.

Junto a esto, un conjunto de variables explicativas han sido seleccionadas, conforme a un doble criterio:

- Evidencia de su influencia en la ocurrencia del accidente, a partir del análisis de la bibliografía existente.
- Análisis de los factores presentes en la infraestructura, que razonablemente influyen en el accidente.

Durante este proceso de identificación de variables de influencia, un conjunto de restricciones han sido impuestas:

- Algunas variables, como anchura del pavimento, varían dentro de la sección de longitud 1 milla. Por ello, deben ser consideradas variables que tengan en cuenta dicho evento.
- Las variables seleccionadas deben ser sencillas y fáciles de medir. Así, por ejemplo, aunque la distancia de visibilidad es una variable de notable influencia, no es considerada debido a la dificultad para cuantificar su valor en las distintas secciones.

Finalmente, han sido tenidas en cuenta un total de 25 variables explicativas, de las cuales únicamente 7 han resultado significativas en el modelo ajustado. Así, tales variables significativas son las siguientes:

- X_1 : diferencia de anchura de plataforma respecto a un valor de referencia de 24 ft, expresado en porcentaje (%).
- X_2 : factor de corrección de anchura del pavimento. Corresponde a la suma de productos del ancho de la sección por su longitud, dividido por la longitud total.
- X_3 : diferencia de anchura del arcén respecto a un valor de referencia de 6 ft, expresado en porcentaje (%).
- X_4 : proporción de la sección que no está a nivel.
- X_5 : límite promedio de velocidad en la vía (mph). Corresponde a la suma de productos del límite de velocidad por la longitud de sección en que está aplicada, dividido por la longitud total en ambas direcciones.
- X_6 : número de puntos de acceso importantes en ambos laterales de la calzada.
- X_7 : número de curvas enlazadas.

Algunas de las variables consideradas en el desarrollo del modelo, y no tenidas finalmente en cuenta en el modelo por carencia de significación (en la muestra considerada) han sido:

- Número de curvas horizontales.
- Porcentaje de curvatura horizontal.
- Suma de ángulos centrales de la curva horizontal a lo largo de la sección.
- Número de rasantes de inclinación mayor que 0%.
- Porcentaje de rasantes de inclinación mayor del 3%.
- Porcentaje de distancia donde el paso no está permitido en ambas direcciones.
- Número de accesos secundarios (accesos residenciales,...)
- Radio mínimo de la sección.
- Relación del radio mínimo al máximo en la sección.
- Porcentaje combinado del alineamiento horizontal y vertical.
- Relación del número de señales de curva peligrosa en ambos sentidos, a dos veces el número de curvas.

El modelo finalmente ajustado, basado en las variables significativas, se muestra seguidamente:

$$D = 5.771 - 0.007 \cdot X_1 + 0.073 \cdot X_2 - 0.010 \cdot X_3 - 0.015 \cdot X_4 - 0.090 \cdot X_5 - 0.205 \cdot X_6 - 0.296 \cdot X_7 \quad (1.8.)$$

donde D es la medida de la discrepancia.

A partir del parámetro D de medida de la discrepancia, se evalúa en que medida el modelo desarrollado predice adecuadamente los estados de la variable respuesta discreta. Así, el modelo presentado en la *Ecuación 1.8.* genera los siguientes resultados:

- Predicción acertada de lugares de no-concentración de accidentes: 81 %
- Predicción acertada de lugares de concentración de accidentes: 79 %

1.3.3.- CONCLUSIONES.

Tras la evaluación de los resultados obtenidos en los trabajos de investigación presentados, puede concluirse lo siguiente respecto a la validez de la metodología basada en la utilización de los factores del medio para la predicción de la frecuencia de accidentes:

- Existe una gran cantidad de factores del medio que influyen en el riesgo de ocurrencia del accidente de tráfico. El tipo de factores significativos está fuertemente condicionado por las características de la vía analizada, así como por la metodología de recogida de la información empleada en el proceso de ajuste del modelo predictivo.
- La mayoría de los estudios analizados considera únicamente los factores permanentes presentes en el itinerario en estudio.

- Los modelos obtenidos explican parcialmente el fenómeno de ocurrencia del fenómeno accidente. Las causas principales de esto se muestran seguidamente:

- * Imposibilidad de considerar en esta modelización los factores condicionantes del comportamiento del conductor, el elemento más importante del acto de la conducción.

- * Los modelos desarrollados tienen en cuenta una parte de las variables del medio involucradas. Esto es pretendido por simplicidad de la modelización, al tiempo que la muestra considerada habitualmente no es adecuada para la identificación de los efectos de todas ellas.

- * Algunas variables significativas no son consideradas en algunas modelizaciones por la dificultad de su medición. Sirva como ejemplo la variable distancia geométrica de visibilidad.

- No obstante, esta metodología de modelización es adecuada para la identificación de la influencia ejercida por algunas variables del medio. Y, a diferencia de los modelos de comportamiento del conductor, permite un análisis objetivo del accidente de tráfico.

CAPÍTULO 2.- OBJETIVOS DE LA PRESENTE TESIS

CAPÍTULO 2.- OBJETIVOS DE LA PRESENTE TESIS.

El OBJETIVO GENERAL de la presente Tesis Doctoral consiste en:

“Generación de una metodología de elaboración de modelos de predicción de la ocurrencia de accidentes en tramos de carretera, basados en la obtención de los valores de los factores permanentes del medio involucrados mediante el desarrollo de un sistema de medida en continuo, constituido por un vehículo instrumentado.”

Para la generación de esta metodología, se proponen los siguientes OBJETIVOS PARTICULARES:

- Objetivo 1.-** Identificación de los principales factores permanentes del medio de influencia en la ocurrencia de accidentes de tráfico.
- Objetivo 2.-** Definición, a partir de dichos factores permanentes del medio, de las variables explicativas objetivas consideradas en la parte sistemática del modelo de predicción de la ocurrencia de accidentes, en función de las características de la vía considerada. La presente Tesis analiza la aplicación de la metodología propuesta a tramos de curva de autovía.
- Objetivo 3.-** Desarrollo de un sistema de medida en continuo de los factores del medio previamente identificados. La elaboración de dicho sistema será abordado tomando en consideración los siguientes criterios:
- Utilización de un vehículo turismo de serie como plataforma del sistema.
 - Medición en continuo de los factores del medio con una mínima perturbación del flujo de tráfico. Esto condicionará tanto la ubicación de los sensores de medida embarcados como la velocidad de circulación durante el proceso de adquisición.
 - Facilidad de manejo, tanto durante el proceso de medición sobre el escenario, como durante el posterior proceso de tratamiento de las señales y generación de las variables explicativas de interés.
 - Optimización de los algoritmos de cálculo, para disminuir el tiempo de procesamiento de señales.
 - Coste la más reducido posible.
- Objetivo 4.-** Validación del sistema de medida desarrollado mediante el contraste dinámico de los factores recogidos, en condiciones similares a las de medición.
- Objetivo 5.-** Selección del procedimiento de modelización más adecuado en función de las características de la variable respuesta “frecuencia de accidentes” analizada. Durante este proceso de modelización serán excluidas de la parte sistemática del modelo aquellas variables explicativas que no resulten significativas en la

muestra empleada.

- Objetivo 6.-** Evaluación de los resultados de significación de las variables explicativas consideradas sobre el fenómeno de ocurrencia de accidentes de tráfico, en relación al tipo de vía estudiado.
- Objetivo 7.-** Generalización del modelo desarrollado mediante su aplicación a la predicción de la ocurrencia de accidentes en tramos de curva del tipo de vía considerada, y que no hayan sido empleados durante el proceso de generación de dicho modelo.

CAPÍTULO 3.- METODOLOGÍA

CAPÍTULO 3.- METODOLOGÍA.

Definidos los objetivos de la Tesis, se presenta a continuación la metodología seguida para su cumplimiento:

- 1.- Recopilación y análisis de las principales aportaciones hasta el momento sobre:
 - Modelización de la ocurrencia de accidentes, con especial atención al estudio de los factores permanentes del medio de influencia.
 - Sistemas embarcados de medida de los parámetros de la calzada.
- 2.- Definición del ámbito de aplicación del estudio.
- 3.- Determinación de las variables explicativas consideradas en la parte sistemática del modelo de predicción de la ocurrencia de accidentes, a partir de los factores de influencia del medio previamente identificados.
- 4.- Desarrollo de un sistema de medida en continuo de los factores del medio, basado en un vehículo instrumentado. Para ello, y tomando como plataforma un vehículo turismo de serie, se equipará con sensores de medida, sistemas de alimentación y acondicionamiento, y equipo de registro basado en un ordenador embarcado, a fin de completar las cadenas de medida y recogida de datos necesarios para la medición de los parámetros buscados.
- 5.- Elaboración de un programa informático para Windows[®] de procesamiento de las señales adquiridas, para la obtención de los factores del medio previamente definidos así como de las trayectorias en planta y alzado de la calzada analizada.

El lenguaje de programación empleado será *Turbo Pascal 1.5[®] para Windows[®]*
- 6.- Validación del sistema de medida en continuo, mediante el contraste de las variables adquiridas en ensayos dinámicos en pista de pruebas y en carretera.
- 7.- Selección de una muestra de itinerarios de la población considerada, y medición de los factores permanentes del medio en los mismos mediante el sistema desarrollado. Durante esta etapa del trabajo de investigación será evaluado si dicha muestra es representativa de la población.
- 8.- Elección y ajuste del modelo de predicción más adecuado, en función de la distribución de la variable respuesta “frecuencia de accidentes” considerada. Para ello, será utilizado el programa estadístico *SPSS Versión 6.0[®] para Windows[®]*. Los accidentes acumulados proceden de la *Base Estadística General de Accidentes con Víctimas en España* durante los años 1994, 1995 y 1996, proporcionada por la DGT (Dirección General de Tráfico).

Posteriormente, y durante este proceso de modelización, serán excluidas de la parte sistemática del modelo aquellas variables explicativas que no resulten significativas en la muestra considerada.

9.- Diagnósis del modelo ajustado mediante:

- Análisis de multicolinealidad
- Análisis de sensibilidad de los coeficientes estimados.

10.- Evaluación de los resultados de significación de las variables explicativas consideradas sobre el fenómeno de ocurrencia de accidentes de tráfico, en relación al tipo de vía estudiado.

11.- Aplicación del modelo desarrollado a la predicción de la ocurrencia de accidentes en tramos del tipo de vía analizada distintos a los empleados en la generación del modelo.

12.- Valoración de los modelos desarrollados de predicción de la ocurrencia de accidentes en tramos de curva de autovía, basados en las obtención de los valores de los factores del medio involucrados mediante el sistema de medida en continuo desarrollado.

13.- Finalmente, se proponen futuros desarrollos para la mejora del procedimiento de modelización propuesto, así como su utilización para el incremento de la seguridad activa en los vehículos.

CAPÍTULO 4.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

CAPÍTULO 4.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

4.1.- Introducción.

La Estadística actúa como disciplina puente entre los modelos matemáticos y gran número de fenómenos reales. Un modelo matemático es una abstracción simplificada de una realidad más compleja y siempre existirá cierta discrepancia entre lo observado y lo previsto por el modelo. La Estadística proporciona una metodología para evaluar y juzgar estas discrepancias entre la realidad y la teoría.

Además de su papel instrumental, el estudio de la Estadística es importante para entender las posibilidades y limitaciones de la investigación experimental, para diferenciar las conclusiones que pueden obtenerse de los datos de las que carecen de base empírica y, en definitiva, para desarrollar un pensamiento crítico y antidogmático ante la realidad.

A continuación se listan algunos de los problemas básicos que pueden ser resueltos por la Estadística:

- *Descripción de datos*: encontrar procedimientos para resumir la información contenida en los datos.
- *Análisis de muestras*: es frecuente que, por razones técnicas o económicas, no sea posible estudiar todos los elementos de una población. La Estadística es empleada para elegir una muestra representativa y hacer inferencias respecto a la población a partir de lo observado en la muestra.

El análisis de la muestra requiere un modelo probabilístico y la utilización de métodos de inferencia.

- *Contraste de hipótesis*: un objetivo frecuente en la investigación empírica consiste en contrastar una hipótesis. El contraste de hipótesis requiere una metodología para comparar las predicciones resultantes de la hipótesis con los datos observados y el diseño de un experimento para garantizar que las conclusiones que se extraigan de la experimentación no estén invalidadas por factores no controlados.
- *Medición de relaciones*: determinar y medir estas relaciones es importante porque, debido a los errores de medición, las relaciones que se observan entre variables físicas, sociales o técnicas son, prácticamente siempre, estadísticas.
- *Predicción*: muchas variables económicas y físicas presentan cierta inercia en su evolución y aunque sus valores futuros son desconocidos, el estudio de su historia es informativo para prever su evolución futura. La previsión puede mejorarse estudiando la relación entre la variable de interés y otras variables.

La presente Tesis aborda la *generación de modelos de predicción*. Los aspectos generales de este proceso de generación son tratados en los siguientes apartados.

4.1.1.- APROXIMACIÓN AL PROBLEMA DE LA MODELIZACIÓN: LA GENERACIÓN DE MODELOS DE PREDICCIÓN.

Los modelos estadísticos analizados en este trabajo corresponden a una descomposición de los valores de una variable observada, y , en:

$$\text{observación } (y) = \text{parte sistemática (predecible)} + \text{parte aleatoria (impredecible)}$$

El proceso global de elaboración de estos modelos, según ha sido presentado en la *Figura 0.1.*, conlleva las siguientes fases fundamentales:

- *Planteamiento del problema.*
 - Definición de la población.
 - Definición de las variables respuesta y explicativas.

- *Ajuste del modelo.*
 - Definición de la muestra.
 - Recogida de la información muestral.
 - Selección del modelo, según la distribución de la variable respuesta.
 - Estimación de parámetros.
 - Crítica y diagnosis del modelo.

Finalmente, una vez ajustado el modelo, se procederá a su aplicación para la predicción de la ocurrencia de accidentes en tramos de carretera.

Teóricamente, el análisis de predicción consiste en la aplicación sucesiva de cada una de las fases precedentes. Sin embargo, en la práctica se producen retrocesos en su aplicación, falsas hipótesis, etc., que resultan en un proceso iterativo de análisis.

Seguidamente, se presentan algunas ideas básicas asociadas con cada una de las fases de trabajo anteriormente descritas.

4.1.1.1.- Planteamiento del problema.

La primera etapa de la investigación requiere la definición del problema en términos precisos, indicando:

- El ámbito de aplicación, es decir, la *población* que se quiere investigar. Esto exige definir sus límites y caracterizar a sus miembros sin ambigüedad.

- Las *variables* que debemos observar y cómo medirlas.

El resultado de esta fase es una *variable respuesta*, observable en una o varias poblaciones definidas sin ambigüedad, y un conjunto de variables que podrían explicar esta variable respuesta y que llamaremos *variables explicativas* (integrantes de la parte sistemática del modelo).

4.1.1.2.- Ajuste del modelo.

4.1.1.2.1.- *Definición de la muestra.*

Frecuentemente no es posible estudiar todos los elementos integrantes de la población debido a que:

- Puede no ser viable económicamente estudiar toda la población.
- El estudio llevaría tanto tiempo que sería impracticable e incluso las propiedades de la población habrían variado con el tiempo.

En estas ocasiones en lugar de hacer un *censo* (un estudio exhaustivo de todos sus elementos) será seleccionado un conjunto representativo de elementos llamado *muestra*. Cuando la muestra ha sido elegida adecuadamente puede obtenerse una información similar a la del censo con mayor rapidez y menor coste. Esto justifica que en la práctica el análisis de poblaciones grandes se haga preferentemente mediante *muestreo*.

La clave de un procedimiento de muestreo consiste en garantizar que la muestra es representativa de la población. Por tanto, cualquier información respecto a las diferencias entre sus elementos debe tenerse en cuenta para seleccionar dicha muestra.

4.1.1.2.2.- *Recogida de la información muestral.*

Una vez construido un modelo del problema deben ser medidos los valores de las variables de interés. Para ello, es indispensable la definición del *experimento*, como el proceso de observación de dicha característica o propiedad de interés en los elementos de la muestra previamente definida.

El objetivo del experimento es estudiar el efecto que sobre una variable de interés, llamada *variable respuesta*, tienen un conjunto de otras variables, llamadas *variables explicativas*. La contribución al modelo de cada uno de estos efectos está fuertemente influenciada por las características del experimento definido para la obtención de los valores de dichas variables.

Cuando el objetivo es contrastar relaciones entre las variables y predecir sus valores futuros se utilizan *técnicas de diseño experimental*, que consisten en fijar los valores de ciertas variables y medir la respuesta que inducen en otras. No obstante, los valores de las variables explicativas consideradas en este estudio no proceden de experimentos predeterminados, sino que están definidos a priori en los tramos de carretera evaluados, por lo que serán empleados *métodos de muestreo*.

4.1.1.2.3.- *Selección del modelo.*

El proceso de ajuste de un modelo será satisfactorio si el tipo de modelo seleccionado es suficientemente representativo de los datos en estudio. Con este objetivo, la selección del mismo será función de la distribución de la variable respuesta definida.

Junto a esto, la incorporación de variables explicativas en dicho modelo debe seguir una estrategia de selección, que busque el mejor equilibrio posible entre la mejora añadida al introducir una nueva variable, y el incremento indeseado en la complejidad del modelo.

4.1.1.2.4.- *Estimación de parámetros.*

Los modelos estadísticos dependen de ciertas constantes desconocidas que llamaremos parámetros. A veces se dispone de información a priori respecto a sus valores, y otras esta información inicial será muy pequeña con relación a la que aportará la muestra.

La etapa de estimación consiste en utilizar la información disponible para decidir respecto a un valor concreto de estos parámetros así como cuantificar el posible error en la estimación. Para ello, será necesario la definición de una medida de la bondad del ajuste entre los valores observados y los valores ajustados generados por el modelo.

4.1.1.2.5.- *Crítica y diagnosis del modelo.*

Esta etapa investiga la compatibilidad entre la información empírica y el modelo. De este modo, y a pesar de una cuidadosa selección del modelo, éste puede no resultar adecuado para los datos analizados. Las causas más habituales de discrepancia son:

- Los datos presentan alejamientos sistemáticos de los valores ajustados.
- Algunos valores individuales se alejan del resto.

La detección de estas discrepancias es parte de este proceso de diagnosis.

Si después de esta etapa se acepta el modelo como correcto, será utilizado para tomar decisiones o realizar previsiones de la variable respuesta. En caso contrario, deberá volverse nuevamente a la etapa precedente de selección del mismo.

4.1.1.3.- Aplicación del modelo: predicción de la ocurrencia de accidentes.

La predicción está relacionada con la obtención de valores probables de eventos no observados, no necesariamente en el futuro. Para resultar verdaderamente útiles, los valores predichos deben ir acompañados de las siguientes hipótesis:

- Mediciones precisas de variables incluidas en el modelo

- Las condiciones de toma de datos permanecen invariables.
- El modelo seleccionado es correcto.

4.1.2.- HIPÓTESIS Y DECISIONES.

La etapa de *definición del ámbito de aplicación* del estudio mostrado en este capítulo, así como el posterior proceso de *ajuste del modelo de predicción* presentado en el *Capítulo 7.*, precisan la validación de hipótesis asumidas durante ambas etapas. Para ello la Estadística proporciona diversas técnicas de contraste, algunas de las cuales son descritas a continuación.

4.1.2.1.- El contraste de hipótesis.

Contrastar una hipótesis requiere comparar las predicciones que se deriven de ella con los datos observados. Cuando exista variabilidad, o errores de medida, este contraste debe hacerse estadísticamente.

4.1.2.1.1.- *Tipos de hipótesis.*

Se define la *hipótesis estadística* como una suposición que determina, parcial o totalmente, la distribución de probabilidad de una o varias variables aleatorias. Estas hipótesis pueden clasificarse como sigue:

- 1.- Hipótesis que especifican un valor concreto (hipótesis simples), o un intervalo para los parámetros de una variable (hipótesis compuestas).
- 2.- Hipótesis que establecen la igualdad de las distribuciones de dos o más variables.
- 3.- Hipótesis que determinan la forma de la distribución de la variable.

4.1.2.1.2.- *Metodología.*

La metodología actual de contraste de hipótesis es el resultado de los trabajos de R. A. Fisher, J. Neyman, y E. S. Pearson. En síntesis, las etapas del contraste son:

- 1.- Definición de la hipótesis nula a contrastar, H_0 , y la hipótesis alternativa H_1 . Ambas hipótesis son definidas como sigue:

Hipótesis nula

La hipótesis nula H_0 es aquella que se contrasta. El nombre de “nula” proviene de que H_0 representa la hipótesis que será mantenida a no ser que los datos indiquen su falsedad, y debe entenderse en el sentido de “neutra”. La hipótesis H_0 nunca se considera probada, aunque puede ser rechazada por los datos.

La hipótesis H_0 se elige normalmente de acuerdo con el principio de simplicidad científica, esto es, sólo debe abandonarse un modelo simple a favor de otro más complejo cuando la evidencia a favor de este último sea fuerte.

En consecuencia, en el primer tipo de contrastes respecto a los parámetros de una distribución, la hipótesis nula suele ser que el parámetro (o vector de parámetros) es igual a un valor concreto que se toma como referencia.

Hipótesis alternativa

Si rechazamos H_0 , se acepta implícitamente una hipótesis alternativa H_1 . Suponiendo que H_0 es simple, del tipo $\vartheta = \vartheta_0$, los casos más importantes de hipótesis alternativas son:

- Contraste bilateral: se desconoce en qué dirección puede ser falsa H_0 , y se especifica $H_1: \vartheta \neq \vartheta_0$.
- Contraste unilateral: se conoce que si $\vartheta \neq \vartheta_0$, forzosamente $\vartheta > \vartheta_0$ (o bien $\vartheta < \vartheta_0$).

2.- Definición de una medida de discrepancia (d) entre los datos muestrales, X , y la hipótesis H_0 . Para contrastes paramétricos, la discrepancia puede expresarse como una función del valor del parámetro especificado por H_0 y el valor estimado en la muestra.

$$\text{discrepancia} = d(\vartheta_0; \hat{\vartheta}) \quad (4.1.)$$

La medida de la discrepancia debe tener una distribución conocida cuando H_0 sea cierta. De esta manera, puede decirse que una discrepancia es grande cuando tiene una probabilidad muy pequeña de ocurrir cuando H_0 es cierta, y pequeña cuando es esperable si H_0 es cierta.

3.- Determinación de discrepancias inadmisibles con H_0 .

4.- Toma de muestras, cálculo del estimador y discrepancia. Si ésta es pequeña, aceptación de H_0 ; si es demasiado grande, rechazo de H_0 y aceptación de H_1 .

4.1.2.1.3.- *Medidas de discrepancia.*

La definición de un contraste de significación requiere, por tanto:

- a) Una medida de discrepancia.
- b) Un criterio para juzgar qué discrepancias son “demasiado” grandes.

La medida de discrepancia depende de la hipótesis alternativa.

En contrastes bilaterales, el signo de la desviación entre el valor del parámetro especificado por H_0 y el valor estimado en la muestra es irrelevante, por lo que es habitual considerar medidas de discrepancia del tipo:

$$d_1 = \left| \frac{\hat{\vartheta}_0 - \hat{\vartheta}_{MV}}{\hat{\sigma}_{MV}} \right| \quad (4.2.)$$

donde:

- $\hat{\vartheta}_{MV}$: estimador máximo-verosímil del estimador ϑ
- $\hat{\sigma}_{MV}$: desviación típica del estimador máximo-verosímil.
- d_1 : tiene una distribución conocida, ya que, aproximadamente, en muestras suficientemente grandes:

$$P(d_1 \leq a | H_0) = P(|z| \leq a) = P(-a \leq z \leq a) \quad (4.3.)$$

donde z es $N(0, 1)$.

En contrastes unilaterales, el signo de la desviación es importante, lo que conduce a medidas de la discrepancia del tipo (supuesto $\vartheta > \vartheta_0$):

$$d_2 = \begin{cases} 0 & \text{si } \hat{\vartheta}_{MV} \leq \hat{\vartheta}_0 \\ \frac{\hat{\vartheta}_{MV} - \hat{\vartheta}_0}{\hat{\sigma}_{MV}} & \text{si } \hat{\vartheta}_{MV} \geq \hat{\vartheta}_0 \end{cases} \quad (4.4)$$

donde para d_2 positiva (zona de interés), las probabilidades se calculan de nuevo con la distribución Normal estándar.

4.1.2.1.4.- Nivel de significación y región de rechazo.

El método tradicional de realizar un contraste consiste en dividir el rango de discrepancias que puede observarse cuando H_0 es cierta en dos regiones: una región de aceptación de H_0 y otra de rechazo.

Se consideran discrepancias “demasiado grandes” las que tienen una probabilidad pequeña α (normalmente 0.05, 0.01 ó 0.001) de ocurrir si H_0 es cierta. Si se rechaza H_0 cuando ocurre una discrepancia de probabilidad α , éste número puede interpretarse como la probabilidad que estamos dispuestos a asumir de rechazar H_0 cuando es cierta. De este modo, se tiene:

$$\text{nivel de significación } (\alpha) = P(\text{rechazar } H_0 \mid H_0 \text{ es cierta}) \quad (4.5.)$$

Fijando α , la región de rechazo se determina a partir de la distribución de $d(\hat{\theta}, \hat{\theta}_0)$ cuando H_0 es cierta. Como esta distribución es conocida, elegiremos d_c , de manera que:

$$P(d > d_c \mid H_0 \text{ es cierta}) = \alpha \quad (4.6.)$$

Por tanto, discrepancias mayores que d_c tienen una probabilidad de ocurrir menor que α si H_0 es cierta. Por tanto, se establecen como regiones de rechazo o aceptación de H_0 las siguientes:

$$\begin{cases} \text{Región de Rechazo:} & d > d_c \\ \text{Región de Aceptación:} & d \leq d_c \end{cases} \quad (4.7)$$

Este método se muestra gráficamente en la siguiente figura (Figura 4.1). Cuando la discrepancia observada en la muestra pertenece a la región de rechazo, se dice que se ha producido una *diferencia significativa*, y se rechaza la hipótesis H_0 .

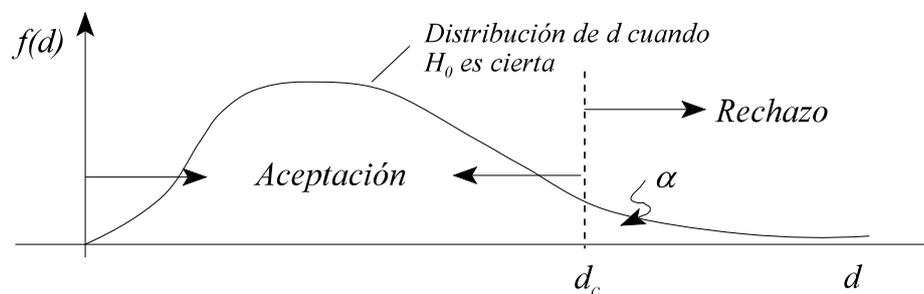


Figura 4.1.- Nivel de significación de un test.

Críticas a la selección del nivel de significación

El procedimiento de selección de una región de rechazo mediante el nivel de significación está sujeto a dos críticas principales:

- El resultado del test puede depender mucho del valor de α , que es arbitrario.
- Dar únicamente el resultado del test no permite diferenciar el grado de evidencia que la muestra indica a favor o en contra de H_0 .

Un procedimiento para hacer frente a estas críticas consiste en el empleo del nivel crítico de un test (p) en lugar del nivel de significación (α).

4.1.2.1.5.- *El nivel crítico "p".*

Se define el *nivel crítico p* del contraste como la probabilidad de obtener una discrepancia mayor o igual que la observada en la muestra, cuando H_0 es cierta. Esto es, llamando \hat{d} al valor observado:

$$p = \text{Prob}(d \geq \hat{d} \mid H_0 \text{ es cierta}) \quad (4.8.)$$

Por tanto, el valor de p no se fija a priori, sino que se determina a partir de la muestra. La aceptación o rechazo de H_0 depende de tres componentes:

- La opinión a priori que tengamos de su validez.
- Las consecuencias de la equivocación.
- La evidencia aportada por la muestra.

El nivel de significación se fija en función de los dos primeros, mientras que el nivel crítico permite poner de manifiesto el tercero.

4.1.2.2.- Comparación de dos poblaciones: comparación de dos proporciones.

Una de las técnicas estadísticas de comparación de dos poblaciones es la *comparación de proporciones*. Dicha técnica consiste en contrastar la hipótesis de que la proporción de elementos con un atributo es idéntica en ambas poblaciones. El contraste así definido se establece como sigue:

$$\begin{aligned} H_0: \hat{p}_1 &= \hat{p}_2 = \hat{p}_0 \\ H_1: \hat{p}_1 &\neq \hat{p}_2 \end{aligned} \quad (4.9)$$

donde:

- n_1 y n_2 : tamaños de muestras de ambas poblaciones.
- \hat{p}_1 y \hat{p}_2 : proporciones observadas de elementos con el atributo considerado en muestras de ambas poblaciones.

El contraste presentado parte de la *hipótesis de independencia* de las muestras de las poblaciones tomadas en cuenta.

Así, si H_0 es cierta, la mejor estimación de \hat{p}_0 vendrá dada por la siguiente expresión:

$$\hat{p}_0 = \frac{n_1 \cdot \hat{p}_1 + n_2 \cdot \hat{p}_2}{n_1 + n_2} \quad (4.10.)$$

Entonces, la variable $\hat{y} = \hat{p}_1 - \hat{p}_2$ seguirá un modelo de distribución normal de media cero y varianza igual a la suma de varianzas, dada por:

$$\text{Var}(\hat{p}_1 - \hat{p}_2) = \sqrt{\frac{\hat{p}_0 \cdot \hat{q}_0}{n_1} + \frac{\hat{p}_0 \cdot \hat{q}_0}{n_2}} \quad (4.11.)$$

Esto puede ser expresado como sigue:

$$\hat{y} \sim N\left(0; \sqrt{\frac{\hat{p}_0 \cdot \hat{q}_0}{n_1} + \frac{\hat{p}_0 \cdot \hat{q}_0}{n_2}}\right) \quad (4.12.)$$

Dicha variable aleatoria normal puede ser transformada en la variable normal estándar z ($z \sim N(0,1)$), mediante:

$$z = \frac{y - 0}{\sqrt{\frac{p_0 \cdot q_0}{n_1} + \frac{p_0 \cdot q_0}{n_2}}} \quad (4.13.)$$

Tomando esto en consideración, se define la *medida de discrepancia* (d) por la expresión mostrada a continuación:

$$d = \left| \frac{\hat{p}_1 - \hat{p}_2}{\sqrt{\frac{\hat{p}_0 \cdot \hat{q}_0}{n_1} + \frac{\hat{p}_0 \cdot \hat{q}_0}{n_2}}} \right| \quad (4.14.)$$

En este caso d tiene una distribución conocida: sigue un modelo de distribución normal estándar, según ha sido presentado en la *Ecuación 4.13*.

A continuación, y como ha sido descrito en el *Apartado 4.1.2.1.4.*, el método de contraste continúa con la división del rango de discrepancias que puede observarse cuando H_0 es cierta en dos regiones: una de aceptación de la hipótesis nula y otra de rechazo de la misma. Se consideran discrepancias “demasiado grandes” las que tienen una probabilidad pequeña α de ocurrir si H_0 es cierta, de modo que α puede interpretarse como la probabilidad que estamos dispuestos a asumir de rechazar H_0 cuando es cierta.

Fijando α , la región de rechazo se determina a partir de la distribución de d cuando H_0 es cierta. Como esta distribución es conocida, se elige un valor de discrepancia crítica d_c de manera que se establecen como regiones de rechazo o aceptación de H_0 las presentadas en la *Ecuación 4.7*. En el presente trabajo de investigación será considerado un nivel de significación α de 0.05, por lo que:

$$d_c = z_{\alpha/2} = 1.96 \quad (4.15.)$$

De este modo e iniciando la aplicación de la metodología de generación de modelos de predicción presentado previamente, se aborda la fase inicial de *planteamiento del problema*, durante la cual será definido el ámbito de aplicación del estudio así como las variables respuesta y explicativas involucradas en dicho modelo.

4.2.- **Ámbito de aplicación de la investigación: la población.**

4.2.1.- INTRODUCCIÓN.

La investigación empírica propuesta se inicia con un interrogante acerca de los objetivos pretendidos con la misma. Así, el presente trabajo trata de analizar en qué medida los factores permanentes del medio condicionan el comportamiento de los conductores influyendo sobre el riesgo de ocurrencia de accidentes.

Una vez planteado dicho interrogante, esta etapa del proceso de investigación requiere la definición del ámbito de aplicación del estudio, es decir, la población que se pretende analizar. Una población es un conjunto de elementos homogéneos en los que se desea investigar la ocurrencia de una característica o propiedad. Esta etapa de definición de la población es fundamental ya que las conclusiones obtenidas al final del estudio sólo se aplicarán a los miembros de la misma, y su validez dependerá de una selección adecuada de las variables involucradas.

Seguidamente, se muestra el análisis efectuado para la selección del ámbito de aplicación del presente trabajo de investigación.

4.2.2.- COMPARACIÓN DE POBLACIONES.

Inicialmente, la población considerada en la presente Tesis Doctoral es definida como sigue:

Tramos de carreteras españolas, donde serán identificados los principales factores de riesgo potencial asociados a las condiciones permanentes del medio presentes en los mismos, los cuales condicionan el comportamiento de los conductores influyendo sobre la ocurrencia de accidentes de tráfico.

No obstante, desde el punto de vista de los factores permanentes del medio son esperadas carencias de homogeneidad en los elementos de la población previamente definida. Debido a ello, es efectuado un análisis de influencia sobre dicha homogeneidad de dos propiedades de la población:

- *Tipo de vía.*
- *Características del trazado en planta de la calzada: recta frente a curva.*

Dicho análisis está basado en la *comparación de proporciones*, según ha sido descrito en el *Apartado 4.1.2.2*. Para ello, serán definidos pares de subpoblaciones independientes conforme a las propiedades en estudio. Seguidamente, será contrastada la hipótesis de identidad de proporciones de elementos con un atributo determinado entre dichos pares de subpoblaciones.

Dado que el presente trabajo aborda el estudio de la ocurrencia de accidentes de tráfico, serán elegidos como atributos para el contraste los siguientes:

- *Distribución de accidentes según la configuración de la colisión.*
- *Distribución de accidentes según la gravedad de la colisión.*

Para el desarrollo de este contraste son tomados en consideración los accidentes con víctimas ocurridos en España durante los años de 1994, 1995 y 1996, procedentes del Cuestionario Estadístico de Accidentes de Circulación con Víctimas, según se recoge en el *Anexo I*. En dicho cuestionario se distinguen las siguientes clasificaciones para cada uno de los atributos de contraste previamente definidos:

- *Distribución de accidentes según la configuración de la colisión.*
 - Colisión frontal.
 - Colisión frontolateral.
 - Colisión lateral.
 - Colisión por alcance.
 - Colisión múltiple o en caravana.
 - Colisión con obstáculo en la calzada.
 - Atropello.
 - Vuelco en la calzada.
 - Salida de la calzada por la izquierda.
 - Salida de la calzada por la derecha.
- *Distribución de accidentes según la gravedad de la colisión.*
 - Número de ilesos en la colisión.
 - Número de heridos leves en la colisión (no requieren hospitalización en el momento del accidente).
 - Número de heridos graves en la colisión (requieren hospitalización en el momento del accidente).
 - Número de víctimas mortales en la colisión.

Tomando en cuenta estos atributos, son definidas las hipótesis nula y alternativa del contraste, según ha sido mostrado en la *Ecuación 4.9.*, donde:

- H_0 : igualdad de proporciones de número de accidentes entre subpoblaciones para cada uno de los atributos considerados.
- H_1 : desigualdad de proporciones de número de accidentes entre subpoblaciones para cada uno de los atributos considerados.

Empleando dichas proporciones así como el número de accidentes, es obtenida la medida de la discrepancia $-d-$ para cada uno de los atributos (según *Ecuación 4.14.*).

En los siguientes apartados son presentados los resultados del análisis de comparación de proporciones previamente descrito para cada una de las propiedades en estudio.

4.2.2.1.- Influencia del tipo de vía.

4.2.2.1.1.- *Clasificación de la vía.*

Se considera como *vía pública* todo camino que pueda ser utilizado sin más limitaciones que las impuestas por el *Código de la Circulación* [28]. Las especificaciones geométricas de diseño, el control de accesos, el tipo de señalización, y las características e intensidad del tráfico, están condicionadas fuertemente por el tipo de vía considerada.

Las vías públicas se dividen, según las definiciones contenidas en la *Instrucción de carreteras 8.1 - IC: Señalización vertical* [32], en:

- *Vía urbanas o calle:* es la comprendida dentro del casco de una población.
- *Vía interurbana o carretera:* es la situada fuera del casco de las poblaciones. Éstas, a su vez, se subdividen en los tipos siguientes:
 - Autopista:
 - ◇ Calzadas separadas para cada sentido de circulación, salvo en puntos singulares o con carácter general.
 - ◇ Sin cruces a nivel.
 - ◇ Limitación total de accesos: calzadas de servicio conectadas con el tronco sólo a través de los enlaces.
 - ◇ Uso exclusivo de automóviles.
 - Autovía.
 - ◇ Calzadas separadas para cada sentido de circulación, salvo en puntos singulares o con carácter general.
 - ◇ Sin cruces a nivel.
 - ◇ Limitación parcial de accesos: calzadas de servicio conectadas con el tronco a través de los enlaces, o a través de entradas o salidas específicas situadas a más de 1.2 km (salidas) o 1.5 km (entradas) de ellos.
 - ◇ Puede ser reservada al uso exclusivo de automóviles, si las calzadas de servicio aseguran la continuidad del itinerario para los vehículos cuya circulación por la calzada principal se vaya a limitar.
 - Vía rápida.
 - ◇ Calzada única para ambos sentidos de circulación.
 - ◇ Sin cruces a nivel.
 - ◇ Limitación total de accesos: calzadas de servicio conectadas con el tronco sólo a través de los enlaces.
 - ◇ Uso exclusivo de automóviles.

- Carretera convencional
 - ↳ No reúne las características propias de las autopistas, autovías o vías rápidas.

- *Travesías*: es la calle o vía urbana comprendida dentro del desarrollo de una carretera.

Como consecuencia de esto, pueden establecerse algunas de las características generales que diferencian estos tipos desde el punto de vista de la accidentalidad:

- *Vías urbanas y travesías*:
 - Mayor densidad de circulación, con frecuentes atascos.
 - Circulación muy variada.
 - Mayor número y variedad de señales verticales, luminosas y de agentes, y de marcas viales.
 - Constante sucesión de intersecciones y cruces.
 - Circulación de peatones.
 - Mayor número de accidentes, pero de menor gravedad.
- *Vías interurbanas*:
 - Mayor velocidad.
 - Menor densidad de circulación.
 - Monotonía.
 - Mayor duración de un viaje.
 - Accidentes más graves.

Esta diferenciación condiciona el número, la configuración y la gravedad de los accidentes.

4.2.2.1.2.- *Definición de subpoblaciones.*

Tomando en consideración las características diferenciadoras mostradas en el apartado precedente, son establecidas las subpoblaciones según el tipo de vía, las cuales quedan definidas como sigue:

- P1.- *Tramos de vías urbanas y travesías españolas, donde serán identificados los factores de riesgo asociados a las condiciones permanentes del medio presentes en los mismos.*
- P2.- *Tramos de vías interurbanas españolas, donde serán identificados los factores de riesgo asociados a las condiciones permanentes del medio presentes en los mismos.*
- P21.- *Tramos de autopistas españolas, donde serán identificados los factores de riesgo asociados a las condiciones permanentes del medio presentes en los mismos.*
- P22.- *Tramos de autovías españolas, donde serán identificados los factores de riesgo asociados a las condiciones permanentes del medio presentes en los mismos.*
- P23.- *Tramos de carreteras convencionales españolas, donde serán identificados los factores de riesgo asociados a las condiciones permanentes del medio presentes en los mismos.*

Como puede observarse, no se tiene en cuenta el tipo de vía interurbana “vía rápida”, dado que en España existe un número muy reducido de kilómetros de vía que verifiquen estas especificaciones.

Seguidamente se presenta el análisis de comparación de proporciones para la comparación de poblaciones previamente descrito, empleando como atributos para el contraste la *distribución de accidentes según la configuración de la colisión y según la gravedad de la misma*.

4.2.2.1.3.- Comparación de poblaciones según configuración de la colisión.

En primer lugar son evaluadas las proporciones de accidentes según el atributo “configuración de la colisión” para cada una de las subpoblaciones definidas. Dicho análisis de proporciones es presentado por separado para cada uno de los años considerados: 1994, 1995 y 1996, como se muestra en las *Figuras 4.2., 4.3.* (1994), *Figuras II.1., II.2., II.3. y II.4.* (1995 y 1996), así como en la *Tabla II.1.*

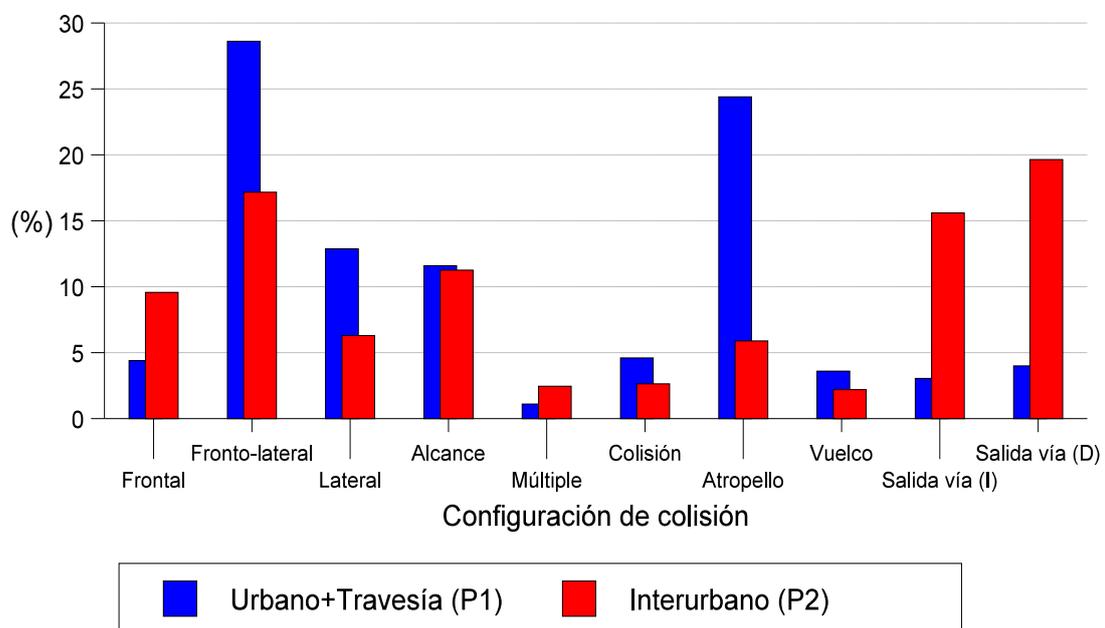


Figura 4.2.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según tipos principales de vías (1994).

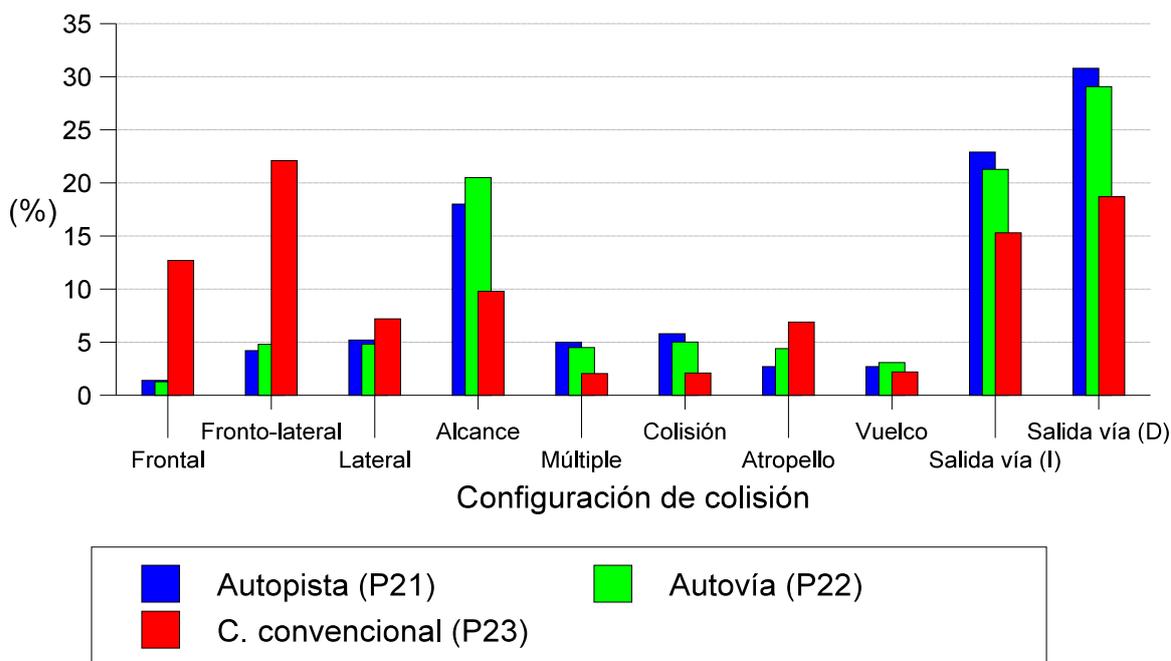


Figura 4.3.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según tipos de vías interurbanas (1994).

Seguidamente, se evalúa el número total de accidentes en cada una de las vías analizadas. Los valores obtenidos son mostrados en la *Tabla II.2*.

Tras el cálculo de estas proporciones y teniendo en cuenta el número total de accidentes en cada una de las vías analizadas, se procede a la *comparación de poblaciones* según el atributo analizado. Dicha técnica de contraste permite únicamente la comparación de dos poblaciones simultáneamente, por lo que serán realizados los contrastes definidos a continuación:

- Vías urbana y travesía (P1) frente vía interurbana (P2).
- Autopista (P21) frente a autovía (P22).
- Autopista (P21) frente a carretera convencional (P23).
- Autovía (P22) frente a carretera convencional (P23).

El contraste desarrollado así como los resultados obtenidos se presentan en los siguientes apartados.

A.- Vías urbana y travesía frente a vía interurbana.

En este caso son esperadas diferencias significativas en la configuración de las colisiones entre ambos tipos de vía, debido a las notables diferencias en las especificaciones geométricas del trazado, en la velocidad de circulación, en la congestión de la circulación de vehículos y en el número de peatones que invaden la calzada.

Tomando en consideración las proporciones según han sido mostradas en la *Tabla II.1.*, así como el número total de accidentes presentado en la *Tabla II.2.*, es obtenida la medida de la discrepancia para cada una de las configuraciones de colisión. Los valores así calculados son presentados en la *Tabla II.3.* y en la siguiente figura (*Figura 4.4.*).

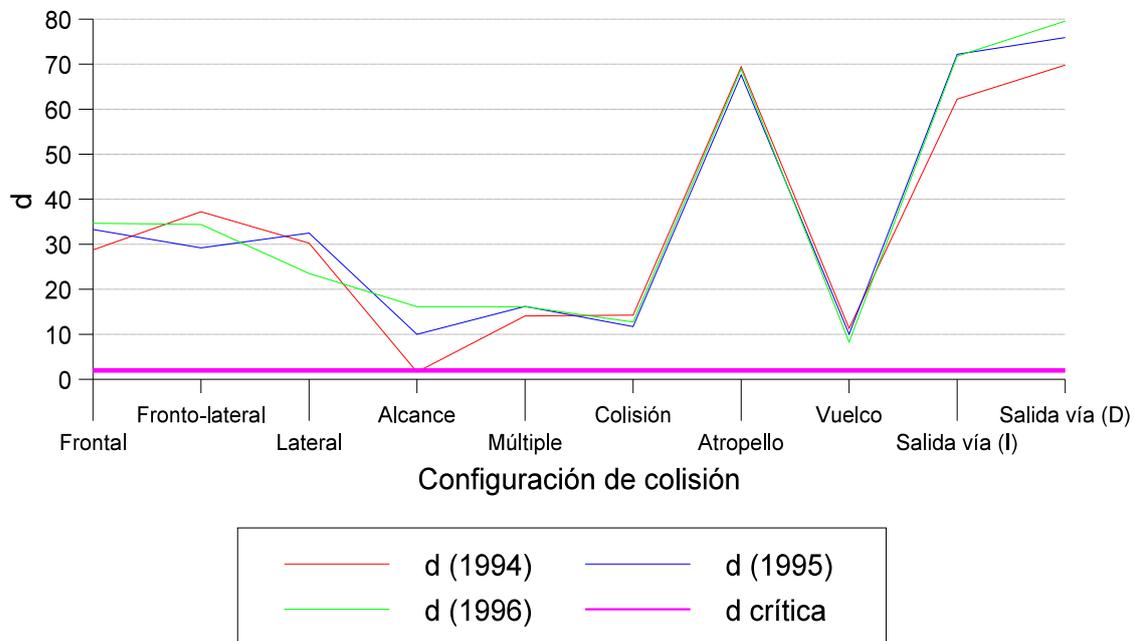


Figura 4.4.- Medida de la discrepancia “d” entre P1 y P2 según el atributo “configuración de la colisión”.

El análisis efectuado aporta los siguientes resultados:

- La comparación de las poblaciones P1 y P2 desde el punto de vista de la configuración de la colisión proporciona valores de la medida de la discrepancia d muy por encima del valor crítico (1.96), exceptuando la configuración de colisión por alcance en 1994 que puede excluirse como un punto singular.
- La evolución del valor de la medida de discrepancia según la configuración de la colisión se mantiene durante los tres años evaluados en el presente trabajo.

A la vista de estos resultados puede concluirse lo siguiente:

- Existen diferencias significativas entre las dos poblaciones comparadas desde el punto de vista de la configuración de la colisión.
- Estas diferencias se mantienen durante los años de 1994, 1995 y 1996.

B.- Autopista frente a autovía.

En el apartado precedente han sido mostradas las diferencias existentes entre vías urbana y travesía frente a las vías interurbanas. Por otro lado, y como ha sido descrito en el *Apartado 4.2.2.1.1.*, las vías interurbanas pueden subdividirse en varios tipos con diferencias en las especificaciones geométricas de diseño, en el control de accesos, en el tipo de señalización, y en las características e intensidad del tráfico. Debido a esto, se procede a la comparación de los principales tipos de vías definidos como vías interurbanas.

El presente apartado compara las autopistas (P21) frente a las autovías (P22). En este caso no son esperadas notables diferencias por la similitud en las especificaciones geométricas, en el tipo de señalización y en las características e intensidad del tráfico. Mayores diferencias pueden apreciarse en el control de accesos entre ambos tipos.

Tomando en consideración las proporciones (*Tabla II.1. y Figura 4.3.*), así como el número total de accidentes (*Tabla II.2.*), es obtenida la medida de la discrepancia para cada una de las configuraciones de colisión. Los valores así calculados son presentados en la *Tabla II.4.* y en la siguiente figura (*Figura 4.5.*).

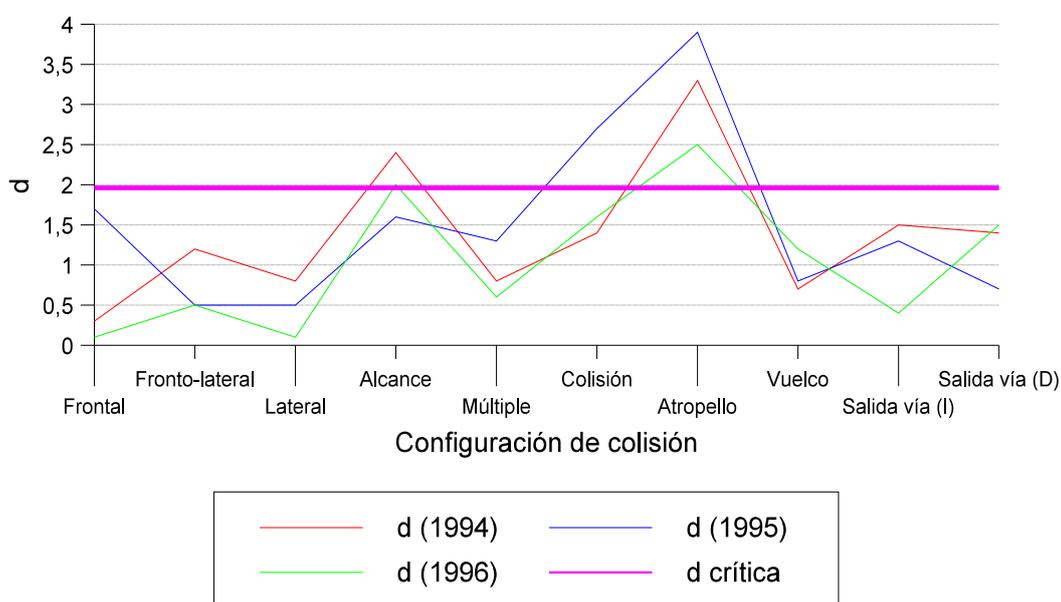


Figura 4.5.- Medida de la discrepancia “d” entre P21 y P22 según el atributo “configuración de la colisión”.

El análisis efectuado aporta los siguientes resultados:

- La comparación de las poblaciones P21 y P22 desde el punto de vista de la configuración de la colisión proporciona valores de la medida de la discrepancia inferiores al valor crítico (1.96), exceptuando la configuración de colisión por alcance en 1994 y los atropellos en todos los años evaluados.

- La evolución del valor de la medida de discrepancia según la configuración de la colisión se mantiene durante los tres años evaluados en esta investigación.

A la vista de estos resultados puede concluirse lo siguiente:

- No existen diferencias significativas entre las dos poblaciones comparadas desde el punto de vista de la configuración de la colisión, salvo en el caso de los atropellos. Esto es debido principalmente al hecho que en autovía existe mayor accesibilidad de los peatones a la plataforma, lo que incrementa el riesgo de atropellos en la misma.
- La tendencia seguida por la medida de la discrepancia se mantiene durante los años de 1994, 1995 y 1996.

C.- Autopista frente a carretera convencional.

Este apartado continúa la comparación de los principales tipos de vías definidos como vías interurbanas. De este modo, seguidamente se compara las autopistas (P21) frente a las carreteras convencionales (P23).

En este caso son esperadas diferencias significativas en la configuración de las colisiones entre ambos tipos de vía, debido en gran medida a las notables diferencias en las especificaciones geométricas del trazado (número de carriles, trazado en planta y alzado,...), en la velocidad de circulación y en la congestión de la circulación de vehículos.

Tomando en consideración las proporciones (*Tabla II.1.*), así como el número total de accidentes (*Tabla II.2.*), es obtenida la medida de la discrepancia para cada una de las configuraciones de colisión. Los valores así calculados son presentados en la *Tabla II.5.* y en la siguiente figura (*Figura 4.6.*).

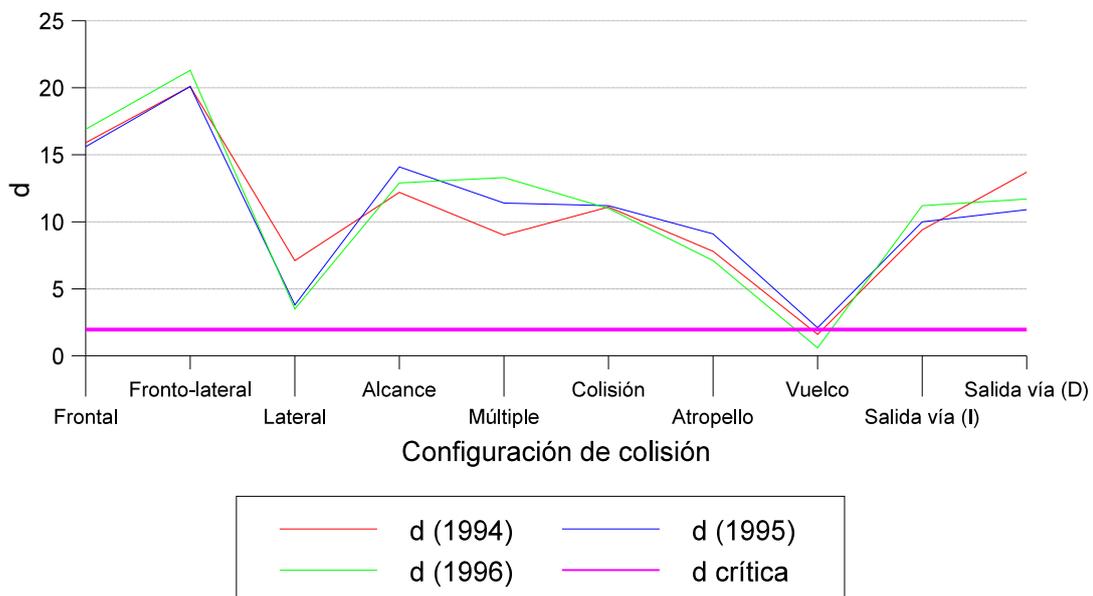


Figura 4.6.- Medida de la discrepancia "d" entre P21 y P23 según el atributo "configuración"

de la colisión”.

El análisis efectuado aporta los siguientes resultados:

- La comparación de las poblaciones P21 y P23 desde el punto de vista de la configuración de la colisión proporciona valores de la medida de la discrepancia muy por encima del valor crítico (1.96), exceptuando la configuración de colisión por vuelco en los tres años considerados.
- La evolución del valor de la medida de discrepancia según la configuración de la colisión se mantiene durante los tres años evaluados en el presente trabajo.

A la vista de estos resultados puede concluirse lo siguiente:

- Existen diferencias significativas entre las dos poblaciones comparadas desde el punto de vista de la configuración de la colisión. Estas diferencias son especialmente destacables en el caso de las colisiones frontales y frontolaterales.

Así, en autopista existen varios carriles en cada sentido de circulación al tiempo que dichos sentidos están habitualmente separados por una mediana, frente a las carreteras convencionales con un carril de circulación en cada sentido. Esto motiva la elevada proporción de colisiones frontales y frontolaterales en carreteras convencionales, donde se producen frecuentes invasiones del sentido contrario de circulación por adelantamientos y salidas de vía.

- Estas diferencias se mantienen durante los años de 1994, 1995 y 1996.

D.- Autovía frente a carretera convencional.

Para concluir el análisis de los tipos de vías definidos como vías interurbanas, seguidamente se compara las autovías (P22) frente a las carreteras convencionales (P23). En este caso, son esperadas diferencias significativas en la configuración de las colisiones entre ambos tipos de vía, teniendo en cuenta la similitud de especificaciones de diseño entre autopistas y autovías, frente a las carreteras convencionales.

Tomando en consideración las proporciones (*Tabla II.1.*), así como el número total de accidentes (*Tabla II.2.*), es obtenida la medida de la discrepancia para cada una de las configuraciones de colisión. Los valores así calculados son presentados en la *Tabla II.6.* y en la siguiente figura (*Figura 4.7.*).

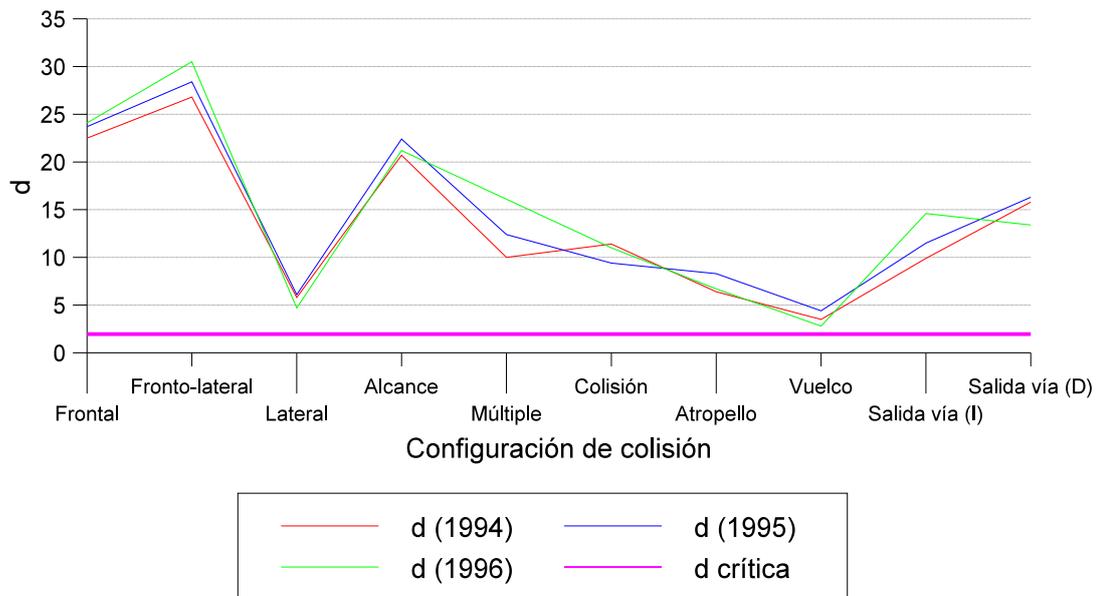


Figura 4.7.- Medida de la discrepancia “d” entre P22 y P23 según el atributo “configuración de la colisión”.

El análisis efectuado aporta los siguientes resultados:

- La comparación de las poblaciones P22 y P23 desde el punto de vista de la configuración de la colisión proporciona valores de la medida de la discrepancia muy por encima del valor crítico (1.96).
- La evolución del valor de la medida de discrepancia según la configuración de la colisión se mantiene durante los tres años evaluados en esta investigación.

A la vista de estos resultados puede concluirse lo siguiente:

- Existen diferencias significativas entre las dos poblaciones comparadas desde el punto de vista de la configuración de la colisión. Este resultado es similar al obtenido en la comparación entre autopistas y carreteras convencionales mostrado en el apartado precedente.
- Estas diferencias se mantienen durante los años de 1994, 1995 y 1996.

4.2.2.1.4.- Comparación de poblaciones según gravedad de la colisión.

Continuando con la comparación de las poblaciones previamente descritas, se evalúa el atributo *distribución de accidentes según la gravedad de la colisión*. En este caso, y teniendo en cuenta que todos los accidentes contenidos en el cuestionario estadístico han tenido alguna

víctima (heridos leves, heridos graves y/o muertos), este atributo permite la definición de los siguientes tipos de colisiones:

- Colisiones con heridos leves únicamente (sin heridos graves ni muertos): *gravedad 1*.
- Colisiones con algún herido grave (con o sin heridos leves, sin muertos): *gravedad 2*.
- Colisiones con algún muerto (con o sin heridos leves, con o sin heridos graves): *gravedad 3*.

Este contraste requiere, en primer lugar, el cálculo de las proporciones de accidentes según dicho atributo para cada una de las subpoblaciones definidas en el *Apartado 4.2.2.1.2*. Dicho análisis de proporciones es presentado por separado para cada uno de los años considerados: 1994, 1995 y 1996, como se muestra en las *Figuras 4.8. y 4.9. (1994)*, *Figuras II.5., II.6., II.7. y II.8. (1995 y 1996)*, así como en la *Tabla II.7*. Junto a esto, es presentado en la *Tabla II.2* el número de accidentes en cada uno de los tipos de vía analizados.

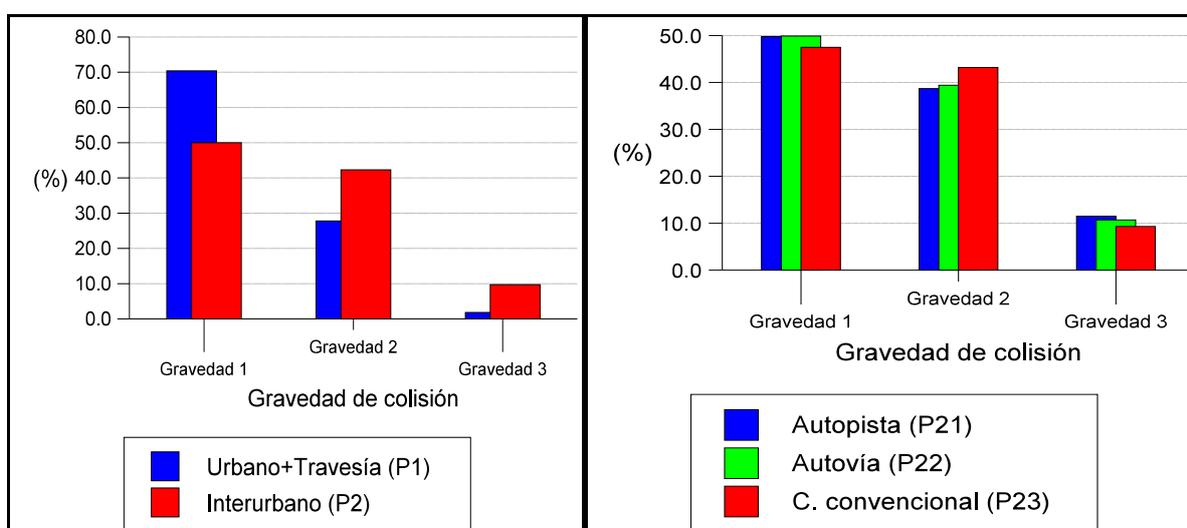


Figura 4.8.- Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos principales de vías (1994).

Figura 4.9.- Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos de vías interurbanas (1994).

Tras el cálculo de estas proporciones y teniendo en cuenta el número total de accidentes en cada una de las vías analizadas, se procede a la *comparación de poblaciones* según el atributo analizado. Como ha sido descrito en el *Apartado 4.2.2.1.2.*, dicha técnica de contraste permite únicamente la comparación de dos poblaciones simultáneamente, por lo que serán realizados los contrastes definidos a continuación:

- Vías urbana y travesía (P1) frente vía interurbana (P2).
- Autopista (P21) frente a autovía (P22).
- Autopista (P21) frente a carretera convencional (P23).
- Autovía (P22) frente a carretera convencional (P23).

El contraste desarrollado así como los resultados obtenidos se presentan en los siguientes apartados.

A.- Vías urbana y travesía frente a vía interurbana.

En este caso son esperadas diferencias significativas en la gravedad de las colisiones entre ambos tipos de vía, debido a las notables diferencias en la velocidad de circulación y en la configuración de las colisiones (según ha sido contrastado en el *Apartado 4.2.2.1.3.*).

Tomando en consideración las proporciones según han sido mostradas en la *Tabla II.7.*, así como el número total de accidentes presentado en la *Tabla II.2.*, es obtenida la medida de la discrepancia para cada nivel de gravedad de colisión definido. Los valores así calculados son presentados en la *Tabla II.8.* y en la siguiente figura (*Figura 4.10.*).

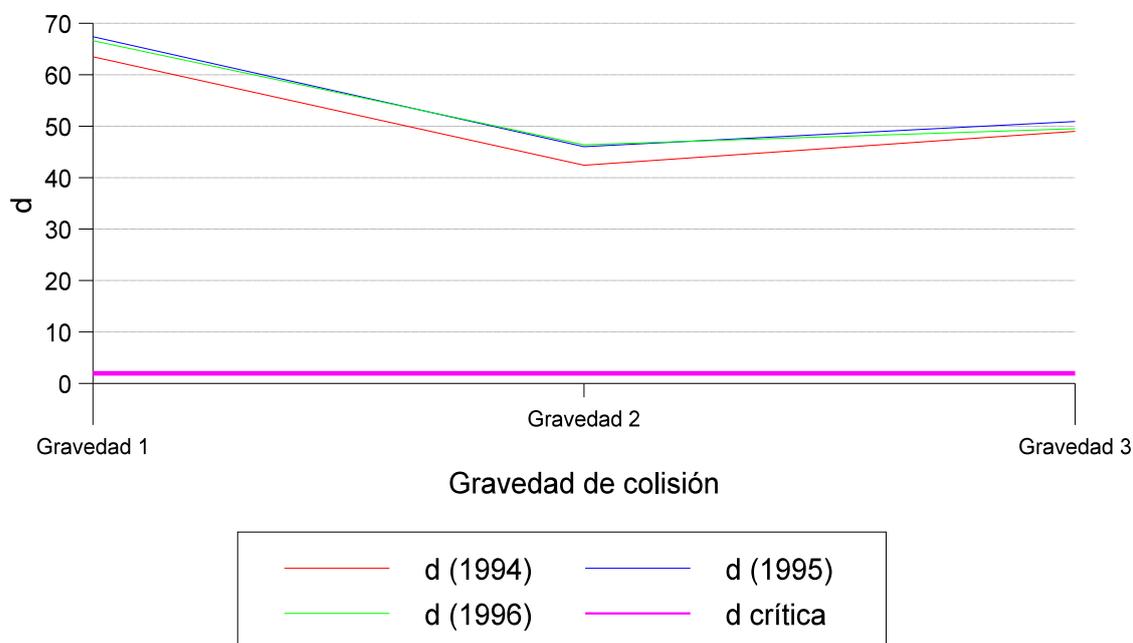


Figura 4.10.- Medida de la discrepancia “d” entre P1 y P2 según el atributo “gravedad de la colisión”.

El análisis efectuado aporta los siguientes resultados:

- La comparación de las poblaciones P1 y P2 desde el punto de vista de la gravedad de la colisión proporciona valores de la medida de la discrepancia d muy por encima del valor crítico (1.96).
- La evolución del valor de la medida de discrepancia según la gravedad de la colisión se mantiene durante los tres años evaluados en el presente trabajo.

A la vista de estos resultados puede concluirse lo siguiente:

- Existen diferencias significativas entre las dos poblaciones comparadas desde el punto de vista de la gravedad de la colisión.
- Estas diferencias se mantienen durante los años de 1994, 1995 y 1996.

B.- Autopista frente a autovía.

Continuando con el modo de operación desarrollado en el *Apartado 4.2.2.1.3.*, se procede a la comparación de los principales tipos de vías definidos como vías interurbanas.

El presente apartado compara las autopistas (P21) frente a las autovías (P22). En este caso no son esperadas diferencias significativas en la gravedad de las colisiones por la similitud en la velocidad de circulación y en la configuración de las colisiones (según ha sido contrastado en el *Apartado 4.2.2.1.3.*).

Tomando en consideración las proporciones (*Tabla II.7.*), así como el número total de accidentes (*Tabla II.2.*), es obtenida la medida de la discrepancia para cada nivel de gravedad de colisión. Los valores así calculados son presentados en la *Tabla II.9.* y en la siguiente figura (*Figura 4.11.*).

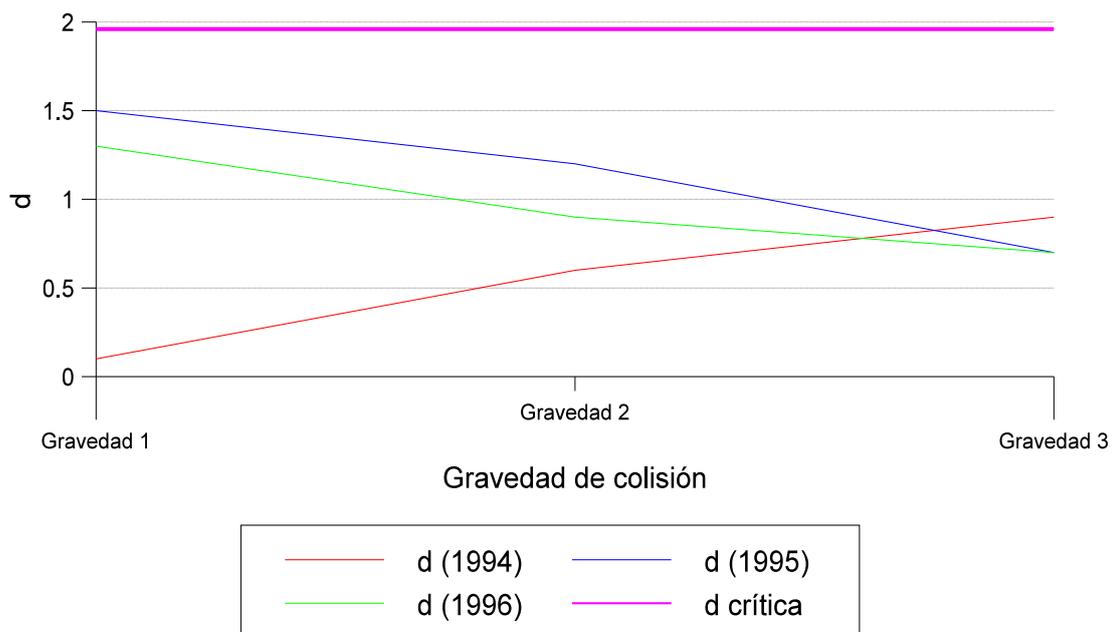


Figura 4.11.- Medida de la discrepancia “d” entre P21 y P22 según el atributo “gravedad de la colisión”.

El análisis efectuado aporta los siguientes resultados:

- La comparación de las poblaciones P21 y P22 desde el punto de vista de la gravedad de la colisión proporciona valores de la medida de la discrepancia inferiores al valor crítico (1.96).
- La evolución del valor de la medida de discrepancia según la gravedad de la colisión se mantiene durante los tres años evaluados en esta investigación.

A la vista de estos resultados puede concluirse lo siguiente:

- No existen diferencias significativas entre las dos poblaciones comparadas desde el punto de vista de la gravedad de la colisión.
- La tendencia seguida por la medida de la discrepancia se mantiene durante los años de 1994, 1995 y 1996.

C.- Autopista frente a carretera convencional.

Este apartado continúa la comparación de los principales tipos de vías definidos como vías interurbanas. De este modo, seguidamente se compara las autopistas (P21) frente a las carreteras convencionales (P23).

En este caso son esperadas diferencias significativas en la gravedad de las colisiones entre ambos tipos de vía, debido a las diferencias en la velocidad de circulación y en la configuración de las colisiones.

Tomando en consideración las proporciones (*Tabla II.7.*), así como el número total de accidentes (*Tabla II.2.*), es obtenida la medida de la discrepancia para cada nivel de gravedad de colisión. Los valores así calculados son presentados en la *Tabla II.10.* y en la siguiente figura (*Figura 4.12.*).

El análisis efectuado aporta los siguientes resultados:

- La comparación de las poblaciones P21 y P23 desde el punto de vista de la gravedad de la colisión proporciona valores de la medida de la discrepancia en la mayoría de los casos superiores al valor crítico (1.96).
- La evolución del valor de la medida de discrepancia según la gravedad de la colisión durante los tres años considerados presenta una mayor variabilidad que en los casos precedentes.

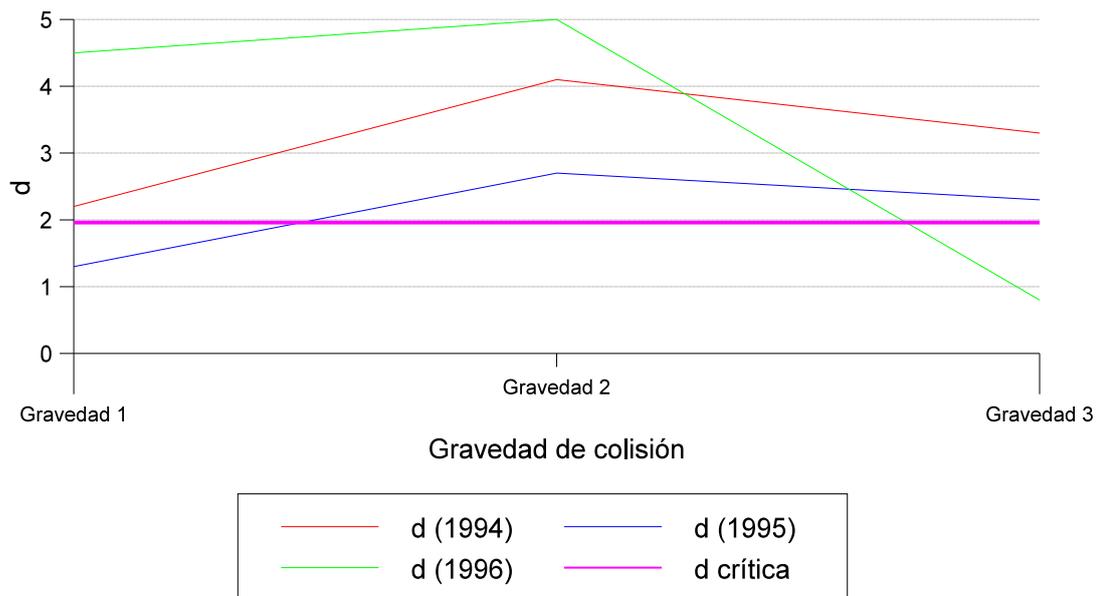


Figura 4.12.- Medida de la discrepancia “d” entre P21 y P23 según el atributo “gravedad de la colisión”.

A la vista de estos resultados puede concluirse lo siguiente:

- Existen diferencias significativas entre las dos poblaciones comparadas desde el punto de vista de la gravedad de la colisión.

D.- Autovía frente a carretera convencional.

Para concluir la comparación de los tipos de vías definidos como vías interurbanas, seguidamente se compara las autovías (P22) frente a las carreteras convencionales (P23). En este caso son esperadas diferencias significativas en la gravedad de las colisiones entre ambos tipos de vía, teniendo en cuenta la similitud en las especificaciones de diseño entre autopistas y autovías frente a las carreteras convencionales.

Tomando en consideración las proporciones (*Tabla II.7.*), así como el número total de accidentes (*Tabla II.2.*), es obtenida la medida de la discrepancia para cada nivel de gravedad de colisión. Los valores así calculados son presentados en la *Tabla II.11.* y en la siguiente figura (*Figura 4.13.*).

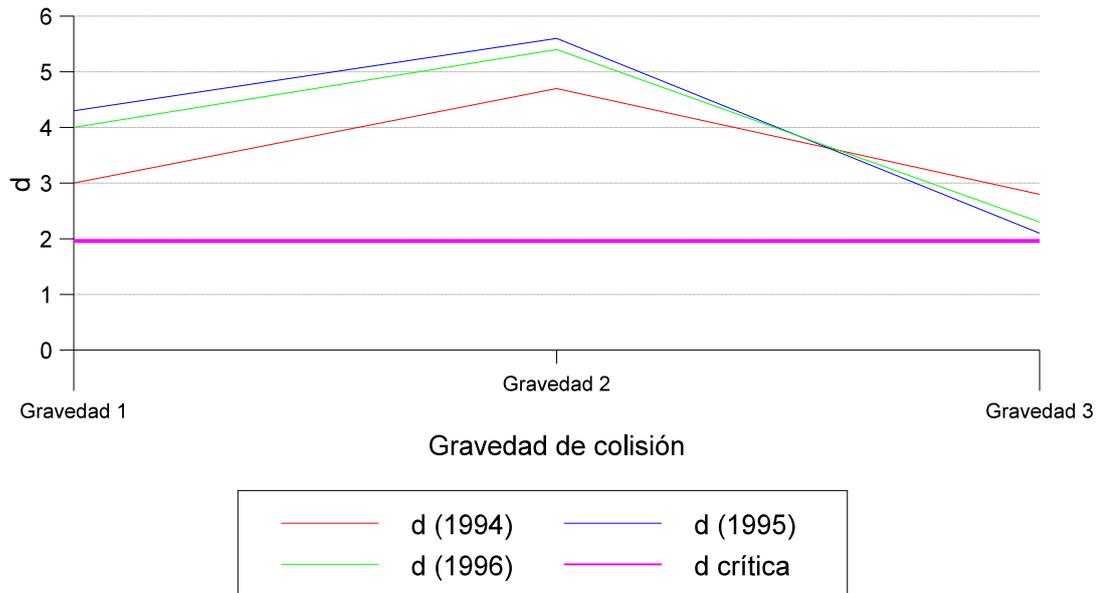


Figura 4.13.- Medida de la discrepancia “d” entre P22 y P23 según el atributo “gravedad de la colisión”.

El análisis efectuado aporta los siguientes resultados:

- La comparación de las poblaciones P22 y P23 desde el punto de vista de la gravedad de la colisión proporciona valores de la medida de la discrepancia superiores al valor crítico (1.96).
- La evolución del valor de la medida de discrepancia según la gravedad de la colisión se mantiene durante los tres años evaluados en el presente trabajo.

A la vista de estos resultados puede concluirse lo siguiente:

- Existen diferencias significativas entre las dos poblaciones comparadas desde el punto de vista de la gravedad de la colisión. Este resultado es similar al obtenido en la comparación entre autopistas y carreteras convencionales mostrado en el apartado precedente.
- Estas diferencias se mantienen durante los años de 1994, 1995 y 1996.

4.2.2.2.- Influencia del trazado en planta de la calzada.

4.2.2.2.1.- *Elementos básicos.*

Los elementos geométricos básicos definatorios del trazado en planta de la calzada, especialmente en vías interurbanas, son los siguientes:

- Alineaciones rectas:
 - Longitud.
- Alineaciones curvas:
 - Radio.
 - Peralte.
 - Longitud.
 - Transiciones de radio y peralte.

Las características del trazado en curva ejercen gran influencia en la ocurrencia de accidentes, especialmente debido a los siguientes aspectos:

- Solicitaciones de aceleración lateral sobre el vehículo no compensadas por el peralte, lo cual genera requerimientos de adherencia transversal en el neumático. Estos requerimientos pueden llegar a generar situaciones de riesgo, motivadas por:
 - Velocidades de circulación elevadas para las características del trazado.
 - Ángulo de inclinación de peralte contrario al sentido de giro de la curva (curvas contraperaltadas), lo cual se produce en algunas ocasiones en tramos de curvas enlazadas.
- Limitaciones en la distancia de visibilidad, en combinación con el trazado en alzado.
- Adecuación de la señalización a las características de la curva.

Esta diferenciación en los parámetros geométricos característicos de ambas alineaciones condiciona el número, la gravedad y la configuración de los accidentes.

Junto a esto y como ha sido mostrado en el *Apartado 4.2.2.1.*, las especificaciones geométricas de diseño, el control de accesos, el tipo de señalización, y las características e intensidad del tráfico, están condicionadas fuertemente por el tipo de vía considerada. Por ello, la influencia de las alineaciones recta y curva sobre las características de los accidentes debe ser analizada según el tipo de vía.

4.2.2.2.2.- *Definición de subpoblaciones.*

Tomando esto en consideración son establecidas las subpoblaciones según el tipo de alineación y tipo de vía interurbana, las cuales quedan definidas como sigue:

- P1'.- *Tramos de recta en autopistas españolas, donde serán identificados los factores de riesgo asociados a las condiciones permanentes del medio presentes en los mismos.*
- P2'.- *Tramos de curva en autopistas españolas, donde serán identificados los factores de riesgo asociados a las condiciones permanentes del medio presentes en los mismos.*
- P3'.- *Tramos de recta en autovías españolas, donde serán identificados los factores de riesgo asociados a las condiciones permanentes del medio presentes en los mismos.*
- P4'.- *Tramos de curva en autovías españolas, donde serán identificados los factores de riesgo asociados a las condiciones permanentes del medio presentes en los mismos.*
- P5'.- *Tramos de recta en carreteras convencionales españolas, donde serán identificados los factores de riesgo asociados a las condiciones permanentes del medio presentes en los mismos.*
- P6'.- *Tramos de curva en carreteras convencionales españolas, donde serán identificados los factores de riesgo asociados a las condiciones permanentes del medio presentes en los mismos.*

Como puede observarse, no se considera en este apartado el tipo de vía urbana. Ello se debe a que en esta vía, los accidentes están frecuentemente ocasionados por la congestión del tráfico, las frecuentes intersecciones entre calles y los atropellos de peatones (como ha sido mostrado en las *Figuras 4.2., II.1. y II.2.*, con predominio de las colisiones por alcance, frontolaterales y atropellos, respectivamente), por lo que las especificaciones geométricas del trazado de las alineaciones recta y curva ejerce una influencia secundaria.

Asimismo, no se tiene en cuenta el tipo de vía interurbana “vía rápida”, dado que en España existe un número muy reducido de kilómetros de vía que verifiquen estas especificaciones.

Seguidamente se presenta el análisis de comparación de proporciones para la comparación de las subpoblaciones previamente descrito, empleando como atributos para el contraste la *distribución de accidentes según la configuración de la colisión y según la gravedad de la misma.*

Para el desarrollo de este contraste son tomados en consideración los accidentes con víctimas ocurridos en España durante los años de 1994, 1995 y 1996, procedentes del Cuestionario Estadístico de Accidentes de Circulación con Víctimas, según se recoge en el *Anexo I.* En dicho cuestionario se distingue la siguiente clasificación del trazado en planta de la calzada:

- Recta.

- Curva suave.
- Curva fuerte sin señalizar.
- Curva fuerte con señal y sin velocidad señalizada.
- Curva fuerte con señal y velocidad señalizada.

Siguiendo esta clasificación, se adopta el siguiente criterio para el desarrollo de la comparación de las subpoblaciones definidas previamente:

- *Alineación recta*: agrupa los accidente ocurridos en recta.
- *Alineación curva*: agrupa los accidentes ocurridos en los cuatro tipos de curva establecidos en el Cuestionario Estadístico.

4.2.2.2.3.- Comparación de poblaciones según configuración de la colisión.

En primer lugar son evaluadas las proporciones de accidentes según el atributo “configuración de la colisión” para cada una de las subpoblaciones definidas. Dicho análisis de proporciones es presentado por separado para cada uno de los años considerados: 1994, 1995 y 1996, como se muestra en las *Figuras 4.14., 4.15., 4.16.*, (1994), *Figuras II.9., II.10., II.11., II.12., II.13. y II.14.* (1995 y 1996), así como en la *Tabla II.12.*

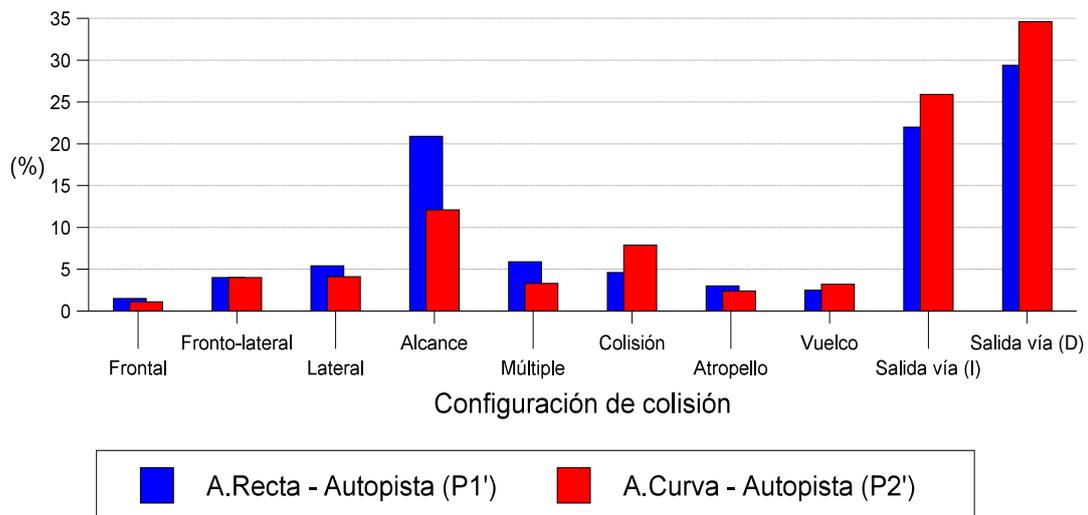


Figura 4.14.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según el tipo de alineación en autopista (1994).

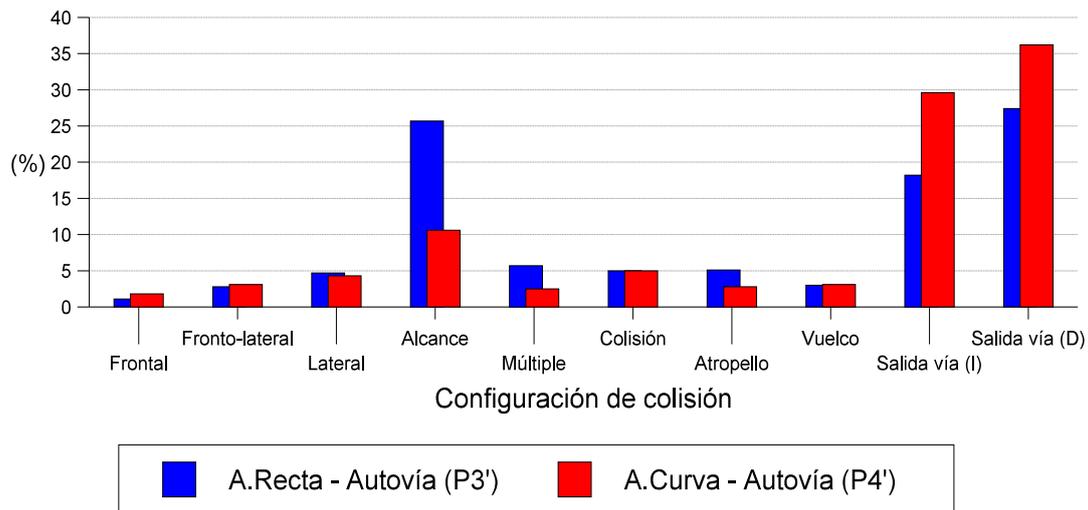


Figura 4.15.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según el tipo de alineación en autovía (1994).

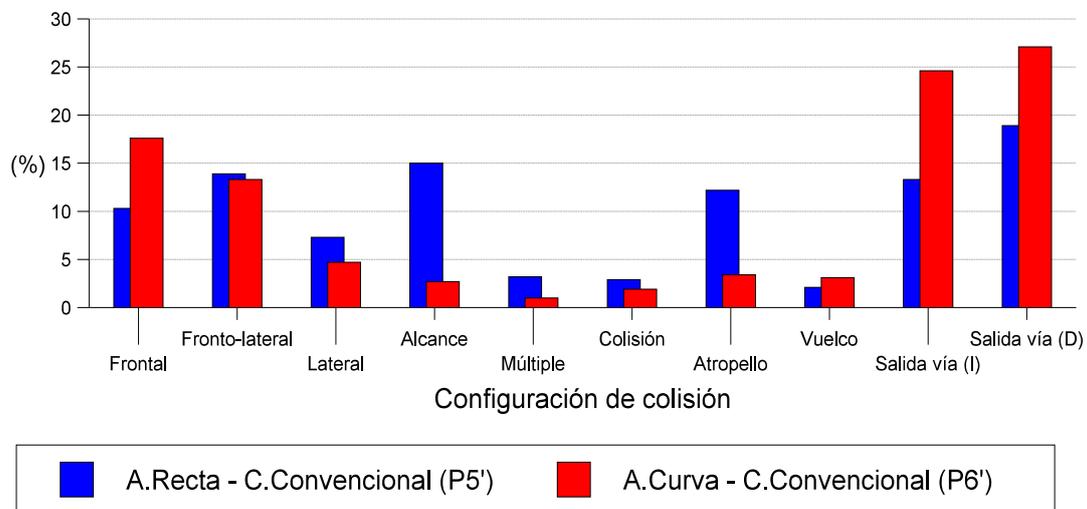


Figura 4.16.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según el tipo de alineación en carretera convencional (1994).

Seguidamente, se evalúa el número total de accidentes en cada una de las alineaciones y vías analizadas. Los valores obtenidos son mostrados en la *Tabla II.13*.

Tras el cálculo de estas proporciones y teniendo en cuenta el número total de accidentes, se procede a la *comparación de poblaciones* según el atributo analizado. Dicha técnica de contraste permite únicamente la comparación de dos poblaciones, por lo que serán realizados los contrastes definidos a continuación:

- Alineación recta (P1') frente alineación curva (P2') en autopista.

- Alineación recta (P3') frente alineación curva (P4') en autopista.
- Alineación recta (P5') frente alineación curva (P6') en carretera convencional.

El contraste desarrollado así como los resultados obtenidos se presentan en los siguientes apartados.

A.- Alineación recta frente a alineación curva en autopista.

Tomando en consideración las proporciones según han sido mostradas en la *Tabla II.12.*, así como el número total de accidentes presentado en la *Tabla II.13.*, es obtenida la medida de la discrepancia para cada una de las configuraciones de colisión. Los valores así calculados son presentados en la *Tabla II.14.* y en la siguiente figura (*Figura 4.17.*).

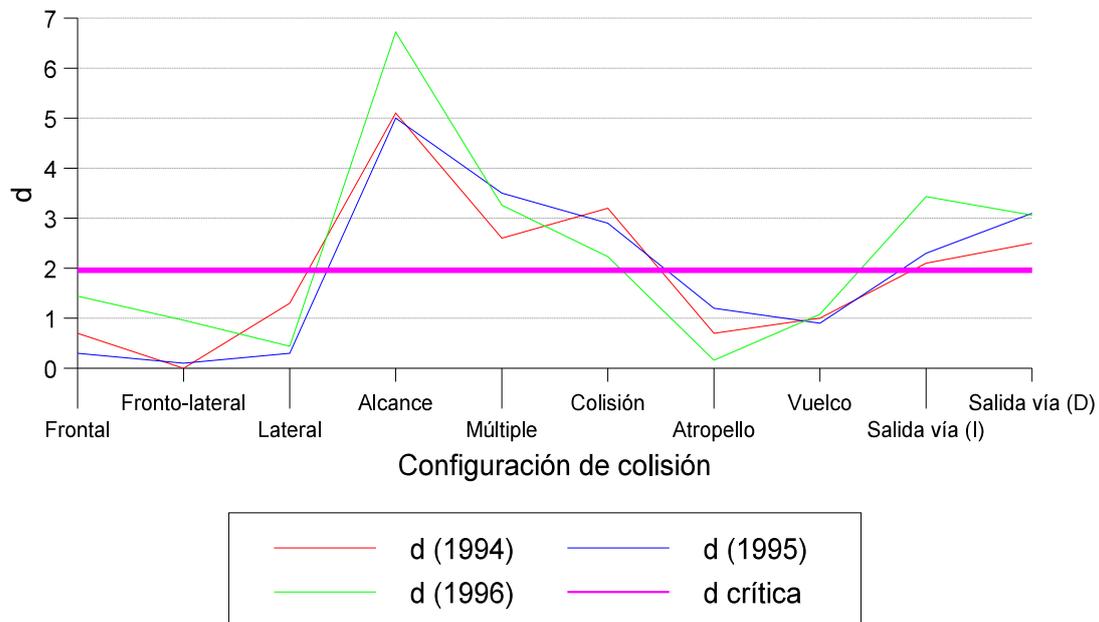


Figura 4.17.- Medida de la discrepancia “d” entre P1' y P2' según el atributo “configuración de la colisión”.

El análisis efectuado aporta los siguientes resultados:

- La comparación de las poblaciones P1' y P2' desde el punto de vista de la configuración de la colisión proporciona valores de la medida de la discrepancia d superiores al valor crítico en los casos siguientes:
 - Colisiones por alcance.
 - Colisiones múltiples o en caravana.
 - Colisiones contra obstáculos en la calzada.
 - Colisiones por salida de la vía.

- La evolución del valor de la medida de discrepancia según la configuración de la colisión se mantiene durante los tres años evaluados en el presente trabajo.

A la vista de estos resultados puede concluirse lo siguiente:

- Existen diferencias significativas entre las dos alineaciones comparadas en autopista, desde el punto de vista de la configuración de la colisión, en las configuraciones de colisión predominantes en este tipo de vía. Así, las sollicitaciones laterales generadas por la geometría de la alineación en curva favorecen las salidas de vía por velocidad inadecuada, acompañadas en muchas ocasiones de colisiones con obstáculos fuera de la calzada.

Junto a esto, la influencia del tipo de alineación sobre las configuraciones de colisión frontal y frontolateral es poco significativa, dado que en autopista existen varios carriles en cada sentido de circulación al tiempo que dichos sentidos están habitualmente separados por una mediana, por lo que las invasiones del sentido contrario son escasas.

- Estas diferencias se mantienen durante los años de 1994, 1995 y 1996.

B.- Alineación recta frente a alineación curva en autovía.

Tomando en consideración las proporciones según han sido mostradas en la *Tabla II.12.*, así como el número total de accidentes presentado en la *Tabla II.13.*, es obtenida la medida de la discrepancia para cada una de las configuraciones de colisión. Los valores así calculados son presentados en la *Tabla II.15.* y en la siguiente figura (*Figura 4.18.*).

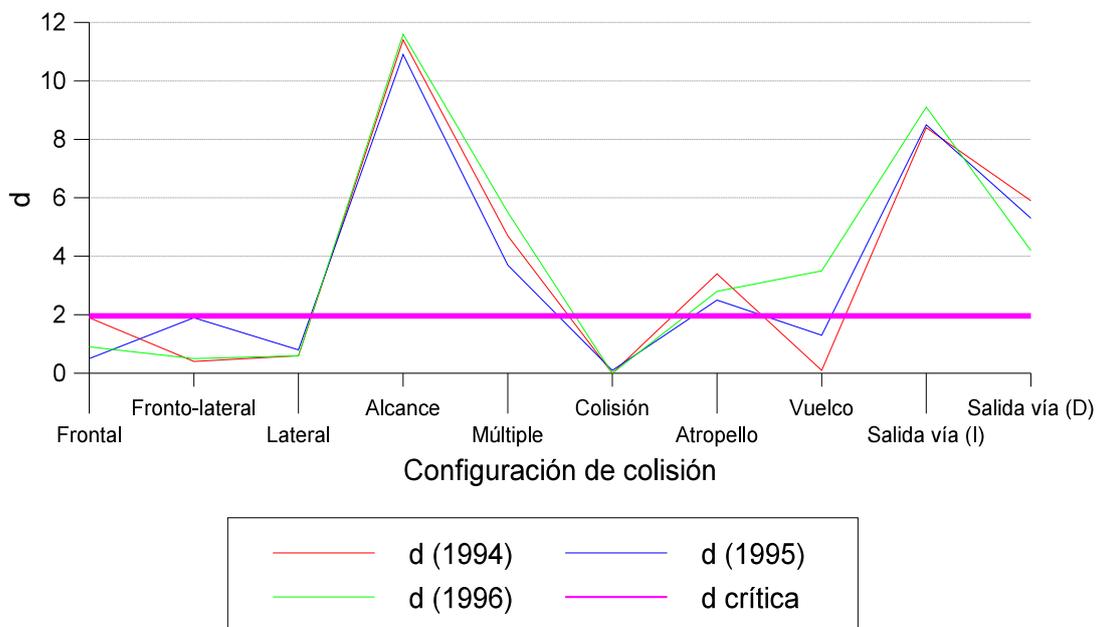


Figura 4.18.- Medida de la discrepancia “d” entre P3’ y P4’ según el atributo “configuración de la colisión”.

El análisis efectuado aporta los siguientes resultados:

- La comparación de las poblaciones P3' y P4' desde el punto de vista de la configuración de la colisión proporciona valores de la medida de la discrepancia d superiores al valor crítico en los casos siguientes:
 - Colisiones por alcance.
 - Colisiones múltiples o en caravana.
 - Atropello.
 - Colisiones por salida de la vía.
- La evolución del valor de la medida de discrepancia según la configuración de la colisión se mantiene durante los tres años evaluados en esta investigación.

A la vista de estos resultados puede concluirse lo siguiente:

- Existen diferencias significativas entre las dos alineaciones comparadas en autovía, desde el punto de vista de la configuración de la colisión, en las configuraciones de colisión predominantes en este tipo de vía.

Así, las solicitudes laterales generadas por la geometría de la alineación en curva favorecen las salidas de vía por velocidad inadecuada. Junto a esto, la influencia del tipo de alineación sobre las configuraciones de colisión frontal y frontolateral es poco significativa. Estos resultados son comparables a los obtenidos en el caso de autopista.

- Estas diferencias se mantienen durante los años de 1994, 1995 y 1996.

C.- Alineación recta frente a alineación curva en carretera convencional.

Tomando en consideración las proporciones según han sido mostradas en la *Tabla II.12.*, así como el número total de accidentes presentado en la *Tabla II.13.*, es obtenida la medida de la discrepancia para cada una de las configuraciones de colisión. Los valores así calculados son presentados en la *Tabla II.16.* y en la siguiente figura (*Figura 4.19.*).

El análisis efectuado aporta los siguientes resultados:

- La comparación de las poblaciones P5' y P6' desde el punto de vista de la configuración de la colisión proporciona valores de la medida de la discrepancia d superiores al valor crítico en la mayoría de los casos, exceptuando la configuración de colisión frontolateral.
- La evolución del valor de la medida de discrepancia según la configuración de la colisión se mantiene durante los tres años evaluados en el presente trabajo.

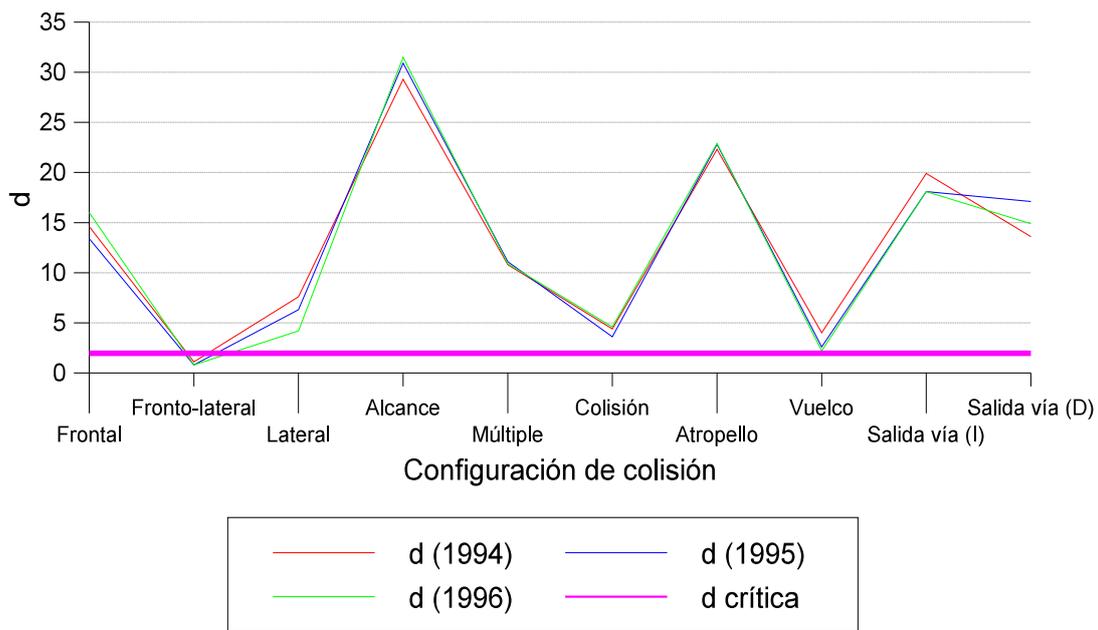


Figura 4.19.- Medida de la discrepancia “d” entre P5' y P6' según el atributo “configuración de la colisión”.

A la vista de estos resultados puede concluirse lo siguiente:

- Existen diferencias significativas entre las dos alineaciones comparadas en carretera convencional desde el punto de vista de la configuración de la colisión.

Así, las solicitudes laterales generadas por la geometría de la alineación en curva favorecen las salidas de vía por velocidad inadecuada. Junto a esto, y a diferencia de lo acontecido en autopistas y autovías, las frecuentes invasiones en este tipo de vía del carril de sentido contrario durante los adelantamientos se ven dificultadas significativamente por la disminución de visibilidad en las alineaciones curvas.

- Estas diferencias se mantienen durante los años de 1994, 1995 y 1996.

4.2.2.2.4.- Comparación de poblaciones según gravedad de la colisión.

Continuando con la comparación de las poblaciones previamente descritas, se evalúa el atributo *distribución de accidentes según la gravedad de la colisión*. En este caso, y teniendo en cuenta que todos los accidentes contenidos en el cuestionario estadístico han tenido alguna víctima (heridos leves, heridos graves y/o muertos), son considerados los tipos de colisiones mostrados en el Apartado 4.2.2.1.4.

Este contraste requiere, en primer lugar, el cálculo de las proporciones de accidentes según dicho atributo para cada una de las subpoblaciones definidas. Dicho análisis de proporciones es presentado por separado para cada uno de los años considerados: 1994, 1995 y 1996, como se muestra en las *Figuras 4.20., 4.21., 4.22.* (1994), *Figuras II.15., II.16., II.17., II.18., II.19. y II.20.* (1995 y 1996), así como en la *Tabla II.17.* Junto a esto, es presentado en la *Tabla II.13.* el número total de accidentes en cada una de las subpoblaciones analizadas.

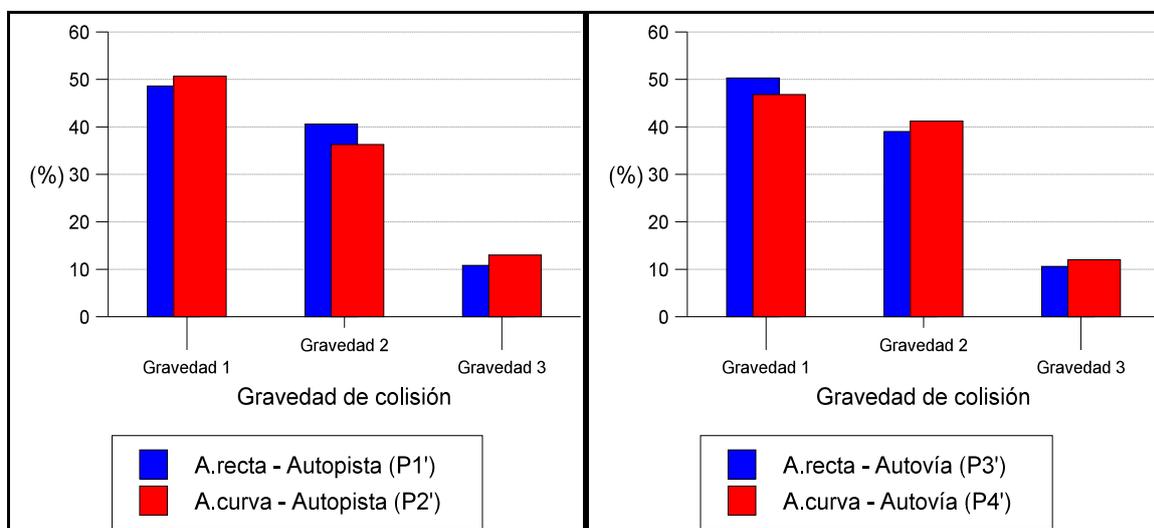


Figura 4.20.- Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos de alineación en autopista (1994).

Figura 4.21.- Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos de alineación en autovía (1994).

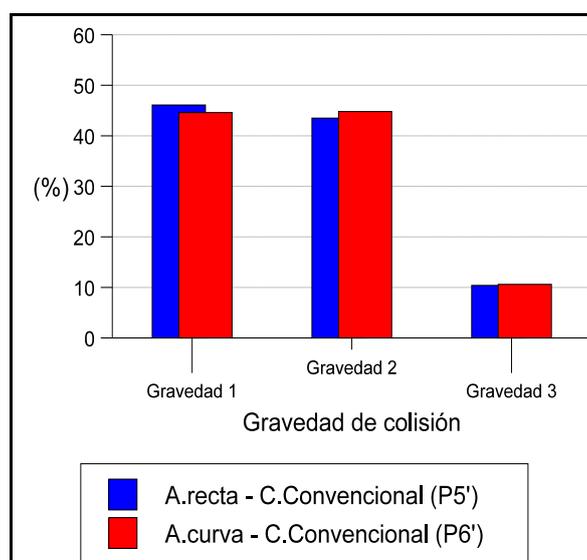


Figura 4.22.- Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos de alineación en carretera convencional (1994).

Tras el cálculo de estas proporciones y teniendo en cuenta el número total de accidentes, se procede a la *comparación de poblaciones* según el atributo analizado. Dicha técnica de contraste permite la comparación únicamente de dos poblaciones, por lo que serán realizados los contrastes definidos en el *Apartado 4.2.2.2.3*.

El contraste desarrollado así como los resultados obtenidos se presentan en los siguientes apartados.

A.- Alineación recta frente a alineación curva en autopista.

Tomando en consideración las proporciones según han sido mostradas en la *Tabla II.17.*, así como el número total de accidentes presentado en la *Tabla II.13.*, es obtenida la medida de la discrepancia para cada nivel de gravedad de colisión. Los valores así calculados son presentados en la *Tabla II.18.* y en la siguiente figura (*Figura 4.23.*).

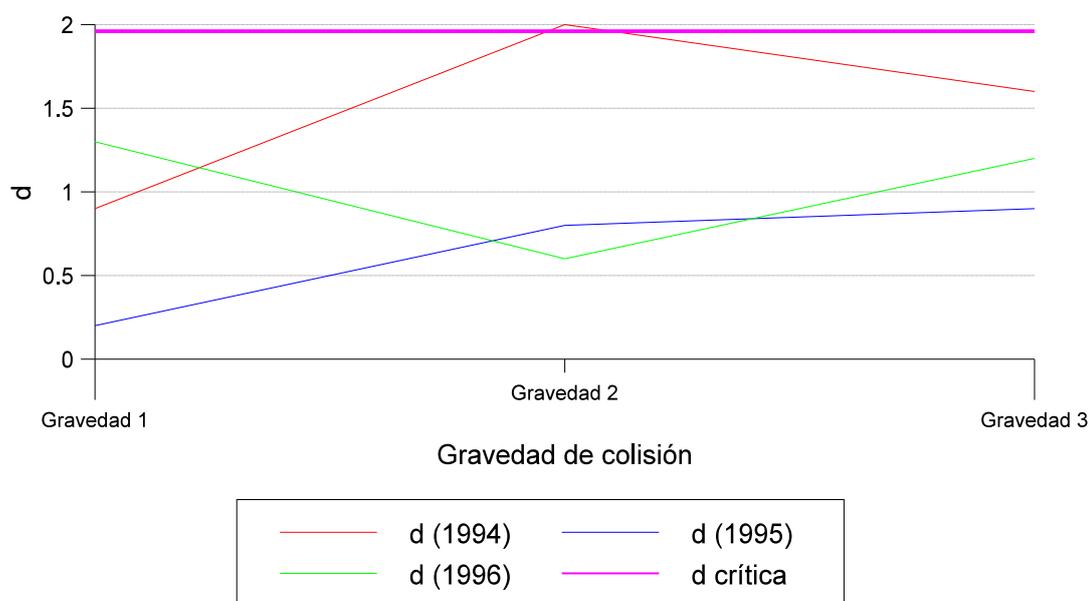


Figura 4.23.- Medida de la discrepancia “d” entre P1' y P2' según el atributo “gravedad de la colisión”.

El análisis efectuado aporta los siguientes resultados:

- La comparación de las poblaciones P1' y P2' desde el punto de vista de la gravedad de la colisión proporciona valores de la medida de la discrepancia d inferiores al valor crítico en la mayoría de los casos.
- La evolución del valor de la medida de discrepancia según la gravedad de la colisión no se mantiene durante los tres años evaluados en el presente trabajo.

A la vista de estos resultados puede concluirse lo siguiente:

- No existen diferencias significativas entre las dos alineaciones comparadas en autopista, desde el punto de vista de la gravedad de la colisión.

B.- Alineación recta frente a alineación curva en autovía.

Tomando en consideración las proporciones según han sido mostradas en la *Tabla II.17.*, así como el número total de accidentes presentado en la *Tabla II.13.*, es obtenida la medida de la discrepancia para cada nivel de gravedad de colisión. Los valores así calculados son presentados en la *Tabla II.19.* y en la siguiente figura (*Figura 4.24.*).

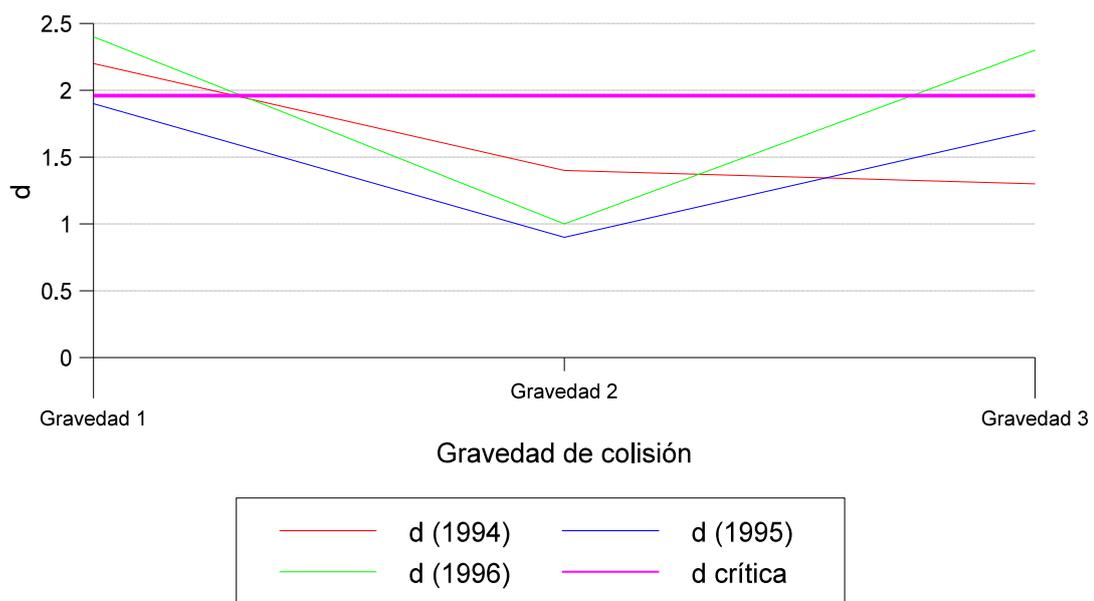


Figura 4.24.- Medida de la discrepancia “d” entre P3’ y P4’ según el atributo “gravedad de la colisión”.

El análisis efectuado aporta los siguientes resultados:

- La comparación de las poblaciones P3’ y P4’ desde el punto de vista de la gravedad de la colisión proporciona valores de la medida de la discrepancia d inferiores al valor crítico en la mayoría de los casos.
- La evolución del valor de la medida de discrepancia según la gravedad de la colisión se mantiene durante los tres años evaluados en esta investigación.

A la vista de estos resultados puede concluirse lo siguiente:

- No existen diferencias significativas entre las dos alineaciones comparadas en autovía, desde el punto de vista de la gravedad de la colisión.

C.- Alineación recta frente a alineación curva en carretera convencional.

Tomando en consideración las proporciones según han sido mostradas en la *Tabla II.17.*, así como el número total de accidentes presentado en la *Tabla II.13.*, es obtenida la medida de la discrepancia para cada nivel de gravedad de colisión. Los valores así calculados son presentados en la *Tabla II.20.* y en la siguiente figura (*Figura 4.25.*).

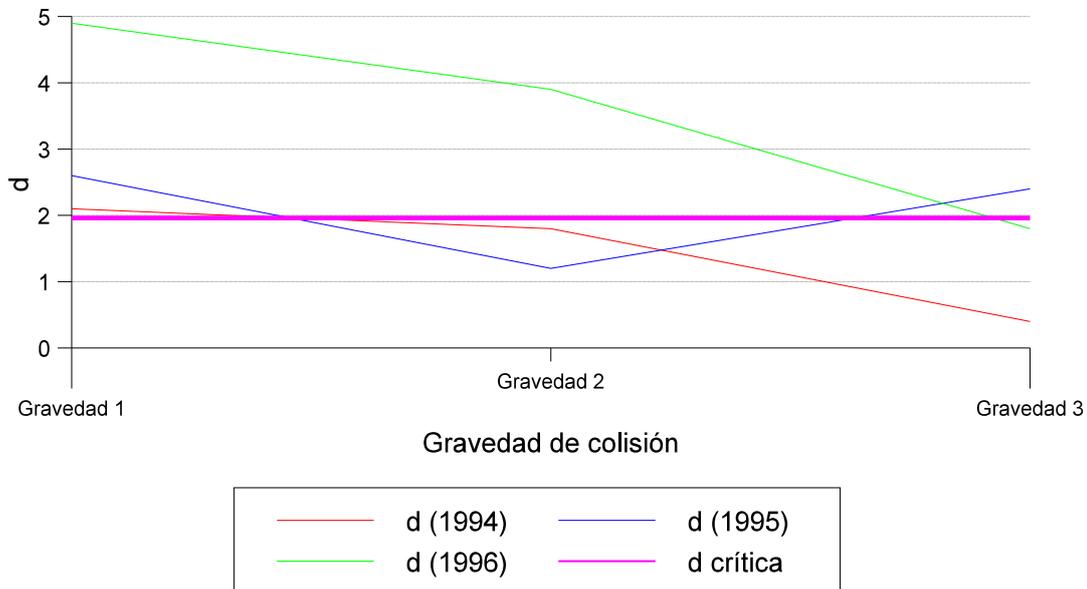


Figura 4.25.- Medida de la discrepancia “d” entre P5' y P6' según el atributo “gravedad de la colisión”.

El análisis efectuado aporta los siguientes resultados:

- La comparación de las poblaciones P5' y P6' desde el punto de vista de la gravedad de la colisión proporciona valores de la medida de la discrepancia d inferiores al valor crítico, excepto en el caso del nivel de gravedad 1.
- La evolución del valor de la medida de discrepancia según la gravedad de la colisión no se mantiene durante los tres años evaluados en la presente Tesis.

A la vista de estos resultados puede concluirse lo siguiente:

- No existen diferencias significativas entre las dos alineaciones comparadas en carretera convencional, desde el punto de vista de la gravedad de la colisión.

4.2.3.- DEFINICIÓN DEL ÁMBITO DE APLICACIÓN DE LA PRESENTE INVESTIGACIÓN.

El análisis de influencia sobre la accidentalidad de las dos propiedades de la población consideradas *-tipo de vía, trazado en planta-*, ha aportado los siguientes resultados:

A.- Tipo de vía.

- Existen diferencias significativas entre vías urbanas (y travesías) frente a vías interurbanas, tanto desde el punto de vista de la configuración de la colisión como de la gravedad de la misma.
- Dentro de las vías interurbanas, no existen diferencias significativas entre autopistas frente a autovías, ni desde el punto de vista de la configuración de la colisión ni de la gravedad de la misma.
- Dentro de las vías interurbanas, existen diferencias significativas entre autopistas y autovías frente a carreteras convencionales, tanto desde el punto de vista de la configuración de la colisión como de la gravedad de la misma.
- En el presente análisis no ha sido tenido en cuenta el tipo de vía interurbana “vía rápida”, dado que en España existe un número muy reducido de kilómetros de vía que verifiquen estas especificaciones.

B.- Características del trazado en planta: recta frente a curva.

- Existen diferencias significativas entre alineaciones rectas y alineaciones curvas, tanto en autopista como en autovía y en carretera convencional, desde el punto de vista de la configuración de la colisión.
- Dichas diferencias entre alineaciones no resultan significativas desde el punto de vista de la gravedad de la colisión.

Tomando esto en consideración, y con objeto de definir una población lo más homogénea posible desde el punto de vista de los factores permanentes del medio de influencia en la ocurrencia de accidentes, puede concluirse lo siguiente:

- Deben ser analizadas por separado las vías urbanas (y travesías) frente a las vías interurbanas. Junto a esto y dentro de las vías interurbanas, pueden tratarse de modo similar las autopistas y autovías, frente a las carreteras convencionales.
- Deben ser tratadas de modo diferente desde el punto de vista de los factores permanentes del medio las alineaciones rectas frente a las alineaciones curvas.

Junto a esto, y para la definición del ámbito de aplicación de la presente Tesis Doctoral, son tenidas en cuenta las siguientes características:

- Los accidentes en vías urbanas y travesías están frecuentemente ocasionados por la congestión del tráfico, las frecuentes intersecciones entre calles y los atropellos de peatones (como ha sido mostrado en las *Figuras 4.2., II.1. y II.2.*, con predominio de las colisiones por alcance, frontolaterales y atropellos), por lo que las especificaciones geométricas del trazado ejercen una influencia secundaria.
- La mayor concentración de accidentes por kilómetro en vías interurbanas tiene lugar en autopistas y autovías frente a las carreteras convencionales. Esto se observa en la siguiente tabla (*Tabla 4.1.*).

| <i>Número de accidentes por kilómetro</i> | | |
|---|----------------|-----------------------|
| <i>Autopista</i> | <i>Autovía</i> | <i>C.Convencional</i> |
| 1.11 | 0.99 | 0.16 |

Tabla 4.1.- Número de accidentes por kilómetro en vías interurbanas (1994).

- Los accidentes de mayor gravedad -número de muertos por accidente-, en la mayoría de las configuraciones de colisión, se producen en vías interurbanas frente a vías urbanas y travesías, así como en autopistas y autovías frente a carreteras convencionales. Esto es mostrado en las siguientes figuras (*Figuras 4.26. y 4.27.*).

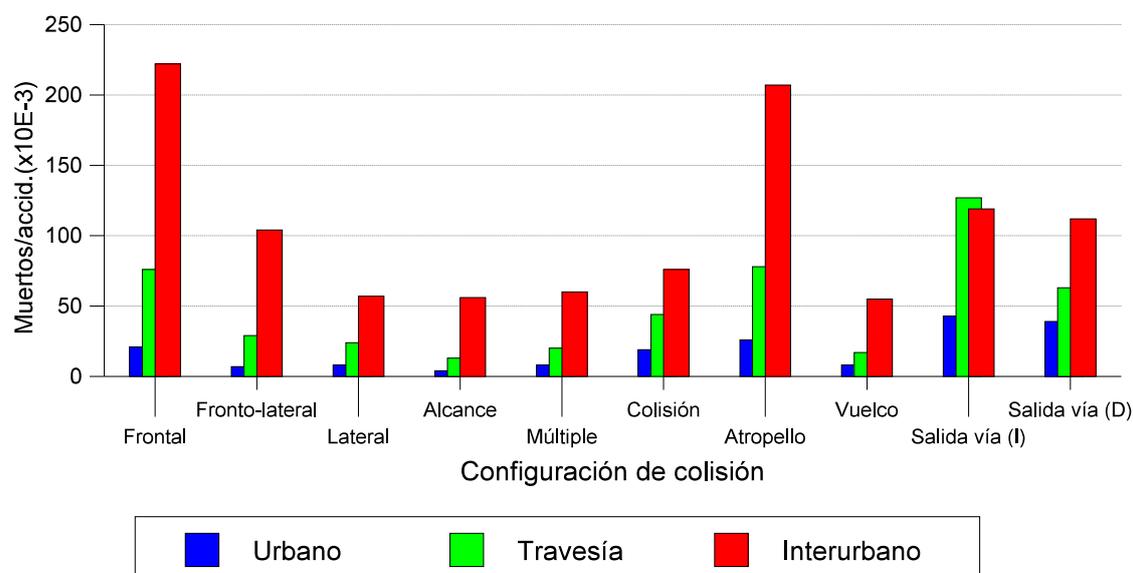


Figura 4.26.- Número de muertos por accidente por configuración de la colisión, según tipos principales de vías (1994).

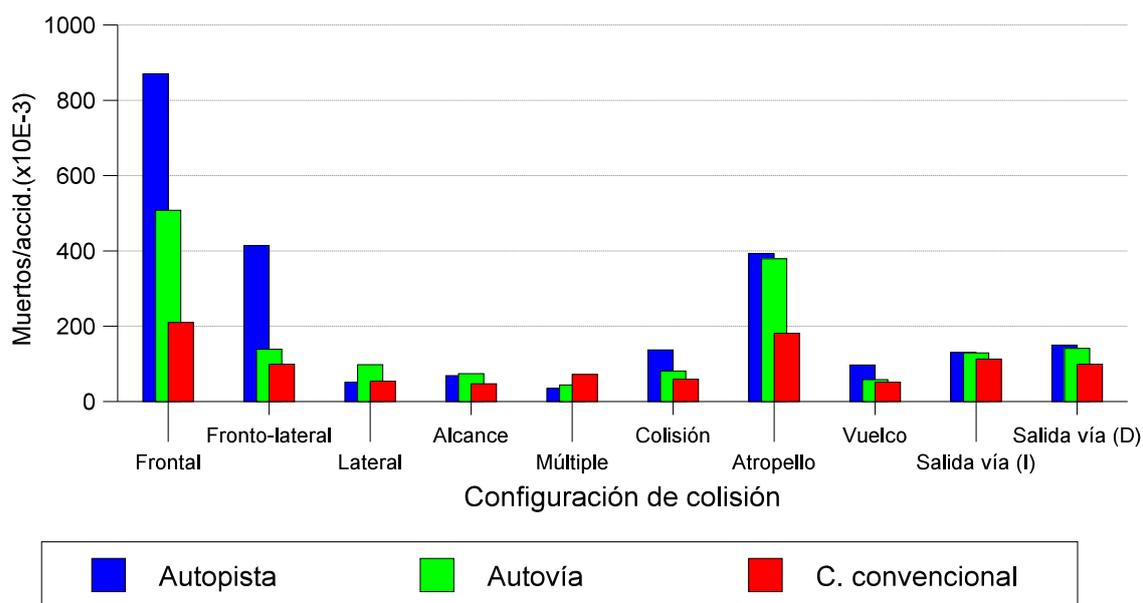


Figura 4.27.- Número de muertos por accidente por configuración de la colisión, según tipos de vías interurbanas (1994).

- Las instalaciones para la realización del presente trabajo de investigación están situadas en la ciudad de Madrid. Dada la configuración radial de la red de carreteras de España, las principales autovías tienen su punto de partida en esta ciudad, lo que facilita la selección de itinerarios para su medición. Frente a esto, existen pocas autopistas en las proximidades de Madrid.

- La metodología de medición de los factores permanentes del medio mediante el sistema de medida desarrollado en el presente trabajo (basado en un vehículo turismo de serie) presenta menores dificultades de aplicación en vías de varios carriles en cada sentido de circulación, dado que el resto de vehículos del flujo de tráfico que circulan en su mismo sentido pueden adelantar fácilmente al vehículo de medida sin que éste perturbe de manera significativa dicho flujo. Esto se debe, como será descrito en los *Apartados 5. y 6.*, a que la velocidad del vehículo durante la medición (aproximadamente a 80 km/h), suele ser inferior a la velocidad promedio de circulación en autopistas y autovías.

Todo esto considerado, se define como ámbito de aplicación de esta investigación el siguiente:

- *Tipo de vía:* *autovía*. Esta elección se debe a la concentración y gravedad de los accidentes ocurridos en este tipo de vía, la accesibilidad de itinerarios para el estudio y la facilidad de medición de los factores del medio mediante el sistema de medida desarrollado.
- *Tipo de alineación:* *curva*. Esta elección está motivada por la notable influencia de los factores permanentes del medio sobre los accidentes ocurridos en esta alineación, cuyas especificaciones de diseño condicionan las sollicitaciones de aceleración lateral sobre el vehículo no compensadas por el peralte y la distancia de visibilidad

geométrica.

No obstante, las especificaciones de las alineaciones rectas serán tenidas en cuenta como tramo previo a cada alineación curva.

De este modo, la población considerada en la presente Tesis Doctoral quedará definida como sigue:

Tramos en curva de autovías españolas, donde serán identificados los principales factores de riesgo potencial asociados a las condiciones permanentes del medio presentes en los mismos, los cuales condicionan el comportamiento de los conductores influyendo sobre la ocurrencia de accidentes de tráfico.

4.3.- La variable respuesta.

La variable respuesta constituye la propiedad observada en la población cuya variabilidad debe ser explicada por el modelo. En la práctica sólo será explicada una parte de dicha variabilidad, la cual constituye la parte sistemática o previsible del modelo. La diferencia entre los valores de la variable respuesta y esta componente sistemática se define como la parte aleatoria del modelo, y recoge el efecto de todas las variables no consideradas en el mismo.

La presente Tesis aborda la propiedad “*ocurrencia de accidentes*” en la población definida en el apartado precedente (*Apartado 4.2.3.*).

El análisis de dicha propiedad puede ser realizado, de acuerdo a los trabajos de investigación desarrollados en este área (*Mountain, L; Fawaz, B., 1996 [34], Summersgill, I.; Layfield, R. E., 1996 [48], Karlsson, CH.; Schmeling, E., 1994 [22]*), desde una doble perspectiva:

- Predicción del número de accidentes acumulados en tramos de curva en autovía.
- Predicción de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva en autovía.

Esto motiva la definición en el presente trabajo de dos variables respuesta de distinta naturaleza (como será tratado en detalle en el *Apartado 7.*):

- *Variable respuesta discreta*: frecuencia de accidentes en tramos de curva en autovía.
- *Variable respuesta binaria*: tramo de curva de autovía de concentración de accidentes, cuyos estados quedan definidos como sigue:
 - a) *Estado 0*: el número de accidentes acumulado en el tramo de curva no es estadísticamente significativo.
 - b) *Estado 1*: el número de accidentes acumulado en el tramo de curva es estadísticamente significativo.

En la definición de ambas variables respuesta son tenidos en cuenta los criterios mostrados seguidamente.

4.3.1.- PERÍODO DE ACUMULACIÓN DE ACCIDENTES.

Para la definición de dichas variables son tomados en consideración los accidentes con víctimas ocurridos en los itinerarios en estudio durante los años de 1994, 1995 y 1996, procedentes del *Cuestionario Estadístico de Accidentes de Circulación con Víctimas*, según se recoge en el *Anexo I*. La elección del citado período ha estado condicionada por el requerimiento de asegurar la ausencia de modificaciones en las condiciones de diseño de los itinerarios de autovía analizados durante el mismo, el cual se pondría en riesgo si se considera un período de

tiempo más dilatado.

4.3.2.- LONGITUD DE TRAMO DE CURVA.

Como ha sido presentado en los apartados precedentes, el análisis de modelización desarrollado en este trabajo se centra en el estudio de los factores permanentes del medio que influyen sobre la ocurrencia del accidente en tramos de curva en autovías. *El tramo de curva* es definido en este trabajo de investigación como sigue y como se presenta en la siguiente figura (Figura 4.28.):

“Tramo de curva.- Sección de la calzada cuyo radio del trazado en planta es inferior a 1000 metros ($R < 1000$ m). Dicha sección es ampliada en 100 metros de longitud en su zona posterior (zona de influencia de la misma).”

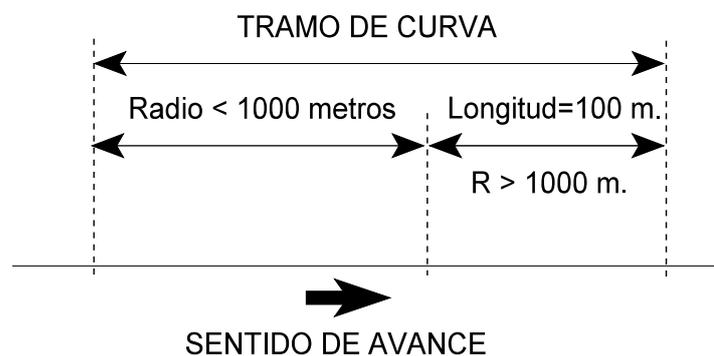


Figura 4.28.- Definición de “tramo de curva”.

Los criterios adoptados para la definición de dicho tramo de curva son descritos en los siguientes apartados.

4.3.2.1.- Radio de curva crítico.

La elección del valor crítico del radio de 1000 metros se basa en el concepto de “*velocidad máxima en curva*” definida en la *Instrucción de Carreteras 8.1. IC para la señalización de las carreteras [32]* (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo).

De este modo, se define la *velocidad máxima en curva* v_s (km/h) como la máxima velocidad a la que una curva de radio R (m) y peralte p (%) puede ser recorrida con seguridad, y que corresponde a una aceleración centrífuga no compensada por el peralte igual a la cuarta parte de la aceleración de la gravedad. La expresión matemática de dicha velocidad se muestra en la siguiente expresión:

$$v_s = \sqrt{1,27 \cdot R \cdot (p + 25)} \quad (4.16.)$$

Y así, se define el concepto de *radio de curva crítico* como sigue:

“Radio de curva crítico.- Valor del radio tal que considerando la curva no peraltada (condición más desfavorable: peralte = 0%, excluyendo condición de contraperalte), permite circular al vehículo tipo (según se define en la Instrucción de Carreteras 8.1. IC para la señalización de las carreteras [32], y se presenta en el Anexo IV) a su velocidad máxima en llano ($v_{máx.} = 175$ km/h) en condiciones de seguridad, esto es, de modo que el vehículo no experimente una aceleración centrífuga sin compensar por el peralte superior a la cuarta parte de la aceleración de la gravedad.”

4.3.2.2.- Longitud de influencia.

La elección de una longitud de influencia de 100 metros está basada en el concepto de “*curva de acuerdo*” definida en la *Instrucción de Carreteras 3.1. IC. Trazado de carreteras [30]* (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo).

Así, las curvas constan, en general, de una curva central circular y de dos curvas de acuerdo (clotoides) que permiten la transición gradual de la trayectoria rectilínea a la curvilínea de radio constante. La expresión matemática de dicha curva de acuerdo se presenta a continuación.

$$R \cdot L = A^2 \quad (4.17.)$$

donde:

- R: radio de curvatura (m).
- L: longitud (m).
- A: parámetro de la clotoide (m).

Las limitaciones contenidas en dicha Instrucción acerca de los parámetros de dicha ecuación se listan brevemente en los siguientes apartados.

Limitaciones del parámetro "A" de la clotoide.

- a) Por limitación de la aceleración centrífuga: la variación de la aceleración centrífuga debe limitarse a un valor "J", aceptable desde el punto de vista de la comodidad.

$$A \geq \sqrt{\frac{v \cdot R_0}{46,656 \cdot J} \cdot \left[\frac{v^2}{R_0} - 127 \cdot p \right]} \quad (4.18.)$$

b) Por razón de estética:

$$A \geq \frac{R_0}{3} \quad (4.19.)$$

c) Por razón de transición del peralte: el cambio de una sección transversal en recta a la sección en curva circular requiere una longitud que permita efectuar la transición del bombeo al peralte de valor "p", sin superar un determinado valor máximo de la inclinación que cualquier borde de la calzada tenga con relación al eje de la calzada.

$$A \geq \sqrt{\frac{n \cdot a}{2 \cdot \xi} \cdot R_0 \cdot p} \quad (4.20.)$$

donde:

- v: velocidad específica (km/h).
- p: peralte en tanto por uno.
- n: coeficiente variable con el número de carriles.
- a: ancho de la calzada (m).
- ξ: inclinación del borde la calzada en relación con el eje de la carretera en tanto por uno.
- R₀: radio de la curva contigua (m).
- J: variación de la aceleración centrífuga (m/s³).

Longitud mínima de la curva de acuerdo.

a) Por limitación de la aceleración centrífuga:

$$L_0 \geq \frac{v}{46,656 \cdot J} \cdot \left[\frac{v^2}{R_0} - 127 \cdot p \right] \quad (4.21.)$$

b) Por razón de estética:

$$L_0 \geq \frac{R_0}{9} \quad (4.22.)$$

c) Por razón de transición del peralte:

$$L_0 \geq \frac{n \cdot a}{2 \cdot \xi} \cdot p \quad (4.23.)$$

En el cálculo de "A" y "L₀", se tomará el mayor de los valores obtenidos de los párrafos anteriores.

Tomando esto en consideración, se define el concepto de *longitud de influencia* como sigue:

“Longitud de influencia.- Longitud mínima de curva de acuerdo considerando la curva no peraltada (condición más desfavorable: peralte = 0%, excluyendo condición de contraperalte), la velocidad máxima permitida de circulación en autovía (120 km/h), y el radio de curva crítico (1000 metros).”

De este modo, y utilizando los parámetros y expresiones mostradas, se obtiene un valor de la longitud de influencia de 100 metros.

4.4.- Las variables explicativas del modelo.

Tras la definición de la variable respuesta del modelo mostrado en el apartado precedente, la etapa final de la fase de *planteamiento del problema* consiste en la determinación de las posibles variables explicativas objetivas integrantes de la parte sistemática o previsible de dicho modelo. Dichas variables son definidas a partir de los principales factores permanentes del medio de influencia en la ocurrencia de accidentes en la población en estudio.

La identificación de dichos factores permanentes, así como la definición de las variables explicativas objetivas a partir de ellos, se presenta en los siguientes apartados.

4.4.1.- IDENTIFICACIÓN DE LOS FACTORES PERMANENTES DEL MEDIO.

El proceso de identificación de los factores del medio de influencia en la ocurrencia de accidentes está condicionado por el ámbito de aplicación de la investigación (según ha sido definido en el *Apartado 4.2.*). Así, los factores inicialmente considerados son presentados en la tabla siguiente (*Tabla 4.2.*), y descritos en los apartados mostrados a continuación.

| PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LA CALZADA |
|--|
| <i>Trazado en planta</i> |
| • Longitudes de recta y curva |
| • Radio |
| • Peralte |
| • Transiciones de radio y peralte |
| <i>Trazado en alzado</i> |
| • Longitud de la rasante |
| • Inclinación de la rasante: rampa y pendiente |
| • Acuerdos de las rasantes |
| <i>Trazado combinado en planta y alzado</i> |
| <i>Sección transversal</i> |
| • Número y anchura de carriles |
| • Anchura del arcén |
| • Vías adicionales: vías lentas, carril para bicicletas y ciclomotores |

Tabla 4.2.- Factores permanentes del medio de influencia en la ocurrencia de accidentes en tramos de curva en autovía.

| |
|--|
| PARÁMETROS DE LOS RAMALES DE ACCESO/SALIDA |
| <i>Configuración del carril de acceso/salida</i> |
| <i>Punto de intersección con vía principal</i> |
| SEÑALIZACIÓN |
| VISIBILIDAD GEOMÉTRICA DE ELEMENTOS DE LA VÍA |
| <i>Tramo de curva</i> |
| <i>Ramales</i> |
| <i>Señalización</i> |
| <i>Distancia máxima de visibilidad</i> |
| INTENSIDAD DE TRÁFICO |

Tabla 4.2.- Factores permanentes del medio de influencia en la ocurrencia de accidentes en tramos de curva en autovía (cont.).

4.4.1.1.- Parámetros geométricos de la calzada.

4.4.1.1.1.- *Trazado en planta.*

El elemento más importante del trazado en planta lo constituye la curva. Las características de la alineación curva ejercen gran influencia en la ocurrencia de accidentes, como ha sido mostrado en el *Apartado 4.2.2.2.*, especialmente debido a los siguientes aspectos:

- Aceleración lateral sobre el vehículo no compensada por el peralte, lo cual genera requerimientos de adherencia en el neumático. Estos requerimientos pueden llegar a generar situaciones de riesgo, debido a:
 - Velocidades de circulación elevadas para las características de la vía.
 - Ángulo de inclinación de peralte contrario al sentido de giro de la curva (curvas contraperaltadas), lo cual se produce en algunas ocasiones en tramos de curvas enlazadas.
- Limitaciones en la distancia de visibilidad, en combinación con el trazado en alzado.
- Adecuación de la señalización a las características de la curva.

Esto determina la curva como un elemento potencial de concentración de accidentes.

Los parámetros de diseño más significativos definatorios de esta alineación curva son los siguientes:

- Longitud de curva
- Longitud de recta precedente.
- Radio.
- Peralte.
- Transiciones de radio y peralte.

Las características más importantes de dichos parámetros, según las definiciones contenidas en la *Instrucción de carreteras 3.1 - IC: Trazado de carreteras [30]*, son mostradas seguidamente.

- *Longitudes de curva y de recta precedente.*

Las grandes longitudes de las alineaciones rectas o curvas de radio superior a 10000 m producen sensación de monotonía y molestia, especialmente en la noche por deslumbramiento de faros.

Por ello, conviene que se cumplan las siguientes especificaciones, en función de la naturaleza del terreno:

- *Terreno llano*: longitudes máximas entre 500 y 2000 m (según la velocidad específica).
- *Terreno ondulado o accidentado*: sustituir rectas por curvas de radio entre 5000 y 10000 m, o mantener criterio de terreno llano.

En general, las longitudes mínimas estarán entre 50 y 200 m (salvo excepciones).

- *Radio de alineaciones curvas.*

Las curvas constan, en general, de una curva central circular y de dos curvas de acuerdo (clotoides) que permiten la transición gradual de la trayectoria rectilínea a la curvilínea de radio constante. Las características esenciales de una curva circular son:

- R_c : radio de la curva circular en m.
- D_c : longitud del arco o desarrollo en m.
- p : peralte en tanto por uno.
- f_t : coeficiente de rozamiento transversal.

El radio de una curva circular se determina en función de la velocidad específica del tramo, de forma que no se alcance la situación límite de deslizamiento. Dicha velocidad es la máxima que puede mantenerse en condiciones de seguridad en una curva circular de longitud suficiente, cuando las circunstancias meteorológicas y de tráfico son tan favorables que las únicas limitaciones vengan determinadas por las características geométricas del tramo.

La velocidad de deslizamiento en curva viene dada por la siguiente expresión:

$$v_{m\acute{a}x.desl.} = 11,27 \cdot \sqrt{(tg\alpha + f_t) \cdot R} \quad (4.24.)$$

- α : ángulo de peralte.
- f_t : coeficiente de rozamiento transversal.
- R: radio de la curva en m.
- $v_{m\acute{a}x.desl.}$: velocidad máxima de deslizamiento en km/h.

Los valores de los radios mínimos están determinados en función de la velocidad específica y del tipo de vía.

• *Peralte de alineaciones curvas*

Otra característica importante de la alineación curva lo constituye el *peralte* de la misma, como parámetro de la calzada para la compensación de la aceleración transversal. Se adoptarán los peraltes siguientes, en función de:

- Tipo de vía.
- Presencia o no de hielo o nieve.
- Radio y velocidad específica.

De este modo, y teniendo en cuenta el tipo de vía, se distingue lo siguiente:

- En *autopistas y autovías*, siempre que el radio no rebase 900 m; y en *vías rápidas y carreteras convencionales* (estas últimas fuera de poblado), siempre que el radio no rebase 450 m:
 - ▶ 10 %, donde no exista problema de hielo o nieve.
 - ▶ 8 %, donde exista problema de hielo o nieve.
- En *vías urbanas*, siempre que el radio no rebase de 90 m:
 - ▶ 5 %, como norma general.
 - ▶ Igual que en alineación recta, donde la velocidad específica no rebase 40 km/h.
- En *nudos*:
 - ▶ 8 % en lazos.
 - ▶ 5 % en los demás tipos de ramal y en vías de giro canalizadas.
 - ▶ 3 % en vías de giro sin canalizar.

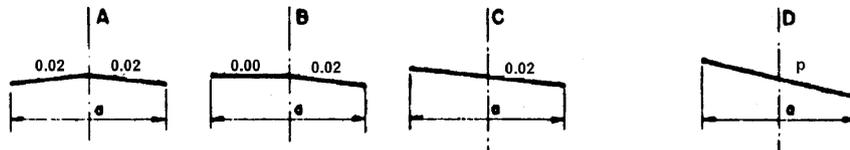
• *Transición del radio*

Las especificaciones de diseño de las curvas de transición del radio han sido descritas en el *Apartado 4.3.2.2.*

• *Transición del peralte*

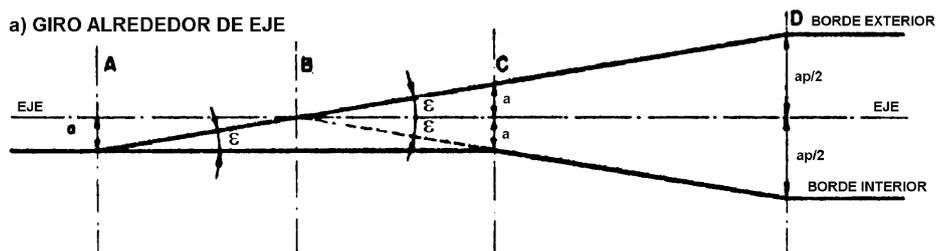
Finalmente, los métodos básicos de *transición del peralte* se muestran en la siguiente figura (Figura 4.29.).

SECCIÓN TRANSVERSAL

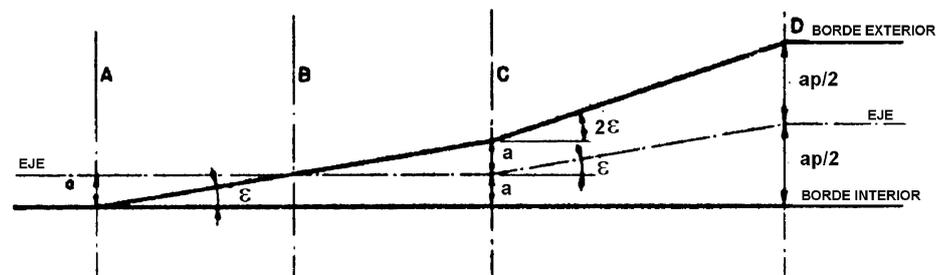


PERFILES LONGITUDINALES DEL EJE Y DE LOS BORDES

a) GIRO ALREDEDOR DE EJE



b) GIRO ALREDEDOR DEL BORDE INTERIOR



c) GIRO ALREDEDOR DEL BORDE EXTERIOR

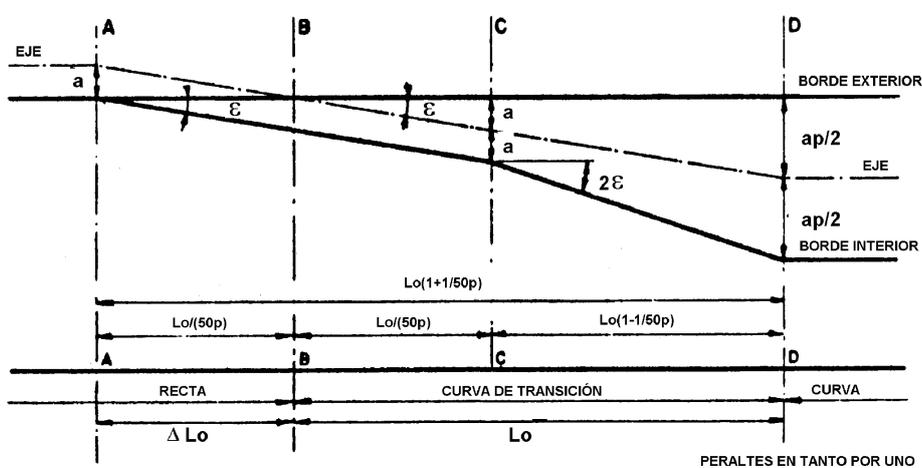


Figura 4.29.- Métodos básicos de transición del peralte.

4.4.1.1.2.- *Trazado en alzado.*

El principal elemento del trazado en alzado lo forma el perfil de rasantes (rampas y pendientes). Las características del mismo ejercen influencia en la ocurrencia de accidentes, especialmente debido a lo siguiente:

- Limitaciones en la distancia de visibilidad, en combinación con el trazado en planta.
- Rampas (perfil ascendente) pronunciadas y de gran longitud, lo que favorece la aparición de vehículos lentos, fundamentalmente vehículos industriales de gran tonelaje. Esto provoca situaciones de riesgo de accidentes, motivado por:
 - Congestionamientos: da lugar a colisiones por alcance y salidas de vía, en combinación con visibilidad reducida en el tramo precedente.
 - Maniobras de adelantamientos múltiples.
- Pendientes (perfil descendente) pronunciadas y de gran longitud, lo que induce un incremento de la velocidad de circulación. Esto puede generar situaciones de riesgo elevado, especialmente si al final del tramo descendente existe una curva y/o incorporaciones o salidas.

Los parámetros de diseño más significativos definitorios de este perfil de rasantes son los siguientes:

- Longitud de rampas.
- Inclinación de la rasante: rampa y pendiente.
- Acuerdos de las rasantes.

Las características de dichos parámetros, según las definiciones contenidas en la *Instrucción de carreteras 3.1 - IC: Trazado de carreteras [30]*, son mostradas seguidamente.

- *Longitud máxima de rampa*

Los valores de rampas máximas admisibles, mostrados en la *Tabla 4.3.* pueden mantenerse, si las condiciones del proyecto lo aconsejan, en una longitud indefinida.

En general, siempre que sea económicamente aceptable, no se proyectarán rampas en las que la disminución de la velocidad del vehículo pesado tipo sea superior a 25 km/h. Si la rampa va precedida por una pendiente, la disminución de la velocidad admisible puede subir en 10÷15 km/h.

• *Inclinación máxima de rampa*

La inclinación máxima de las rampas se define como sigue:

- Las rampas máximas admisibles se muestran en la siguiente tabla (*Tabla 4.3.*), procurando mantenerlas en un corto tramo de la alineación contigua

| Terreno | I.M.D. | | | |
|-----------------|-----------|-----------|------------|--------|
| | < 250 | 250 - 500 | 500 - 2000 | > 2000 |
| | Rampa (%) | | | |
| Llano | 5 | 4 | 3 | 3 |
| Ondulado | 6 | 5 | 4 | 4 |
| Accidentado | 7 | 6 | 5 | 5 |
| Muy accidentado | 8 | 7 | 6 | 5 |

Tabla 4.3.- Rampas máximas admisibles.

- Si el radio es inferior a 100 m, es conveniente que la inclinación de la rasante sea inferior al 5 %.

• *Acuerdos de las rasantes*

Los parámetros que definen los acuerdos de las rasantes vienen caracterizados como sigue:

- Los acuerdos pueden ser cóncavos o convexos, y se utiliza la parábola. Los parámetros fundamentales de esta parábola son:

- ▶ K_v : longitud de curva por unidad de variación de la pendiente (m).
- ▶ Radio de curvatura en el vértice.

Los criterios de determinación de dichos acuerdos se establecen del modo siguiente:

- Por razón de visibilidad: si la longitud de la curva de acuerdo es superior a la distancia de visibilidad requerida, el parámetro " K_v " de la parábola vendrá dado por:

- *Acuerdos cóncavos:*

$$K_v = \frac{D^2}{2 \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2} \quad (4.25.)$$

- *Acuerdos convexos:*

$$K_v = \frac{D^2}{2 \cdot (h + D \cdot \frac{\alpha \cdot \pi}{180})} \quad (4.26.)$$

donde:

- ▶ h_1 : altura del punto de vista sobre la calzada (m).
- ▶ h_2 : altura del objeto sobre la calzada (m).
- ▶ h : altura de los faros del vehículo (m).
- ▶ α : ángulo en grados sexagesimales que el rayo de luz de mayor pendiente del cono de luz forma con el eje longitudinal del vehículo.
- ▶ D : distancia de visibilidad requerida (m).

Si la longitud de la curva de acuerdo es menor que la distancia de visibilidad requerida, la condición b) descrita a continuación da valores del parámetro " K_v " superiores a los que se obtendría para disponer de la distancia de visibilidad requerida.

b) Por razón de estética: la longitud de la curva de acuerdo (L_v) cumplirá la siguiente condición:

$$L_v \geq v$$

Cuando la longitud de la curva de acuerdo: $L_v = K_v \cdot \theta$ sea inferior a " v ", se determinará el valor " K_v " como:

$$K_v \geq v/\theta$$

donde " θ " es el valor absoluto de la diferencia algebraica de las pendientes en tanto por uno.

4.4.1.1.3.- *Trazado combinado en planta y alzado.*

Las características del trazado combinado ejercen influencia en la ocurrencia de accidentes, especialmente debido a las limitaciones en la distancia de visibilidad.

La inclinación de la rasante obliga a limitar el valor del peralte de forma que la línea de máxima pendiente no supere los valores mostrados en la siguiente figura (*Figura 4.30.*).

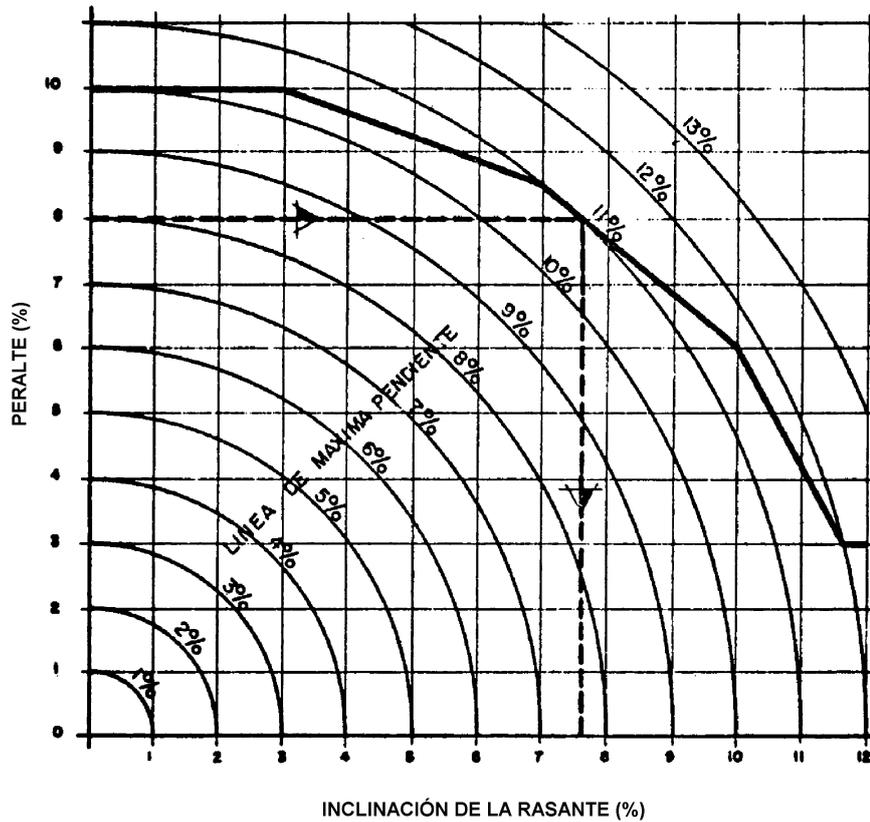


Figura 4.30.- Inclinación límite de la línea de máxima pendiente en las curvas.

Esta inclinación de la línea de máxima pendiente viene dada por la siguiente expresión:

$$\theta_{m\acute{a}x.} = \sqrt{\theta_p^2 + \theta_v^2} \quad (4.27.)$$

donde:

- $\theta_{m\acute{a}x.}$: ángulo de la línea de máxima pendiente combinada.
- θ_p : ángulo de peralte.
- θ_v : ángulo de rasante.

4.4.1.1.4.- *Sección transversal.*

Las características de la sección transversal del trazado influyen en la ocurrencia de accidentes, fundamentalmente motivado por:

- El número de carriles de la calzada, especialmente la existencia de más de un carril en cada sentido de circulación, reduce en gran medida el riesgo debido a los adelantamientos en los que se ven involucrados vehículos circulando en sentido contrario. Al mismo tiempo, posibilita la realización de maniobras evasivas de escape ante situaciones de riesgo de varios vehículos.

Así, como se observa en las *Figuras 4.3., II.2. y II.4.*, en carreteras convencionales y vías rápidas (con un carril en cada sentido de circulación) la proporción de accidentes frontales y frontolaterales, debidos en alto porcentaje a adelantamientos, es elevada frente a las autopistas y autovías.

- La existencia y ancho del arcén permite también la realización de maniobras evasivas de escape ante situaciones de riesgo, como adelantamientos o congestiones bruscas de la circulación, e incluso puede ejercer las funciones de carril de aceleración/deceleración en el caso de incorporaciones/salidas que carezcan del mismo.
- La existencia de vías adicionales, especialmente para la circulación de vehículos lentos en calzadas de carril único en cada sentido de circulación, reduce el riesgo de colisiones debidas a adelantamientos así como por alcance.

Los elementos básicos definitorios de la sección transversal de la calzada son los siguientes:

- Número y anchura de carriles.
- Anchura de arcén.
- Vías adicionales: vías lentas, carril para bicicletas y ciclomotores.

Las principales características de estos elementos, según las definiciones contenidas en la *Instrucción de carreteras 3.1 - IC: Trazado de carreteras [30]*, son mostradas seguidamente.

- *Sección transversal en recta*

En primer lugar, debe caracterizarse la *anchura de los carriles*. Ésta se determina en función del I.M.D., según la siguiente tabla (*Tabla 4.4.*). Si la velocidad específica es mayor de 100 km/h, la anchura será de 3,75 m, independientemente del I.M.D.

| <i>IMD</i> | ≤ 500 | $500 \div 5000$ | > 5000 |
|---------------------|------------|-----------------|----------|
| Ancho de carril (m) | 3,00 | 3,50 | 3,75 |

Tabla 4.4.- Ancho de carril en función del IMD.

Si son requeridos cambios de ancho de la calzada es conveniente la sucesión de: parábola cúbica, recta y parábola de 4^o orden.

La longitud de acuerdo será: $l \geq 40*(e)^{1/2}$, siendo aconsejable: $l \approx 80*(e)1/2$.

En cuanto al *número de carriles*, debe verificarse que:

- 2 carriles: son suficientes hasta I.M.D.<5000 veh./día.
- 3 carriles:
 - ▶ En general, no debe usarse carril central para ambos sentidos.
 - ▶ Justificable si $5000 < \text{I.M.D.} < 8000$ veh./día, y los estudios justifican un crecimiento lo suficientemente lento para que se pueda preveer que en amplio plazo no serán necesarios 4 carriles.
 - ▶ Nunca se utilizará, si ha de ser ampliada a 4 carriles en un futuro más o menos próximo. Se tolerará cuando esta ampliación sea imposible y necesaria.
- 4 carriles: cuando así se deduzca del estudio de capacidades.

Junto a esto, *el ancho de los arcenes* se fija en función de la naturaleza del terreno y del I.M.D.

Finalmente, la definición de las *vías adicionales*, si son requeridas, viene determinado como sigue:

- Vías lentas: es necesaria la existencia de vía lenta cuando, debido al tráfico pesado, la velocidad real de la circulación en la hora del proyecto desciende por debajo de los valores mostrados en la siguiente tabla (*Tabla 4.5.*). Cuando sean necesarias, su ancho será de 3 m.

| | | | | | |
|-----------------------------|----|----|----|-----|-----|
| Velocidad específica (km/h) | 60 | 70 | 80 | 100 | 120 |
| Velocidad real (km/h) | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 |

Tabla 4.5.- Condicionantes de velocidad para la existencia de vías lentas.

- Pistas para bicicletas y ciclomotores: cuando la componente de bicicletas y ciclomotores tenga una punta horaria superior a : I.M.H.> 500 veh./hora, en una carretera de dos carriles con una intensidad de tráfico total: I.M.D. > 2000 veh./día, se estudiará la necesidad de establecer este tipo de pistas.

• *Sección transversal en curva*

Las características del trazado en curva hace necesario dotar a cada carril en curva de un *sobreancho* cuyo valor viene definido por la siguiente expresión:

$$S = \frac{l^2}{2 \cdot R_h} \quad (4.28.)$$

donde:

- S: sobreancho de cada carril (m).
- l: longitud de los vehículos, medida entre su extremo delantero y el eje de las ruedas traseras (m).
- R_h: radio de la curva horizontal (m).

No obstante, este sobreancho sólo es necesario para valores: R_h < 250 m.

La transición de dicho sobreancho se ejecuta siempre en la curva de acuerdo, aumentando progresivamente hasta el valor del sobreancho total en la curva circular.

4.4.1.2.- Parámetros de los ramales de acceso/salida.

La función y caracterización de los ramales en vías urbanas e interurbanas presenta grandes diferencias. Seguidamente y dado el ámbito de aplicación del presente estudio, serán descritas las propiedades del elemento ramal de acceso/salida en vías interurbanas.

4.4.1.2.1.- *Configuración del carril de acceso/salida.*

Las carreteras proporcionan un flujo de tráfico prácticamente continuo. El acceso y la salida desde la carretera se produce en los ramales, que están generalmente proyectados para permitir las maniobras de confluencia y bifurcación a altas velocidades, y por lo tanto, minimizando las alteraciones al tráfico de la vía principal.

Una intersección ramal-carretera es una zona donde se produce una competencia por el espacio entre dos circulaciones. La forma en que interaccionan ambas circulaciones está condicionada, en primera aproximación, por el sentido del ramal según sea de acceso o salida. Las características de dicha interacción son descritas a continuación:

- *Ramal de acceso:*

El flujo de la vía corriente arriba del ramal está compuesto por demandas de una gran variedad de orígenes. En la zona de confluencia, los vehículos del ramal de acceso tratan de encontrar intervalos en la corriente circulatoria del carril adyacente de la carretera.

Por ello, dicho carril estará directamente afectado por el ramal. En el caso de autopistas y autovías, a medida que el flujo del ramal de acceso aumenta, los vehículos que entran afectan a la distribución del tráfico entre los carriles de la autovía puesto que la circulación cambia de carril para evitar la turbulencia y los conflictos en la zona de confluencia. Es una situación dinámica con interacción entre los flujos, influyendo la circulación del ramal de acceso de manera importante en la operación del conjunto. En condiciones de colapso, generalmente los conductores del ramal y del carril derecho de la autopista o autovía confluyen alternativamente.

- *Ramal de salida:*

En los ramales de salida la maniobra básica es una bifurcación. Los vehículos que van a salir deben ocupar el carril adyacente al ramal (o aquel que se dedique a la salida hacia el ramal), por lo que hay un efecto de redistribución de los otros conductores entre el resto de los carriles.

Cuando se presentan ramales de salida de dos carriles, la influencia de los movimientos divergentes puede propagarse sobre varios carriles de la vía.

Un ramal funcionará de forma eficaz cuando se proyecten correctamente todos sus elementos. Cabe destacar que errores en su diseño provocará efectos negativos en la circulación de la totalidad del ramal, así como sobre la vía a la que conecta.

Por lo tanto, dichos ramales generan una notable perturbación del flujo de tráfico en la vía principal, tanto en la zona previa como en la posterior al punto de intersección. El problema se incrementa cuando se concentra más de un ramal en el mismo tramo. En este caso, las áreas de influencia de ellos interaccionan entre sí, incrementando notablemente el riesgo de ocurrencia de accidentes en el mismo. Pueden ser consideradas diversas configuraciones de ramales adyacentes, como se define seguidamente y como se muestra en la siguiente figura (*Figura 4.31.*):

- *Ramales de incorporación adyacentes:* dos ramales de incorporación consecutivos lo suficientemente próximos como para influirse mutuamente en su comportamiento.
- *Ramales de salida adyacentes:* dos ramales de salida consecutivos lo suficientemente próximos como para influirse mutuamente en su comportamiento.
- *Ramal de incorporación seguido de otro de salida:* secuencia de un ramal de incorporación y otro de salida con un espaciamiento lo suficientemente corto como para influir mutuamente cada uno sobre el comportamiento del otro. Si los ramales se encuentran unidos mediante un carril auxiliar continuo, se trata el tramo como un *área de trenzado* entre ramales.
- *Ramal de salida seguido de otro de incorporación:* secuencia de un ramal de salida y otro de incorporación con un espaciamiento lo suficientemente reducido como para influir mutuamente cada uno sobre el comportamiento del otro. Esta secuencia de ramales opera a menudo como si ambos estuviesen aislados.

- *Bifurcación*: separación de un segmento de autovía en dos calzadas multicarril de los tipos autovía o colectoras/distribuidoras. Se refiere únicamente a aquellas configuraciones en las que el número de carriles que parten de la bifurcación es igual al que llega más uno.
- *Confluencia*: unión de dos calzadas multicarril del tipo autovía o colectoras/distribuidoras en un único segmento de autovía. Se refiere únicamente a aquellas configuraciones en las que dos carriles de los que acceden (uno de cada acceso) confluyen en un sólo carril.

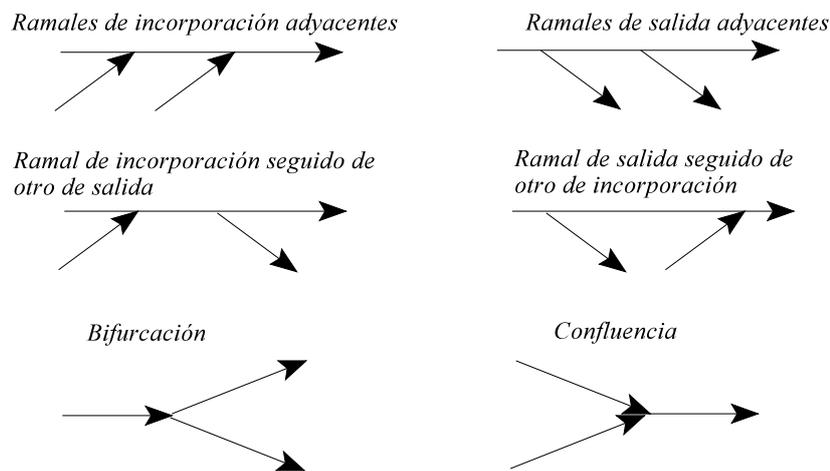


Figura 4.31.- Configuraciones de ramales adyacentes.

La existencia y configuración de los ramales ejercen gran influencia en la ocurrencia de accidentes, fundamentalmente debido a lo siguiente:

- La función y caracterización de los ramales en vías urbanas e interurbanas presenta grandes diferencias. Dichas diferencias quedan reflejadas en la siguiente figura (Figura 4.32.), donde se presenta la proporción de accidentes ocurridos en intersecciones en vías urbanas, travesías y vías interurbanas, obtenidos a partir de los datos contenidos en el *Cuestionario Estadístico de Accidentes de Circulación con Víctimas*, en el año 1994.

En esta figura se observa un porcentaje de accidentes mucho más elevado en las intersecciones en vías urbanas y travesías frente a las vías interurbanas. Esto se debe en gran medida a que la intersección urbana corresponde en muchas ocasiones a cruces entre calles, por lo que el número de dichas intersección es mucho más elevado que en carretera.

- Centrando el análisis en las vías interurbanas, los ramales generan una notable perturbación del flujo de tráfico en la vía principal, tanto en la zona previa como en la posterior al punto de intersección. El problema se incrementa cuando se concentra más de un ramal en el mismo tramo.

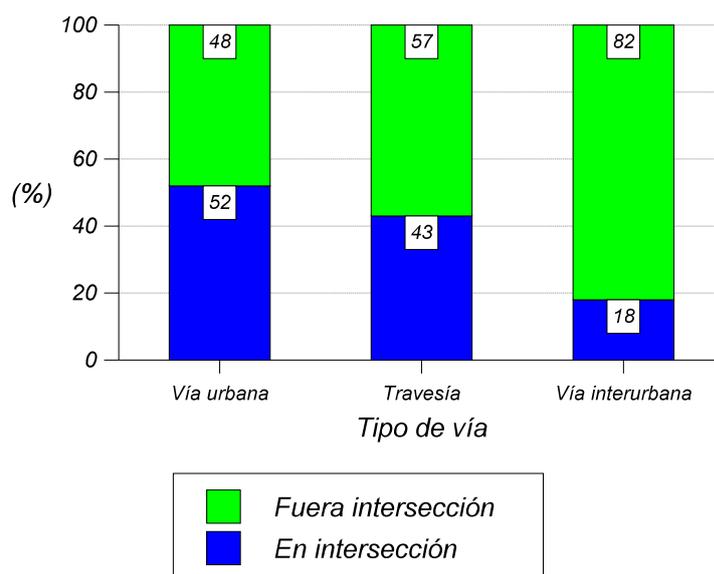


Figura 4.32.- Porcentaje de número de accidentes en ramal de incorporación/salida, según tipos principales de vías (1994).

- La influencia del ramal sobre el riesgo de ocurrencia de accidentes está condicionada por el tipo de vía analizada. Esto se muestra en la siguiente figura (Figura 4.33.), donde se presenta la proporción de accidentes ocurridos en intersecciones en los distintos tipos de vías interurbanas, obtenidos a partir de los datos contenidos en el *Cuestionario Estadístico de Accidentes de Circulación con Víctimas*, en el año 1994.

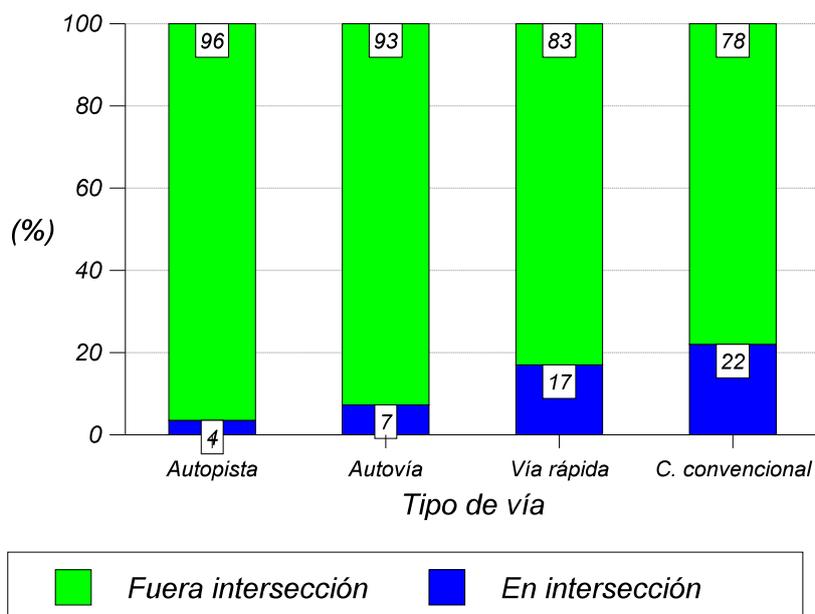


Figura 4.33.- Porcentaje de número de accidentes en ramal de incorporación/salida, según tipos de vías interurbanas (1994).

Así, se observa un mayor porcentaje de accidentes en intersección en la vía rápida y en carretera convencional frente a la autopista y autovía. Esto es debido fundamentalmente a los factores siguientes:

- En autovías, y especialmente en autopistas, existe una mayor control de ramales, lo que redundan en condiciones de diseño (carril de aceleración, visibilidad, señalización) más adecuados, generando un menor riesgo de accidentalidad.
- En autovías y autopistas existe más de un carril en cada sentido de circulación, lo que permite la realización de maniobras evasivas hacia el carril más alejado de la zona de influencia del ramal.
- Las características de configuración del ramal -longitud del carril de aceleración/deceleración, señalización previa sobre la vía principal, visibilidad del mismo desde la vía principal-, son determinantes en su influencia sobre el riesgo de ocurrencia de accidentes.

4.4.1.2.2.- *Punto de intersección con vía principal.*

Como ha sido mostrado en el apartado precedente, una intersección ramal-carretera es una zona donde se produce una competencia por el espacio entre dos circulaciones. Por ello, los ramales generan una notable perturbación del flujo de tráfico en la vía principal, tanto en la zona previa como en la posterior al punto de intersección.

Junto a esto, la situación de riesgo generada por la presencia de un ramal puede verse agravada por las condiciones del medio en el punto de intersección con la vía principal, como son:

- Intersección en curva.
- Incorporación/salida en zona de visibilidad limitada.
- Confluencia de varios ramales en una distancia reducida.

Esto motiva que la influencia del ramal sobre el riesgo de ocurrencia de accidentes deba ser analizada en combinación con el resto de factores del medio.

4.4.1.3.- Señalización.

El propósito de la señalización, tanto horizontal como vertical, consiste en asegurar la circulación segura por la vía, proporcionando información de los elementos involucrados en el tráfico rodado. Las funciones generales que debe cumplir dicha señalización son las siguientes:

- Advertir de posibles peligros.
- Ordenar la circulación de acuerdo con las circunstancias de cada lugar.
- Recordar algunas prescripciones del Código de la Circulación.

- Proporcionar al usuario de la vía una información conveniente.

Para resultar efectiva, la señalización debe verificar varios requerimientos, como son:

- Responder a un requerimiento real.
- Captar la atención.
- Comunicar un mensaje claro y conciso.
- Inducir al respeto por parte de los usuarios de la calzada.
- Proporcionar información con la suficiente anticipación.

El aseguramiento de dichos requerimientos exige la dedicación de especial atención a los siguientes aspectos referentes a la decisión de la señalización necesaria en un punto de la vía:

- Diseño.
- Localización.
- Mantenimiento.
- Uniformidad.

En función del tipo de información proporcionada, se establece la siguiente clasificación de la señalización. Las características de cada tipo son mostradas en el *Anexo IV*.

- a) *Peligro*.
- b) *Preceptivas*.
- c) *Informativas*.

Las características de la señalización, en especial la preceptiva y de peligro, ejercen gran influencia en la ocurrencia de accidentes, debido a lo siguiente:

- Adecuación de la misma a la situación de riesgo de la que informan. En este sentido, una señalización poco severa puede generar riesgo al no informar al conductor de las precauciones que debe tomar en ese punto. Por otro lado, una señalización demasiado severa puede inducir al conductor a no respetar la señalización que aparezca en los tramos siguientes.
- La localización de las señales debe ser tal que permita una adecuada visibilidad de las mismas. Junto a esto, debe estar ubicada de forma que posibilite la reacción del conductor con la suficiente antelación.
- Los criterios de definición de la señalización en un tipo de vía dada deben ser uniformes, de modo que no induzcan al conductor a situaciones de error en su interpretación.

4.4.1.4.- Visibilidad de elementos de la vía.

Las condiciones de visibilidad de los distintos elementos existentes en un itinerario - tramo de curva, ramales, señalización- ejercen influencia en el riesgo de ocurrencia de accidentes.

Así, tomando en consideración los accidentes ocurridos en vía interurbana, obtenidos a partir de los datos contenidos en el *Cuestionario Estadístico de Accidentes de Circulación con Víctimas* en el año 1994, se registra la existencia de las siguientes restricciones a la visibilidad en los accidentes ocurridos (*Figura 4.34.*).

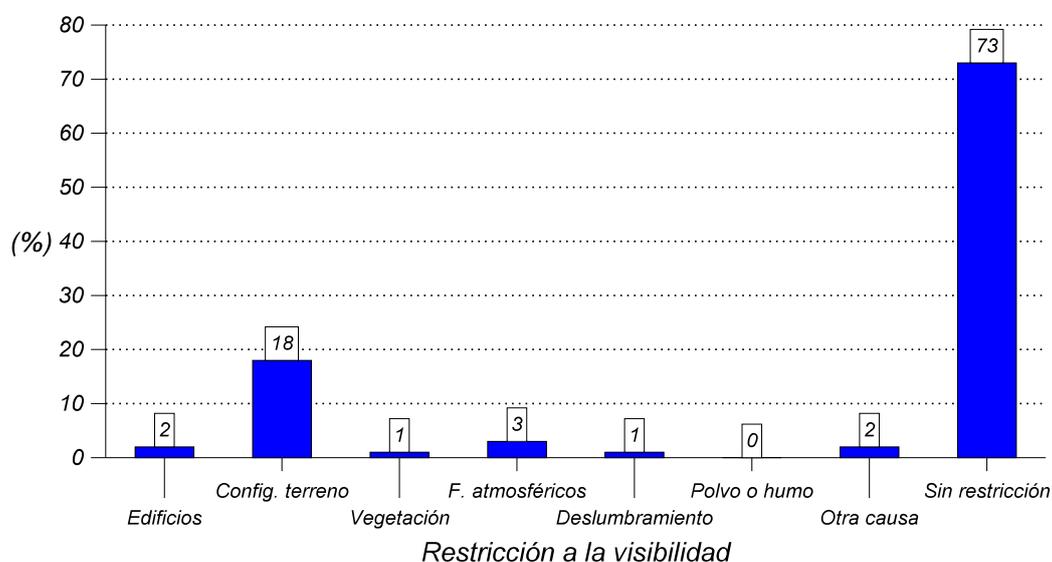


Figura 4.34.- Porcentaje de número de accidentes en vía interurbana, según las restricciones a la visibilidad (1994).

Como se observa en la figura precedente, se constata la influencia en el accidente de una restricción a la visibilidad en un 23% de los accidentes ocurridos en vía interurbana. Dentro de éstas, la restricción más significativa corresponde a la debida a la configuración del terreno -18%- , la cual será considerada en la presente Tesis.

De este modo, el aumento de la distancia de visibilidad favorece la anticipación de acciones tendentes a evitar posibles situaciones de riesgo, como son:

- Maniobras de frenado y/o esquivas, ante obstáculos imprevistos en la calzada.
- Maniobras de reducción de la velocidad en tramos de curva, sometiendo al vehículo a sollicitaciones laterales admisibles.

En este trabajo se considera únicamente la influencia de factores permanentes del medio, por lo que el presente análisis de las condiciones de visibilidad no toma en consideración las restricciones de la misma debida a factores transitorios -factores atmosféricos, deslumbramiento, polvo o humo, etc.-, sino únicamente las debidas a las condiciones del terreno.

Las componentes básicas de la visibilidad, según las definiciones contenidas en la *Instrucción de carreteras 3.1 - IC: Trazado [30]*, son mostradas seguidamente.

• *Cálculo de la distancia de visibilidad*

La distancia de visibilidad se mide según una paralela al eje de la carretera, coincidiendo con la trayectoria del vehículo. La altura del punto del vista del conductor sobre el plano de la calzada es de 1,20 m.

En alineaciones curvas, el valor del despeje necesario para disponer de una determinada distancia de visibilidad se obtiene de la fórmula:

$$F = R - (R + b) \cdot \cos\left[\frac{31,83 \cdot D}{(R + b)}\right] \quad (4.29.)$$

donde:

- b: distancia en m. del vehículo al borde interior de la calzada.
- R: radio en m. del borde interior de la calzada.
- F: distancia mínima en m. del obstáculo al borde interior de la calzada.
- D: distancia de visibilidad en m.

• *Distancia de visibilidad de parada*

La distancia de visibilidad de parada es la existente entre un obstáculo situado sobre la calzada y la posición de un vehículo que circula en dirección a dicho obstáculo, en el momento en que puede divisarlo, sin que luego desaparezca de su vista hasta llegar al mismo.

Se consideran las siguientes distancias como referencias:

- Altura del obstáculo sobre el plano de la calzada: 0,20 m.
- Altura del punto de vista del conductor sobre el plano de la calzada: 1,20 m.
- La distancia entre el punto de vista y el obstáculo se mide según una línea paralela al eje de la carretera y trazada a 1,50 m del borde derecho de la calzada en el sentido de la marcha por el interior del pavimento.

La distancia de parada es la distancia total recorrida por un vehículo obligado a detenerse tan rápidamente como le sea posible, medida desde su situación en el momento de aparecer el objeto que motiva la detención. Esta distancia comprende los tiempos de percepción, reacción y frenado.

La distancia de parada viene dada por la siguiente expresión:

$$Dp = \frac{V \cdot t}{3,6} + \frac{V^2}{250 \cdot (f_l + i)} \quad (4.30.)$$

donde:

- Dp: distancia de parada (m).
- V: velocidad específica (km/h).
- f_l : coeficiente de rozamiento longitudinal.

- i: inclinación de la rasante en tanto por uno.
- t: incluye los tiempos de percepción y de reacción, en segundos. La Instrucción presente considera este tiempo igual a 2 s.

Se dice que una carretera tiene visibilidad de parada cuando en toda su longitud la distancia de visibilidad de parada es igual o mayor que la distancia de parada.

• *Distancia de visibilidad de adelantamiento*

La distancia de visibilidad de adelantamiento es la precisa para que un vehículo adelante a uno o varios que marchan por su vía de circulación, sin peligro de colisión con otro que venga en sentido contrario por la vía contigua.

La distancia de adelantamiento es la mínima de que debe disponer un conductor para adelantar a otro con toda seguridad, sin obligar a disminuir su velocidad a un tercer vehículo que circule a la velocidad específica y en sentido opuesto. Esta distancia se obtiene de la fórmula siguiente:

$$D_a = 30 + V + (V - 8) \cdot \sqrt{\frac{0,7 \cdot V}{j}} \quad (4.31.)$$

donde:

- D_a : distancia de adelantamiento (m).
- V : velocidad específica (km/h).
- j : aceleración longitudinal (m/s^2).

• *Restricciones de diseño de la calzada referentes a la distancia de visibilidad*

La distancia de visibilidad de adelantamiento impone una condición más restrictiva que la distancia de visibilidad de parada. Las restricciones sobre la distancia de visibilidad mínima en el trazado de la calzada, tanto en curvas horizontales como en alzado (acuerdos verticales), se muestran en las siguientes tablas (*Tablas 4.6. y 4.7.*).

| 2 Carriles | 3 Carriles | 4 Carriles o calzadas separadas |
|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| $D_{vis} \geq D_{parada} (*)$ | $D_{vis} \geq D_{adelant.}$ | $D_{vis} \geq D_{parada}$ |

(*): En calzadas de 2 carriles, debe cumplirse la siguiente condición adicional. Así, la proporción mínima de tramos con visibilidad de adelantamiento que debe existir en una longitud de 5 km de carretera se indica en la tabla siguiente (*Tabla 4.13.*).

Tabla 4.6.- Restricciones sobre la distancia de visibilidad mínima en el trazado de la calzada.

| 2 Carriles | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|
| IMD | < 1000 | 1000 ÷ 2000 | 2000 ÷ 5000 |
| Nº de oportunidades de adelantar o proporción en 5 km de longitud con visibilidad de adelantamiento (2 carriles) | 2 oportuni. | 30% | 60% |

Tabla 4.7.- Restricciones sobre la distancia de visibilidad mínima en el trazado de calzadas de 2 carriles.

En calzadas de 3 carriles, la vía central deberá ser utilizada exclusivamente para la maniobra de paso por las circulaciones en ambos sentidos. Las zonas en que no exista visibilidad de adelantamiento deberán marcarse convenientemente con una línea continua en el centro del firme.

4.4.1.5.- Intensidad del tráfico.

El número de vehículos que pasa por una sección transversal de la calzada ejerce un papel primordial sobre el riesgo de ocurrencia de accidentes. Así, el incremento de la intensidad del tráfico influye del modo siguiente:

- Aumenta el número de vehículos expuestos al riesgo de accidente.
- Condiciona la velocidad media de circulación por el tramo.
- Favorece la aparición de problemas de congestión.
- Dificulta las maniobras de cambio de carril, en caso de adelantamientos o ante la presencia de ramales de acceso/salida.

Junto a esto, gran parte de las especificaciones de diseño del trazado de la calzada contenidas en la *Instrucción de carreteras 3.1 - IC* están condicionadas por dicha intensidad en el itinerario.

El análisis de la intensidad del tráfico en la calzada es efectuado a través de la *Intensidad Media Diaria (IMD)*, la cual se define como el número total de vehículos que pasa por una sección transversal de la carretera, en ambos sentidos, durante un año, dividido por el número de días del año (según se define en la *Instrucción de carreteras 3.1 - IC: Trazado de carreteras [30]*).

La toma de datos sobre el número de vehículos que pasan por una sección dada se efectúa en estaciones de aforo, distribuidas a lo largo de las vías de la Red de Interés General del Estado (RIGE).

4.4.2.- DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES EXPLICATIVAS DEL MODELO.

Las variables explicativas objetivas consideradas en el modelo de predicción de la ocurrencia de accidentes en tramos de curva en autovía son definidas a partir de los factores permanentes del medio mostrados en el *Apartado 4.4.1*. Junto a esto, serán tenidos en cuenta los criterios de señalización de carreteras contenidos en la *Instrucción de carreteras 8.1. IC [32] (Anexo IV)*.

Dichas variables explicativas así como la naturaleza de las mismas son presentados en la tabla siguiente (*Tabla 4.8*). Como se observa en esta tabla, algunas de las variables definidas poseen una naturaleza *continua*, mientras que otras son *discretas*. Esta doble naturaleza condicionará la técnica de generación del modelo de predicción empleada en la presente Tesis.

| <i>Variable</i> | <i>Naturaleza</i> |
|--|-------------------|
| ASOCIADAS A LA GEOMETRÍA | |
| Velocidad máxima en curva (v_s) | Continua |
| Velocidad de aproximación (v_{ap}) | Continua |
| Factor de influencia de la velocidad en la curva (F_{vC}) | Continua |
| Factor de influencia de las curvas precedentes (F_{cp}) | Continua |
| Factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (F_{visIC}) | Continua |
| Factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (F_{visTC}) | Continua |
| Factor de influencia de la señalización de la curva (F_{sC}) | Discreta |
| Longitud de curva (L_c) | Continua |
| ASOCIADAS A LOS RAMALES | |
| Factor de influencia de configuración del ramal (F_{cR}) | Discreta |
| Factor de influencia de la velocidad en el ramal (F_{vR}) | Continua |
| Factor de influencia de la visibilidad del ramal (F_{visR}) | Continua |
| Factor de influencia de ramales adyacentes (F_T) | Discreta |
| ASOCIADAS A LA INTENSIDAD DEL TRÁFICO | |
| Intensidad Media Diaria (IMD) | Continua |

Tabla 4.8.- Variables explicativas objetivas consideradas en el desarrollo del modelo de predicción de la ocurrencia de accidentes.

Posteriormente y durante el desarrollo del citado modelo predictivo, se generarán nuevas variables como resultado de la combinación de las mostradas en la tabla precedente.

4.4.2.1.- Variables asociadas a la geometría de la curva.

4.4.2.1.1.- *Velocidad máxima en curva (v_s).*

La velocidad máxima en curva corresponde a la velocidad máxima en curva teniendo en cuenta el radio y peralte de la misma, según ha sido mostrada en la *Ecuación 4.16.* y como se define en la *Instrucción de Carreteras 8.1. IC (Anexo IV).*

4.4.2.1.2.- *Velocidad de aproximación (v_{ap}).*

Desde el punto de vista del análisis de la ocurrencia de accidentes, la situación ideal sería conocer la velocidad a la que circulan todos los vehículos que recorren el itinerario en estudio. No obstante, esto resulta enormemente dificultoso. Así, la elección de la velocidad por parte de un conductor es el resultado de un proceso complejo, en el que influyen características personales y circunstancias concretas que rodean una situación determinada.

Algunas investigaciones desarrolladas han concluido que los factores permanentes del medio que tienen mayor influencia sobre la velocidad real de los vehículos son los siguientes:

- Perfil en alzado (rampa/pendiente).
- Ancho de la calzada.
- Radio de curvatura en planta.

Frente a esto, la velocidad de aproximación a un tramo de curva considerada en este trabajo representa una velocidad tipo máxima posible de llegada a dicho tramo, considerando la influencia que sobre un vehículo tipo ejercen los parámetros geométricos de la calzada (trazado en planta y en alzado). Dicha velocidad no corresponde, por tanto, con la velocidad real de circulación de los vehículos por dicho punto.

En el cálculo de la velocidad de aproximación se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- 1.- El trazado de la calzada se considera dividido en tramos de curva, unidos por tramos de recta. De este modo, se evalúa la velocidad de aproximación a una curva, considerando la aceleración de un vehículo tipo durante el tramo de recta precedente, afectado por los parámetros geométricos del mismo.
- 2.- El vehículo tipo considerado es un FIAT TIPO 1.6., de 83 C.V. de potencia y 175 km/h de velocidad máxima en terreno horizontal, según es definido en la *Instrucción de Carreteras 8.1. I.C.*, y como se muestra en el *Anexo IV.*

3.- El movimiento del vehículo es evaluado mediante el modelo de simulación de la dinámica vehicular descrito en el *Apartado 5*.

4.- Dicho vehículo tipo circula en todo momento en condiciones de aceleración longitudinal máxima, conforme a las curvas de aceleración mostradas en la *Figura IV.2*. Durante el proceso de aceleración, se considera la influencia de los parámetros geométricos (especialmente, el trazado en alzado) de la calzada.

El cálculo de la *velocidad de aproximación*, a diferencia del criterio tomado en cuenta para la obtención de la *velocidad máxima de aproximación a una curva (Anexo IV.)*, no considera la realización de maniobras de frenado en los instantes previos a la llegada al tramo de curva. Esto pretende evaluar la situación más desfavorable en la que el vehículo tipo llegaría a la curva, no imponiendo restricciones a la velocidad de llegada a la misma.

5.- Se imponen dos limitaciones a la velocidad de circulación por el itinerario:

- *Límite de salida de tramo de curva*: habitualmente, la velocidad real promedio de circulación por tramos de curva es superior a la velocidad máxima en curva, como se ha puesto de manifiesto en algunos estudios realizados. Así, *Krammes* lleva a cabo un análisis sobre 28 curvas localizadas en 3 estados norteamericanos (Maryland, Virginia y West Virginia), durante 1991. Y compara las medidas de velocidad real en las mismas (representadas por el percentil de velocidad del 85%), con las velocidades seguras. Como resultado del estudio, concluye que dicha medida de velocidad real es superior en todos los casos a la velocidad máxima en curva.

Tomando esto en cuenta, la velocidad máxima de salida de un tramo de curva considerada en esta Tesis es aquella a la que una curva de radio R (m) y peralte p (%) puede ser recorrida, de manera que el vehículo experimente una aceleración centrífuga no compensada por el peralte inferior a 4 m/s^2 . Esta limitación de aceleración centrífuga sin compensar, superior al considerado en la definición de velocidad máxima en curva, permite la circulación del vehículo en condiciones de seguridad en asfalto seco en buen estado, como se establece en el estudio *Manoeuvres and demands in emergency situations [23]*, desarrollado por el INRETS.

- *Límite superior de la velocidad*: el valor de la misma correspondiente a la limitación de la cadena cinemática. En el caso del vehículo tipo considerado, este valor es de 210 km/h.

4.4.2.1.3.- Factor de influencia de la velocidad en la curva (F_{vC}).

El riesgo de un tramo de curva no está determinado de forma efectiva por la propia geometría del mismo. Así, y como se recoge en el estudio desarrollado por el INRETS [23] (Institut National de Recherche sur les Transports et leur Securite), el riesgo viene condicionado en gran medida por las sollicitaciones de aceleración lateral (a_c), en relación con el comportamiento del vehículo y la capacidad de los conductores. Así, se establecen cuatro límites de aceleración lateral, definidos como sigue:

- $a_c < 2 \text{ m/s}^2$: la gran mayoría de los vehículos y conductores son capaces de circular en condiciones de seguridad sometidos a dicha sollicitación lateral. La pérdida de control puede ser explicada únicamente por una deficiente asimilación de la información, una decisión equivocada o la conducción bajo el efecto de alcohol o drogas.
- $2 < a_c < 4 \text{ m/s}^2$: la gran mayoría de los vehículos ligeros y un buen número de los conductores con experiencia son capaces de circular en condiciones de seguridad sometidos a dicha aceleración lateral.
- $4 < a_c < 6 \text{ m/s}^2$: un número elevado de vehículos ligeros puede responder adecuadamente ante este nivel de sollicitación lateral. No obstante, la mayoría de los conductores podrían comenzar a experimentar dificultades de control sobre sus vehículos.
- $6 < a_c < 8 \text{ m/s}^2$: pocos vehículos pueden responder adecuadamente ante dicha sollicitación lateral, y escasos conductores pueden mantener el control del vehículo.

El nivel de aceleración lateral experimentado por un vehículo en curva viene definido como la combinación de dicha geometría (radio y peralte), y la velocidad de circulación del vehículo por la misma, dependiente de las características del itinerario previo.

Así, en un estudio posterior desarrollado por dicho Instituto [57], se considera como factor de riesgo el cociente entre la velocidad de entrada a la curva y la velocidad crítica en la misma, donde:

- *Velocidad crítica en curva*: máxima velocidad a la que una curva de radio R y peralte $p = 0 \%$ puede ser recorrida, tal que el vehículo experimente una aceleración centrífuga igual a 2 m/s^2 .
- *Velocidad de entrada a la curva*: velocidad calculada teniendo en consideración que un vehículo tipo sale de la curva precedente a la velocidad crítica, y efectúa un proceso de aceleración hasta alcanzar la curva siguiente.

Tomando esto en consideración, se define *el factor de influencia de la velocidad en la curva* empleado en la presente Tesis Doctoral como sigue:

$$F_{vC} = \frac{v_{ap}}{v_s} \quad (4.32)$$

Este factor está definido como el cociente entre la velocidad de aproximación (*Apartado 4.4.2.1.2.*) condicionada por las características de un vehículo tipo y la configuración geométrica del tramo previo, y la velocidad máxima en curva (*Apartado 4.4.2.1.1.*) determinada por los parámetros geométricos -radio, peralte- del propio tramo de curva en estudio.

Dicho factor considera la relación entre una velocidad tipo máxima posible de llegada al tramo de curva, inducida por el trazado en alzado del terreno, y una velocidad que permite circular por dicho tramo en condiciones de seguridad.

4.4.2.1.4.-Factor de influencia de las curvas precedentes (F_{cp}).

La “expectativa” de un conductor puede describirse como su disposición para actuar de forma previsible y adecuada, con continuidad respecto a la línea de comportamiento por él seguida en situaciones determinadas. Cuando los conductores se enfrentan a situaciones no habituales, los resultados son imprevisibles y pueden resultar fallidos. Estas situaciones se consideran violaciones de las expectativas del conductor, y en algunos casos, contribuyen a la ocurrencia de accidentes.

Las expectativas del conductor en cada instante están basadas, junto a otros factores, en la percepción de las características del itinerario a medida que se va recorriendo. En este sentido, las especificaciones geométricas que difieren significativamente de las de los elementos precedentes pueden suponer una violación de estas expectativas.

La peligrosidad de un tramo de curva está condicionada, junto a la influencia de la configuración del propio tramo, por las características del itinerario precedente. De este modo, la velocidad de aproximación a dicho tramo de curva puede estar afectado por la peligrosidad de los tramos de curva anteriores. Así, un itinerario de autovía poco sinuoso podría inducir a la circulación por el mismo a una velocidad media superior a la de otro más sinuoso.

Para poder tomar en consideración la influencia de las curvas precedentes es definido en este estudio el concepto de *itinerario previo*. La determinación del mismo se basa en las especificaciones contenidas en la *Norma Complementaria a la Instrucción de Carreteras 3.1. I.C. sobre el trazado de autopistas [31]*, durante la definición de la “velocidad del proyecto”.

Así, la “velocidad de proyecto” de una autopista o tramo de autopista es la velocidad que permite definir las características geométricas mínimas de construcción de sus elementos particulares. A estos efectos, se denomina tramo el limitado por dos enlaces consecutivos o no, por uno de éstos y un terminal, o por dos terminales. Durante el diseño del trazado se procurará que la diferencia de velocidades de proyecto entre dos tramos contiguos no sea superior a 20 km/h. No obstante, si en dos tramos consecutivos se diera este caso, se intercalarán los tramos necesarios de longitud no inferior a 5 kilómetros para efectuar la transición con diferencias de velocidad entre tramos de 20 km/h.

El análisis de dicha especificación muestra que para evitar cambios bruscos en la velocidad de proyecto deben escalonarse los cambios de dicha velocidad mediante tramos de longitud mínima de 5 kilómetros con objeto de no someter al conductor a modificaciones súbitas en las condiciones de seguridad del trazado, lo que podría generar riesgo de accidente.

Tomando esto en consideración, es definido el *itinerario previo* como el tramo de 5 kilómetros de longitud anterior al tramo de curva en estudio. Y se relaciona la velocidad máxima en curva de este tramo de curva (v_s) con la velocidad máxima en curva promedio de los tramos de curva existentes en el *itinerario previo* (v_{s5}).

La definición del *factor de influencia de las curvas precedentes* (F_{cp}) quedará definido como sigue:

$$F_{cp} = \frac{v_s}{v_{s5}} \quad (4.33)$$

4.4.2.1.5.- Factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (F_{visIC}).

Como ha sido definido en el *Apartado 4.4.1.4.*, las condiciones de visibilidad de los distintos elementos existentes en un itinerario ejercen una influencia decisiva en el riesgo de ocurrencia de accidentes. Dichas condiciones de visibilidad pueden verse reducidas e incluso impedidas por factores de distinta naturaleza, como son:

- *Factores permanentes*, tales como geometría del trazado en planta y alzado, u obstáculos naturales (vegetación, taludes,...).
- *Factores transitorios* (climatología, proyecciones de otros vehículos,...).

Según ha sido mostrado en los apartados precedentes, esta Tesis considera únicamente las limitaciones de visibilidad impuestas por los factores permanentes del medio.

Junto a esto, el presente trabajo se concentra en los accidentes ocurridos en tramos de curva. Por ello, se pretende evaluar los factores asociados a la visibilidad de los parámetros geométricos de dichos tramos. A pesar que los mecanismos de percepción y decisión del conductor al afrontar la circulación por una curva son difíciles de cuantificar, el modelo desarrollado tendrá en consideración dos factores objetivos relacionados con la visibilidad de las características de estas curvas:

- a) Punto desde el cual es visible el inicio del tramo de curva: *factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva* (*Apartado 4.4.2.1.5.*).
- b) Porcentaje del tramo visible, desde un punto tal que permita la reacción del conductor: *factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva* (*Apartado 4.4.2.1.6.*).

Para evaluar estos factores, se define el siguiente procedimiento de toma de información del itinerario considerado, a partir de las imágenes de vídeo recogidas por el vehículo instrumentado de medida CANE desarrollado durante el presente trabajo, y que será descrito en detalle en el *Apartado 5.*:

- Las imágenes son recogidas en continuo mediante una cámara de video ubicada en el vehículo instrumentado. Dicha cámara está situada aproximadamente a la altura del punto de observación del conductor.
- El registro de imágenes se lleva a cabo en días soleados con buena iluminación. De este modo, se elimina la influencia de los factores transitorios, no considerados en la presente Tesis.

A partir de las imágenes registradas en el itinerario analizado, se define el primero de los factores de visibilidad propuestos: el *factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva*, como el tiempo transcurrido desde que el conductor percibe el punto de inicio del tramo de curva hasta que alcanza dicho punto de inicio. Dicho factor pretende considerar el tiempo a disposición del conductor para percibir el inicio del tramo de curva, y efectuar la toma de decisiones y maniobras de reducción de velocidad (si fuera necesario).

La metodología de cálculo del citado factor se describe seguidamente:

- Análisis en laboratorio de las imágenes de vídeo recogidas en el tramo en estudio. Este análisis posibilita la obtención de la máxima distancia de visibilidad del punto de inicio del tramo de curva analizado, limitada por los factores permanentes de la calzada y del entorno.
- Considerando dicha distancia máxima, así como la velocidad tipo probable de circulación estimada (calculada según los criterios mostrados en el *Apartado 4.2.2.1.2.*), se evalúa el tiempo de visibilidad.

El tiempo así obtenido constituye el *factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva*.

4.4.2.1.6.-Factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (F_{visTC}).

La visibilidad, como ha sido descrito en el apartado precedente, constituye un factor fundamental en la toma de decisiones. El factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (*Apartado 4.4.2.1.5.*) caracteriza una de las componentes objetivas de dicha visibilidad consideradas en el presente trabajo, durante la circulación por tramos de curva: el punto desde el que es percibido el inicio de dicho tramo.

Por otra parte, existe una segunda componente objetiva de la visibilidad tenida en cuenta: la longitud del desarrollo de la curva percibida. El aumento de dicha longitud permitirá una más correcta evaluación de la geometría de dicha curva, y por tanto, una estimación más acertada de la velocidad máxima en curva previsible de circulación.

Basado en esta componente de la visibilidad, se define el *factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva* como la proporción (%) de la longitud total del tramo de curva percibido desde un punto tal que permita la reacción del conductor en condiciones de seguridad: *el punto de percepción de la curva*. Dicho “punto de percepción” está condicionado por la velocidad de aproximación (según *Apartado 4.4.2.1.2.*) y por la velocidad máxima en curva (según *Apartado 4.4.2.1.1.*), y es determinado como sigue:

- *Caso 1:* $v_{ap} \leq v_s$

El vehículo alcanza el inicio del tramo de curva a una velocidad igual o inferior a la velocidad máxima en curva. El punto de percepción de la curva coincide con el punto de inicio del tramo de curva.

- *Caso 2:* $v_{ap} > v_s$

El vehículo alcanza el inicio del tramo de curva a una velocidad superior a la velocidad máxima en curva. En este caso, y siguiendo el criterio de frenado recogido en la *Instrucción de Carreteras 8.1. IC. (Anexo IV.)*, se evalúa el punto desde el cual debería iniciarse dicha maniobra de frenado suave para llegar al punto de inicio de la curva a la velocidad máxima en curva. El punto así obtenido determina el punto de percepción de la curva.

El criterio de obtención del punto de percepción, para el cálculo del factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva, se muestra en las siguientes figuras (*Figuras 4.35. y 4.36.*):

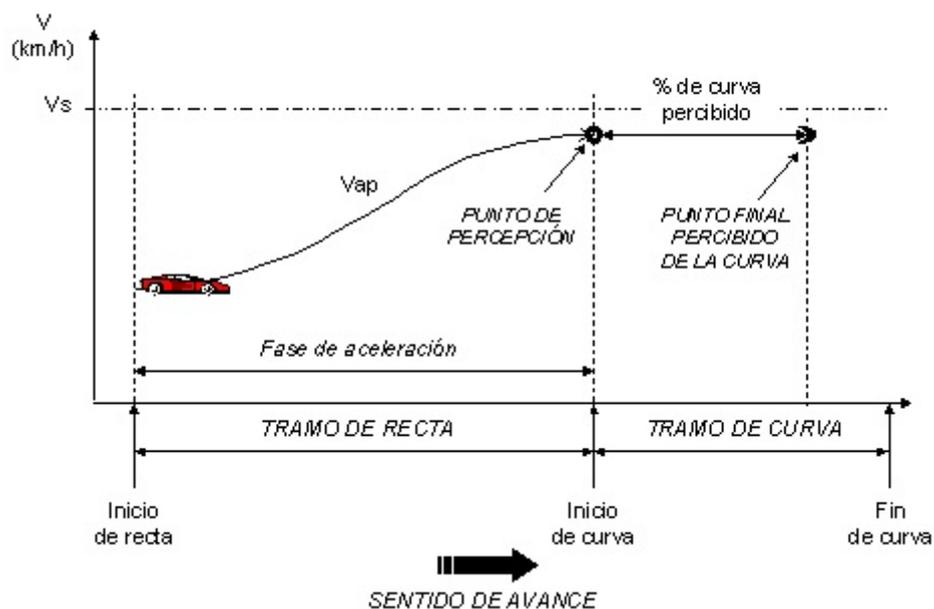


Figura 4.35.- Esquema de cálculo del factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (Caso 1).

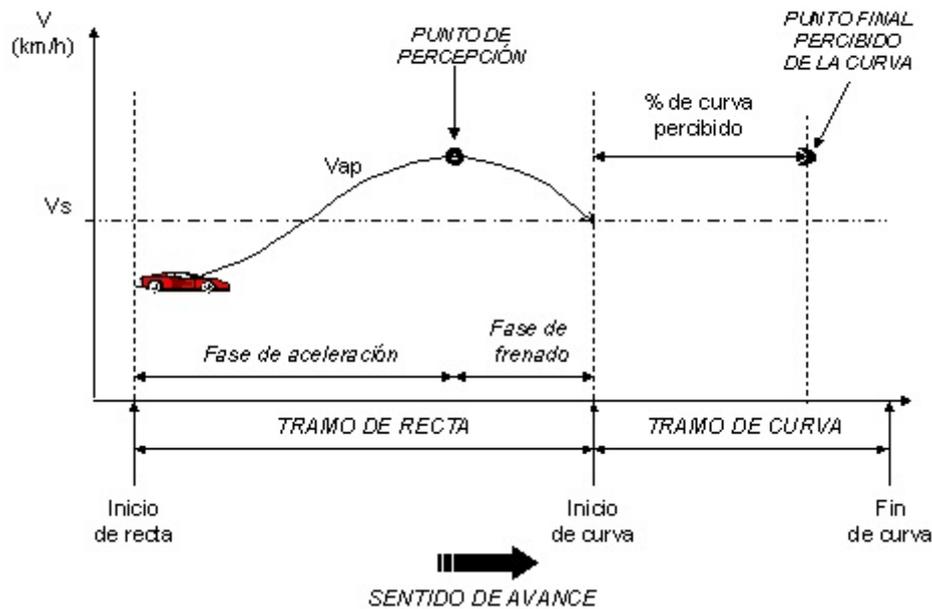


Figura 4.36.- Esquema de cálculo del factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (Caso 2).

4.4.2.1.7.-Factor de influencia de la señalización de la curva (F_{sC}).

En algunas ocasiones, las especificaciones geométricas del tramo de curva generan una reducción de la velocidad máxima en curva en el mismo respecto a la velocidad máxima de circulación por la vía. En estas circunstancias, algunos conductores pueden no percibir las condiciones que se les van a presentar, por lo que deberían ser correctamente advertidos con suficiente antelación mediante la señalización.

Seguidamente se aborda el objetivo de analizar la influencia de la señalización en la ocurrencia de accidentes en tramos de curva. Dicho análisis no pretende el estudio detallado de influencia de cada uno de los tipos de señales relacionados con los factores del medio considerados durante el proceso de modelización. A diferencia de esto, la variable definida tratará de evaluar la posible incidencia sobre el conductor de los dos tipos de señales de mayor influencia esperada: señales de peligro y señales preceptivas (*Anexo IV*).

De este modo, se define una variable explicativa binaria *-factor de influencia de la señalización de la curva-*, que tenga en consideración la existencia o ausencia de dichas señales de peligro y/o preceptivas presentes en los tramos de autovía analizados. Así, dicha variable binaria queda definida como sigue:

- *Estado "0"*: el tramo de curva no presenta señalización vertical de "peligro de curva" ni señalización vertical preceptiva de "velocidad limitada".

- *Estado "1"*: el tramo de curva presenta señalización vertical de "peligro de curva" y/o señalización vertical preceptiva de "velocidad limitada".

La definición de esta variable no tiene en consideración las señales informativas de "límite de velocidad aconsejable o recomendable", asumiendo la hipótesis de la menor influencia sobre el conductor de la señalización informativa, frente a la señalización preceptiva o de peligro.

4.4.2.1.8.- *Longitud de curva (Lc)*.

La longitud de los tramos de curva de autovía considerados en la presente Tesis no es uniforme. Este hecho influye en la exposición de los vehículos a las condiciones de riesgo presentes en dichos tramos. Para tomar en cuenta este factor, la variable *longitud de curva* será considerada en el modelo.

4.4.2.2.- Variables asociadas a los ramales.

Como fue presentado en el *Apartado 4.4.1.2.*, las carreteras proporcionan un flujo de tráfico prácticamente continuo. El acceso y la salida desde las mismas se produce en los ramales, que están generalmente proyectados para permitir las maniobras de confluencia y bifurcación a altas velocidades, y por lo tanto, minimizando las alteraciones al tráfico de la vía principal.

La importancia de los ramales como elementos perturbadores del flujo de la vía y, por lo tanto, como elementos de influencia en la ocurrencia de accidentes, ha motivado la realización de numerosos trabajos de investigación para el análisis de su contribución como elementos desencadenantes directos del accidente. No obstante, mucho más crítica resulta la influencia de dichos ramales cuando se consideran en combinación con tramos de curva de autovía.

Así, el presente trabajo de investigación tiene en consideración la influencia en el riesgo de ocurrencia de accidentes de diferentes factores característicos de los ramales (acceso y salida) existentes en los tramos de curvas de las autovías analizadas. Seguidamente, se muestra los parámetros de dichos ramales considerados en el desarrollo del modelo de predicción propuesto.

4.4.2.2.1.- *Factor de influencia de configuración del ramal (F_{cRA} , F_{cRS}).*

Existe una gran cantidad de parámetros definitorios de la configuración de los ramales. No obstante, se define una variable discreta "Factor de influencia de configuración del ramal", que tiene en consideración dos factores objetivos de influencia de los mismos:

- 1.- *Señalización*: considera la existencia sobre la autovía de señalización adecuada de anticipación del ramal. Se establece como "señalización adecuada" la señalización de peligro de empalme.
- 2.- *Acceso/salida*: analiza la existencia de un carril de acceso o salida a la autovía con una longitud adecuada. Dicho "carril" corresponde a la longitud de vía del ramal, aneja a la vía principal como un carril adicional.

En este sentido, los carriles de acceso/salida presentes en los tramos de curva de las autovías analizadas presentan dos situaciones posibles:

- Longitud inferior a 50 m: en este caso, se trata de ramales con acceso/salida prácticamente directa
- Longitud superior a 50 m: en este caso, es habitual una longitud de carril próxima a los 100 m.

Por ello, se define como “longitud adecuada” una longitud de carril superior a 50 metros.

A partir de estos parámetros, se define el factor de influencia de configuración del ramal. Dicho factor, considerado por separado para ramales de acceso y ramales de salida (F_{cRA} y F_{cRS} , respectivamente), quedará definido por los estados mostrados en la tabla siguiente (*Tabla 4.9.*):

| <i>Estado</i> | <i>Existencia de carril</i> | <i>Señalización adecuada</i> | <i>Longitud adecuada</i> |
|---------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 1 | NO | NO | NO |
| 2 | SI | SI | SI |
| 3 | SI | SI | NO |
| 4 | SI | NO | NO |

Tabla 4.9.- Definición de los estados de la variable discreta “Factor de influencia de configuración del ramal”.

Los estados definidos corresponden a cuatro configuraciones de los ramales, independientes entre sí, y numerados en orden previsiblemente creciente de influencia sobre riesgo de ocurrencia de accidentes. Como se muestra en dicha tabla, no se ha considerado el estado correspondiente a ramales con longitud adecuada y señalización inadecuada, dado que no ha aparecido ningún ramal con dicha configuración en las autovías analizadas.

4.4.2.2.2.- Factor de influencia de la velocidad en el ramal (F_{vRA} , F_{vRS}).

Junto a la influencia de la configuración del ramal (señalización y carril) mostrada en el apartado anterior, un segundo factor condicionante del riesgo de ocurrencia de accidentes debido a la existencia de ramales en tramos de curva lo constituye la velocidad de circulación por la vía principal en el punto de intersección de la misma con el carril del dicho ramal. El aumento de dicha velocidad incrementa el riesgo de la perturbación introducida por la presencia de ramales, debido a las maniobras de cambio de carril producidas en este punto.

Así, se define el *factor de influencia de la velocidad en el ramal* como la velocidad tipo posible de circulación del vehículo tipo por la autovía en el punto de intersección de la misma con el carril del ramal. El cálculo de dicha velocidad es obtenida conforme al procedimiento definido en el *Apartado 4.4.2.1.2. (Velocidad de aproximación)*.

Dicho factor es considerado de forma independiente para ramales de acceso y de salida (F_{vRA} , F_{vRS}).

4.4.2.2.3.- *Factor de influencia de la visibilidad del ramal* (F_{visRA} , F_{visRS}).

Como ha sido mostrado en los apartados precedentes, las condiciones de visibilidad de los distintos elementos existentes en un itinerario ejercen una influencia decisiva en el riesgo de ocurrencia de accidentes. El aumento de la distancia de visibilidad favorece la anticipación de acciones tendentes a evitar posibles situaciones de riesgo.

A partir de las imágenes registradas en el itinerario analizado, se define el *factor de influencia de la visibilidad del ramal*, como el tiempo transcurrido desde que el conductor percibe el punto de inicio del ramal hasta que alcanza dicho punto de inicio. Dicho factor pretende considerar el tiempo a disposición del conductor para percibir el citado ramal, y efectuar la toma de decisiones y maniobras de reducción de velocidad y/o cambio de carril (si fuera necesario). La metodología de cálculo seguida para la obtención de este factor en los tramos de curva analizados coincide con la mostrada en el *Apartado 4.4.2.1.5*.

Este factor es considerado de forma independiente para ramales de acceso y de salida (F_{visRA} , F_{visRS}).

4.4.2.2.4.- *Factor de influencia de ramales adyacentes* (F_T)

En los apartados anteriores ha quedado patente la importancia de las intersección ramal-autovía, como zona donde se produce una competencia por el espacio entre dos circulaciones. Dichos ramales generan una notable perturbación del flujo de tráfico en la vía principal, tanto en la zona previa como en la posterior al punto de intersección.

El problema se incrementa cuando se concentra más de un ramal en el mismo tramo de curva. En este caso, las áreas de influencia de ellos interaccionan entre sí, incrementando notablemente el riesgo de ocurrencia de accidentes en el mismo. Diversas configuraciones de ramales adyacentes han sido descritas en el *Apartado 4.4.1.2.1*.

El número de tramos considerado en la presente Tesis imposibilita el análisis de influencia de cada una de las configuraciones anteriormente reseñadas. Por ello, se define la variable discreta *factor de influencia de ramales adyacentes*, la cual toma en consideración la concentración de ramales en el mismo tramo. Los estados de dicha variable quedan definidos como sigue:

- *Estado "0"*: el tramo concentra uno o ningún ramal.

- *Estado "1"*: el tramo concentra más de un ramal.

4.4.2.3.- Variables asociadas a la intensidad del tráfico.

4.4.2.3.1.-*Intensidad Media Diaria (IMD).*

Como ha sido mostrado en el *Apartado 4.4.1.5.*, la Intensidad Media Diaria (IMD) se define como el número total de vehículos que pasa por una sección transversal de la carretera, en ambos sentidos, durante un año, dividido por el número de días del año, (según *la Instrucción de Carreteras 3.1.IC.*).

La Intensidad Media Diaria, como parámetro indicador de la densidad del flujo del tráfico, ejerce un papel primordial sobre el riesgo de ocurrencia de accidentes. Debido a ello, el IMD será considerado como factor de influencia en el desarrollo del modelo de predicción.

4.5.- Resumen del capítulo 4.

El presente apartado ha mostrado la primera fase de la metodología de generación de modelos de predicción, consistente en el *planteamiento del problema* que se trata de resolver. Dicha fase ha requerido la definición del problema en términos precisos, indicando:

- El ámbito de aplicación del trabajo, esto es, la población que se quiere investigar.
- Las variables respuesta y explicativas que serán consideradas durante la posterior etapa de selección del modelo.

La etapa de definición del ámbito de aplicación del trabajo trata de determinar una población integrada por elementos lo más homogéneos posible desde el punto de vista de la propiedad que se quiere evaluar: *ocurrencia de accidentes en tramos de carretera*.

De este modo, y tomando en consideración todos los tramos de carreteras de España, son esperadas carencias de homogeneidad desde el punto de vista de los factores permanentes del medio. Debido a ello, ha sido efectuado un análisis de influencia sobre dicha homogeneidad de dos propiedades:

- *Tipo de vía.*
- *Características del trazado en planta de la calzada: recta frente a curva.*

Este análisis ha permitido concluir lo siguiente:

- Deben ser analizadas por separado las vías urbanas (y travesías) frente a las vías interurbanas. Junto a esto y dentro de las vías interurbanas, pueden tratarse de modo similar las autopistas y autovías, frente a las carreteras convencionales.
- Deben ser tratadas de modo diferente desde el punto de vista de los factores permanentes del medio las alineaciones rectas frente a las alineaciones curvas.

Ante esto, se establece como ámbito de aplicación de la presente Tesis Doctoral el siguiente:

- *Tipo de vía:* *autovía.* Esta elección se debe a la concentración y gravedad de los accidentes ocurridos en este tipo de vía, la accesibilidad de itinerarios para el estudio y la facilidad de medición de los factores del medio mediante el sistema de medida desarrollado.
- *Tipo de alineación:* *curva.* Esta elección está motivada por la notable influencia de los factores permanentes del medio sobre los accidentes ocurridos en esta alineación, cuyas especificaciones de diseño condicionan las sollicitaciones de aceleración lateral sobre el vehículo no compensadas por el peralte y la distancia de visibilidad geométrica. Así, el tramo de curva es definido como sigue:

“Tramo de curva.- Sección de la calzada cuyo radio del trazado en planta es inferior a 1000 metros ($R < 1000$ m). Dicha sección es ampliada en 100 metros de longitud en su zona posterior (zona de influencia de la misma).”

Y de este modo, la población considerada quedará definida como sigue:

Tramos en curva de autovías españolas, donde serán identificados los principales factores de riesgo potencial asociados a las condiciones permanentes del medio presentes en los mismos, los cuales condicionan el comportamiento de los conductores influyendo sobre la ocurrencia de accidentes de tráfico.

Posteriormente, se aborda la etapa de definición de las variables del modelo. En este trabajo, y como resultado de los trabajos de investigación realizados en este área, serán consideradas dos variables respuesta de distinta naturaleza:

- *Variable respuesta discreta*: frecuencia de accidentes en tramos de curva en autovía.
- *Variable respuesta binaria*: tramo de curva de autovía de concentración de accidentes.

Finalmente han sido identificadas, a partir de los factores permanentes del medio de influencia en la ocurrencia de accidentes, las variables explicativas que serán consideradas en la parte sistemática del modelo predictivo. Los principales factores del medio tenidos en cuenta se presentan seguidamente:

- Parámetros geométricos de la calzada:
 - Trazado en planta.
 - Trazado en alzado.
 - Trazado combinado en planta y alzado.
 - Sección transversal.
- Parámetros de los ramales:
 - Configuración del ramal de acceso/salida.
 - Punto de intersección con vía principal.
- Señalización.
- Visibilidad geométrica de elementos de la vía:
 - Tramo de curva.
 - Ramales.
 - Señalización.
 - Distancia máxima de visibilidad.
- Intensidad del tráfico.

Las variables explicativas objetivas consideradas en el modelo, tomando en cuenta los factores precedentes, han sido:

- ASOCIADAS A LA GEOMETRÍA.
 - ▶ Velocidad máxima en curva (v_s).
 - ▶ Velocidad de aproximación (v_{ap}).
 - ▶ Factor de influencia de la velocidad en la curva (F_{vC}).
 - ▶ Factor de influencia de las curvas precedentes (F_{cp}).

- ▶ Factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (F_{visIC}).
 - ▶ Factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (F_{visTC}).
 - ▶ Factor de influencia de la señalización de la curva (F_{sC}).
 - ▶ Longitud de curva (L_c).
- ASOCIADAS A LOS RAMALES.
 - ▶ Factor de influencia de configuración del ramal (F_{cR}).
 - ▶ Factor de influencia de la velocidad en el ramal (F_{vR}).
 - ▶ Factor de influencia de la visibilidad del ramal (F_{visR}).
 - ▶ Factor de influencia de ramales adyacentes (F_T).
- ASOCIADAS A LA INTENSIDAD DEL TRÁFICO.
 - ▶ Intensidad Media Diaria (IMD).

La bondad del análisis de significación de las variables explicativas definidas se fundamenta en la precisión en la medida de los factores del medio. Esta medición constituye habitualmente una tarea laboriosa, no existiendo sistemas de medida específicos de aplicación a la investigación accidentológica para el registro en continuo de estos factores.

Ante esto se lleva a cabo una segunda fase de desarrollo de un sistema para la medida en continuo de los factores permanentes del medio previamente identificados, basado en un vehículo instrumentado. Para ello, ha sido empleado como plataforma un vehículo turismo de serie equipado con un conjunto de equipos de medida. Las características del sistema de medida en continuo desarrollado -*Apartado 5.*-, así como la validación del mismo -*Apartado 6.*-, son presentados a continuación.

***CAPÍTULO 5.- SISTEMA DE MEDIDA DE
LOS FACTORES DEL MEDIO.
VEHÍCULO INSTRUMENTADO CANE***

CAPÍTULO 5.- SISTEMA DE MEDIDA DE LOS FACTORES DEL MEDIO. VEHÍCULO INSTRUMENTADO CANE.

5.1.- Introducción.

Como ha sido mostrado en el apartado precedente (*Apartado 4.*), la fase inicial de *planteamiento del problema* requiere la definición de las variables explicativas que serán tenidas en cuenta durante el posterior proceso de modelización. Dichas variables explicativas son determinadas a partir de los factores permanentes del medio de influencia en la ocurrencia de accidentes.

Estos factores deben ser medidos durante la etapa posterior de *recogida de información muestral*. La bondad del análisis de significación de las variables explicativas definidas se fundamenta en la precisión en la medida de dichos factores. Esta medición constituye habitualmente una tarea laboriosa, no existiendo sistemas de medida específicos de aplicación a la investigación accidentológica para el registro en continuo de los mismos. Ante esto, se lleva a cabo el desarrollo de un sistema para la medida en continuo de dichos factores, basado en un vehículo instrumentado.

La elaboración de dicho sistema es abordado teniendo en consideración los siguientes criterios de diseño:

- *Medición en continuo* de los factores permanentes del medio, con una mínima perturbación del flujo de tráfico. Esto condicionará tanto la ubicación de los sensores de medida embarcados como la velocidad de circulación durante el proceso de adquisición.
- *Facilidad de manejo*, tanto durante el proceso de medición sobre el itinerario, como durante el posterior proceso de tratamiento de las señales y generación de las variables explicativas de interés.
- *Optimización de los algoritmos de cálculo*, para disminuir el tiempo de procesamiento de señales.
- *Coste* la más reducido posible.

Para ello, y tomando como plataforma un vehículo turismo de serie, ha sido equipado con sensores de medida, sistemas de alimentación y acondicionamiento, y equipo de registro basado en un ordenador embarcado, a fin de completar las cadenas de medida y recogida de datos necesarias para la medición de los factores buscados.

Finalmente, ha sido desarrollada una utilidad informática para Windows[®] de procesamiento de las señales adquiridas, para la obtención de los factores del medio previamente identificados así como de los perfiles en planta y alzado de la calzada analizada.

Las especificaciones del sistema generado se muestran seguidamente. Posteriormente, en el *Apartado 6.* es descrita la etapa final de esta fase de elaboración del sistema de medida en continuo, consistente en la validación del mismo mediante ensayos dinámicos en pista de pruebas (pista del INTA) y en carretera (M-607 y N-I).

5.2.- Sensorización del vehículo.

El desarrollo del sistema de medida empleado en el presente trabajo es continuación de los trabajos previos efectuados por *López Rosado, A., 1994 [24]* en su Tesis Doctoral.

En la presente investigación ha sido tomado como plataforma un vehículo turismo de serie -Ford Orion 1.8 16V Ghia-, en el cual se han instalado los equipos de adquisición y registro de datos requeridos para la medición de las variables del medio seleccionadas.

5.2.1.- INSTRUMENTACIÓN EMBARCADA.

Como ha sido indicado en el apartado precedente, el vehículo turismo de serie utilizado para el desarrollo del sistema de medida de los factores del medio es un Ford Orion 1.8 16V Ghia (CANE). Los sensores embarcados así como su ubicación en el mismo se muestran en la siguientes figuras (*Figuras 5.1. y 5.2.*), donde:

- E1: Equipo de medida de velocidad sin contacto.
- E2: Equipo de medida del ángulo de giro de volante.
- E3: Servo inclinómetro de dos ejes (longitudinal y transversal).
- E4: Cámara de video.
- E5: Equipo de registro.

Las especificaciones técnicas de dichos equipos se describen en los siguientes apartados.

Figura 5.1.- Sensores embarcados en el sistema CANE de medida de los factores del medio. Esquema general.

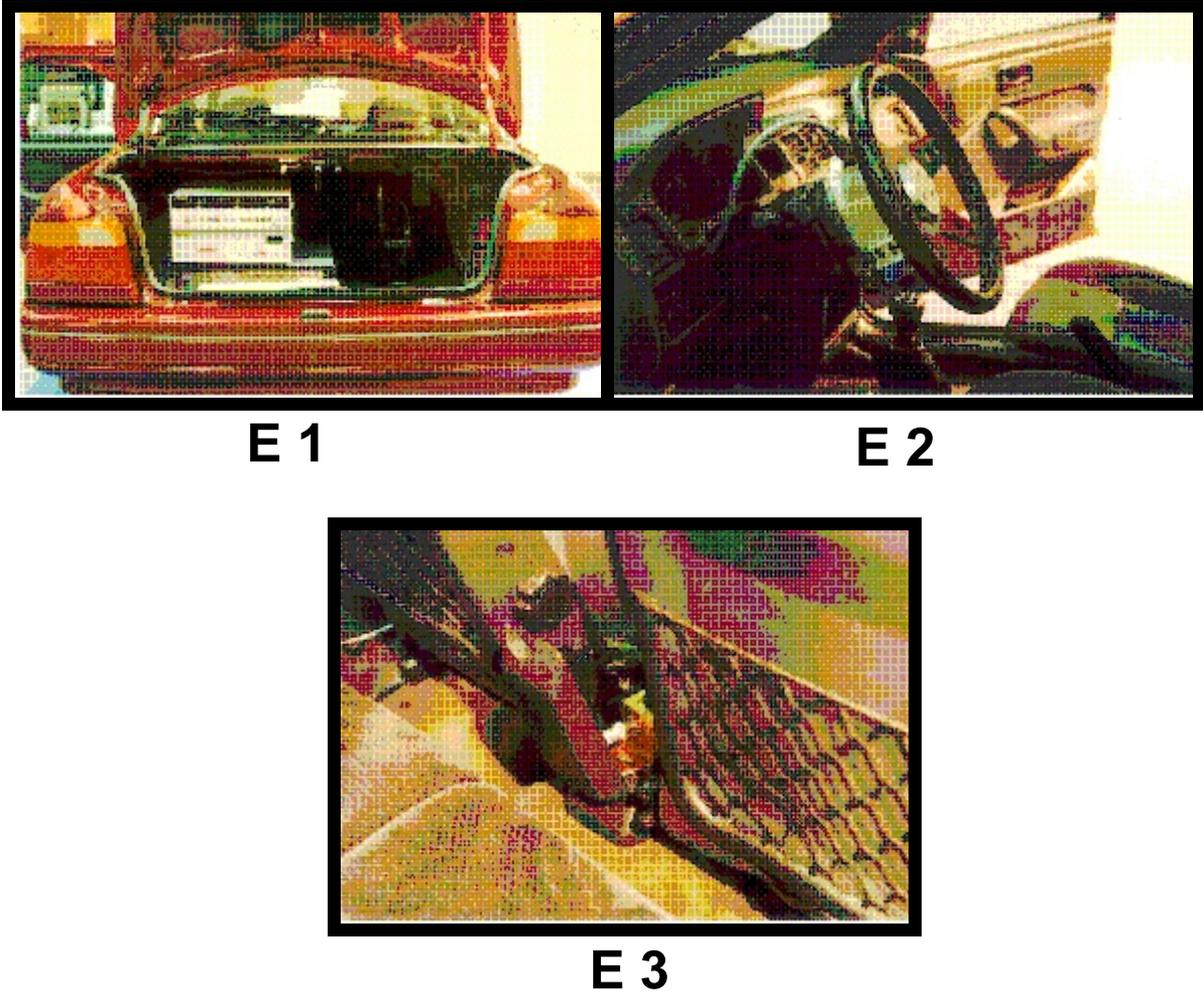


Figura 5.2.- Sensores embarcados en el sistema CANE de medida de los factores del medio. Fotografías de detalle.

5.2.1.1.- Equipo de medida de velocidad sin contacto.

5.2.1.1.1.- *Introducción.*

El análisis de los factores que influyen en el riesgo de ocurrencia de accidentes en tramos de carretera requiere el posicionamiento en el itinerario medido de los diferentes parámetros adquiridos. Para ello, será necesario un cálculo preciso de la distancia en cada instante. Dicho cálculo se basa en la medida instantánea de las variables tiempo y velocidad, las cuales se relacionan a través de la siguiente expresión:

$$\textit{distancia} = \textit{velocidad} \cdot \textit{tiempo} \quad (5.1.)$$

La mayoría de los vehículos disponen de serie de un dispositivo de medida de la velocidad longitudinal. Dicha medida es mostrada al conductor mediante el velocímetro localizado en el habitáculo de pasajeros. No obstante, el error de dicho dispositivo suele estar próximo al 10%, por lo que dicho procedimiento es descartado, dado que no proporciona la precisión requerida en el presente trabajo de investigación para la obtención de la velocidad longitudinal del vehículo.

Por otro lado, el vehículo CANE considerado está dotado de un dispositivo antibloqueo de ruedas en frenado (ABS) de serie. Por ello, se aborda como segunda opción el cálculo de la velocidad longitudinal del mismo empleando dicho dispositivo.

Así, los objetivos fundamentales del dispositivo ABS son los siguientes:

- *Detección* del momento en el que se inicia el bloqueo de cada una de las ruedas controladas, o existen condiciones para que éste se produzca.
- *Actuación* sobre el sistema de frenos del vehículo, modulando la presión del fluido del circuito.

El proceso de detección de una posible situación de bloqueo se fundamenta en la medida de la velocidad angular del neumático. El sistema de medida de dicha velocidad es mostrado en la siguiente figura (*Figura 5.3.*), donde:

- El movimiento de rotación es transmitido desde el neumático a un captador inductivo a través de una rueda dentada (rueda fónica), la cual gira solidaria a dicho neumático. El captador está dotado de un imán permanente el cual genera un campo magnético enfrente de los dientes de dicha rueda. Así, cuando el diente atraviesa dicho campo el cambio de flujo resultante induce una fuerza electromotriz en el devanado, dando lugar a una señal pulsátil.
- La frecuencia de dicha señal es proporcional a la velocidad angular de la rueda. Por ello, se efectúa una etapa intermedia de acondicionamiento del pulso (conformado y conversión frecuencia-tensión), para finalmente obtener una tensión de salida (V_{SALIDA}) proporcional a dicha velocidad angular.

De este modo, a partir de la velocidad angular del neumático ω medida puede ser calculada la velocidad longitudinal del vehículo, a partir de la siguiente expresión:

$$v = \omega \cdot r_d \quad (5.2.)$$

donde:

- v : velocidad longitudinal del vehículo.
- ω : velocidad angular del neumático, medida a partir del dispositivo ABS.
- r_d : radio dinámico del neumático.

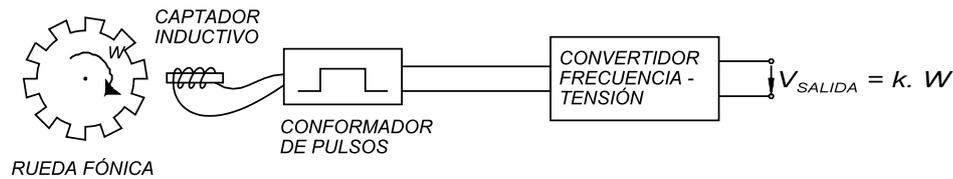


Figura 5.3.- Esquema de la cadena de medida de la velocidad angular del neumático en el dispositivo ABS del vehículo instrumentado CANE.

No obstante, este cálculo presenta el inconveniente que dicho radio varía continuamente, en función de las condiciones dinámicas del vehículo. Por ello, finalmente es abandonada esta metodología de cálculo, debido a que no proporciona la precisión requerida en el presente trabajo de investigación para la obtención de la velocidad longitudinal del vehículo.

Frente a los dispositivos anteriores, la medida con precisión de la velocidad longitudinal de los vehículos en continuo ha sido abordada desde una doble perspectiva:

- Sistemas de medida de la velocidad angular de una rueda adicional montada en el vehículo. Dicha rueda, a diferencia de los neumáticos del vehículo, no soporta cargas verticales dinámicas, al tiempo que presenta una deformación radial muy reducida, por lo que el radio dinámico de la misma puede ser conocido con elevada precisión.

Con esto, y aplicando la expresión mostrada en la Ecuación 5.2., puede ser evaluada la velocidad longitudinal del vehículo con gran exactitud.

- Sistemas de medida de la velocidad sin contacto. Dichos sistemas llevan a cabo el cálculo de la velocidad longitudinal del vehículo mediante dispositivos ópticos, basados en el análisis del haz luminoso reflejado por la calzada, procedente de una fuente de luz instalada en el propio vehículo.

En el presente trabajo de investigación, es empleado un sistema de medida de velocidad sin contacto. Las especificaciones técnicas de dicho equipo se describen en el siguiente apartado.

5.2.1.1.2.- Principio de medida.

El dispositivo de medida de la velocidad sin contacto empleado en el presente trabajo es un modelo LC-660S, fabricado por ONO SOKKI CO., LTD. Dicho dispositivo es mostrado en la siguiente figura (Figura 5.4.).

El equipo de medida presentado consta de tres subsistemas principales:

- Fuente de haz luminoso.
- Detector de haz reflejado por la calzada.
- Unidad de procesamiento.

El principio de medida de dicho dispositivo se describe seguidamente:

- El detector consta de una fotocélula de silicio de tipo “matriz”, como se presenta en la siguiente figura (*Figura 5.4.*), la cual recibe el haz luminoso reflejado por la calzada (procedente de una fuente de luz instalada en el propio vehículo). Dicha fotocélula está situada tras una lente, la cual proyecta sobre aquella una imagen de la configuración de la superficie de la calzada.
- Cuando el vehículo se mueve la imagen de la configuración de la superficie de la calzada cambia, con lo que se modifica la intensidad eléctrica de salida de la fotocélula, correspondiente a las variaciones de la intensidad de la luz recibida por la misma desde la calzada.
- La configuración en celosía de la fotocélula genera una señal de salida periódica, debido al movimiento relativo entre el haz luminoso reflejado y dicha fotocélula (solidaria al vehículo en movimiento), cuya frecuencia es proporcional a la distancia P .

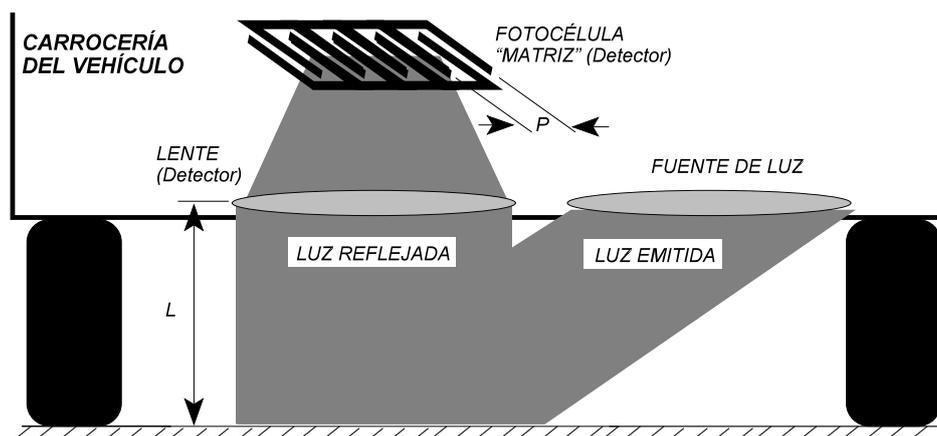


Figura 5.4.- Dispositivo de medida de la velocidad sin contacto LC-660S.

- Finalmente, la velocidad longitudinal del vehículo es evaluada a partir de la frecuencia de dicha señal periódica, a partir de la siguiente expresión:

$$v = \frac{P}{m} \cdot f \quad (5.3.)$$

donde:

- P: distancia entre bandas de la fotocélula en celosía.
- m: amplificación del sistema óptico.
- f: frecuencia de la señal de salida de la fotocélula.

5.2.1.2.- Equipo de medida del ángulo de giro del volante.

5.2.1.2.1.- *Introducción.*

La medida del trazado en planta de la calzada (radio) se basa en el cálculo de la trayectoria seguida por el vehículo CANE durante su tránsito por el itinerario en estudio. Dicho cálculo requiere la medición del ángulo girado por los neumáticos del eje delantero directriz.

Los dispositivos de medida directa en continuo de dicho ángulo presentan una elevada complejidad. Por ello, se recurre a dispositivos indirectos más sencillos y económicos de medida del ángulo girado por el volante de la dirección. Posteriormente, en el *Apartado 6.* se llevará a cabo el cálculo de la relación de desmultiplicación entre dicho volante y los neumáticos.

Las especificaciones técnicas de dicho equipo se describen en el siguiente apartado.

5.2.1.2.2.- *Principio de medida.*

El sistema de medida del ángulo girado por el volante es un Modelo 01027, fabricado por Sensor Developments Inc. Dicho dispositivo es mostrado en la siguiente figura (*Figura 5.5.*).

La medida del ángulo girado por el volante es llevada a cabo mediante un transductor resistivo. Dicho sensor es un potenciómetro circular, de 10 vueltas entre extremos, y que está ubicado en paralelo con la columna de la dirección. La transmisión del movimiento entre dicho potenciómetro y el volante se lleva a cabo mediante una correa dentada de precisión, que enlaza ambos elementos.

Al mismo tiempo, y aunque no es empleado en este trabajo de investigación, el dispositivo permite la medida de otras dos variables adicionales:

- Velocidad de giro del volante.
- Esfuerzo ejercido en la columna de dirección.

Figura 5.5.- Dispositivo de medida del ángulo girado por el volante modelo 01027.

5.2.1.3.- Servo inclinómetro de dos ejes.

5.2.1.3.1.- *Introducción.*

La medida de la inclinación del trazado en alzado de la calzada (rampa/pendiente) y de la inclinación de la sección transversal de la misma (peralte), se basa en la medida de la orientación del plano del suelo de la carrocería del vehículo instrumentado durante su tránsito por el itinerario en estudio.

Los sensores de medida de la inclinación de un cuerpo o vehículo pueden clasificarse en función del sistema de referencia respecto al cual se determina la orientación de dicho cuerpo. Seguidamente, se presentan los sistemas de referencia más utilizados para la determinación de la orientación de un vehículo:

- *Método de referencia inercial:* el movimiento de un cuerpo rotante obedece a la primera ley del movimiento de Newton en un marco de referencia inercial, en la que no se aplica fuerza alguna al cuerpo y dicho cuerpo no experimenta ninguna aceleración. Sin la presencia de un par actuante, el cuerpo rotante se mantiene girando de igual manera alrededor del mismo eje.

- *Método de referencia gravitacional*: la fuerza de la gravedad actuando sobre una masa puede usarse para establecer un eje de referencia vertical. Si la masa se suspende dentro de una estructura y ésta se fija al vehículo, los cambios de orientación del vehículo se traducen en cambios del ángulo formado por la estructura respecto al eje de suspensión de la masa.
- *Método de referencia magnética*: si un campo magnético permanece fijado en posición, sus polos pueden establecer un eje de referencia. Así, una aguja imantada se autoalinea con los polos de un campo magnético, como el de la Tierra.
- *Método de referencia por caudal de fluido*: la dirección a lo largo de la cual fluye un fluido fuera de un vehículo en movimiento puede ser usada como referencia para la orientación del mismo. La orientación detectada de esta manera se denomina típicamente ángulo de ataque.
- *Método de referencia óptica*: uno o más ejes de referencia para la orientación de un vehículo pueden establecerse apuntando un dispositivo electro-óptico de un vehículo a un cuerpo celeste emisor de luz, cuya posición en el tiempo de medición es bien conocida, o apuntando un dispositivo semejante a un punto de posición conocida, en donde un cambio en escalón en la luz reflejada o refractada se detecta en el vehículo.
- *Método de referencia radio*: la interacción entre un haz de radiación electromagnética, emanado de un punto de posición, dirección y características conocidas, y un dispositivo receptor localizado en el vehículo, capaz de detectar cambios en el ángulo de incidencia del haz, puede ser usado para evaluar la orientación de dicho vehículo.

Teniendo en cuenta dicha clasificación, se muestran a continuación algunos de los sensores característicos basados en cada uno de los sistemas de referencia previamente descritos:

- *Giróscopo de orientación*: éste es un sensor con referencia inercial.
- *Inclinómetros*: éstos son transductores con referencia gravitacional. Los sensores empleados para medir el desplazamiento angular respecto a la vertical son muy simples de diseñar, con una masa líquida o sólida unida a un transductor o formando parte de éste.
- *Brújula*: éste es un sensor con referencia magnética. Los dispositivos relacionados con la brújula se emplean en la mayoría de los vehículos marinos o aéreos para indicar el rumbo.
- *Detectores de ángulo de ataque*: éstos son transductores con referencia por caudal de flujo. Son empleados en vehículos espaciales de alta velocidad para la detección de la orientación con respecto a la dirección del caudal de fluido ambiental observado en el vehículo.
- *Detectores electro-ópticos*: éstos son transductores con referencia óptica. Dichos sensores son empleados típicamente para la determinación de la orientación en vehículos espaciales, incluso en globos de experimentación o aplicaciones aéreas espaciales.

- *Radio brújula*: éste es un transductor con referencia radio. Esencialmente, se trata de un radio receptor, con antena rotatoria altamente direccional (antena bucle).

5.2.1.3.2.- *Hipótesis de cálculo de la inclinación de la calzada.*

Como ha sido indicado al comienzo del presente apartado, el objetivo pretendido es la determinación de la orientación del plano del suelo de la carrocería del vehículo CANE durante su tránsito por el itinerario en estudio, para la medición de la rampa/pendiente y peralte de la calzada. Esta metodología de cálculo de los ángulos de inclinación de la calzada implica la introducción de la siguiente hipótesis simplificativa:

- El vehículo turismo considerado se comporta como un sólido rígido, no existiendo movimiento relativo entre la masa suspendida (carrocería del vehículo) y la masa no suspendida (neumáticos) que se encuentra en contacto con la calzada. Este movimiento ha sido cuantificado mediante sensores potenciométricos de hilo instalados en el vehículo instrumentado.

La aceptación de dicha hipótesis se basa en la observación que durante la circulación del vehículo instrumentado a la velocidad de ensayo por itinerarios de autovía, el movimiento relativo masa suspendida-no suspendida, provocado por las aceleraciones longitudinal y transversal, es muy reducido.

Dicho movimiento es más apreciable cuando el vehículo atraviesa alguna irregularidad de la calzada, lo que genera aceleraciones verticales: en esta situación, los filtros de señal (implementados en el equipo acondicionador, así como en el algoritmo de cálculo propuesto en los apartados siguientes), corrigen parcialmente la influencia del ruido introducido por esta irregularidad. Con todo, la componente del movimiento relativo no corregida entrará a formar parte del error de medida, evaluado durante los ensayos de validación presentados en el *Apartado 6*.

Finalmente, la información sobre este movimiento relativo no será considerada en el algoritmo desarrollado con objeto de simplificar los cálculos.

Teniendo en cuenta esta simplificación, la orientación de la carrocería del vehículo será determinada en la presente Tesis Doctoral por dos ángulos, como se presenta en la siguiente figura (*Figura 5.6*).

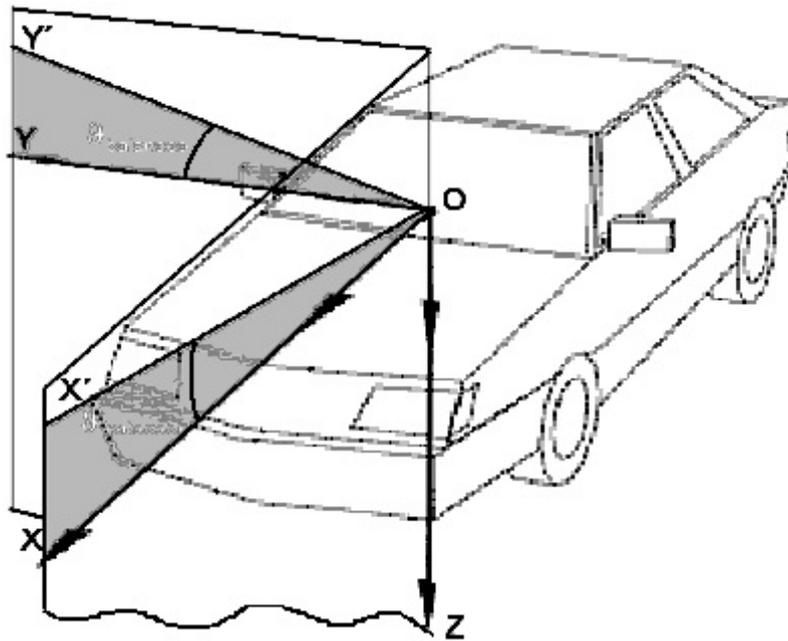


Figura 5.6.- Ángulos de suelo de carrocería medidos mediante el vehículo CANE.

Dichos ángulos quedan definidos como sigue:

1.- Se considera un sistema de referencia ortogonal móvil con el vehículo, y cuyo origen coincide con el punto O de ubicación del dispositivo de medida de ángulos, donde:

- El plano XY de dicho sistema (plano horizontal) se define como normal al vector aceleración de la gravedad.
- El plano XZ de dicho sistema se define como normal al anterior y conteniendo al vector de velocidad de avance del vehículo.
- El plano $X'Y'$ queda definido por el suelo de la carrocería del vehículo.

2.- Se definen los ángulos del suelo de la carrocería del vehículo como se muestra seguidamente:

- *Ángulo de cabeceo*: ángulo de inclinación medido sobre el plano XZ . Dicho ángulo, correspondiente a la rampa/pendiente de la calzada, es el ángulo formado entre el eje OX y la línea de intersección del suelo de la carrocería con el plano XZ (línea OX').
- *Ángulo de balanceo*: ángulo de inclinación medido sobre el plano YZ . Dicho ángulo, correspondiente al peralte de la calzada, es el ángulo formado entre el eje OY y la línea de intersección del suelo de la carrocería con el plano YZ (línea OY').

3.- El valor del *ángulo de guiñada*, como ángulo medido sobre el plano horizontal (plano XY) no es tenido en cuenta durante la definición del equipo de medida, dado que se considera despreciable a la velocidad de circulación del vehículo CANE por el itinerario de autovía medido.

Teniendo en cuenta los distintos dispositivos de medida de la orientación de un vehículo mostrados en este apartado así como el objetivo propuesto en el presente trabajo, la elección del equipo ha sido efectuada como sigue:

- El método de referencia por caudal de fluido no presenta interés, dado que está dirigido a la utilización por vehículos de alta velocidad.
- Los métodos de referencia magnética, de referencia óptica y de referencia radio, son empleados para la orientación longitudinal del vehículo en su itinerario, pero no han sido diseñados para medidas de precisión de los ángulos de inclinación de la estructura del vehículo, objeto del presente trabajo.
- Finalmente, tanto los métodos de referencia inercial como gravitacional son válidos para la medición de los ángulos girados por la carrocería del vehículo durante su circulación por el itinerario en estudio.

Los giróscopos de orientación, basados en una referencia inercial, poseen mayor precisión en la medida de los ángulos que los inclinómetros, basados en una referencia gravitacional, especialmente en medidas dinámicas. No obstante, aquellos presentan el gran inconveniente del coste: aproximadamente de 10 a 15 veces superior al de los inclinómetros.

Por ello, y dado que uno de los criterios de partida en el diseño del vehículo es mantener un coste lo más reducido posible, ha sido implementado en el vehículo CANE un inclinómetro de medida de dos ejes.

Las especificaciones técnicas de dicho equipo se describen en el siguiente apartado.

5.2.1.3.3.- *Principio de medida.*

El dispositivo de medida de la inclinación de la carrocería del vehículo empleado en el presente trabajo es un servo inclinómetro modelo SX 41400, fabricado por SENSOREX. Dicho dispositivo es mostrado en la siguiente figura (*Figura 5.7.*).

El dispositivo empleado es un sensor de medida por comparación, frente a los transductores de medida de deflexión (en éstos, la magnitud medida genera un efecto físico, que produce algún efecto similar pero opuesto en alguna parte del instrumento y que está relacionado con la variable a medir).

Figura 5.7.- Servo inclinómetro de dos ejes modelo SX41400.

Frente a esto, en los dispositivos por comparación, como el descrito seguidamente, se intenta mantener nula la deflexión mediante la aplicación de un efecto bien conocido, opuesto al generado por la magnitud a medir. En este caso, hay un detector del equilibrio y un medio para restablecerlo.

Así, el servo inclinómetro empleado en la presente Tesis es un acelerómetro afectado por el campo de gravedad terrestre (± 1 g). El transductor consta de una masa inercial (péndulo), la cual posee un brazo perpendicular a la dirección de movimiento de dicho péndulo. El sistema es servo controlado mediante un generador de par inductivo, cuya corriente es proporcional a la aceleración aplicada. Posteriormente, es aplicada la conversión de la aceleración a ángulo, mediante la función “arcseno”.

La posición de la masa inercial es detectada mediante un sensor óptico, a partir del movimiento del brazo del péndulo. La detección de la posición sin contacto evita pérdidas por fricción. El elemento transductor está inmerso en aceite, para proporcionar un buen amortiguamiento frente a las vibraciones del medio.

Las medidas en transductores de medida por comparación suelen ser más exactas que en sistemas por deflexión, debido a que el detector de desequilibrio (en este caso, el sensor de posición óptico), sólo mide alrededor del cero y, por lo tanto, proporciona una elevada sensibilidad.

Por otro lado, una de las desventajas importantes de los servo inclinómetros frente a los giróscopos de orientación es la respuesta en frecuencia. Así, la frecuencia de corte del servo inclinómetro es de 6 Hz, lo cual condiciona el campo de utilización del mismo. No obstante, y dado que el fenómeno físico a medir (rampa y peralte), a la velocidad de medición con el vehículo instrumentado (aproximadamente 80 km/h), posee una frecuencia de variación alejada de dicho límite, el sensor escogido permitirá la medición del fenómeno pretendido. Al mismo tiempo, dicha frecuencia de corte actuará como un primer filtro ante las irregularidades de la calzada, las cuales introducen ruido en la señal adquirida.

5.2.1.4.- Cámara de vídeo.

La definición de algunas de las variables explicativas objetivas consideradas en los modelos de predicción de la ocurrencia de accidentes en tramos de carretera desarrollados en el presente trabajo de investigación están basadas en factores permanentes del medio los cuales no pueden ser medidos directamente mediante los transductores instalados en el vehículo CANE, y presentados en los apartados anteriores.

Dichas variables se presentan seguidamente:

- Número de carriles.
- Características de configuración de los ramales de acceso y salida a la vía principal en estudio.
- Restricciones geométricas a la visibilidad.
- Ubicación de los hitos kilométricos reales en la carretera medida.

Para la adquisición de dichas variables, se instala en el interior del habitáculo del vehículo una cámara de vídeo HANDYCAM SONY, con película de 8 mm, y situada aproximadamente en el punto de vista del conductor. Mediante dicha cámara se registra en continuo todo el itinerario en estudio, para el posterior análisis del mismo, utilizando el reloj interno de esta cámara para el posicionamiento de los diferentes elementos respecto a las variables adquiridas mediante el resto de sensores del vehículo.

5.2.1.5.- Equipo de acondicionamiento y registro.

5.2.1.5.1.- *Introducción.*

Si se desea indicar el valor medido en un punto situado a cierta distancia del punto de medida, es preciso introducir un medio de transmisión de información entre el dispositivo de medida y el dispositivo de visualización o almacenamiento. Los sistemas de transmisión de medidas remotas más populares son los sistemas de medida electrónicos.

En las siguiente figura (*Figura 5.8.*) se muestra un sistema electrónico básico de medida.

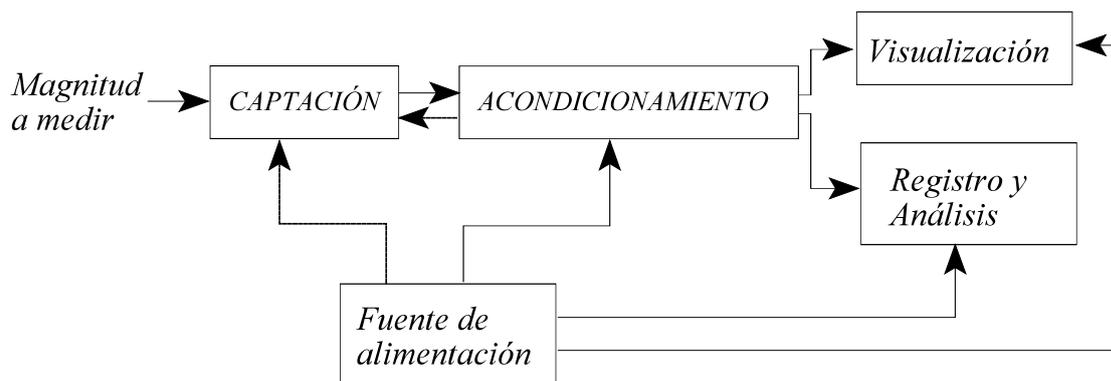


Figura 5.8.- Sistema electrónico básico de medida.

Dicho sistema está formado por los siguientes elementos:

- *Sensor*: dispositivo que convierte una señal de una forma física en una señal correspondiente pero de otra forma física distinta. Es, por tanto, un dispositivo que convierte un tipo de energía en otro.
- *Acondicionamiento*: los acondicionadores de señal, adaptadores o amplificadores, son los elementos del sistema de medida que ofrecen, a partir de la señal de salida de un sensor electrónico, una señal adecuada para ser presentada o registrada, o que simplemente permiten un procesamiento posterior mediante un equipo o instrumento estándar.

Consisten normalmente en circuitos electrónicos que ofrecen, entre otras funciones, las siguientes:

- Amplificación.
- Filtrado.
- Alimentación.
- Adaptación de impedancias.

Si se considera, por ejemplo, el caso en que una de las etapas de tratamiento de la señal medida es digital, si la salida del sensor es analógica (que es lo más frecuente), hará falta un convertidor A/D (Analógico/Digital). Éstos presentan una impedancia de entrada limitada, y exigen que su amplitud esté entre unos límites determinados, que no suelen exceder de 10 V.

Todas estas exigencias obligan a interponer un acondicionador de señal entre el sensor, que muchas veces ofrece señales de apenas unos milivoltios, y el convertidor analógico/digital.

- *Visualización y registro*: la presentación de los resultados puede ser de forma analógica (óptica, acústica o táctil), o numérica (óptica). El registro puede ser magnético o sobre papel, e incluso electrónico, y exige siempre que la información de entrada esté en forma eléctrica.

Las especificaciones técnicas de dicho equipo instalado en el vehículo instrumentado CANE se describen en el siguiente apartado.

5.2.1.5.2.- *Configuración del equipo de acondicionamiento y registro.*

Los requerimientos técnicos de los dispositivos de acondicionamiento están determinados por las características del transductor al que están asociados. Así, teniendo en cuenta los sensores instalados en el vehículo CANE, han sido implementados los siguientes dispositivos:

- *Equipo de medida de velocidad sin contacto*: dicho equipo es alimentado a una tensión de $12 \frac{66}{51}$ VDC.

Dado que dicha alimentación no presenta requerimientos de elevada precisión, dicho dispositivo es alimentado directamente por la batería del vehículo, por lo que no es necesario la instalación de ninguna fuente de tensión adicional. Junto a esto, este equipo lleva incorporado el dispositivo de amplificación y filtrado de la señal, por lo que tampoco es preciso la instalación de ningún acondicionador.

- *Equipo de medida del ángulo de giro del volante*: como ha sido mostrado, la medida del ángulo girado por el volante es llevada a cabo mediante un transductor potenciométrico, el cual admite una tensión de alimentación seleccionable en el rango de $3 \div 18$ VDC. En estos sensores, la precisión de la señal medida está condicionada por la estabilidad de la tensión de alimentación, por lo que es necesario la instalación de una fuente de alimentación de precisión.

Al mismo tiempo, se ha incorporado un dispositivo de filtrado y adaptación de impedancias de la señal generada por dicho dispositivo.

- *Servo inclinómetro*: dicho equipo puede ser alimentado a una tensión en el rango de $9 \div 18$ VDC (12 V nominal).

Aunque este dispositivo no presenta requerimientos de elevada precisión, dicho dispositivo es alimentado mediante la fuente instalada para la alimentación del equipo de medida del ángulo de giro del volante. Junto a esto, este equipo lleva incorporado el dispositivo de amplificación y filtrado de la señal, por lo que no es preciso la instalación de ningún acondicionador adicional.

Las señales analógicas de los transductores son registradas en el disco duro de un ordenador embarcado (procesador digital) durante el recorrido por el itinerario en estudio. Por ello, es preciso una etapa intermedia donde dichas señales analógicas, continuas en el tiempo y en la amplitud, sean convertidas en señales digitales, las cuales poseen únicamente dos niveles de tensión para representar un código determinado.

La conversión analógico/digital (A/D) se encarga de convertir un tipo de señal en otro, sin pérdida significativa de información. Dicho proceso de conversión analógico/digital es llevado a cabo mediante una tarjeta comercial, modelo PCL 818, la cual ha sido implementada en el ordenador embarcado de registro de las señales adquiridas.

5.2.2.- LOCALIZACIÓN DE LOS SENSORES DE MEDIDA.

Como ha sido mostrado en el apartado precedente, los sensores embarcados en el vehículo de medida CANE así como su ubicación en el mismo son presentados en las *Figuras 5.1. y 5.2.* Los criterios de localización de dichos sensores se describen seguidamente.

5.2.2.1.- Equipo de medida de velocidad sin contacto.

Como ha sido presentado en el *Apartado 5.2.1.1.2.*, el equipo de medida de velocidad sin contacto empleado en el presente trabajo consta de tres subsistemas principales:

- Fuente de haz luminoso.
- Detector de haz reflejado por la calzada.
- Unidad de procesamiento.

La unidad de procesamiento va localizada en el interior del habitáculo. Por otro lado, tanto la fuente de haz luminoso como el detector de haz reflejado deben estar dirigidos hacia la calzada, a una altura respecto a ésta de 500 ± 100 mm. La configuración portátil de dicho dispositivo permite su instalación en el exterior de la carrocería del vehículo, mediante ventosas.

No obstante, y dado que unos de los criterios de diseño del vehículo instrumentado consiste en la medición en continuo de los factores del medio con una mínima perturbación del flujo de tráfico, se modifica la ubicación del dispositivo de modo que pase desapercibido en dicho flujo. Para ello, se practica una abertura en el suelo del portaequipajes del vehículo, desde donde dicho dispositivo puede emitir y recibir el haz luminoso sobre la calzada, sin ser detectado por el resto de conductores.

5.2.2.2.- Equipo de medida del ángulo de giro del volante.

Como ha sido mostrado en el *Apartado 5.2.1.2.*, el valor del ángulo girado por los neumáticos del eje directriz es calculado a partir del valor medido del ángulo girado por el volante de la dirección. Para ello es sustituido el volante original, instalando en su lugar el dispositivo de medida mostrado en la *Figura 5.5.*

5.2.2.3.- Servo inclinómetro.

El transductor de medida del ángulo de inclinación de la carrocería del vehículo CANE es fijado al suelo de la misma. Dicho dispositivo es situado sobre el eje longitudinal del vehículo, en el hueco existente entre los asientos anteriores, junto al mando del freno de estacionamiento.

La unión al suelo es llevada a cabo a través de una plataforma regulable, la cual permite el ajuste en reposo del cero en las dos direcciones de medida de dicho transductor (longitudinal y transversal).

5.2.2.4.- Cámara de vídeo.

La cámara de vídeo para el registro en continuo del itinerario en estudio ha sido instalada en el interior del habitáculo de conducción, aproximadamente a la altura del punto de vista del conductor, con objeto de obtener una visión lo más próxima posible a la imagen percibida por el mismo durante la circulación por el trazado de carretera.

5.3.- Procedimiento de cálculo de los factores permanentes del medio.

5.3.1.- CÁLCULO DEL TRAZADO EN PLANTA Y ALZADO.

El cálculo de los parámetros característicos que definen los perfiles en planta y alzado de la calzada (radio, rampa/pendiente y peralte) está fundamentado en las medidas obtenidas mediante el vehículo instrumentado CANE. Sin embargo, dichas medidas deben ser procesadas con objeto de:

- Inferir el radio de la trayectoria a partir del ángulo girado por el volante y de la velocidad longitudinal del vehículo.
- Compensar el efecto perturbador de la dinámica longitudinal y lateral sobre las medidas de los ángulos girados por la carrocería del vehículo.

El algoritmo aplicado a las señales recogidas se muestra en la siguiente figura (*Figura 5.9.*).

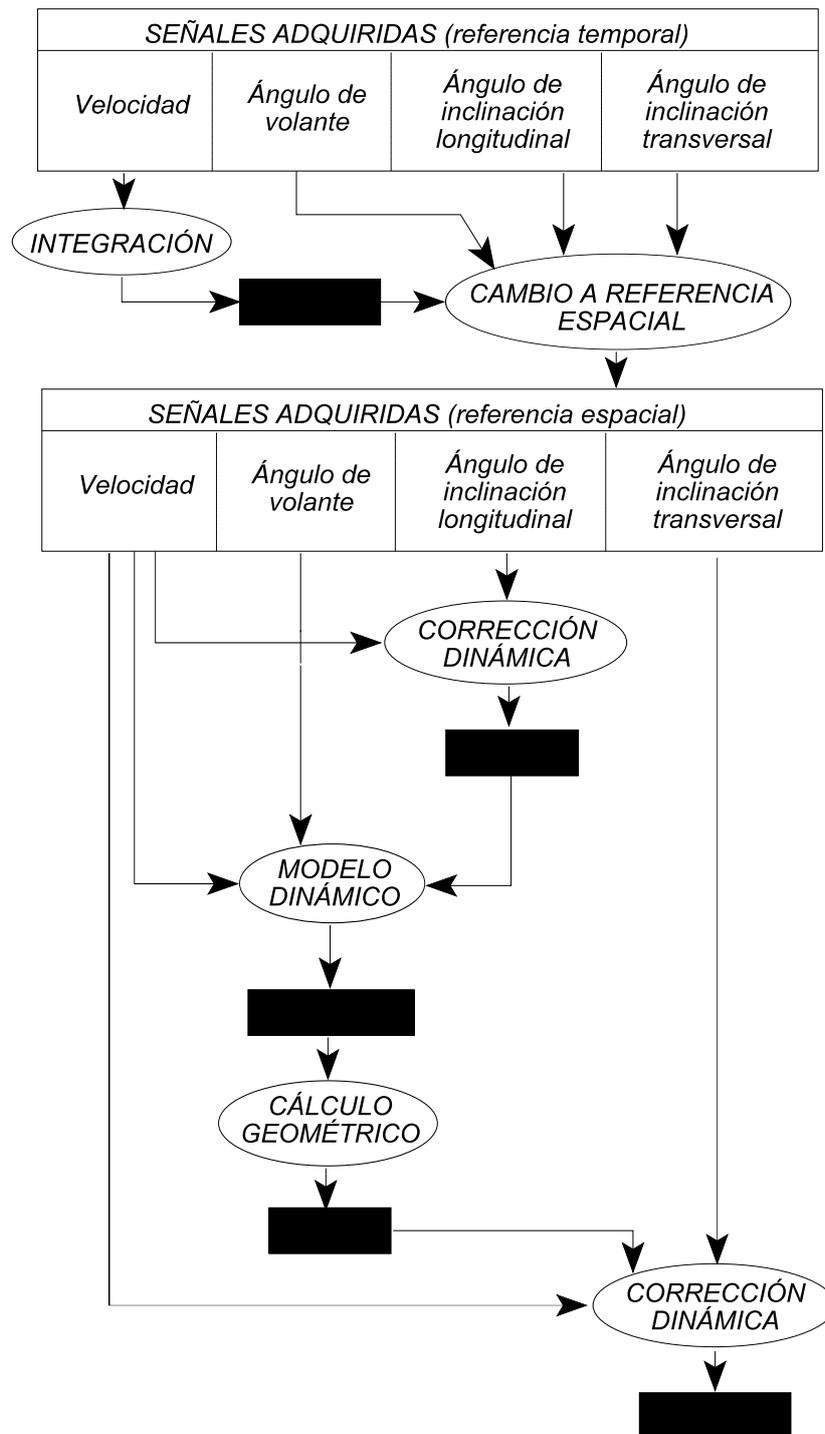


Figura 5.9.- Algoritmo de cálculo de parámetros del trazado en planta y alzado de la calzada.

Dicho algoritmo evoluciona como sigue:

1.- *Cambio a referencia espacial.*

Las señales captadas por los transductores y registradas en el disco duro del ordenador embarcado están referidas a la variable tiempo. Así, dichas variables son adquiridas a una frecuencia de muestreo de 10 Hz (10 puntos por segundo), por lo que el tiempo transcurrido entre dos muestras consecutivas es de 0.1 s.

El estudio llevado a cabo en el presente trabajo requiere el posicionamiento en la calzada de las variables consideradas. Por ello, es necesario referir dichas variables al espacio.

El espacio recorrido en cada instante es calculado a partir de la señal de velocidad adquirida mediante el equipo de medida de la velocidad sin contacto, a través de un proceso de integración de dicha señal de velocidad. Dicho cálculo se muestra en la siguiente figura (*Figura 5.10.*), así como en la expresión presentada a continuación.

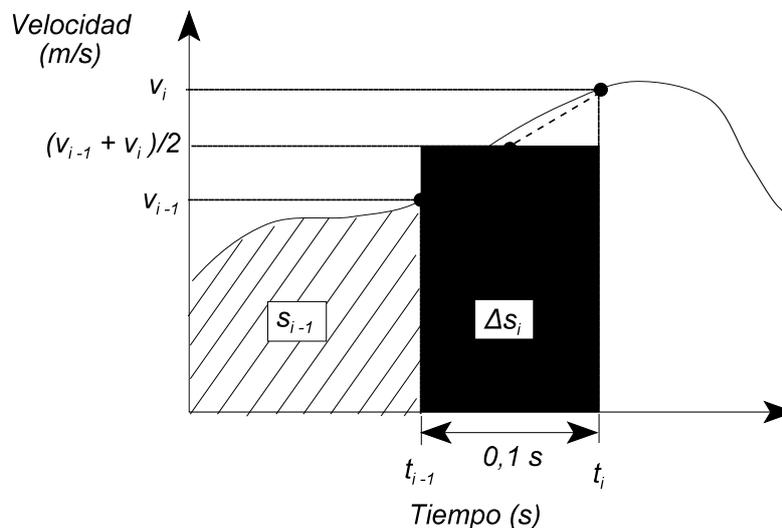


Figura 5.10.- Cálculo de la distancia recorrida a partir de la señal de velocidad.

$$s_i = s_{i-1} + \Delta s_i = s_{i-1} + \frac{(v_{i-1} + v_i)}{2} \cdot 0.1 \quad (5.4.)$$

Seguidamente, se muestra en la siguiente figura (*Figura 5.11.*) la aplicación de esta metodología de cálculo a la evaluación de la distancia recorrida por el vehículo instrumentado en un itinerario de la N-IV (P.K. 15 a P.K. 20).

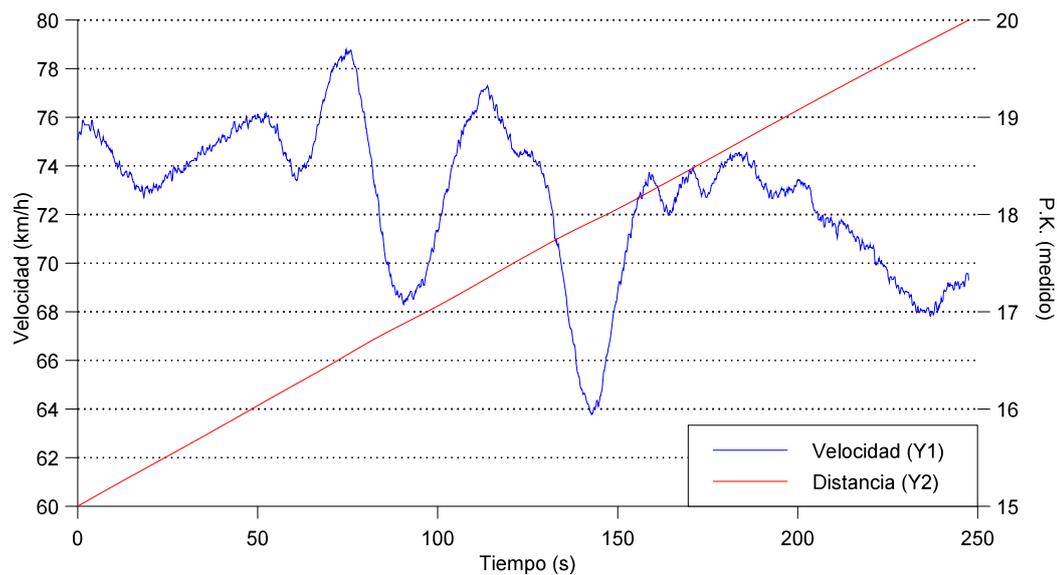


Figura 5.11.- Cálculo de la distancia recorrida en un itinerario de la N-IV (P.K. 15 a P.K. 20).

Finalmente, tras el cálculo de la distancia en función del tiempo, se lleva a cabo el cambio de la referencia temporal de las señales adquiridas a su referencia frente a la variable espacio (distancia recorrida por el vehículo CANE).

2.- Cálculo de la rampa.

Posteriormente, y previo a la aplicación del modelo dinámico de vehículo, es necesario el cálculo de la rampa/pendiente del itinerario (inclinación de la calzada en la dirección de avance del vehículo instrumentado). Para ello, y como ha sido mostrado en el *Apartado 5.2.1.3.2.*, es necesario considerar la siguiente hipótesis simplificativa: el vehículo turismo considerado se comporta como un sólido rígido, no existiendo movimiento relativo entre la masa suspendida (carrocería del vehículo) y la masa no suspendida (neumáticos) que se encuentra en contacto con la calzada. Dicha hipótesis permite identificar el ángulo de inclinación del suelo de la carrocería del vehículo con el ángulo de inclinación de la calzada.

Junto a esto, la medida del servo inclinómetro instalado en el habitáculo de pasajeros se ve afectada fundamentalmente por las aceleraciones del vehículo durante la marcha en la dirección de avance del mismo. Por ello, debe realizarse una corrección dinámica de dicha medida de inclinación.

Inicialmente, se instala un acelerómetro en dicha dirección de avance. No obstante, dicho transductor se ve afectado en igual medida por el ángulo de inclinación de la carrocería. Así, debe considerarse que un servo inclinómetro es un servo acelerómetro con salida de tensión proporcional al ángulo girado en vez de generar una salida proporcional a la aceleración.

Debido a este hecho, se descarta la utilización de un acelerómetro. En su lugar, se calcula la aceleración en el plano de avance del vehículo a partir de la señal de velocidad adquirida mediante el equipo de medida de la velocidad sin contacto, a través de un proceso de derivación respecto a la variable tiempo de dicha señal de velocidad. Dicho cálculo se muestra en la siguiente figura (*Figura 5.12.*), así como en la expresión presentada a continuación.

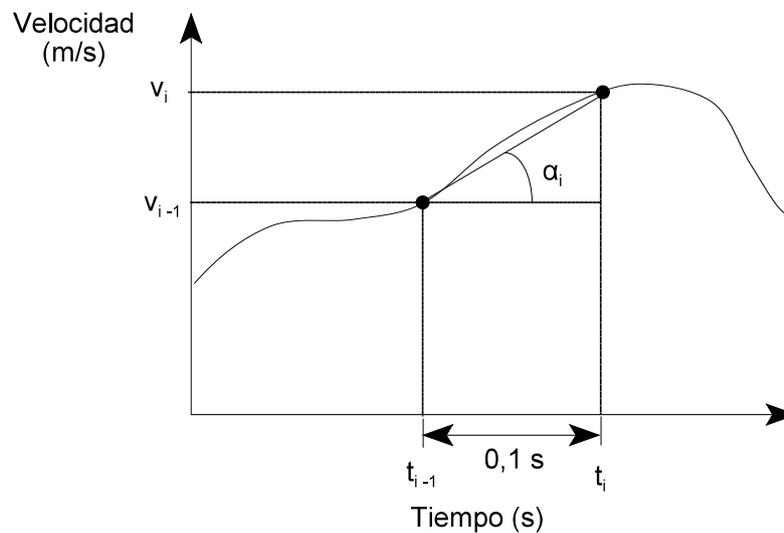


Figura 5.12.- Cálculo de la aceleración longitudinal a partir de la señal de velocidad.

$$a_i = \operatorname{tg} \alpha_i = \frac{\Delta v_i}{\Delta t} = \frac{(v_i - v_{i-1})}{0.1} \quad (5.5.)$$

Una vez obtenida la aceleración longitudinal en el plano de avance del vehículo, se elimina la contribución de la misma a la medida de inclinación longitudinal proporcionada por el inclinómetro. Esta corrección dinámica se muestra en la siguiente figura (*Figura 5.13.*), así como en la expresión presentada a continuación.

$$\text{rampa} (\%) = 100 \cdot \operatorname{tg} \left[\operatorname{arcsen} \left(\operatorname{sen} \theta_i - \frac{a_i}{g} \right) \right] \quad (5.6.)$$

donde:

- a_i : aceleración longitudinal sobre el plano de avance del vehículo (plano de la calzada), opuesta a la acción de la inercia, la cual actúa sobre la masa pendular del inclinómetro.

- θ_i : ángulo proporcionado por el inclinómetro, correspondiente (según el sentido de la aceleración considerada en la siguiente figura) a una inclinación superior a la real experimentada por el suelo de la carrocería del vehículo instrumentado.

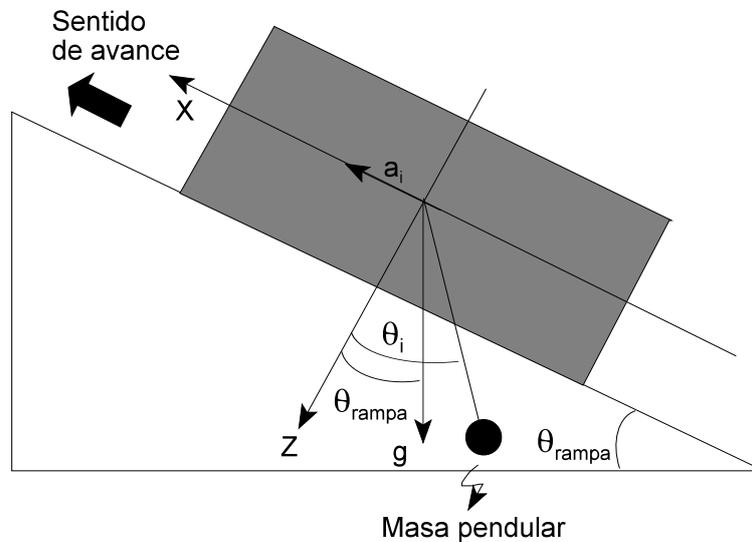


Figura 5.13.- Corrección dinámica del ángulo de inclinación longitudinal del servo inclinómetro.

Seguidamente, se muestra en la siguiente figura (Figura 5.14.) la aplicación de esta metodología de cálculo a la evaluación de la rampa/pendiente en un itinerario de la N-IV (P.K. 15 a P.K. 20), donde:

- En color verde se representa la evolución de la velocidad en el itinerario de 5 km. considerado, a partir de la cual se evalúa la aceleración promedio para la corrección dinámica del valor de ángulo longitudinal medido.
- En color rojo se muestra el valor del ángulo longitudinal medido, expresado en tanto por ciento. El signo de dicho valor sigue el siguiente convenio:
 - * Positivo: calzada en ascenso (rampa).
 - * Negativo: calzada en descenso (pendiente).
- En color azul se presenta el valor de la rampa calculada (expresada en tanto por ciento), tras la corrección dinámica del ángulo medido mediante la aceleración longitudinal estimada.

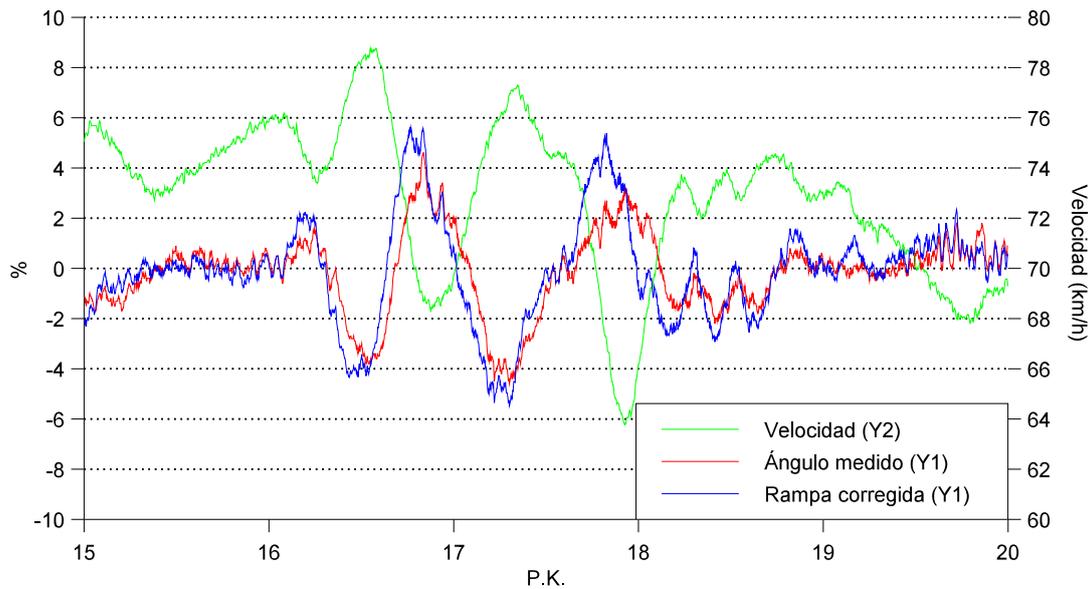


Figura 5.14.- Cálculo de la rampa en un itinerario de la N-IV (P.K. 15 a P.K. 20).

En esta figura se observa como la contribución de la aceleración longitudinal en las condiciones de realización del ensayo resulta, en la mayoría de las ocasiones, poco significativa.

Finalmente, empleando el valor de la rampa calculada, se obtiene el perfil en alzado del itinerario. Así, se muestra en la siguiente figura (Figura 5.15.) el cálculo del mismo en un itinerario de la N-IV (P.K. 15 a P.K. 20)

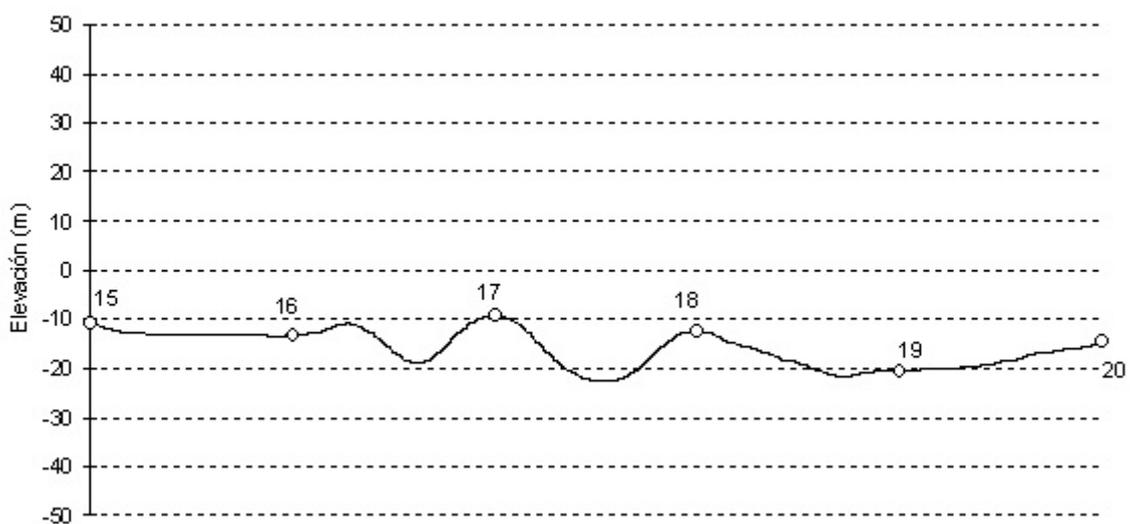


Figura 5.15.- Cálculo del perfil en alzado en un itinerario de la N-IV (P.K. 15 a P.K. 20).

3.- Cálculo de la trayectoria.

La generación de la trayectoria seguida por el vehículo instrumentado CANE es requerida para el cálculo del radio del itinerario recorrido por el mismo. Dicha trayectoria es obtenida mediante la computación del modelo de vehículo de diez grados de libertad optimizado en los trabajos previos efectuados por *López Rosado, A., 1994 [24]*.

Dicho modelo incluye el modelo de neumático de Dugoff de simulación del contacto neumático/calzada, mediante el cual se determina los valores de adherencia utilizados por el vehículo ante solicitaciones combinadas (longitudinal y lateral).

El modelo considerado, descrito brevemente en el *Apartado 5.3.2.*, recibe como información de entrada para el cálculo de la trayectoria seguida por el vehículo la siguiente, adquirida en continuo mediante el vehículo instrumentado, para la evaluación de la trayectoria recorrida por el mismo:

- Señal de velocidad de circulación.
- Señal de ángulo girado por el volante.
- Rampa/pendiente del itinerario calculada.

Seguidamente, se muestra en la siguiente figura (*Figura 5.16.*) la aplicación de esta metodología de cálculo a la evaluación de la trayectoria en planta seguida por el vehículo CANE en un itinerario de la N-IV (P.K. 15 a P.K. 20).

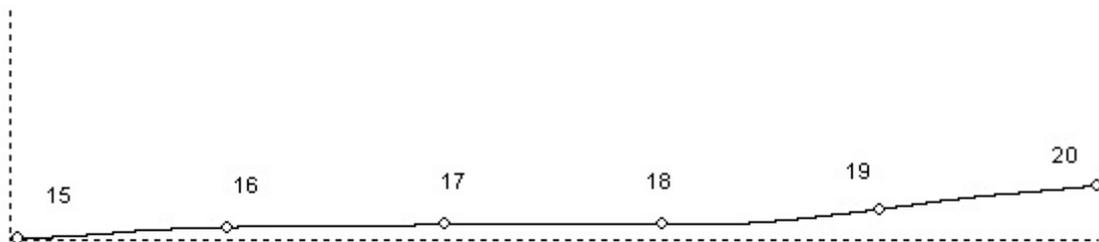


Figura 5.16.- Cálculo de la trayectoria en planta seguida por el vehículo CANE en un itinerario de la N-IV (P.K. 15 a P.K. 20).

4.- Cálculo del radio.

Para la obtención del radio del itinerario considerado es necesario tener en cuenta la siguiente hipótesis simplificativa: el trazado de dicho itinerario corresponde con la trayectoria seguida por el vehículo instrumentado CANE.

Dicha trayectoria, como ha sido mostrado en el apartado precedente, es calculada a partir de la información sobre los factores del medio adquirida durante el recorrido por la calzada en estudio. Los puntos que definen esta trayectoria son evaluados con una distancia de separación de 2 metros. Así, el cálculo geométrico del radio en cada uno de los puntos es obtenido como sigue:

- El radio en un punto corresponde al radio de un tramo de longitud de 50 metros, centrado en el punto de cálculo.

La elección de la longitud de tramo de 50 metros para el cálculo del radio ha sido llevada a cabo tras un conjunto de pruebas iniciales de validación (utilizando los valores obtenidos en la pista de pruebas del INTA y en la carretera M-607), durante las cuales han sido evaluadas las siguientes longitudes de tramo para el cálculo del radio: 10 metros, 25 metros, 50 metros, 75 metros y 100 metros. Los resultados de estas pruebas se muestran seguidamente:

- * Los valores de 10 y 25 metros son demasiado cortos, proporcionando una elevada variabilidad en los valores del radio obtenidos.

- * El valor de 75 metros no aporta grandes diferencias respecto al valor de 50 metros, y presenta el inconveniente de requerir un mayor número de puntos para el cálculo, lo cual ralentiza el proceso.

- * El valor de 100 metros promedia el radio obtenido en exceso, proporcionando un mayor error en el cálculo.

- Para el cálculo del radio en este tramo, se aproxima el mismo a un segmento de circunferencia. Seguidamente, se aplica el método de la cuerda y la flecha para el cálculo geométrico de dicho radio.

Dicho cálculo se muestra en la siguiente figura (*Figura 5.17.*), así como en la expresión presentada a continuación.

$$Radio_P = R_P = \frac{C^2}{8 \cdot F} + \frac{F}{2} \quad (5.7.)$$

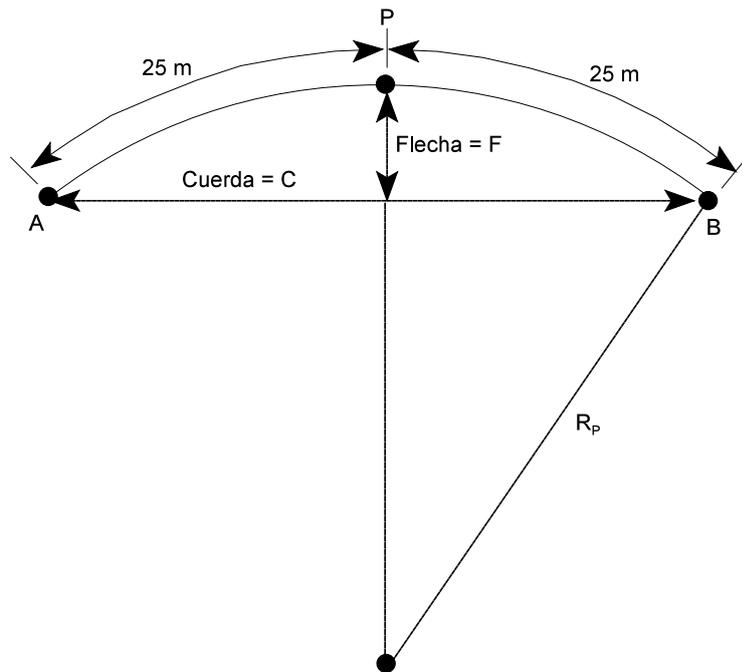


Figura 5.17.- Cálculo del radio de la trayectoria en un punto P.

Seguidamente, se muestra en la siguiente figura (Figura 5.18.) la aplicación de esta metodología de cálculo a la evaluación del radio de la trayectoria seguida por el vehículo CANE en un itinerario de la N-IV (P.K. 15 a P.K. 20), donde el signo de dicho valor sigue el siguiente convenio:

- Positivo: giro antihorario (giro a la izquierda).
- Negativo: giro horario (giro a la derecha).

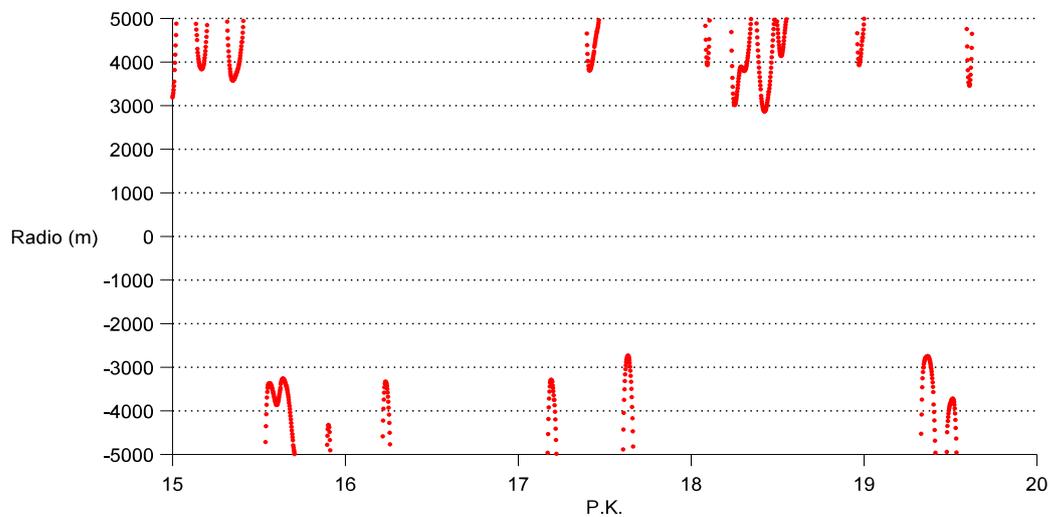


Figura 5.18.- Cálculo del radio en un itinerario de la N-IV (P.K. 15 a P.K. 20).

5.- Cálculo del peralte.

Finalmente, y con objeto de evaluar las condiciones de circulación segura en curva, es necesario el cálculo del peralte del itinerario (inclinación de la calzada en la dirección transversal a la de avance del vehículo instrumentado). Para ello, y como ha sido mostrado en el *Apartado 5.2.1.3.2*, es necesario considerar la siguiente hipótesis simplificativa: el vehículo turismo considerado se comporta como un sólido rígido, no existiendo movimiento relativo entre la masa suspendida (carrocería del vehículo) y la masa no suspendida (neumáticos) que se encuentra en contacto con la calzada. Dicha hipótesis permite identificar el ángulo de inclinación del suelo de la carrocería del vehículo con el ángulo de inclinación de la calzada.

Junto a esto, la medida transversal del servo inclinómetro instalado en el habitáculo de pasajeros, como en el caso del cálculo de la rampa/pendiente del itinerario, se ve afectada fundamentalmente por las aceleraciones del vehículo durante la marcha en la dirección transversal a la de avance del mismo. Por ello, debe realizarse una corrección dinámica de dicha medida de inclinación.

Inicialmente, se instala un acelerómetro en dirección transversal. No obstante, dicho transductor se ve afectado en igual medida por el ángulo de inclinación de la carrocería.

Debido a este hecho, se descarta la utilización de un acelerómetro. En su lugar, se calcula la aceleración a partir de:

- La señal de velocidad adquirida mediante el equipo de medida de la velocidad sin contacto.
- El radio del itinerario previamente evaluado (*Ecuación 5.7.*).

Dicho cálculo se muestra en la expresión presentada a continuación.

$$a_i = \frac{v_i^2}{R_{P_i}} \quad (5.8.)$$

Una vez obtenida la aceleración transversal, se elimina la contribución de la misma a la medida de inclinación transversal proporcionada por el inclinómetro. Esta corrección dinámica se muestra en la siguiente figura (*Figura 5.19.*), así como en la expresión presentada a continuación.

$$\text{peralte (\%)} = 100 \cdot \text{tg} \left[\arcsen \left(\text{sen} \theta_i + \frac{a_i^*}{g} \right) \right] \quad (5.9.)$$

donde:

- a_i^* : aceleración transversal sobre el plano de avance del vehículo, que actúa sobre la masa pendular del inclinómetro. Realmente, la aceleración centrífuga obtenida, a_i , actúa en un plano paralelo al plano horizontal (plano cuyo vector normal es coincidente con el vector aceleración de la gravedad). No obstante, y dado que los ángulos de peralte presentes en autovía son de pequeño valor, será considerado que:

$$a_i^* = a_i$$

- θ_i : ángulo proporcionado por el inclinómetro, correspondiente (según el sentido de la aceleración considerada en la siguiente figura) a una inclinación inferior a la real experimentada por el suelo de la carrocería del vehículo instrumentado.

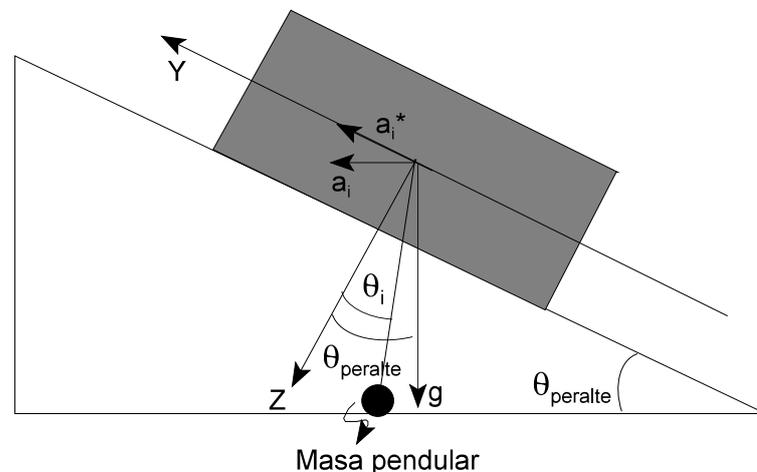


Figura 5.19.- Corrección dinámica del ángulo de inclinación transversal del servo inclinómetro.

Seguidamente, se muestra en la siguiente figura (Figura 5.20.) la aplicación de esta metodología de cálculo a la evaluación del peralte en un itinerario de la N-IV (P.K. 15 a P.K. 20), donde:

- En color rojo se muestra el valor del ángulo transversal medido, expresado en tanto por ciento. El signo de dicho valor sigue el siguiente convenio:

* Positivo: ángulo de balanceo en sentido horario (según sentido de avance del vehículo).

* Negativo: ángulo de balanceo en sentido antihorario (según sentido de avance del vehículo).

- En color azul se presenta el valor del peralte calculado (expresado en tanto por ciento), tras la corrección dinámica del ángulo medido mediante la aceleración transversal.

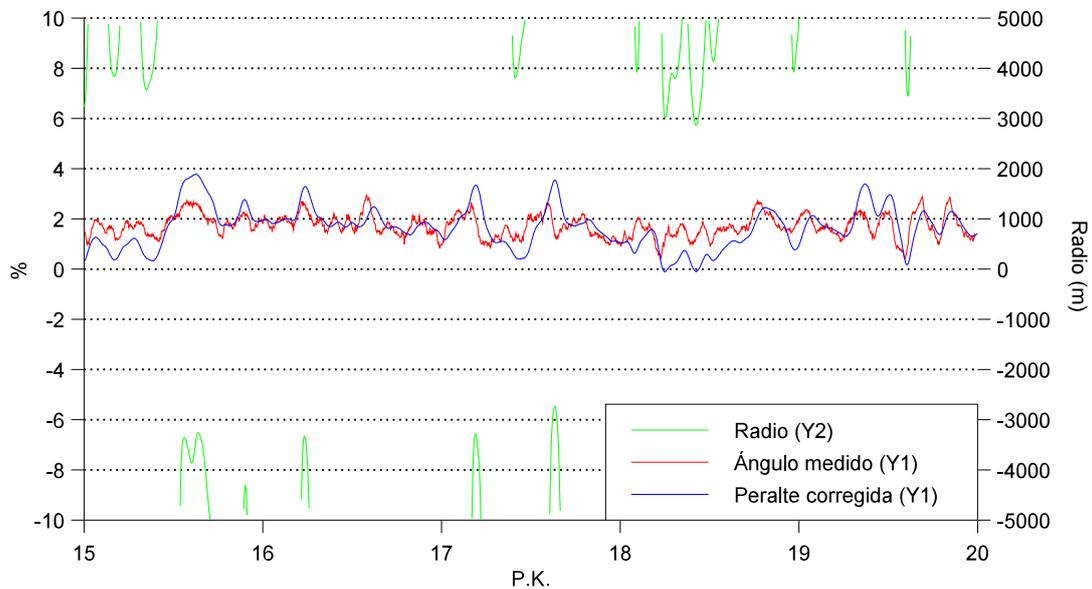


Figura 5.20.- Cálculo del peralte en un itinerario de la N-IV (P.K. 15 a P.K. 20).

En esta figura se observa como, a diferencia del cálculo de la rampa, la contribución de la aceleración transversal en las condiciones de realización del ensayo resulta, en algunas ocasiones, significativa.

5.3.2.- MODELO DE SIMULACIÓN DE LA DINÁMICA VEHICULAR.

5.3.2.1.- Introducción.

Como ha sido mostrado en los apartados precedentes, la presente Tesis Doctoral es continuación de los trabajos previos efectuados por *López Rosado, A., 1994 [24]*.

En dicho trabajo de investigación, se analiza el comportamiento tridimensional dinámico de un vehículo automóvil en maniobras longitudinales (aceleración y frenado) y laterales. Para ello, se computa un modelo de vehículo de diez grados de libertad, que incluye un modelo de neumático mediante el cual se determina los valores de adherencia utilizados por el vehículo ante sollicitaciones combinadas (longitudinal y lateral). En dicho modelo:

- La carrocería es considerada como un sólido rígido en el espacio, con seis grados de libertad.
- El vehículo está dotado de suspensión independiente, con un grado de libertad en cada uno de los neumáticos, correspondiente al giro de los mismos.

Dicho modelo de simulación dinámica será empleado en el presente estudio, en dos fases del trabajo:

- 1.- *Cálculo del trazado en planta del itinerario analizado.*- Así, como ha sido mostrado en el *Apartado 5.3.1.*, dicho trazado corresponde a la trayectoria seguida por el vehículo instrumentado, durante su tránsito por el itinerario en estudio.

El modelo considerado recibe como información de entrada la siguiente, adquirida en continuo mediante el vehículo instrumentado, para la evaluación de dicha trayectoria:

- Señal de velocidad de circulación.
 - Señal de ángulo girado por el volante.
 - Rampa del itinerario calculada.
- 2.- *Evaluación de la velocidad de circulación de un vehículo tipo por el itinerario en estudio*, condicionada por los factores permanentes del medio.

Los principios básicos del citado modelo se muestran seguidamente.

5.3.2.2.- Técnica de modelización.

La obtención de las ecuaciones diferenciales del modelo se realiza mediante la técnica de grafos de unión (*técnica de Bond-Graph*), dado que esta sistemática de obtención de ecuaciones es muy adecuada a los sistemas dinámicos complejos como el propuesto.

La técnica de grafos de unión permite la integración de modelos de subsistemas para constituir un modelo completo. Esta metodología de integración se adapta adecuadamente a la modelización de vehículos, de forma que es posible desarrollar en una primera fase modelos individuales de elementos y subconjuntos, e integrarlos posteriormente en un modelo global.

De este modo, el desarrollo del modelo empleado en el presente estudio ha sido generado a partir de la integración de los siguientes modelos parciales:

- Modelo de suspensión.
- Modelo de sólido rígido en el espacio.
- Modelo de neumático.

Finalmente, será requerido un cambio de referencia del sistema móvil que acompaña al centro de gravedad del vehículo (C.D.G.) a un sistema de referencia inercial, para el cálculo de la trayectoria del mismo.

Los aspectos fundamentales del proceso de modelización se muestran en los apartados siguientes.

5.3.2.3.- Modelo de suspensión.

Las hipótesis adoptadas para la modelización del sistema de suspensión del vehículo se definen a continuación:

- 1.- El vehículo está dotado de un sistema de suspensión independiente para cada rueda.
- 2.- El sistema de suspensión es modelizado mediante un modelo de 1 grado de libertad, donde no se tiene en consideración la rigidez radial del neumático.

5.3.2.4.- Modelo de sólido rígido en el espacio.

Para el estudio del comportamiento tridimensional de un vehículo se considera la carrocería como un sólido rígido de seis grados de libertad, con un sistema de referencia $OXYZ$ móvil cuyo origen O coincide con el centro de gravedad del mismo, como se muestra en la siguiente figura (*Figura 5.21*), donde:

- Tres grados de libertad corresponden a los desplazamientos longitudinal (X), transversal (Y) y vertical (Z) del centro de gravedad.
- Los otros tres grados de libertad son los giros de balanceo (ϕ), cabeceo (θ) y guiñada (ψ), en torno a cada uno de los ejes del sistema móvil.

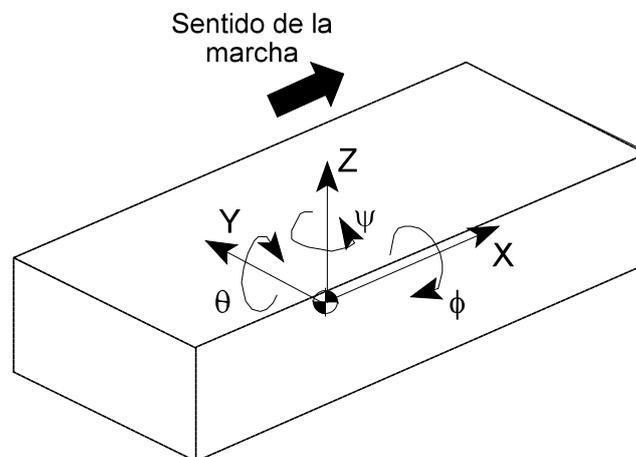


Figura 5.21.- Sistema de referencia y grados de libertad en modelo de sólido rígido.

Una vez determinado el modelo de la carrocería del vehículo, deben ser evaluadas las acciones exteriores sobre la misma. Dichas acciones son mostradas a continuación:

- *Esfuerzos longitudinales y transversales.*- Dichos esfuerzos, aplicados en la huella de contacto neumático-calzada, son calculados mediante el modelo de Dugoff de simulación de dicho contacto, el cual es mostrado en el siguiente apartado. Este modelo requiere como variables de entrada las siguientes:

- Variables dinámicas de estado: velocidades longitudinal y lateral del centro de masas de la carrocería, velocidad de guiñada del vehículo, velocidad angular del neumático y ángulo de dirección.

El ángulo de dirección es evaluado en continuo a partir del ángulo girado por el volante, procedente de las medidas efectuadas en el itinerario en estudio mediante el vehículo instrumentado CANE. La relación de desmultiplicación real entre el ángulo de giro de volante y el ángulo de giro del neumático, incorporada en el modelo de simulación de la dinámica vehicular mostrado en este apartado, ha sido obtenida mediante el procedimiento mostrado en el *Apartado 6*.

- Parámetros del neumático: rigideces longitudinal y de deriva, y factor A_s de reducción de la fricción.

- Parámetros de la calzada: valor nominal del coeficiente de adherencia neumático-calzada.

- Geometría del vehículo: posicionamiento del centro de la huella de contacto.

- *Esfuerzos verticales.*

- *Resistencias al avance.*- Las resistencias consideradas se muestran seguidamente:

- Resistencia a la rodadura: esta resistencia está relacionada con una pérdida de potencia en el neumático, que se debe a los fenómenos de histéresis en el interior de la estructura del mismo, al rozamiento neumático-calzada por deslizamiento y a resistencias debidas al contacto con el aire exterior.

Existe un elevado número de factores de influencia en el coeficiente de resistencia a la rodadura. No obstante, y debido a su reducida influencia respecto a otras resistencias presentes, dicho coeficiente será considerado constante en el presente trabajo.

- Resistencia aerodinámica: ésta es debida a la interacción del vehículo con el fluido aire, en cuyo seno se mueve.

En el presente trabajo de investigación, se desprecian los efectos aerodinámicos en cualquier dirección distinta de la frontal (dirección longitudinal de avance del vehículo), así como cualquier momento aerodinámico.

- Resistencia por desnivel longitudinal (rampa/pendiente): cuando el vehículo circula sobre una superficie con desnivel θ , la componente del peso en dirección longitudinal actuará como fuerza retardadora cuando el vehículo ascienda por una rampa, y como fuerza propulsora del movimiento en las pendientes.

Esta resistencia, la cual no fue considerada en el trabajo previo desarrollado por *López Rosado*, ha sido incorporada al modelo en la presente Tesis como una componente añadida a la suma de resistencias al avance aplicadas en el centro de gravedad del vehículo. La información para su evaluación procede de la medida en continuo de la rampa mediante el vehículo instrumentado CANE.

- Peralte: el ángulo de inclinación del perfil transversal de la calzada es medido en continuo mediante el vehículo CANE, y esta información será empleada como variable de influencia para la predicción del riesgo de ocurrencia de accidentes en curva. No obstante, dicha variable no es incorporada en el modelo de simulación de la dinámica vehicular descrito en el presente apartado.

5.3.2.5.- Modelo de neumático.

Los neumáticos, como parte del vehículo, ejercen gran influencia en el comportamiento dinámico del mismo y en el conjunto de sus prestaciones. Así, todas las fuerzas exteriores que actúan sobre éste, a excepción de las aerodinámicas, son aplicadas a través de dichos neumáticos.

Debido a esto, uno de los elementos principales para la obtención de resultados fiables en la modelización de la dinámica vehicular lo constituye la simulación del comportamiento del neumático. Los modelos de simulación del comportamiento del mismo pueden ser clasificados en tres categorías: empíricos, analíticos y los basados en elementos finitos.

Existen diferentes modelos analíticos desarrollados con diferentes planteamientos en la formulación y resolución del conjunto de ecuaciones diferenciales que describen la deformación del material del neumático. La descripción de los logros más significativos en este campo se muestra en los trabajos de *Maalej (1989)*, *Dugoff (1970)*, *Gim y Nikraves (1989)*, *Sakai (1987)* y otros. Entre todos ellos, destaca la teoría de *Dugoff* publicada en 1970 y validada experimentalmente por *Bernard (1973)*.

Frente a los anteriores, los modelos empíricos se basan en el análisis estadístico de los datos recogidos en ensayos de neumáticos. Uno de los modelos empíricos más destacable es el desarrollado por *Pacejka (1987)*. Según trabajos de comparación entre los diferentes modelos existentes, éste es el que mejor se ajusta al comportamiento real del neumático, aunque presente el inconveniente de la mayor complejidad en los cálculos.

El modelo empleado en la presente Tesis Doctoral es el *modelo de Dugoff*, que contempla el comportamiento del neumático frente a esfuerzos longitudinales y laterales, simultáneamente. Dicho modelo parte del análisis clásico de neumático en rodadura libre desarrollado por *Fiala*. Sin embargo, en muchos aspectos es menos riguroso que aquel, simplificando algunas expresiones matemáticas en beneficio de la sencillez del cálculo pero en perjuicio de la exactitud de los resultados.

5.3.2.6.- Cambio del sistema de referencia.

Las ecuaciones de simulación de la dinámica vehicular, obtenidas a partir de la técnica de grafos de unión, están referidas a un sistema de referencia móvil que acompaña a la carrocería del vehículo. Posteriormente, es necesario referir dichas ecuaciones a un sistema de referencia inercial para la obtención de la trayectoria del mismo.

5.3.2.7.- Características técnicas del vehículo simulado.

Como ha sido mostrado en el *Apartado 4.*, algunas de las variables explicativas consideradas en los modelos de predicción de la ocurrencia de accidentes en tramos de curva se basan en el cálculo de una velocidad de aproximación a dicho tramo. Esta velocidad representa una velocidad posible de llegada a dicho tramo, considerando la influencia que sobre un vehículo tipo ejercen los parámetros geométricos de la calzada (trayectoria en planta y en alzado) medidos mediante el vehículo instrumentado CANE. Dicha velocidad no corresponde necesariamente con la velocidad real de circulación de los vehículos por dicho punto.

Para el cálculo de dicha velocidad de aproximación es empleado el modelo de simulación de la dinámica vehicular previamente definido. Este cálculo requiere el establecimiento de un vehículo tipo, cuyas características geométricas y de la cadena de potencia sean implementadas en el modelo de simulación descrito.

El vehículo tipo considerado es un FIAT TIPO 1.6., de 83 C.V. de potencia y 175 km/h de velocidad máxima en terreno horizontal, según es definido en la *Instrucción de Carreteras 8.1- IC [32] (Anexos III. y IV.)*. Los parámetros más significativos del mismo considerados en el modelo de simulación se muestran en la siguiente tabla (*Tabla 5.1.*).

| <i>Peso y dimensiones</i> | |
|--|-------------------------|
| Peso en orden de marcha | 970 kg |
| Batalla | 2540 mm |
| Vía anterior | 1436 mm |
| Vía posterior | 1415 mm |
| <i>Parámetros aerodinámicos</i> | |
| Área Frontal | 2,3 m ² |
| Coefficiente de resistencia al avance | 0,31 |
| <i>Parámetros del neumático</i> | |
| Denominación | 165/65 R 14 T |
| Radio | 285 mm |
| <i>Caja de cambios</i> | |
| 1 ^o /2 ^a /3 ^a /4 ^a /5 ^a /Grupo cónico | 3,9/2,3/1,4/1,0/0,8/3,8 |
| <i>Motor</i> | |
| Cilindrada | 1580 cm ³ |
| Potencia/régimen | 83 C.V./6000 r.p.m. |

Tabla 5.1.- *Parámetros del vehículo Fiat Tipo 1.6 considerados en el modelo de simulación de la dinámica vehicular.*

Tomando en cuenta dichos parámetros, será implementada en el modelo de simulación una limitación a la velocidad máxima alcanzable por el vehículo, impuesta por la cadena cinemática. Para ello, se consideran las siguientes hipótesis:

- El límite de régimen de giro del motor se produce al régimen en el que se alcanza la potencia máxima del mismo: 6000 r.p.m.
- En esta condición de funcionamiento del motor, la velocidad máxima en rueda se obtiene con la quinta relación de reducción engranada en la caja de cambios: 0.8.

Aplicando dichas consideraciones, la velocidad máxima limitada por la cadena cinemática del vehículo es de 210 km/h.

5.3.3.- VISIBILIDAD, SEÑALIZACIÓN DE CURVA, Y RAMALES DE ENTRADA Y SALIDA.

Como ha sido mostrado en el *Apartado 5.3.1.*, el cálculo de los parámetros característicos que definen los perfiles en planta y alzado de la calzada (radio, rampa/pendiente y peralte) está fundamentado en las medidas obtenidas mediante el vehículo instrumentado CANE, y procesadas posteriormente mediante el algoritmo presentado en la *Figura 5.9*. Para la obtención de dichos parámetros, son requeridas las mediciones en continuo procedentes de los siguientes sensores embarcados:

- E1: Equipo de medida de velocidad sin contacto.
- E2: Equipo de medida del ángulo de giro de volante.
- E3: Servo inclinómetro de dos ejes (longitudinal y transversal).
- E5: Equipo de registro.

Aparte esto, existen un conjunto de variables explicativas involucradas en la generación de los modelos de predicción de la ocurrencia de accidentes que no pueden ser medidas mediante dichos sensores. Dichas variables han sido definidas en el *Apartado 4*.

Para la determinación de dichas variables se emplean las imágenes registradas en continuo mediante la cámara de vídeo embarcada en el vehículo instrumentado CANE, e instalada en el interior del habitáculo de conducción, aproximadamente a la altura del punto de vista del conductor, con objeto de obtener una visión lo más próxima posible a la imagen percibida por el mismo durante la circulación por el trazado de carretera.

La ubicación de las variables consideradas en el itinerario en estudio se lleva a cabo empleando la variable tiempo como referencia. Así, la inicialización de todos los sistemas de registro embarcados (disco duro del ordenador y cinta de película de cámara de vídeo) es sincronizado, de forma que un análisis posterior de laboratorio permitirá la definición de dichas variables empleando las imágenes registradas.

5.4.- Programa informático DISET de análisis del itinerario.

5.4.1.- INTRODUCCIÓN.

El procesamiento de las señales recogidas en continuo por los sensores embarcados en el vehículo instrumentado no es realizado en tiempo real. De este modo, el cálculo de los parámetros característicos que definen los perfiles en planta y alzado de la calzada (radio, rampa/pendiente y peralte) mediante el algoritmo presentado en la *Figura 5.9.*, así como el análisis de las imágenes de vídeo es llevado a cabo en un trabajo posterior de laboratorio.

Una parte de este trabajo es realizado mediante una aplicación informática, en entorno Windows[®] 3.11¹, desarrollada a medida para el presente trabajo de investigación. Dicha aplicación es denominada DISET.

Para la generación de esta aplicación ha sido empleado como lenguaje de programación el lenguaje Turbo Pascal, mediante el compilador Turbo Pascal for Windows[®] 1.5². La elección de dicho lenguaje ha estado condicionada por el hecho de la existencia de algunos módulos previos, programados en el mismo.

Las características más significativas de esta aplicación informática desarrollada son mostradas seguidamente, así como en el *Anexo V.*

5.4.2.- OBJETIVOS.

Los objetivos de generación de la aplicación informática DISET se muestran seguidamente:

- Acondicionamiento de las señales registradas mediante el vehículo instrumentado.
- Cálculo de las trayectorias en planta y alzado de la calzada, así como del radio, peralte y rampa de la misma.
- Obtención de alguna de las variables explicativas consideradas en el modelo de predicción de la ocurrencia de accidentes:

- ASOCIADAS A LA GEOMETRÍA:

- ▶ Velocidad máxima en curva (v_{seg})
- ▶ Velocidad de aproximación (v_{ap})
- ▶ Longitud de curva (L_c)

- ASOCIADAS A LOS RAMALES

- ▶ Factor de influencia de la velocidad en el ramal (F_{vR})

La estructura de funcionamiento de la aplicación es mostrada a continuación.

¹ Windows es una marca comercial registrada, propiedad de Microsoft.

² Turbo Pascal for Windows 1.5 es una marca comercial registrada, propiedad de Borland International Inc.

5.4.3.- ESTRUCTURA DE LA APLICACIÓN INFORMÁTICA DISET.

El diagrama de funcionamiento de esta aplicación es mostrado en la siguiente figura (Figura 5.22.).

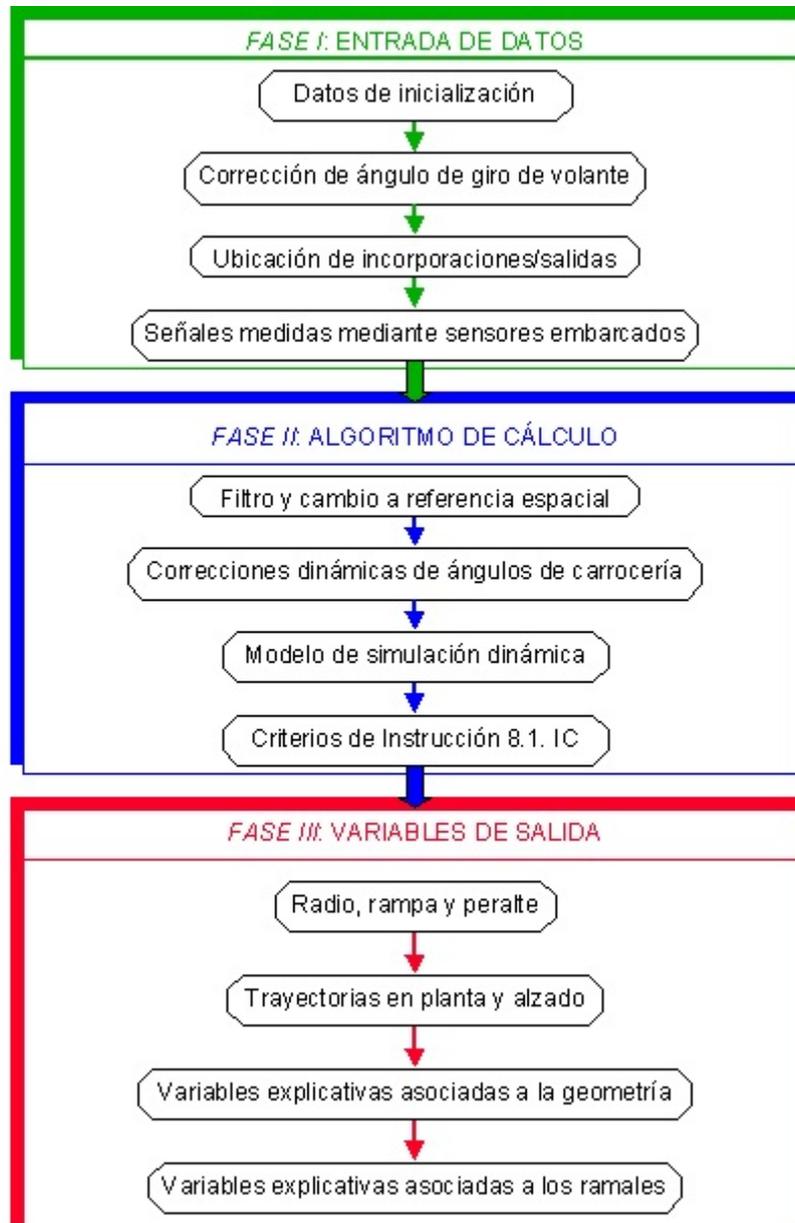


Figura 5.22.- Diagrama de funcionamiento de la aplicación informática DISET.

Las características más significativas de los datos de entrada son descritas seguidamente.

5.4.3.1.- Datos de inicialización.

- *Carretera*: datos de identificación del itinerario medido.
- *Directorio*: ubicación en el disco duro del ordenador de las variables de entrada y salida consideradas durante la ejecución de la aplicación.
- *Nº ensayo*: número de identificación del ensayo realizado.
- *Factor rampa/peralte*: el servo inclinómetro instalado en el habitáculo de pasajeros está unido al suelo de la carrocería del vehículo mediante un soporte, el cual permite la regulación mecánica del ángulo relativo sensor-carrocería en las direcciones longitudinal y transversal, para el ajuste del cero estático de dicho sensor al comienzo de la medida del itinerario.

Como será indicado en el *Apartado 6.*, y debido a la precisión requerida en esta medida del ángulo, se lleva a cabo un proceso de ajuste mediante el soporte regulable al comienzo de cada etapa de medición, dado que las variaciones de carga en el vehículo provocan desajustes del ángulo de la carrocería en ambas direcciones.

Finalmente, será medido el ángulo estático exacto en ambas direcciones proporcionado por el sensor en terreno horizontal, antes del inicio de la adquisición. Dichos valores serán introducidos como *Factor rampa* y *Factor peralte*.

- *P.K. inicio (m)*: la generación de modelos de predicción de la ocurrencia de accidentes se basa en los accidentes acaecidos en el itinerario en estudio. Dichos accidentes están referidos al punto kilométrico y al hectómetro en el que han tenido lugar.

La ubicación de estos accidentes en los tramos analizados requiere la localización de los hitos kilométricos en dicho itinerario. Para ello, se introduce como dato de partida el punto kilométrico, expresado en metros, en el que se inicia la medición. Dicho valor será introducido como *P.K. inicio (m)*.

5.4.3.2.- Corrección del ángulo de giro del volante.

Como ha sido mostrado en los apartados precedentes, el sensor instalado en el volante de la dirección es un potenciómetro circular, de 10 vueltas entre extremos, por lo que presenta un rango de medida entre 0° y 3600°.

Dicho sensor ha sido ajustado de manera que durante la circulación en línea recta del vehículo esté aproximadamente centrado en el rango de medida del mismo, esto es, que proporcione una medida próxima a 1800°.

No obstante y debido a la precisión requerida en esta medida del ángulo, se lleva a cabo un proceso de ajuste al comienzo de cada etapa de medición, durante el cual se evalúa el ángulo exacto proporcionado por el sensor en línea recta.

De este modo, en una primera fase del presente trabajo de investigación ha sido aplicado un factor de corrección común al ángulo girado por el volante durante todo el itinerario medido, para la ubicación de los tramos rectos. No obstante, el análisis de los resultados iniciales obtenidos revela una falta de precisión en la trayectoria simulada a partir de dicha señal de volante. Así, debe considerarse la holgura del dispositivo de dirección lo cual provoca que el volante, tras el trazado de un tramo de curva, no retorne siempre a la misma posición centrada.

Por ello, y como será descrito en el *Apartado 6.*, se introduce un nuevo procedimiento de corrección. Dicho procedimiento es definido como sigue:

- Se considera el trazado del itinerario constituido por tramos de recta y tramos de curva.
- Se introduce una corrección del cero del volante en cada tramo de curva a partir del tramo de recta precedente.
- Para ello y como etapa previa a la generación de la trayectoria, se lleva a cabo un análisis de laboratorio de las imágenes de vídeo registradas, durante la cual se posicionan los tramos de recta referidos a la variable tiempo. Posteriormente, será calculado el factor de corrección para cada uno de dichos tramos de recta.
- Finalmente, los factores de corrección calculados, referidos al instante de comienzo del tramo recto correspondiente, son introducidos en la aplicación informática DISET para la generación de la trayectoria del trazado.

5.4.3.3.- Ubicación de ramales (acceso/salida).

Como ha sido mostrado en el *Apartado 4.*, una de las variables explicativas consideradas durante la generación de modelos de predicción de la ocurrencia de accidentes es el *Factor de influencia de la velocidad en el ramal*. Dicho factor es definido como una velocidad tipo posible de circulación de un vehículo tipo por la autovía en el punto de intersección de la misma con el carril del ramal. El cálculo de dicha velocidad es obtenida conforme al procedimiento definido en el *Apartado 4.4.2.1.2. (Velocidad de aproximación)*.

El cálculo de dicho factor mediante la aplicación informática DISET requiere la introducción de la ubicación del ramal (acceso y/o salida) en el itinerario medido, lo cual se lleva a cabo mediante un análisis previo de laboratorio de las imágenes de vídeo registradas.

5.4.3.4.- Señales medidas mediante sensores embarcados.

La información básica para el cálculo de las variables explicativas obtenidas mediante la aplicación informática desarrollada proviene de la medida en continuo del itinerario. Así, durante esta fase de medición son registrados en el disco duro del ordenador embarcado cuatro ficheros, correspondientes a los sensores instalados en el vehículo instrumentado CANE, como son:

- Señal de velocidad longitudinal.
- Señal de ángulo girado por el volante.
- Señales de servo inclinómetro (longitudinal y transversal).

Dicha información será recuperada durante la ejecución de las distintas utilidades del programa DISET.

5.5.- Resumen del capítulo 5.

Tras la fase de *planteamiento del problema*, durante la cual son definidas las variables explicativas a partir de los factores permanentes del medio, deben ser medidos dichos factores. Ante esto, se lleva a cabo el desarrollo de un sistema para la medida en continuo de los mismos.

El proceso de desarrollo del sistema de medida de los factores del medio permite concluir los siguientes aspectos fundamentales:

1.- Ha sido desarrollado un sistema de medida (vehículo CANE) basado en un vehículo turismo de serie para la medición en continuo de los principales factores permanentes del medio de influencia en la ocurrencia de accidentes en tramos de curva en autovías. Esto posibilita la medición de itinerarios prolongados con una mínima perturbación del flujo de tráfico.

2.- Para ello, han sido embarcados en dicho vehículo el mínimo número de sensores capaces de proporcionar medidas adecuadas al objetivo del estudio. Dichos equipos de medida se listan seguidamente:

- Equipo de medida de velocidad sin contacto.
- Equipo de medida del ángulo de giro de volante.
- Servo inclinómetro de dos ejes (longitudinal y transversal).
- Cámara de video.
- Equipo de registro.

3.- El procedimiento de medida desarrollado implica la aceptación de las siguientes hipótesis simplificadoras:

- El trazado en planta del itinerario corresponde con la trayectoria seguida por el vehículo durante su recorrido. Dicha trayectoria puede no ser ideal, alejándose en diversos puntos de la línea media del carril de medida.
- La metodología de cálculo de los ángulos de inclinación de la calzada (rampa/pendiente y peralte) a partir de la medida de la orientación del plano del suelo de la carrocería del vehículo CANE durante su tránsito por el itinerario en estudio implica que el vehículo turismo considerado se comporta como un sólido rígido, no existiendo movimiento relativo entre la masa suspendida (carrocería del vehículo) y la masa no suspendida (neumáticos).

4.- La obtención de los factores del medio a partir de las medidas registradas en continuo mediante el vehículo instrumentado requiere un procesamiento en laboratorio de dichas medidas.

5.- Existen un conjunto de variables explicativas objetivas involucradas en la generación de los modelos de predicción de la ocurrencia de accidentes que no pueden ser medidas mediante los sensores embarcados. Para la determinación de dichas variables son empleadas las imágenes registradas en continuo mediante la cámara de vídeo embarcada e instalada en el interior del habitáculo de conducción, aproximadamente a la altura del punto de vista del conductor, con objeto de obtener una visión lo más próxima posible a la imagen percibida por el mismo durante la circulación por el itinerario de carretera.

6.- Uno de los criterios fundamentales de diseño del sistema ha sido la facilidad de manejo del mismo, tanto durante el proceso de medición sobre el itinerario, como durante el posterior tratamiento de las señales y generación de las variables de interés.

Con este objetivo, el cálculo de alguna de las variables explicativas es realizado mediante una aplicación informática, en entorno Windows[®] 3.11, desarrollada a medida para la presente Tesis Doctoral. Dicha aplicación es denominada DASET.

Ésta permite la obtención de los siguientes parámetros de la calzada:

- Cálculo de las trayectorias en planta y alzado de la calzada, así como del radio, peralte y rampa/pendiente de la misma.
- Obtención de las siguientes variables explicativas objetivas:
 - Velocidad máxima en curva (v_s)
 - Velocidad de aproximación (v_{ap})
 - Longitud de curva (L_c)
 - Factor de influencia de la velocidad en el ramal (F_{vR})

Seguidamente, en el *Apartado 6.* es descrita la etapa final de esta fase de *desarrollo del sistema de medida en continuo*, consistente en la validación de los parámetros calculados mediante ensayos dinámicos en pista de pruebas (pista del INTA) y en carretera (M-607 y N-I).

***CAPÍTULO 6.- ENSAYOS DE VALIDACIÓN
DEL SISTEMA DE MEDIDA
DE LOS FACTORES DEL MEDIO.***

CAPÍTULO 6.- ENSAYOS DE VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE MEDIDA DE LOS FACTORES DEL MEDIO.

6.1.- Introducción.

Como etapa final de la fase de *desarrollo del sistema de medida* de los factores del medio, y tras la implementación de los dispositivos de adquisición en el vehículo instrumentado -*Apartado 5.*-, se aborda la validación del procedimiento de cálculo de dichos factores mediante ensayos dinámicos en pista de pruebas (pista del INTA) y en carretera (M-607 y N-I). Este proceso de validación es descrito seguidamente.

6.2.- Metodología de medición.

El análisis de un itinerario para la medición de los parámetros geométricos del mismo mediante el sistema de medida desarrollado requiere la aplicación del siguiente procedimiento de trabajo:

1.- MEDICIÓN EN CONTINUO DEL ITINERARIO MEDIANTE EL VEHÍCULO INSTRUMENTADO CANE.

- *Ajuste estático de los sensores de inclinación embarcados:* el servo inclinómetro instalado en el habitáculo de pasajeros está unido al suelo de la carrocería del vehículo mediante un soporte, el cual permite la regulación mecánica del ángulo relativo sensor-carrocería en las direcciones longitudinal y transversal, para el ajuste estático del cero de dicho sensor al comienzo de la medida del itinerario.

No obstante, dicho soporte no posee una regulación lo suficientemente fina para lograr el ajuste preciso de dicho cero. Por ello, al comienzo de cada medición debe ser evaluado el ángulo estático exacto en ambas direcciones proporcionado por el sensor, respecto a un plano horizontal. Dichos valores serán introducidos como *Factor rampa* y *Factor peralte* en la aplicación informática DISET.

- *Verificación del funcionamiento de los equipos de medida y registro.*
- *Recorrido del itinerario:* para la medición en continuo de los factores del medio se circula por el itinerario en estudio con el vehículo instrumentado CANE, a una velocidad aproximadamente constante de 80 km/h. Ésta ha sido fijada teniendo en cuenta los siguientes objetivos:
 - La velocidad debe ser lo más baja posible, para minimizar las influencias dinámicas sobre la medida de inclinación de la carrocería, así como sobre la deriva del neumático durante la circulación en curva.

- No se corta la circulación en el itinerario considerado. Así, la velocidad mínima permitida en autovía (tipo de vía analizada en la presente Tesis), sin necesidad de iluminación de emergencia, es la mitad de la velocidad máxima genérica de la misma, esto es, 60 km/h.

No obstante, dicha velocidad mínima podría interferir con el flujo de tráfico en la mayoría de las ocasiones, por lo que se eleva un 30 % la misma. La circulación a la velocidad de 80 km/h ha resultado adecuada durante las mediciones efectuadas en tramos de autovía.

2.- PROCESAMIENTO DE SEÑALES EN LABORATORIO.

- *Análisis de las imágenes de vídeo:* como ha sido mostrado en el *Apartado 5.4.3.2.*, ha sido introducida una corrección del cero del volante en cada tramo de curva a partir del tramo de recta precedente.

Para ello y como etapa previa a la generación de la trayectoria, se lleva a cabo un análisis de laboratorio de las imágenes de vídeo registradas, durante la cual se posicionan los tramos de recta referidos a la variable tiempo. Posteriormente, será calculado el factor de corrección para cada uno de dichos tramos de recta, los cuales serán introducidos en la aplicación informática DISET.

- *Ejecución de la aplicación informática DISET:* tras la introducción de los datos de inicialización, la corrección del ángulo de giro del volante y la ubicación de incorporaciones/salidas, y considerando las señales adquiridas mediante los sensores embarcados, son evaluados los parámetros geométricos de la vía mediante la aplicación del algoritmo mostrado en la *Figura 5.9.*

Utilizando la metodología descrita, se llevan a cabo un conjunto de mediciones iniciales para la validación del sistema desarrollado. Dicho proceso de validación es presentado seguidamente.

6.3.- Validación del sistema de medida.

6.3.1.- CÁLCULO DE LA RELACIÓN DE DESMULTIPLICACIÓN ENTRE VOLANTE Y NEUMÁTICOS.

Como ha sido indicado en los apartados precedentes, el cálculo de la trayectoria seguida por el vehículo CANE requiere la medición del ángulo girado por los neumáticos del eje delantero directriz, lo cual es llevado a cabo mediante la medida del ángulo girado por el volante de la dirección. Por ello es necesario la evaluación de la relación de desmultiplicación entre ambos.

El procedimiento seguido es mostrado seguidamente:

- El vehículo CANE está detenido.
- Los neumáticos del eje delantero son situados sobre dos platos giratorios, los cuales permiten el giro de la dirección con una reducida resistencia al movimiento.
- Las condiciones del vehículo durante el ensayo son las siguientes:
 - Presión en neumáticos: presión recomendada por fabricante, y coincidente con la presión en condiciones estáticas existente en los mismos durante el proceso de medición en continuo de la calzada.
 - Condiciones de carga: el conductor, y todos los equipos de adquisición y registro transportados en el vehículo durante el proceso de medición en continuo de la calzada.

Junto a esto, el depósito de combustible está lleno, lo cual pretende reproducir las condiciones más próximas a las presentes en el vehículo durante la medición. Así, siempre se inicia la medición de un itinerario con dicho depósito lleno, no recorriéndose en continuo más de 100 kilómetros, lo cual supone una reducción aproximada de combustible durante el recorrido de 10 litros.

- Se mide simultáneamente el ángulo girado por el volante y por los neumáticos del citado eje delantero, en posiciones del volante con una separación uniforme de 15°.
- Dicho procedimiento es aplicado entre posiciones extremas del volante de la dirección, tanto en sentido ascendente como descendente (giro horario y antihorario de dicho volante), para la observación de posibles fenómenos de histéresis del sensor.
- Finalmente y a partir de los resultados obtenidos, se calcula la relación del ángulo girado por cada una de las ruedas del eje delantero directriz (izquierda y derecha), en función del ángulo de giro del volante. Para ello, se emplea una interpolación mediante un polinomio de tercer grado, obteniendo los resultados mostrados en las siguientes ecuaciones:

$$\delta_{Rizq} = 0,004 + 0,059 \cdot \delta_v - 5 \cdot 10^{-4} \cdot \delta_v^2 + 5,8 \cdot 10^{-5} \cdot \delta_v^3 \quad (6.1.)$$

$$\delta_{Rder} = -3 \cdot 10^{-4} + 0,058 \cdot \delta_v + 5 \cdot 10^{-4} \cdot \delta_v^2 + 6,4 \cdot 10^{-5} \cdot \delta_v^3 \quad (6.2.)$$

donde:

- δ_v : ángulo de giro de volante, expresado en radianes.
- δ_{Rizq} : ángulo de giro de rueda delantera izquierda, expresado en radianes.
- δ_{Rder} : ángulo de giro de rueda delantera derecha, expresado en radianes.

El diseño teórico del sistema de dirección impone la siguiente condición: en condiciones de baja velocidad, el giro de las ruedas del eje delantero directriz debe ser tal que no se produzca deslizamiento en ninguno de los neumáticos del vehículo durante la maniobra de giro (ángulos de deriva nulos), esto es, las rectas perpendiculares a los planos medios de los neumáticos en el plano de la calzada deben coincidir en un punto común (centro instantáneo de rotación del vehículo).

El cumplimiento de dicha condición teórica implica que el sistema de dirección debe estar diseñado conforme a la denominada “relación de Ackermann”, la cual se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{B}{L} = \cot \delta_{Rext} - \cot \delta_{Rint} \quad (6.3.)$$

donde:

- B: vía del vehículo.
- L: batalla del vehículo.
- δ_{Rext} : ángulo de giro de rueda delantera exterior, expresado en radianes.
- δ_{Rint} : ángulo de giro de rueda delantera interior, expresado en radianes.

Los mecanismos de dirección de los vehículos tienden a cumplir dicha relación teórica. No obstante, en la mayoría de los casos la relación entre el ángulo de giro de la rueda interior y la exterior suele encontrarse entre la bisectriz (correspondiente al mecanismo de dirección paralela), y la correspondiente a la relación teórica de Ackermann. Dicha situación, considerando el vehículo CANE empleado en el presente estudio, se muestra en la siguiente figura (*Figura*

6.1.).

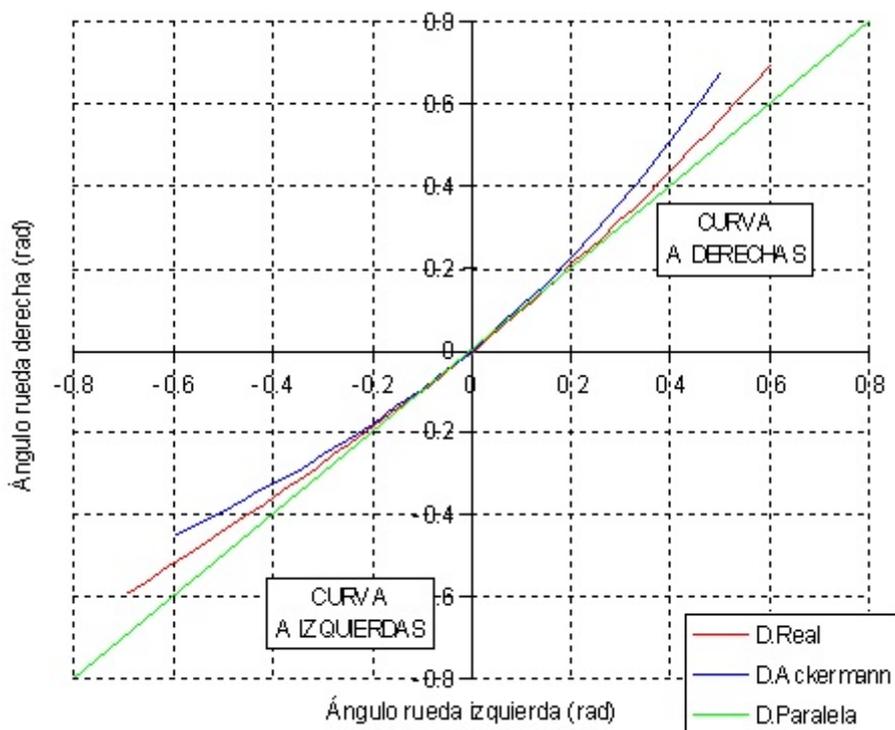


Figura 6.1.- Relaciones teórica (Ackermann) y real entre el ángulo de giro de la rueda interior y la exterior del eje directriz, en vehículo CANE.

Como ha sido indicado, el proceso de cálculo de la relación de desmultiplicación es efectuado en condiciones estáticas. A diferencia de esto, durante la medición del itinerario están presentes condiciones dinámicas, las cuales introducen una componente aleatoria difícilmente evaluable mediante el citado procedimiento, como son:

- Durante la circulación el vehículo está sometido a condiciones dinámicas (dinámica longitudinal, lateral y vertical), que provocan continuas alteraciones de la situación instantánea del sistema de dirección.
- El sistema de dirección presenta un cierto ángulo de holgura (giro de volante sin giro de neumáticos), debido a la elasticidad de los elementos que lo constituyen, y que depende del esfuerzo aplicado a dichos elementos.

Dado que la medida del ángulo girado por las ruedas es empleado para el cálculo del radio a partir de la trayectoria en planta, dicha componente aleatoria quedará incluida en el error de estimación de este radio.

6.3.2.- ENSAYOS DE VALIDACIÓN EN PISTA DEL INTA.

6.3.2.1.- Introducción.

Una serie de ensayos de validación han sido realizados en el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), situado en Madrid. Dicho centro dispone de una pista de ensayo circular, con un radio nominal constante en la línea interior del carril interior de 450 m.

En dicho centro han sido llevados a cabo dos tipos de ensayos:

- Ensayos de validación del algoritmo de cálculo de la distancia recorrida.
- Ensayos de validación del algoritmo de cálculo del radio de la trayectoria.

El procedimiento de ensayo seguido en ambos casos, así como los resultados obtenidos, son presentados en los siguientes apartados.

6.3.2.2.- Ensayos de validación del cálculo de la distancia recorrida.

6.3.2.2.1.- *Cálculo del error.*

En este caso, y aplicando la metodología presentada en el *Apartado 6.2.*, ha sido efectuada la medición en continuo de la distancia recorrida por el vehículo instrumentado. Para ello, han sido realizados dos ensayos consecutivos:

- Cálculo de la distancia recorrida durante una vuelta alrededor de la pista de ensayo del INTA, circulando aproximadamente sobre la línea media del carril interior.
- Cálculo de la distancia recorrida durante tres vueltas alrededor de la pista de ensayo del INTA, circulando aproximadamente sobre la línea media del carril interior.

Al mismo tiempo, y como valor de referencia para la validación del cálculo de dicha distancia, ha sido medida la longitud sobre la línea media del carril interior de la pista de ensayo mediante un odómetro (Precimeter - Modelo 305), el cual posee un error de medida de 1 m/km. Así, el valor obtenido con dicho odómetro ha sido de *2836 m/vuelta*.

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados son mostrados en la siguiente tabla (*Tabla 6.1.*). Como puede observarse, el error máximo cometido en el cálculo de la distancia recorrida con el vehículo instrumentado en los ensayos efectuados en las condiciones de utilización es de 0,6 %, lo que equivale a 6 metros por kilómetro.

| | <i>Distancia calculada con CANE (m/vuelta)</i> | <i>Error (%)</i> |
|-------------------------|--|------------------|
| <i>Ensayo 1 vuelta</i> | 2853 | 0,6 |
| <i>Ensayo 3 vueltas</i> | 2841 | 0,1 |

Tabla 6.1.- Ensayos de validación del cálculo de la distancia recorrida en la pista del INTA.

6.3.2.2.2.- Análisis de adecuación a los objetivos del estudio.

La distancia es una de las magnitudes fundamentales en el presente trabajo, dado que es requerida para el posicionamiento de los factores del medio en el itinerario considerado. Éstos son tomados en cuenta en la parte sistemática del modelo. Frente a esto, la variable observada (accidentes en el itinerario) ha sido recogida por los Equipos de Atestados de las Fuerzas Públicas con una resolución del hectómetro.

La metodología de ubicación de los accidentes en el itinerario medido mediante el vehículo instrumentado se desarrolla como sigue:

- Cada uno de los hitos kilométricos reales (referencia fija para los accidentes ocurridos) es posicionado mediante las imágenes de la cámara de video, a través de la sincronización temporal entre el reloj de la misma y el reloj interno del ordenador embarcado. Debido a ello, el error cometido en dicho posicionamiento es prácticamente despreciable.
- Posteriormente, el hectómetro en el que ha tenido lugar el siniestro es obtenido mediante el cálculo de la distancia a partir de la señal de velocidad medida. Debido a ello, el error máximo cometido en la ubicación del accidente será inferior al error cometido en la medida de 1 kilómetro de carretera, esto es, inferior a 6 metros.

Debido a ello, el error cometido en el posicionamiento de los accidentes, para la ajuste del modelo de predicción, resulta poco significativo.

Asimismo, la distancia es requerida para el cálculo de la velocidad posible de aproximación al tramo de curva y de la velocidad en los ramales. El error máximo cometido en el cálculo de la distancia genera, teniendo en cuenta la geometría del trazado en cada uno de los tramos considerados en la muestra de itinerarios (*Apartado 7.*), errores máximos en el cálculo de la velocidad de 2 km/h.

Junto a esto, la *longitud de los tramos de curva* es incorporada como variable de influencia en el modelo de predicción, mediante la variable explicativa F_{exp} (*Apartado 7.4.2.2.1.*), quedando definida como sigue:

$$F_{exp} = IMD \cdot L_c \cdot 10^{-6}$$

El valor máximo adquirido por dicha variable en la muestra de itinerarios analizada es de 30. En este caso, el error en la misma debido a la distancia es de 0,18. La introducción de dicho error en el modelo de estimación de la frecuencia de accidentes (*Apartado 7.4.2.*), induce un error máximo en la estimación de esta frecuencia de accidentes del 1%.

Los resultados precedentes permiten concluir que la metodología de cálculo de la distancia recorrida empleada en la presente Tesis resulta adecuada para los objetivos pretendidos de estimación de la ocurrencia de accidentes.

6.3.2.3.- Ensayos de validación del cálculo del radio.

6.3.2.3.1.- *Cálculo del error.*

De este modo y aplicando la metodología presentada en el *Apartado 6.2.*, ha sido efectuada la medición en continuo durante una vuelta completa a la pista de ensayos circular del INTA, por el carril interior de la misma, en ambos sentidos de circulación: giro horario y giro antihorario. Dichos ensayos han sido llevados a cabo a una velocidad de aproximadamente 80 km/h, con objeto de reproducir las condiciones presentes durante la medición de un itinerario de carretera abierta. La velocidad real medida durante los citados ensayos se muestra en la figura siguiente (*Figura 6.2.*).

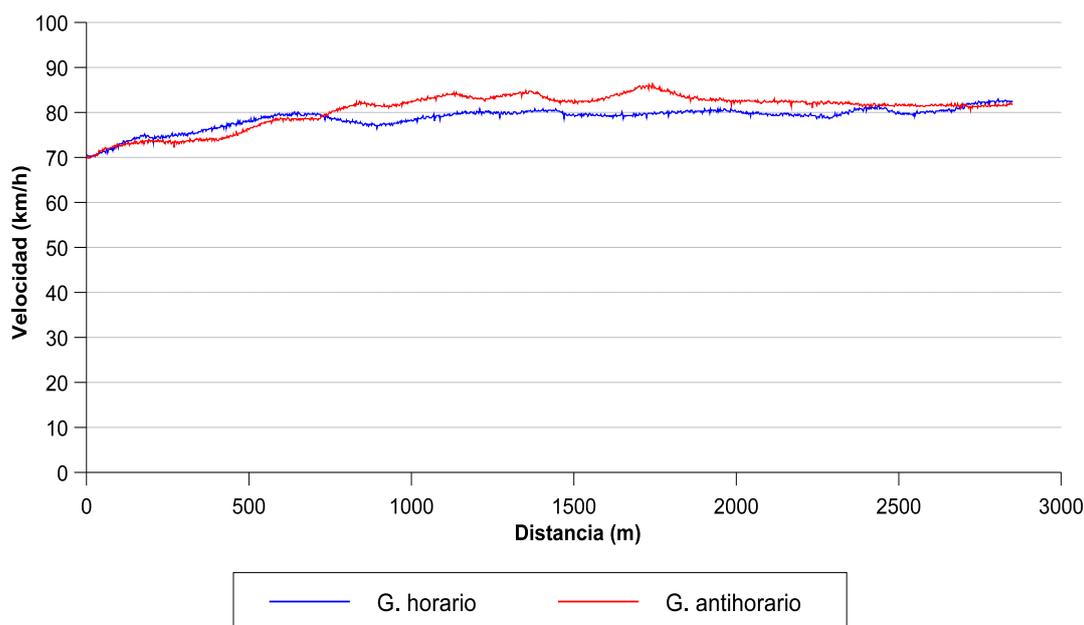


Figura 6.2.- Ensayos de validación del cálculo del radio de la trayectoria en la pista de ensayos del INTA. Velocidad de circulación.

Finalmente, ha sido calculado el radio de la pista de ensayos en ambos sentidos de circulación, a partir de la trayectoria del vehículo estimada desde el ángulo de giro del volante. El resultado obtenido se presenta en la figura siguiente (*Figura 6.3.*). Asimismo, el análisis de estos valores del radio se muestra en la tabla listada a continuación (*Tabla 6.2.*)

| | Valor medio (m) | Desviación típica (m) |
|------------------|-----------------|-----------------------|
| Giro horario | - 458 | 37 |
| Giro antihorario | 459 | 48 |

Tabla 6.2.- Ensayos de validación del cálculo del radio de la trayectoria en la pista de ensayos del INTA. Análisis del radio calculado.

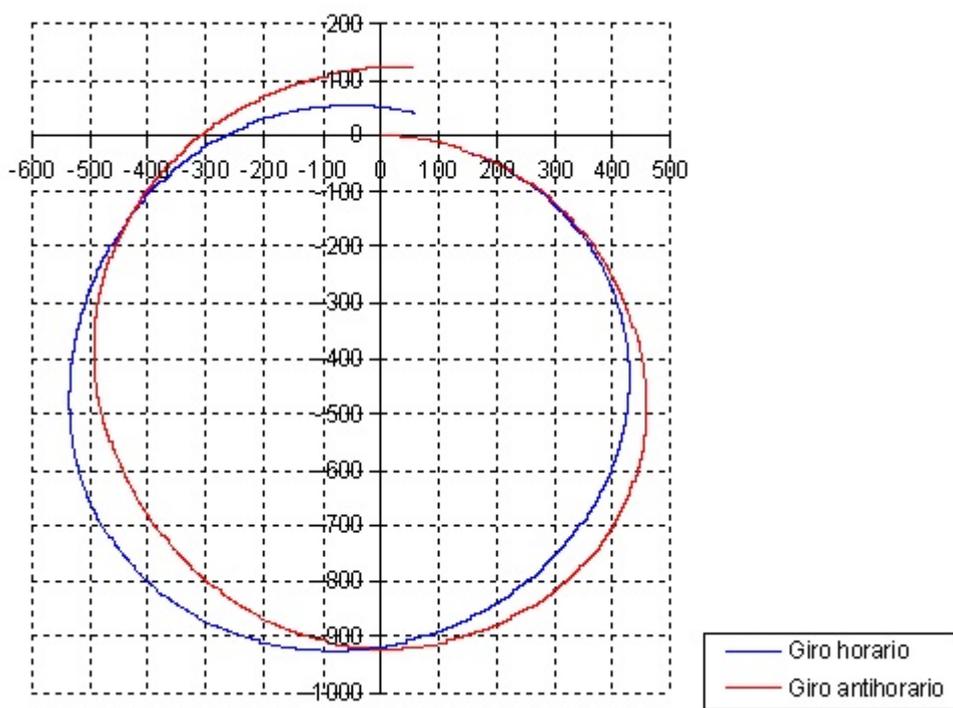


Figura 6.3.- Ensayos de validación del cálculo del radio de la trayectoria en la pista de ensayos del INTA. Trayectoria seguida por el vehículo.

Los valores mostrados en la *Tabla 6.1.*, obtenidos a lo largo de un tramo de radio constante, permiten concluir lo siguiente:

- Considerando como parámetro de centrado el valor medio calculado, el error máximo cometido en la estimación del radio mediante dicho valor medio es del 2 % del valor verdadero del mismo (giro antihorario).
- Considerando como parámetro de dispersión la desviación típica calculada, la dispersión máxima obtenida es del 10,5 % del valor medio del radio medido (giro

antihorario).

6.3.2.3.2.- *Análisis de adecuación a los objetivos del estudio.*

En el análisis de modelización efectuado en la presente Tesis, el radio de la trayectoria influye fundamentalmente durante la evaluación de la velocidad máxima en curva. El error máximo evaluado en el cálculo del radio genera un error máximo en el cálculo de la velocidad máxima en curva del 5%.

Junto a esto, dicha velocidad es incorporada como variable de influencia en el modelo de predicción, mediante la variable explicativa F_{TC} (*Apartado 7.4.2.2.1.*), quedando definida como sigue:

$$F_{TC} = F_{vC} \cdot (100 - F_{visTC})$$

El valor máximo adquirido por dicha variable en la muestra de itinerarios analizada es de 111. En este caso, el error en la misma debido a la velocidad máxima en curva es de 5. La introducción de dicho error en el modelo de estimación de la frecuencia de accidentes (*Apartado 7.4.2.*), induce un error máximo en la estimación de esta frecuencia de accidentes del 6%.

Los resultados precedentes permiten concluir que la metodología de cálculo del radio de la trayectoria empleada en la presente Tesis resulta adecuada para los objetivos pretendidos de estimación de la ocurrencia de accidentes.

6.3.3.- ENSAYOS DE VALIDACIÓN EN CARRETERA M-607.

6.3.3.1.- Introducción.

Una segunda serie de ensayos de validación han sido llevados a cabo en la carretera M-607, en sentido ascendente, entre los puntos kilométricos 12 y 24. Dicha plataforma dispone de dos carriles en cada sentido de circulación, además de un asfalto en condiciones óptimas.

En dicha calzada han sido realizados los siguientes ensayos:

- Ensayos de validación del algoritmo de cálculo de la rampa/pendiente y peralte, mediante un proceso de contraste de los valores medidos.

Para el desarrollo de dicho proceso de validación se dispone de las medidas en continuo de rampa/pendiente y peralte efectuadas mediante un vehículo instrumentado de precisión, denominado EQUIPO DE MEDIDA VÍDEO-LÁSER RST (*Anexo VI.*). Al mismo tiempo, se cuenta con los valores de diseño originales de la vía analizada (radio, rampa/pendiente y peralte), proporcionados por el MOPTMA¹ (Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio

¹ Actualmente, dicha institución pública es denominada Ministerio de Fomento.

Ambiente).

El procedimiento de ensayo seguido en ambos casos, así como los resultados obtenidos, son presentados en los siguientes apartados.

6.3.3.2.- Ensayos de validación del cálculo de la rampa/pendiente y peralte.

6.3.3.2.1.- *Introducción.*

La validación del algoritmo de cálculo de los valores de rampa/pendiente y peralte, presentado en la *Figura 5.9.*, es llevado a cabo mediante un proceso de contraste entre los valores obtenidos a partir de la medición en continuo mediante el vehículo instrumentado CANE y las medidas en continuo efectuadas mediante el equipo de medida vídeo-láser RST. Al mismo tiempo, se cuenta con los valores de diseño originales de la vía proporcionados por el MOPTMA.

Las mediciones realizadas con ambos vehículos instrumentados están estructuradas como sigue:

- La medida de la carretera M-607 mediante el equipo RST ha sido efectuada por AEPO S.A. Ingenieros Consultores, para la Comunidad Autónoma de Madrid, el día 29 de Octubre de 1994.

Dicha medida ha consistido en dos pasadas a lo largo del sentido ascendente de la calzada, entre los puntos kilométricos 12 y 24, sobre el carril derecho de la misma, y situando la rueda derecha del vehículo sobre el arcén, dado que uno de los objetivos de este estudio ha sido el análisis de la posibilidad de acumulación de agua en el mismo.

- La medida de la carretera M-607 mediante el vehículo instrumentado CANE ha sido llevada a cabo por el autor de la presente Tesis Doctoral, el día 1 de Septiembre de 1996.

Dicha medida ha consistido en cuatro pasadas a lo largo del sentido ascendente de la calzada, entre los puntos kilométricos 12 y 24, sobre el carril derecho de la misma, y situando el vehículo instrumentado centrado en dicho carril.

A la vista del procedimiento de medición seguido en ambos casos, cabe destacar lo siguiente:

- No se han realizado modificaciones de firme ni de trazado de la calzada entre las fechas de ejecución de ambas mediciones.
- La línea media del trazado seguido por ambos vehículos no coincide, debido fundamentalmente a la diferencia de objetivos entre ambos estudios. Así, el plano medio del arcén presenta en recta un mayor ángulo de inclinación transversal que el plano medio del carril derecho (ángulo de bombeo), para permitir la evacuación del agua hacia el exterior de la plataforma.

Debido a esto, existirá mayor dispersión entre los valores de peralte evaluados en ambos casos. Por otro lado, dicho ángulo de bombeo ejerce poca influencia sobre el valor de la rampa, por lo que este proceso resultará adecuado para la validación del ángulo de rampa/pendiente de la calzada.

- Los valores de diseño originales de la vía proporcionados por el MOPTMA son mostrados como valores de comparación con los obtenidos mediante ambos vehículos instrumentados. No obstante, cabe esperar una cierta dispersión respecto a dichos parámetros de diseño, debido a lo siguiente:

- Durante la construcción de la vía resulta muy difícil reproducir con exactitud estos valores de diseño.

- Las modificaciones del firme efectuadas desde el trazado original hasta el instante de las medidas contribuye aún más al incremento de esta dispersión.

La fase final del proceso de validación consistirá en la evaluación del error de las medidas obtenidas mediante el vehículo CANE, así como el análisis de adecuación de dicho error respecto a los objetivos del estudio.

6.3.3.2.2.- *Procedimiento de evaluación del error.*

Con objeto de simplificar este análisis, son tenidas en cuenta las siguientes hipótesis:

- El equipo vídeo-láser RST es considerado como instrumento de referencia de los valores de rampa/pendiente y peralte del itinerario, dado que la instrumentación embarcada en el mismo es más adecuada para la medición de los ángulos de inclinación de la calzada.
- Las condiciones habituales de utilización del sistema de medida CANE son idénticas a las existentes durante el proceso de validación.
- Las repeticiones en cada punto de medida mediante el vehículo CANE corresponden a cada una de las cuatro pasadas a lo largo del itinerario.

Considerando estas hipótesis de trabajo, el error de los valores de rampa y peralte medidos mediante el vehículo CANE es obtenida como sigue:

- 1.- La validación se realiza reiterando medidas en el itinerario considerado (tramo comprendido entre P.K. 12 y P.K. 24 de la carretera M-607), en la forma en que el vehículo instrumentado CANE opera habitualmente, para la obtención de los valores de los parámetros de la calzada buscados, esto es, rampa y peralte.
- 2.- Si se reiteran n medidas mediante el sistema CANE en cada punto del tramo (en este caso, se realizan 4 medidas) y sus resultados son x_i ($i = 1 \dots n$), puede determinarse los parámetros de centrado y dispersión mediante las siguientes expresiones:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (6.4.)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6.5.)$$

- 3.- Tomando en consideración las expresiones anteriores, se obtiene un valor de *corrección* como sigue:

$$\Delta x = x_o - \bar{x} \quad (6.6.)$$

donde x_o es el valor obtenido mediante el equipo vídeo-láser RST .

De este modo, cuando el instrumento se emplee habitualmente en condiciones similares a las de validación y con la única variante de medir mensurandos desconocidos, las indicaciones obtenidas x' deberán ser corregidas con la corrección obtenida, con lo que el valor del mensurando desconocido vendrá expresado como sigue:

$$\bar{x} = \bar{x}' + \Delta x \quad (6.7.)$$

donde \bar{x}' es la media aritmética de las indicaciones sin corregir, expresada mediante la siguiente expresión:

$$\bar{x}' = \frac{1}{n_m} \cdot \sum_{k=1}^{n_m} x'_k \quad (6.8.)$$

El valor de n_m corresponde al número de mediciones realizadas en el mismo punto.

- 4.- Finalmente, el cálculo del error (e) de las medidas obtenidas mediante el vehículo instrumentado CANE se realiza teniendo en cuenta la siguiente expresión, así como las hipótesis simplificativas mostradas al comienzo de este apartado.

$$e = \text{máx} \left[\sqrt{s_j^2 \cdot \left(\frac{1}{n_j} + \frac{1}{n_m} \right) + \frac{\Delta x_j^2}{9}} \right] \quad (6.9.)$$

Donde: los valores x_{ji} corresponden a las medidas proporcionadas por el vehículo CANE en cada punto de medida j , y para cada una de las pasadas i . En el proceso de validación efectuado en el presente trabajo, i varía de 1 a 4. Por ello, n_j es igual a 4.

Seguidamente, se presenta los resultados del error de las medidas obtenidas mediante el vehículo instrumentado CANE, empleando la metodología de cálculo mostrada en este apartado.

6.3.3.2.3.- Medida de la rampa mediante el vehículo instrumentado CANE.

Como ha sido descrito en los apartados precedentes, la medida de la carretera M-607 mediante el vehículo instrumentado CANE ha consistido en cuatro pasadas a lo largo del sentido ascendente de la calzada, entre los puntos kilométricos 12 y 24, sobre el carril derecho de la misma, y situando el vehículo instrumentado centrado en dicho carril. La velocidad de circulación en cada una de las pasadas se muestra en la siguiente figura (Figura 6.4.). Asimismo, en la tabla presentada a continuación (Tabla 6.3.) se indica los parámetros de centrado y dispersión correspondientes a dicha velocidad de circulación.

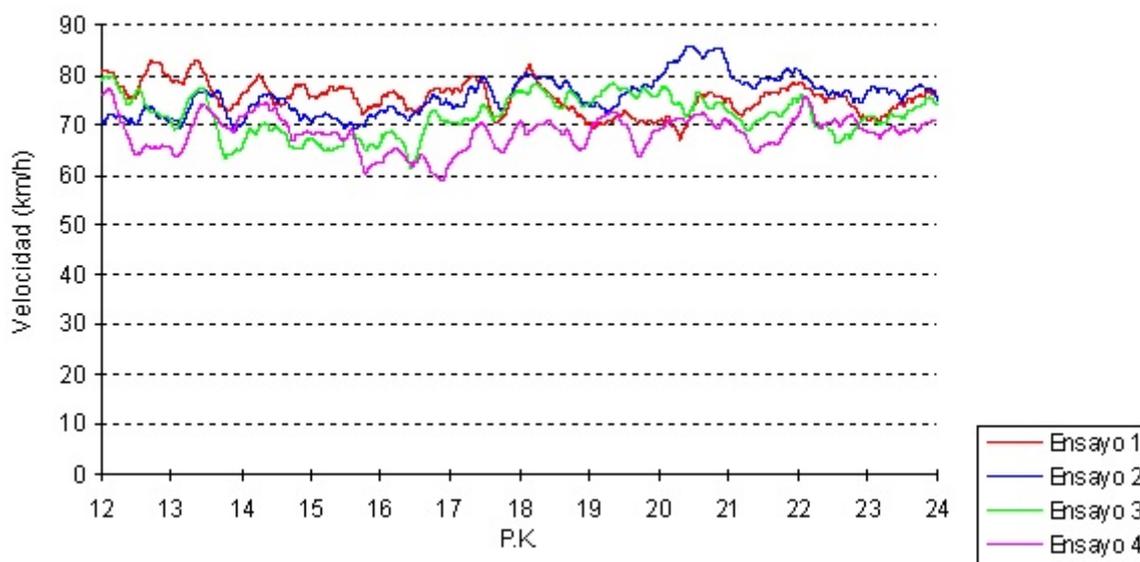


Figura 6.4.- Velocidad de circulación del vehículo CANE durante los ensayos de calibración en la carretera M-607.

| Ensayo | Valor medio (km/h) | Desviación típica (km/h) |
|--------|--------------------|--------------------------|
| 1 | 75.3 | 3.2 |
| 2 | 75.6 | 3.8 |
| 3 | 71.6 | 4.0 |
| 4 | 68.3 | 3.4 |

Tabla 6.3.- Parámetros de centrado y dispersión de la velocidad de circulación del vehículo CANE durante los ensayos de calibración en la carretera M-607.

Seguidamente, se presenta los valores de rampa/pendiente medidos por el vehículo CANE en cada una de las pasadas (*Figuras 6.5., 6.7. y 6.9.*). Al mismo tiempo, se muestra los valores medidos mediante el vehículo de referencia junto al promedio de los valores obtenidos por el sistema de medida CANE, así como los parámetros de diseño proporcionados por el MOPTMA (*Figuras 6.6., 6.8. y 6.10.*).

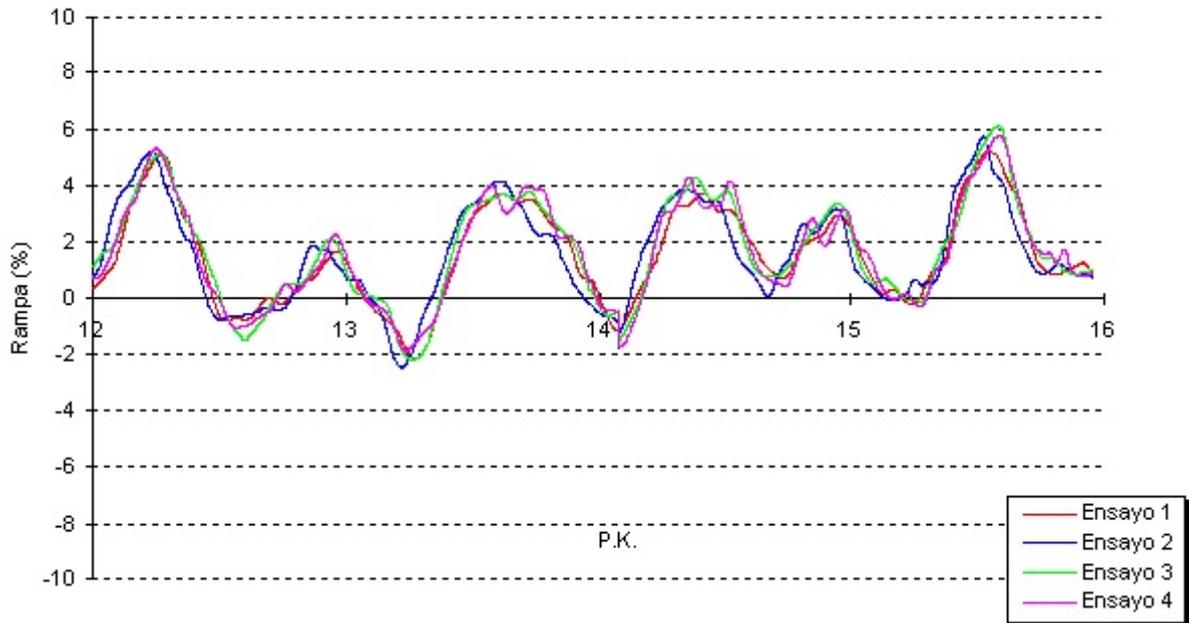


Figura 6.5.- Valores de rampa medidos con el vehículo CANE durante los ensayos de calibración en la carretera M-607. P.K. 12 a P.K. 16.

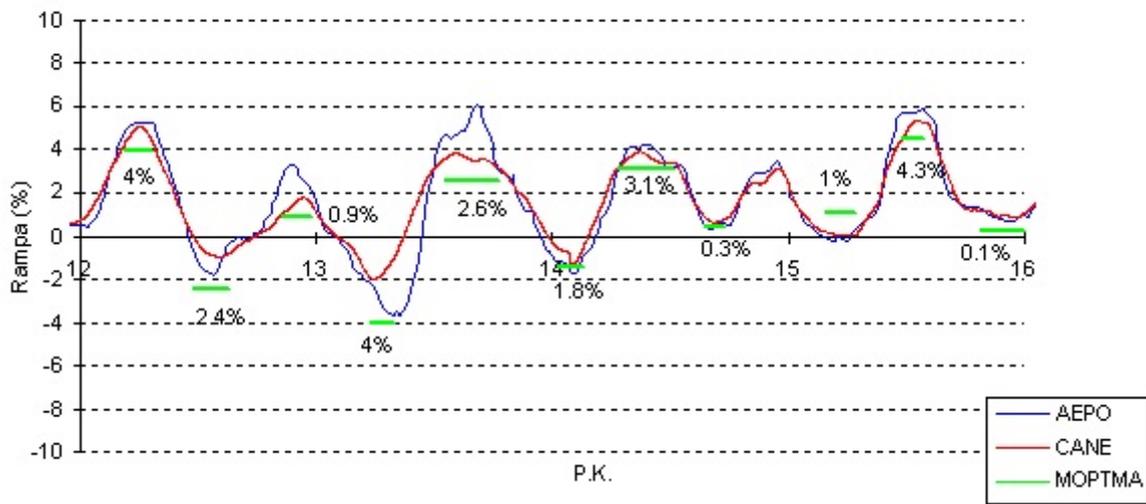


Figura 6.6.- Valor promedio de rampa medido con el vehículo CANE, valor medido con el vehículo de referencia y valor de diseño, durante los ensayos de calibración en la carretera M-607. P.K. 12 a P.K. 16.

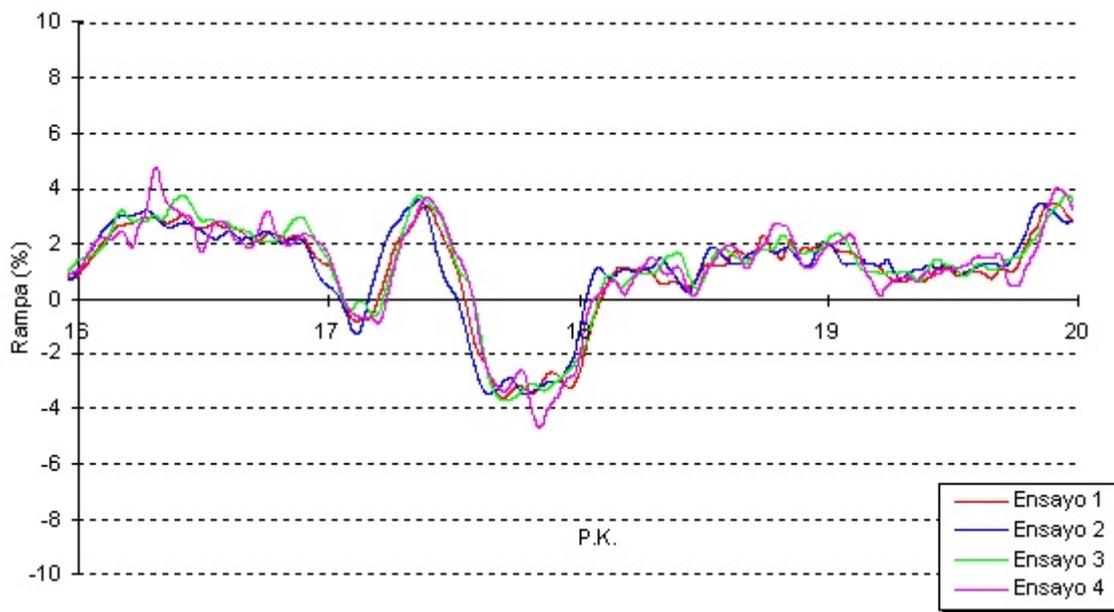


Figura 6.7.- Valores de rampa medidos con el vehículo CANE durante los ensayos de calibración en la carretera M-607. P.K. 16 a P.K. 20.

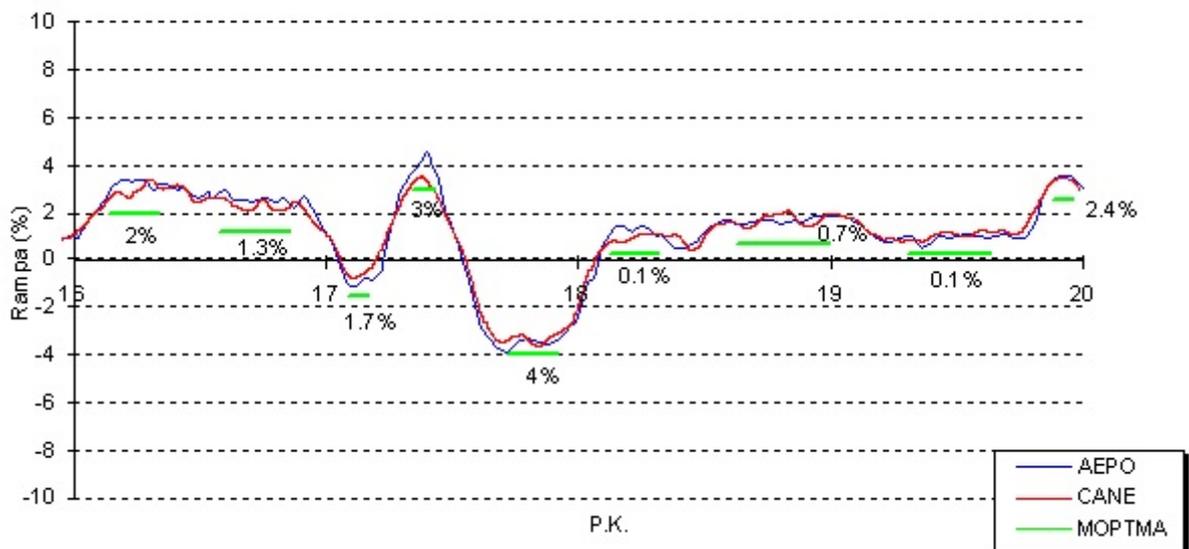


Figura 6.8.- Valor promedio de rampa medido con el vehículo CANE, valor medido con el vehículo de referencia y valor de diseño, durante los ensayos de calibración en la carretera M-607. P.K. 16 a P.K. 20.

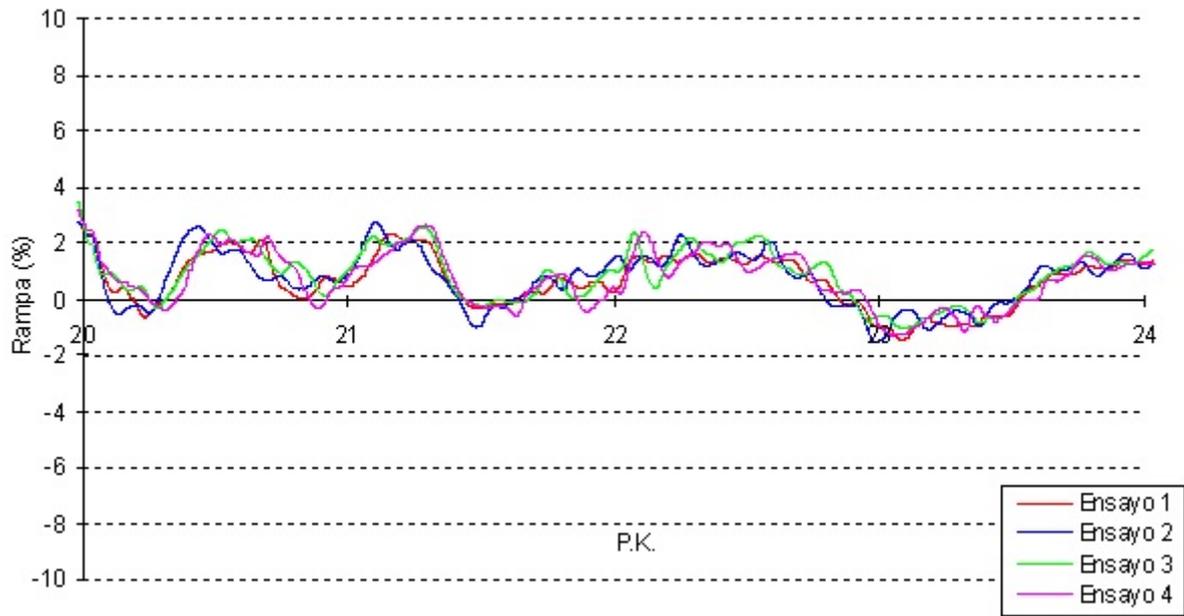


Figura 6.9.- Valores de rampa medidos con el vehículo CANE durante los ensayos de calibración en la carretera M-607. P.K. 20 a P.K. 24.

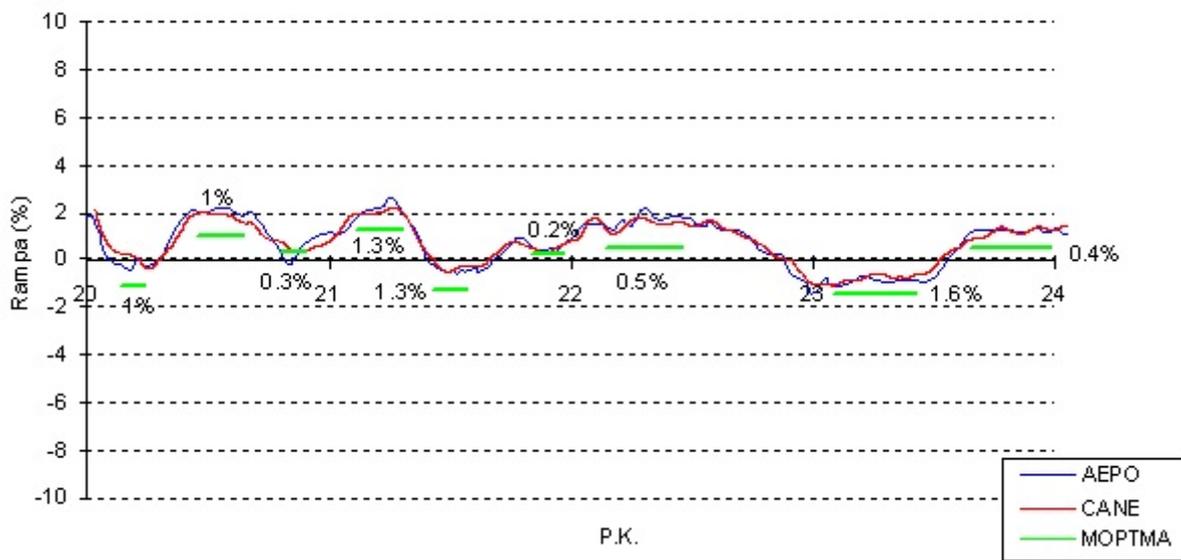


Figura 6.10.- Valor promedio de rampa medido con el vehículo CANE, valor medido con el vehículo de referencia y valor de diseño, durante los ensayos de calibración en la carretera M-607. P.K. 20 a P.K. 24.

A partir de estos valores de rampa medidos mediante el vehículo CANE, se calcula la trayectoria en alzado del itinerario de la carretera M-607 considerado, como se muestra en la siguiente figura (*Figura 6.11.*).

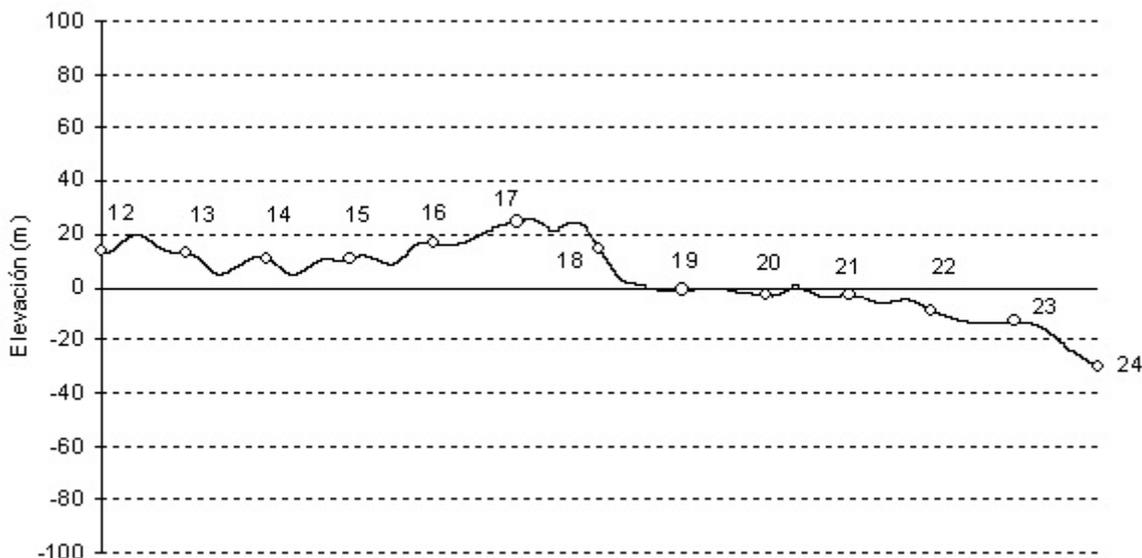


Figura 6.11.- Trayectoria en alzado de la carretera M-607, en sentido ascendente, entre P.K. 12 y P.K. 24.

La aplicación del procedimiento de validación mostrado en el *Apartado 6.3.3.2.2.*, a partir de los valores presentados en las figuras precedentes, proporciona los resultados presentados en la siguiente tabla (*Tabla 6.4.*)

| <i>Error máximo (%)</i> | <i>Error promedio (%)</i> | <i>Corrección (%)</i> |
|-------------------------|---------------------------|-----------------------|
| 1,30 | 0,43 | -0,01 |

Tabla 6.4.- Ensayos de validación del cálculo de la rampa en la carretera M-607. Error y corrección.

6.3.3.2.4.- Medida del peralte mediante el vehículo instrumentado CANE.

Como ha sido descrito en los apartados precedentes, la medida de la carretera M-607 mediante el vehículo instrumentado CANE ha consistido en cuatro pasadas a lo largo del sentido ascendente de la calzada, entre los puntos kilométricos 12 y 24, sobre el carril derecho de la misma, y situando el vehículo instrumentado centrado en dicho carril. La velocidad de circulación en cada una de las pasadas ha sido mostrada en la *Figura 6.5.* y en la *Tabla 6.3.*

Seguidamente, se presenta los valores de peralte medidos por el vehículo CANE en cada una de las pasadas (Figuras 6.12., 6.14. y 6.16.). Al mismo tiempo, se muestra los valores medidos mediante el vehículo de referencia junto al promedio de los valores obtenidos por el instrumento de medida desarrollado, así como los parámetros de diseño proporcionados por el MOPTMA (Figuras 6.13., 6.15. y 6.17.).

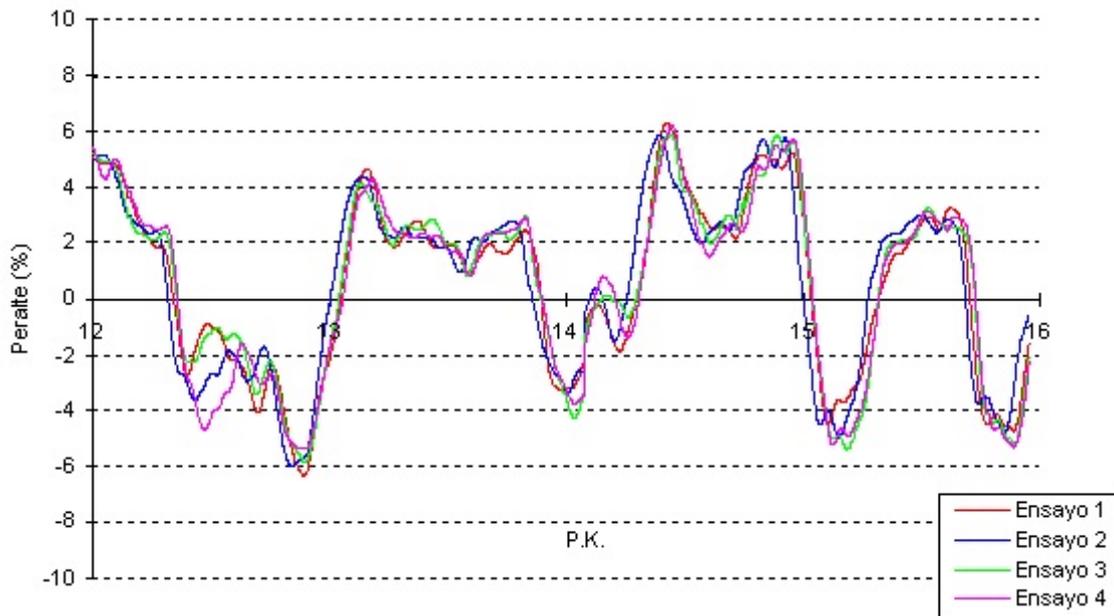


Figura 6.12.- Valores de peralte medidos con el vehículo CANE durante los ensayos de calibración en la carretera M-607. P.K. 12 a P.K. 16.

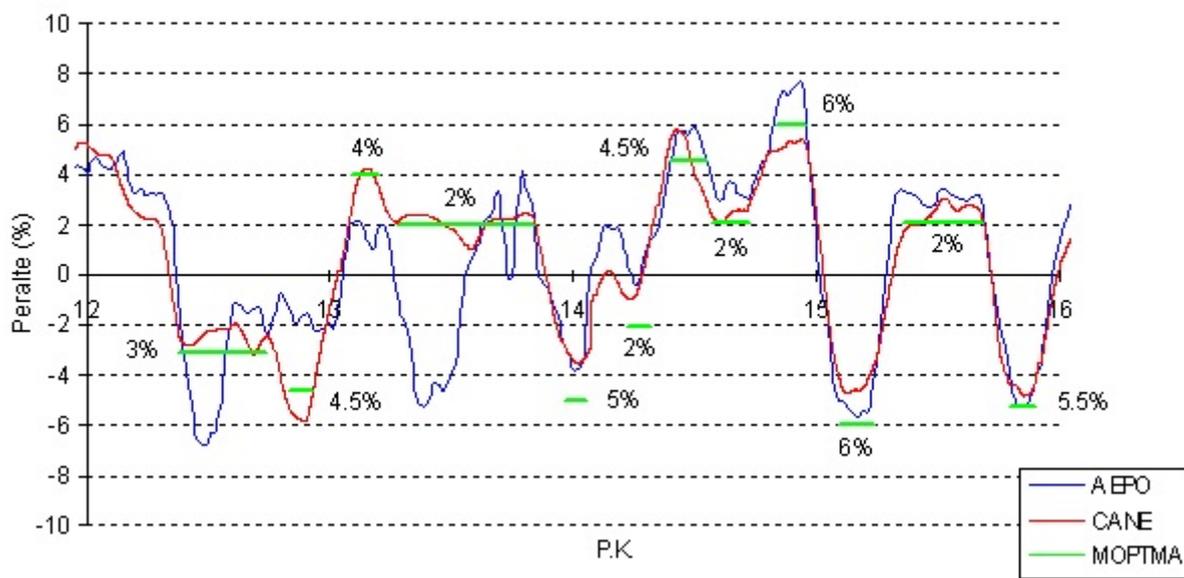


Figura 6.13.- Valor promedio de peralte medido con el vehículo CANE, valor medido con el vehículo de referencia y valor de diseño, durante los ensayos de calibración en la carretera M-607. P.K. 12 a P.K. 16.

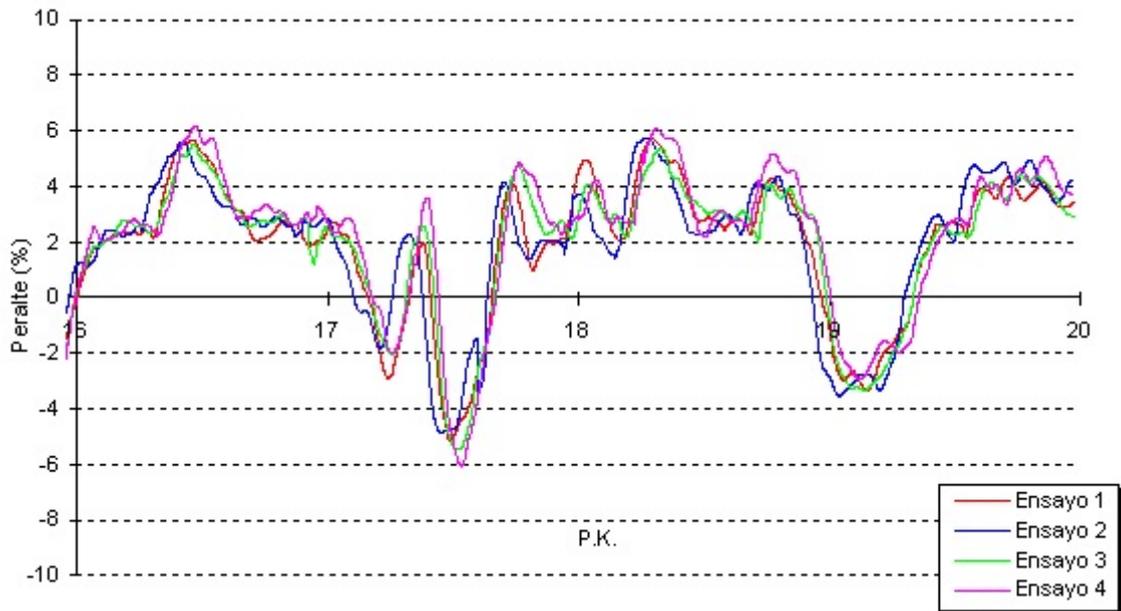


Figura 6.14.- Valores de peralte medidos con el vehículo CANE durante los ensayos de calibración en la carretera M-607. P.K. 16 a P.K. 20.

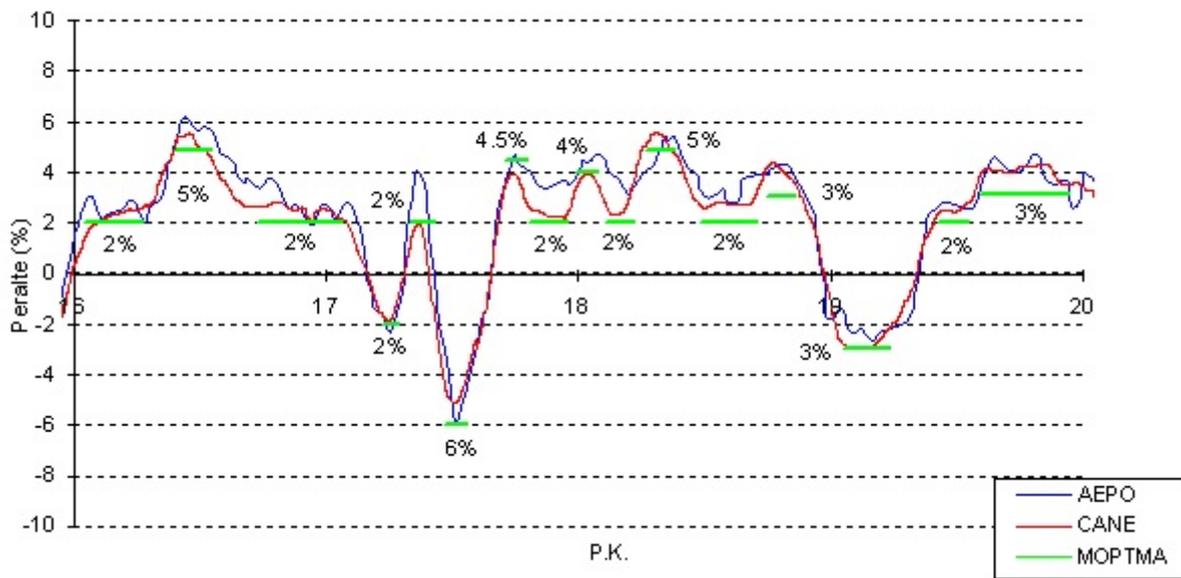


Figura 6.15.- Valor promedio de peralte medido con el vehículo CANE, valor medido con el vehículo de referencia y valor de diseño, durante los ensayos de calibración en la carretera M-607. P.K. 16 a P.K. 20.

La aplicación del procedimiento de validación mostrado en el *Apartado 6.3.3.2.2.*, a partir de los valores presentados en las figuras precedentes, proporciona los resultados presentados en la siguiente tabla (*Tabla 6.5.*).

| <i>Error máximo (%)</i> | <i>Error promedio (%)</i> | <i>Corrección (%)</i> |
|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| 3,59 | 1,21 | 0,25 |

Tabla 6.5.- Ensayos de validación del cálculo del peralte en la carretera M-607. Error y corrección.

Como ha sido indicado en los apartados precedentes, era previsible un error elevado en el cálculo del peralte debido a que la línea media del trazado seguido por ambos vehículos no es coincidente. Así, el vehículo CANE circula sobre el carril derecho de la calzada y centrado en dicho carril, mientras que el vehículo de referencia circula también sobre el mismo carril pero con su rueda derecha sobre el arcén.

Frente a esto, las medidas efectuadas permiten realizar un análisis de repetibilidad del algoritmo de medida del peralte. Así, y considerando como parámetro de dispersión la desviación típica calculada, los ensayos llevados a cabo proporcionan los resultados presentados en la tabla siguiente (*Tabla 6.6.*).

| <i>Desviación típica máxima (%)</i> | <i>Desviación típica promedio (%)</i> |
|---|---|
| 2,73 | 0,63 |

Tabla 6.6.- Ensayos de validación del cálculo del peralte en la carretera M-607. Desviación típica.

Como puede observarse en la tabla precedente, la dispersión es más elevada que en el cálculo de la rampa. Esto se debe, en gran medida, a que el cálculo del peralte está condicionado por el radio medido de la trayectoria (corrección por aceleración lateral), el cual es muy sensible a la trayectoria real seguida por el vehículo durante la medición.

6.3.3.2.5.- *Análisis de adecuación a los objetivos del estudio.*

La rampa/pendiente de la calzada es empleada en el presente trabajo para la estimación de la velocidad de aproximación. Así, es considerada su contribución para la deceleración/aceleración del vehículo durante la circulación por tramos de recta. Los valores de error estimados generan variaciones de aceleración longitudinal inferiores a $0,4 \text{ m/s}^2$, por lo que la influencia sobre la velocidad de aproximación es poco significativa.

Por otro lado, el peralte es empleado para la estimación de la velocidad máxima en curva. En este sentido, errores en la medición del peralte del 3% generan errores en la velocidad máxima en curva inferiores al 5%. Dicho error, como ha sido justificado en el *Apartado 6.3.2.3.2.*, resulta adecuado a los objetivos del presente trabajo.

Los resultados precedentes permiten concluir que la metodología de cálculo de la rampa/pendiente y del peralte de la calzada empleada en la presente Tesis resulta adecuada para los objetivos pretendidos de estimación de la ocurrencia de accidentes.

6.4.- El problema de la ubicación de los accidentes.

Como será presentado en el *Apartado 7.*, el proceso de modelización abordado en el presente trabajo se basa en la predicción de la ocurrencia de la variable respuesta *accidente de tráfico*. Debido a ello, la precisión del ajuste del modelo se fundamenta en el posicionamiento de los accidentes en la carretera medida.

Los accidentes considerados proceden del *Cuestionario Estadístico de Accidentes de Circulación con Víctimas en España*, donde la ubicación de dichos accidentes viene dada por el punto kilométrico y el hectómetro, referidos a los hitos existentes en la calzada. Para ello, se toma como referencia en primera aproximación los hitos kilométricos situados en la carretera, los cuales deben estar teóricamente a una distancia relativa de 1000 m.

Al verificar dicha distancia relativa con las mediciones que proporciona el equipo de medida de velocidad sin contacto se observa que existen desviaciones significativas respecto al valor esperado de 1000 metros. Dichas desviaciones, analizadas sobre el itinerario de la N-I considerado, se muestran en la siguiente figura (*Figura 6.18.*).

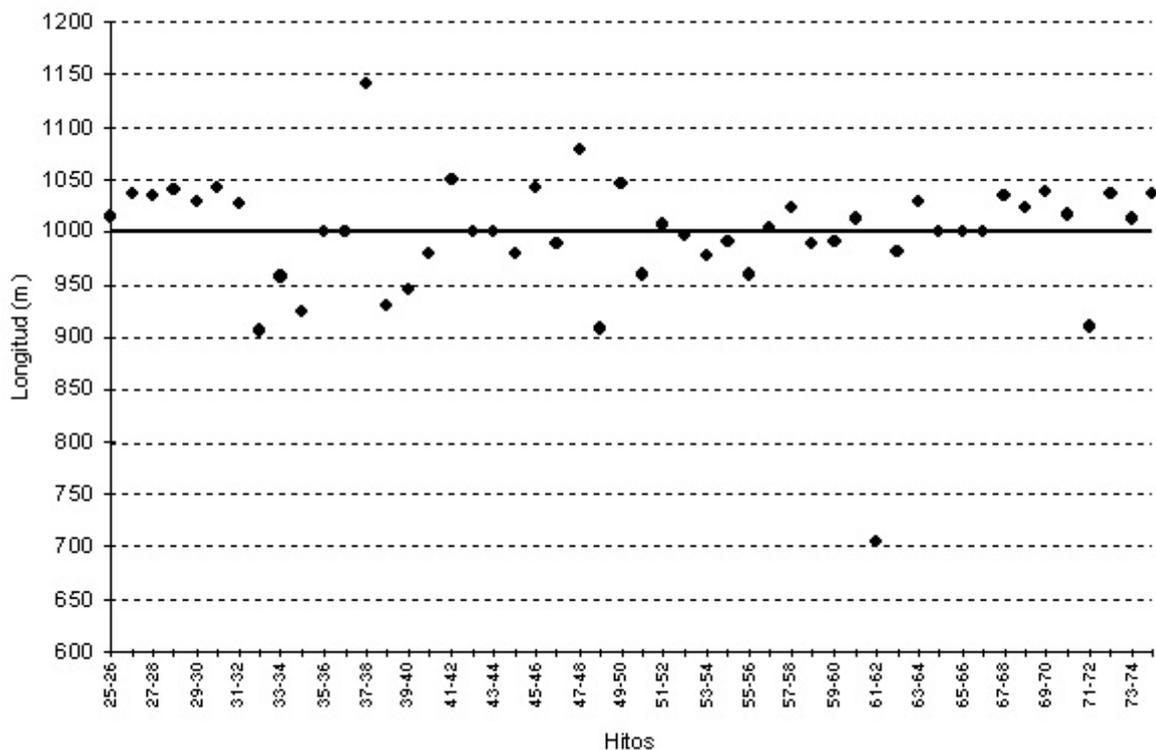


Figura 6.18.- Desviaciones entre los hitos kilométricos reales y los hitos kilométricos teóricos, en la carretera N-I.

Por ello y para subsanar estas desviaciones, serán empleadas las referencias de tiempo sincronizado, de adquisición y de película de vídeo, resultando esta técnica adecuada para el posicionamiento de los accidentes en la carretera medida.

6.5.- Resumen del capítulo 6.

El proceso de validación del sistema de medida CANE mostrado en el presente apartado permite concluir lo siguiente:

1.- Ha sido desarrollada una metodología de medición en continuo de los parámetros geométricos de la calzada mediante el vehículo instrumentado descrito en el *Apartado 5.*, consistente en los pasos siguientes:

- *Medición del itinerario mediante vehículo instrumentado.*
 - Ajuste de los sensores de inclinación embarcados.
 - Verificación del funcionamiento de los equipos de medida y registro.
 - Recorrido del itinerario a una velocidad aproximadamente constante de 80 km/h. Dicha velocidad ha sido fijada teniendo en cuenta que debe ser lo más baja posible para minimizar las influencias dinámicas, al tiempo que debe presentar un valor mínimo de forma que el vehículo de medida no interfiera con el flujo de tráfico.
- *Procesamiento de señales en laboratorio.*
 - Análisis de las imágenes de vídeo, para el cálculo de la corrección incorporada al ángulo de giro del volante medido.
 - Ejecución de la aplicación informática DISET, para la evaluación de los parámetros geométricos de la vía a partir de las señales medidas mediante los sensores embarcados.
 - Obtención de variables explicativas del modelo de predicción de accidentes, algunas de ellas basadas en las imágenes de video registradas.

2.- La validación del sistema comienza con la estimación experimental de la relación de desmultiplicación entre el volante y las ruedas delanteras directrices. Así, el modelo de simulación de 10 grados de libertad, implementado para el cálculo de la trayectoria en planta, recibe como señal de entrada el ángulo de giro del volante para el cálculo del ángulo girado por las ruedas del eje directriz.

No obstante, el cálculo de la relación de desmultiplicación es efectuado en condiciones estáticas. A diferencia de esto, durante la medición del itinerario están presentes condiciones dinámicas, las cuales introducen una componente aleatoria que deberá ser evaluada mediante ensayos en movimiento, como son:

- Durante la circulación el vehículo está sometido a condiciones dinámicas (dinámica longitudinal, lateral y vertical), que provocan continuas alteraciones de la situación instantánea del sistema de dirección.

- El sistema de dirección presenta un cierto ángulo de holgura (giro de volante sin giro de neumáticos), debido a la elasticidad de los elementos que lo constituyen, y que depende del esfuerzo aplicado a dichos elementos.

3.- La validación del algoritmo de cálculo ha sido llevado a cabo mediante ensayos dinámicos en pista y en carretera abierta. Dichos ensayos han permitido estimar los errores cometidos en el cálculo de las siguientes magnitudes: distancia recorrida, radio de la trayectoria seguida por el vehículo, y ángulos de inclinación de la calzada (rampa/pendiente y peralte).

Los resultados obtenidos permiten concluir que la metodología de cálculo de estas magnitudes empleada en la presente Tesis resulta adecuada para los objetivos pretendidos de estimación de la ocurrencia de accidentes.

4.- Los hitos kilométricos reales, requeridos para la localización de los accidentes acumulados en los tramos de curva (variable respuesta del modelo predictivo), no están uniformemente distanciados 1000 metros. Por ello y para subsanar estas desviaciones, serán empleadas las referencias de tiempo sincronizado, de adquisición y de película de video, para el posicionamiento de los accidentes en la carretera medida.

***CAPÍTULO 7.- AJUSTE DEL MODELO DE PREDICCIÓN DE
OCURRENCIA DE ACCIDENTES
EN CURVA DE AUTOVÍA***

CAPÍTULO 7.- AJUSTE DEL MODELO DE PREDICCIÓN DE OCURRENCIA DE ACCIDENTES EN CURVA DE AUTOVÍA.

7.1.- Introducción.

Tras la fase inicial de *planteamiento del problema (Apartado 4.)* -durante la cual han sido definidos el ámbito de aplicación de la investigación, la variable respuesta y las variables explicativas objetivas consideradas en el modelo-, y una vez desarrollado *el sistema de medida de los factores permanentes del medio (Apartados 5. y 6.)*, el proceso de modelización continúa con la fase final de *ajuste del modelo de predicción* de la ocurrencia de accidentes en tramos de curva en autovía.

Durante esta última fase serán desarrolladas las siguientes acciones:

- *Definición de la muestra*, consistente en la selección de un conjunto de elementos representativo de la población.
- *Recogida de la información muestral*, durante la cual son adquiridos los valores de las variables de interés mediante el sistema de medida desarrollado.
- *Selección del modelo predictivo*, determinado por la distribución de la variable respuesta considerada.
- *Estimación de parámetros*, utilizando la información disponible para decidir respecto a los valores de las constantes desconocidas del modelo así como cuantificar el posible error en dicha estimación.
- *Crítica y diagnosis del modelo*. A lo largo de esta fase se evalúa la compatibilidad entre la información empírica y el modelo.

Si después de esta fase se acepta el modelo como correcto, será utilizado para tomar decisiones o realizar previsiones de la variable respuesta analizada. Asimismo, permitirá el análisis de la influencia de las distintas variables explicativas consideradas sobre el fenómeno de ocurrencia de accidentes de tráfico.

Seguidamente, se describe brevemente algunas de las técnicas estadísticas empleadas durante este proceso de ajuste del modelo de predicción.

7.1.1.- LA INFERENCIA ESTADÍSTICA.

La Inferencia Estadística, frente al procedimiento de razonamiento deductivo, trata de inferir el modelo probabilístico que ha generado los datos observados a partir de las frecuencias observadas de una variable.

Los procedimientos de Inferencia Estadística pueden clasificarse por el objetivo del estudio, por el método utilizado y por la información considerada, como se describe a continuación:

- a) *Clasificación respecto al objeto del estudio: muestreo frente a diseño.*
- a.1.- Cuando el objetivo es describir una variable o las relaciones entre un conjunto de variables, se utilizan técnicas de *muestreo*, que consisten en observar una muestra representativa de la población o poblaciones de interés.
- a.2.- Cuando el objetivo es contrastar relaciones entre las variables y predecir sus valores futuros se utilizan técnicas de *diseño experimental*, que consisten en fijar los valores de ciertas variables y medir la respuesta que inducen en otras.
- b) *Clasificación respecto al método utilizado. Métodos paramétricos respecto a no paramétricos.*
- b.1.- *Los métodos paramétricos* suponen que los datos provienen de una distribución que puede caracterizarse por un pequeño número de parámetros que se estiman a partir de los datos. Para ello suponen la forma de una distribución conocida (Normal, Poisson, etc.), y deducen procedimientos óptimos para estimar sus parámetros.
- b.2.- *Los métodos no paramétricos* suponen únicamente aspectos muy generales de la distribución (que es continua, simétrica, etc.) y tratan de estimar su forma o contrastar su estructura. Dentro del enfoque paramétrico estos métodos se utilizan para contrastar hipótesis sobre la forma de la distribución.
- c) *Clasificación respecto a la información considerada: enfoque clásico frente a bayesiano.*
- c.1.- *El enfoque clásico* supone que los parámetros son cantidades fijas desconocidas sobre los que no se dispone de información inicial relevante. Por tanto, la Inferencia utiliza únicamente la información de los datos muestrales.
- c.2.- *El enfoque bayesiano* considera a los parámetros del modelo como variables aleatorias y permite introducir información inicial sobre sus valores mediante una distribución de probabilidad que se denomina distribución a priori.

La diferencia práctica entre ambos procedimientos cuando disponemos de muestras grandes es muy escasa, ya que entonces la información de la muestra será siempre la determinante. En pequeñas muestras, sin embargo, pueden conducir a resultados distintos.

La siguiente figura (*Figura 7.1.*) resume estas clasificaciones. Se estudia la distribución de una variable tomando una muestra (métodos de muestreo); o se comprueba si x influye en y decidiendo unos valores de x y observando el comportamiento de y al cambiar x (métodos de diseño). En ambos casos es posible utilizar un método paramétrico o no paramétrico.

En el primero (método paramétrico) se supone la forma de la distribución y se estima el parámetro θ . En el segundo (método no paramétrico), se estima directamente la forma a partir de los datos (suavizando el histograma). Dentro del modelo paramétrico, si existe información relevante inicial sobre θ , puede ser incluida utilizando un enfoque bayesiano.

Finalmente, el resultado del análisis será: (1) en el método clásico, un estimador puntual de θ , y un intervalo de valores posibles que indica la incertidumbre existente; (2) en el método bayesiano, una distribución de probabilidad sobre θ ; (3) en el enfoque no paramétrico, una distribución estimada sobre y .

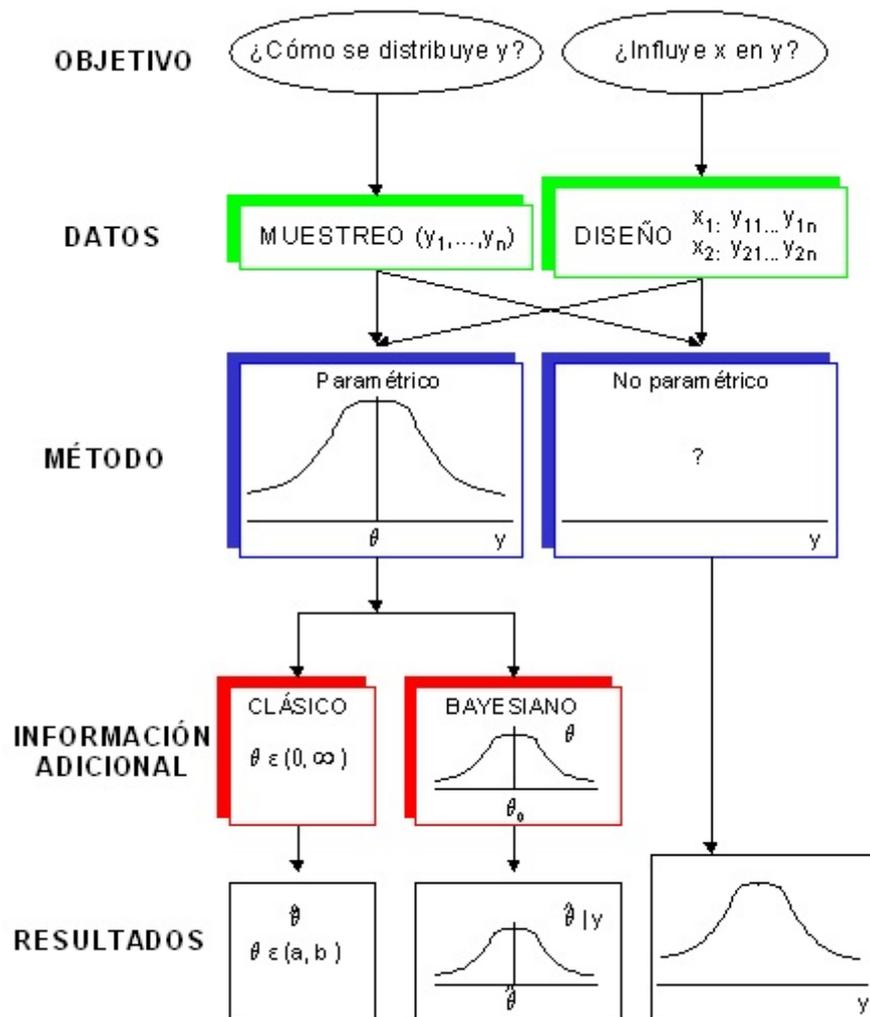


Figura 7.1.- Clasificación de los procedimientos de Inferencia.

7.1.2.- CLASIFICACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS SEGÚN EL OBJETO DEL ESTUDIO.

Una vez planteado el problema deben ser medidos los valores de las variables de interés. Para ello es indispensable la definición del *experimento*, como el proceso de observación de la característica o propiedad buscada en un conjunto de elementos de la población. De esto modo y como ha sido mostrado en el *Apartado 7.1.1.*, los procedimientos de Inferencia pueden clasificarse según el objeto del estudio en dos tipos:

- *Diseño experimental*: el objetivo es contrastar relaciones entre las variables y predecir sus valores futuros. Consiste en fijar los valores de ciertas variables y medir la respuesta que inducen en otras.
- *Muestreo*: el objetivo es describir una variable o las relaciones entre un conjunto de variables. Consiste en observar una muestra representativa de la población o poblaciones de interés.

Seguidamente se describen las características fundamentales de ambas técnicas de definición del experimento.

7.1.2.1.- El diseño experimental.

En la investigación empírica es muy frecuente que repitiendo un experimento en condiciones indistinguibles para el investigador, los resultados obtenidos presenten variabilidad. La metodología de diseño de experimentos estudia cómo realizar comparaciones lo más homogéneas posible para aumentar la probabilidad de detectar cambios o identificar variables influyentes.

Cuando el objetivo es contrastar relaciones entre las variables y predecir sus valores futuros se utilizan *técnicas de diseño experimental*, que consisten en fijar los valores de ciertas variables y medir la respuesta que inducen en otras. Los principios más destacables para el diseño de experimentos son descritos brevemente en los siguientes apartados.

7.1.2.1.1.- *El principio de aleatorización.*

El primer principio para diseñar un experimento es el principio de aleatorización. Este principio requiere que todos los factores no controlados por el experimentador y que puedan influir en los resultados se asignen al azar a las observaciones. Por “asignación al azar” se entiende un procedimiento objetivo que asegure la aleatoriedad, como es la utilización de una tabla de números aleatorios.

La aleatorización es fundamental en el diseño de experimentos ya que:

- Previene la existencia de sesgos.
- Evita la dependencia entre observaciones.
- Confirma la validez de los procedimientos estadísticos más comunes.

7.1.2.1.2.- *La repetición del experimento.*

La varianza de la estimación de una media es σ^2/n . Si se pretende identificar diferencias entre dos tratamientos, puede emplearse uno de los siguientes métodos:

- 1.- Disminución de σ^2 que conduce al concepto de “bloque”, como la variable o factor cuyo efecto sobre la respuesta no es directamente de interés pero que se introduce en el experimento para obtener comparaciones homogéneas.
- 2.- Aumento de n , que conduce a repetir o replicar el experimento.

En la práctica, son empleados ambos métodos. En la experimentación en el laboratorio suele ser más sencillo tomar un pequeño número de observaciones en condiciones muy homogéneas, mientras que en la experimentación “sobre el terreno” suele ser necesario aumentar n para cubrir los efectos de variables fuera del control del experimentador.

7.1.2.1.3.- *La homogeneidad estadística de las comparaciones: diseños factoriales.*

La idea básica de los diseños factoriales consiste en cruzar los niveles de los factores de influencia a todas las combinaciones posibles.

Una idea muy extendida para el estudio de los efectos de varias variables sobre un sistema consiste en medir el efecto de cada una manteniendo constantes todas las demás: esta filosofía de experimentación es denominada “clásica”. No obstante, si los efectos de las variables no son aditivos, esto es si existe interacción entre ellas, el método de modificar una variable sin alterar las demás puede resultar erróneo.

Un segundo inconveniente del método tradicional de experimentación en su ineficiencia cuando existe error experimental. En contrapartida, los diseños factoriales en que son cruzados los niveles de las variables para todas las combinaciones posibles permiten estimar la interacción y, cuando existe error experimental, obtener medidas más precisas de los efectos.

7.1.2.2.- El método de muestreo.

Como ha sido definido en el *Apartado 4.*, se denomina *población* a un conjunto homogéneo de elementos en los que se estudia una característica dada. Frecuentemente no es posible estudiar todos ellos, ya que:

- El estudio puede implicar la destrucción del elemento.
- Los elementos pueden existir conceptualmente, pero no en la realidad.
- Puede ser inviable económicamente estudiar toda la población.
- El estudio llevaría un tiempo excesivamente elevado, e incluso las propiedades de la población habrían variado con el tiempo.

En estas ocasiones en lugar de hacer un *censo* (un estudio exhaustivo de todos sus elementos), se selecciona un conjunto representativo de elementos llamado *muestra*. Cuando la muestra está bien escogida puede ser obtenida una información similar a la del censo con mayor rapidez y menor coste. Esto justifica que, en la práctica, el análisis de poblaciones grandes se haga preferentemente mediante muestreo.

La clave de un procedimiento de muestreo consiste en garantizar que la muestra sea representativa de la población. Por ello, cualquier información respecto a las diferencias entre sus elementos debe tenerse en cuenta para seleccionar dicha muestra. Cuando no se disponga de esta información y los elementos sean indistinguibles o intercambiables a priori y perfectamente homogéneos respecto a la variable que se estudia, la muestra será seleccionada mediante muestreo aleatorio simple.

Seguidamente, se describen brevemente algunas de las técnicas de muestreo habitualmente empleadas en función de las características de los elementos de la población considerada.

7.1.2.2.1.- Muestreo aleatorio simple.

Se dice que una muestra es aleatoria simple cuando se cumple lo siguiente:

- Cada elemento de la muestra tiene la misma probabilidad de ser elegido. Esta condición asegura la representatividad de la población.
- Las observaciones se realizan con reemplazamiento, de manera que la población es idéntica en todas las extracciones. Esta condición se impone por simplicidad: si el tamaño de la población (N) es grande con relación al tamaño de la muestra (n), resulta prácticamente indiferente realizar el muestreo con o sin reemplazamiento.

Para seleccionar una muestra por este método de una población finita se utilizan frecuentemente los números aleatorios de la forma siguiente: se numeran los elementos de la población de 1 a N y se toman números aleatorios de tantas cifras como tenga N . El valor del número aleatorio indicará el elemento a seleccionar.

7.1.2.2.2.- Muestreo estratificado.

El muestreo aleatorio simple presentado en el *Apartado 7.1.2.2.1.* debe utilizarse cuando los elementos de la población son homogéneos respecto a la característica a estudiar, es decir, a priori no se conoce qué elementos de la población tendrán valores altos de ella. Cuando se disponga de información sobre la población conviene tenerla en cuenta al seleccionar la muestra. Así, interesa en estos casos que la muestra tenga una composición análoga a dicha población, lo que se consigue mediante una muestra estratificada.

Se denomina *muestreo estratificado* aquel en que los elementos de la población se dividen en clases o estratos. La muestra se toma asignando un número o *cuota* de miembros a

cada estrato y escogiendo los elementos por muestreo aleatorio simple dentro del estrato.

7.1.2.2.3.- *Muestreo por conglomerados.*

Existen situaciones donde ni el muestreo aleatorio simple ni el estratificado son aplicables, ya que no se dispone de una lista con el número de elementos de la población ni en los posibles estratos. En estos casos típicamente los elementos de la población se encuentran de manera natural agrupados en *conglomerados*, cuyo número sí se conoce. Si se puede suponer que cada uno de estos conglomerados es una muestra representativa de la población total respecto a la variable que se estudia, se puede seleccionar algunos de estos conglomerados al azar y, dentro de ellos, analizar todos sus elementos o una muestra aleatoria simple.

Este método se conoce como *muestreo por conglomerados* y tiene la ventaja de simplificar la recogida de la información muestral. El inconveniente fundamental es que si los conglomerados son heterogéneos entre sí, como sólo se analizan algunos de ellos, la muestra final puede no ser representativa de la población.

Los métodos de estratificación y de conglomerado son opuestos: la estratificación funciona tanto mejor cuanto mayor sean las diferencias entre los estratos y más homogéneos sean éstos internamente; los conglomerados funcionan si hay pocas diferencias entre ellos, y son muy heterogéneos internamente (incluyen toda la variabilidad de la población dentro de cada uno).

7.1.2.2.4.- *Muestreo sistemático.*

Cuando los elementos de la población están ordenados en listas, se utiliza el muestreo sistemático. Así, sea una población de tamaño N , donde se pretende una muestra de tamaño n ; y sea k el entero más próximo a N/n . La muestra sistemática se toma eligiendo al azar (con números aleatorios) un elemento n_1 entre los primeros k . Entonces, serán considerados los elementos $n_1 + k, n_1 + 2k, \dots$, a intervalos fijos de k hasta completar la muestra.

Si el orden de los elementos en la lista es al azar, este procedimiento es equivalente al muestreo aleatorio simple, aunque resulta más fácil de llevar a cabo sin errores. Si el orden de los elementos es tal que los individuos próximos tienden a ser más semejantes que los alejados, el muestreo sistemático tiende a ser más preciso que el aleatorio simple, al cubrir más homogéneamente toda la población.

El muestreo sistemático puede utilizarse conjuntamente con el estratificado para seleccionar la muestra dentro de cada estrato.

De este modo y atendiendo al objeto de esta investigación, cuando el objetivo es contrastar relaciones entre las variables y predecir sus valores futuros se utilizan *técnicas de diseño experimental*. No obstante, los valores de los factores permanentes del medio considerados en la presente Tesis Doctoral no proceden de experimentos predeterminados, sino que están definidos a priori en los tramos de carretera evaluados, por lo que no serán empleadas técnicas de diseño experimental para la recogida de información sobre las variables involucradas. Frente a esto, serán utilizados *métodos de muestreo*.

7.1.3.- ESTIMADORES DE MÁXIMA VEROSIMILITUD.

El concepto de función de verosimilitud, debido a Fisher, es uno de los más importantes de la Inferencia. Esta función se define partiendo de la distribución conjunta de la muestra, cuya caracterización se presenta a continuación.

7.1.3.1.- La función de verosimilitud y la función soporte.

Supongamos una variable aleatoria continua x . La *función de densidad o probabilidad de distribución* es una función continua $f(x)$ que verifica que:

$$f(x) \geq 0; \quad \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot dx = 1 \quad (7.1.)$$

Esta función de densidad permite el cálculo de cualquier probabilidad por integración. Así, la probabilidad de que la variable x sea menor o igual que x_0 vendrá dado por:

$$P(x \leq x_0) = \int_{-\infty}^{x_0} f(x) \cdot dx \quad (7.2.)$$

Supongamos una variable aleatoria continua x con función de densidad que representaremos por $f(x|\underline{\vartheta})$ (para indicar que depende de un vector de parámetros $\underline{\vartheta}$), y una muestra aleatoria simple $X = (x_1, \dots, x_n)$. La *función de densidad conjunta* de la muestra es:

$$f(X|\underline{\vartheta}) = \prod f(x_i|\underline{\vartheta}) \quad (7.3.)$$

Cuando $\underline{\vartheta}$ es conocido, esta función determina la probabilidad de aparición de cada muestra. Si $\underline{\vartheta}$ es desconocido, y se conoce una muestra de $X(X_0)$, la función de densidad conjunta proporciona, para cada valor de $\underline{\vartheta}$, la probabilidad de obtener el valor muestral X_0 . De este modo, cuando variamos $\underline{\vartheta}$ manteniendo X_0 fijo, se obtiene una función llamada *función de verosimilitud*, $l(\underline{\vartheta}|X)$ o $l(\underline{\vartheta})$, tal que:

$$l(\underline{\vartheta}|X) = l(\underline{\vartheta}) = f(X_0|\underline{\vartheta}) \quad X_0 \text{ fijo; } \underline{\vartheta} \text{ variable} \quad (7.4.)$$

En la siguiente figura (*Figura 7.2.*) se resume el concepto de verosimilitud: esta función aparece al invertir el papel de la función de densidad, consecuencia del cambio de óptica que tomamos en Inferencia. Así, en lugar de suponer que conocemos $\underline{\vartheta}$ y queremos calcular las probabilidades de distintas X posibles, suponemos que hemos observado una muestra X_0 , y evaluamos la verosimilitud de los posibles valores de $\underline{\vartheta}$.

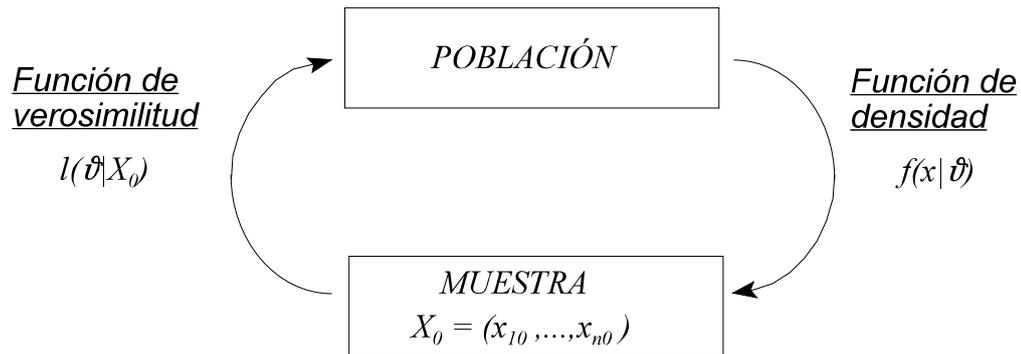


Figura 7.2.- La función de verosimilitud.

Como la función de verosimilitud tiene unidades -las de medida de la variable x - las diferencias entre verosimilitudes no tienen sentido, ya que pueden alterarse arbitrariamente al cambiar la escala de medida. Por ello, para comparar dos posibles valores del parámetro ϑ puede emplearse la diferencia de logaritmos $\ln l(\vartheta_2) - \ln l(\vartheta_1)$, surgiendo el concepto de *función de soporte*, como el logaritmo de la función de verosimilitud:

$$L(\vartheta) = \ln l(\vartheta) \quad (7.5)$$

7.1.3.2.- El método de máxima verosimilitud.

Considerando conocida la función de verosimilitud para $\vartheta -l(\vartheta)-$, un procedimiento intuitivo de estimación consiste en escoger aquel valor que haga máxima la probabilidad de aparición de los valores muestrales efectivamente observados. Esto es, seleccionar como estimador del parámetro el valor que maximice la probabilidad de lo efectivamente ocurrido, es decir, obtener el valor máximo de la función de verosimilitud. Suponiendo que esta función es diferenciable y que su máximo no ocurre en un extremo de su campo de definición, el máximo se obtendrá resolviendo la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial l(\vartheta)}{\partial(\vartheta)} = 0 \quad (7.6.)$$

En la práctica, los estimadores máximo-verosímiles (MV) se obtienen derivando en el logaritmo de la función de verosimilitud o función soporte. Como el logaritmo es una transformación monótona, las funciones soporte y verosimilitud tendrán el mismo máximo. No obstante, la función soporte presenta la ventaja que al tomar logaritmos, las constantes multiplicativas se hacen aditivas y desaparecen al derivar, con lo que la derivada del soporte tiene siempre la misma expresión y no dependen de constantes arbitrarias, frente a lo ocurrido con la derivada de la función de verosimilitud.

La derivada de la función soporte es la *tasa de discriminación*, y podemos definir el estimador máximo-verosímil ($\hat{\theta}_{MV}$) como aquel valor del parámetro para el que se anula la tasa de discriminación de la muestra.

$$\frac{\partial L(\hat{\theta})}{\partial(\hat{\theta})} \Big|_{\hat{\theta}_{MV}} = 0 \quad (7.7.)$$

7.1.4.- ESTIMACIÓN PARAMÉTRICA DEL MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE UNA VARIABLE.

Como ha sido mostrado en el *Apartado 7.1.1.*, los procedimientos de Inferencia Estadística se clasifican, respecto al método utilizado, en paramétricos y no paramétricos. La estimación de los parámetros del modelo de distribución de la variable respuesta, requerido como paso previo a la estimación del modelo lineal generalizado (MLG), es efectuada mediante métodos paramétricos.

En éstos, y partiendo de un modelo de distribución conocida, son obtenidos sus parámetros característicos mediante los estimadores máximo-verosímiles.

7.1.5.- LAS COMPONENTES DE UN MODELO LINEAL GENERALIZADO (MLG).

En los últimos años, los modelos lineales generalizados se han convertido en una herramienta estadística frecuentemente utilizada para el análisis de los datos de accidentes de tráfico. Estos modelos son una extensión de los modelos lineales clásicos.

Esta técnica de modelización es utilizada en la presente Tesis Doctoral.

Como punto de partida de dicha generalización, se considera el vector de observaciones y con n componentes como una muestra de una variable aleatoria Y , cuyos componentes están distribuidos independientemente y con medias μ . La parte sistemática del modelo es una especificación del vector μ , en términos de un número reducido de parámetros β_1, \dots, β_p . En el caso de modelos lineales ordinarios, esta especificación toma la forma siguiente:

$$\mu = \sum x_j \cdot \beta_j \quad (7.8.)$$

donde los parámetros β_j tienen que ser estimados a partir de los datos observados. Si se define i como índice de las observaciones, entonces la parte sistemática del modelo podrá ser escrita como sigue:

$$E(Y_i) = \mu = \sum_1^p x_{ij} \cdot \beta_j; \quad i = 1, \dots, n \quad (7.9.)$$

donde: x_{ij} es el valor de la variable j -ésima en la observación i .

Las hipótesis de partida en los modelos lineales clásicos son las siguientes:

- Las componentes de Y son variables independientes, normalmente distribuidas.
- Estas variables poseen varianza constante (σ^2) y valor esperado igual al valor medio ($E(Y)=\mu$).

7.1.5.1.- La generalización.

La transición de los modelos lineales clásicos a los modelos lineales generalizados puede sintetizarse considerando las hipótesis aplicadas a aquellos como sigue:

1.- *La componente aleatoria (variable respuesta):* las componentes de Y tienen distribuciones normales independientes, con el valor esperado igual al valor medio ($E(Y) = \mu$) y varianza constante (σ^2).

2.- *La componente sistemática (variables explicativas):* las variables explicativas x_1, \dots, x_p generan un predictor lineal η , dado por la siguiente expresión:

$$\eta = \sum_1^p x_j \cdot \beta_j \quad (7.10.)$$

3.- *El lazo de unión* entre las componentes aleatoria y sistemática: $\mu = \eta$

El proceso de generalización introduce un nuevo símbolo η para el predictor lineal, y la tercera componente especifica que μ y η son idénticas. Esta componente puede ser expresada como sigue:

$$\eta_i = g(\mu_i) \quad (7.11.)$$

donde $g(.)$ es denominada *función de unión*. Conforme a esta formulación, los modelos lineales clásicos presentan una distribución Normal en la componente 1, y la función identidad para el lazo de unión en la componente 3.

Los modelos lineales generalizados permiten dos extensiones, a partir de las hipótesis anteriormente expuestas sobre los modelos lineales clásicos:

- La distribución de la componente 1 puede proceder de una familia exponencial distinta de la Normal.
- La función de unión en la componente 3 puede corresponder a cualquier función monótona diferenciable.

7.1.5.2.- Funciones de unión.

Como ha sido mostrado en el apartado anterior, la función o lazo de unión (componente 3) relaciona el predictor lineal η con el valor esperado μ de los datos observados y . En los modelos lineales clásicos, el valor esperado y el predictor lineal son idénticos.

Sin embargo, esta función presenta distintas expresiones en función de la distribución de la componente aleatoria (variable respuesta), como se muestra en la tabla siguiente (*Tabla 7.1.*):

| <i>Distribución de componente aleatoria</i> | <i>Rango de y</i> | <i>Función de unión (*)</i> |
|---|---------------------|--|
| Normal | $(-\infty, \infty)$ | Identidad: $\eta = \mu$ |
| Poisson | $(0, \infty)$ | Logarítmica: $\eta = \log \mu$ |
| Binomial | $(0, 1)$ | Logística: $\eta = \log \{\pi/(1-\pi)\}$ |
| Gamma | $(0, \infty)$ | Recíproca: $\eta = \mu^{-1}$ |
| Gaussiana inversa | $(0, \infty)$ | $\eta = \mu^{-2}$ |

(*): El parámetro valor medio es identificado como μ , o como π para distribuciones binomiales.

Tabla 7.1.- Funciones de unión según la distribución de la componente aleatoria (variable respuesta).

7.1.6.- RESPUESTA BINARIA.

La respuesta binaria es definida como aquella variable que únicamente puede adoptar dos valores, usualmente denotados como 0 y 1. Dicha variable respuesta lleva asociada un vector de variables explicativas $x=(x_1, \dots, x_p)$. El principal objetivo del análisis estadístico aplicado a este tipo de variables explicativas consiste en investigar la relación entre la probabilidad de respuesta π y dichas variables, según la relación $\pi=\pi(x)$.

De este modo, y como ha sido definido en el *Apartado 4.3.*, una de las variables respuesta consideradas en esta investigación es la variable binaria *tramo de curva de autovía de concentración de accidentes*.

En el desarrollo de modelos predictivos con variable respuesta binaria deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones.

7.1.6.1.- Funciones de unión.

Los modelos lineales desarrollan un papel primordial en trabajos teóricos y aplicados. De este modo, se considera que la dependencia de π con (x_1, \dots, x_p) se desarrolla conforme a la siguiente expresión:

$$\eta = \sum_{j=1}^p x_j \cdot \beta_j \quad (7.12.)$$

No obstante, y a menos que sean impuestas restricciones sobre los coeficientes β , los valores del predictor lineal pertenecerán al intervalo $[-\infty, \infty]$. Por ello, la expresión de π como combinación lineal (*Ecuación 7.18.*) sería incompatible con las leyes de probabilidad. Para remediar dicha incompatibilidad, será empleada una transformación $g(\pi)$, que conduce a modelos lineales generalizados cuya parte sistemática vendrá expresada como sigue:

$$g(\pi_i) = \eta_i = \sum_{j=1}^p x_{ij} \cdot \beta_j \quad i = 1, \dots, n \quad (7.13.)$$

Se dispone de un amplio abanico de funciones de unión $g(\pi)$. No obstante, las cuatro funciones más comúnmente empleadas son las siguientes, las cuales son continuas y crecientes en el intervalo $(0,1)$:

1.- *La función logística (logit):*

$$g_1(\pi) = \log\left[\frac{\pi}{(1 - \pi)}\right] \quad (7.14.)$$

2.- *La función Normal inversa (probit):*

$$g_2(\pi) = \Phi^{-1}(\pi) \quad (7.15.)$$

3.- *La función complementaria log-log (c-loglog):*

$$g_3(\pi) = \log[-\log(1 - \pi)] \quad (7.16.)$$

4.- *La función log-log:*

$$g_4(\pi) = -\log[-\log(\pi)] \quad (7.17.)$$

En la siguiente figura (*Figura 7.3.*) se representan gráficamente las cuatro funciones frente a la probabilidad de respuesta π . Así, las funciones logística y probit están casi linealmente relacionadas en el intervalo de probabilidades $\pi \in [0.1, 0.9]$. Por esta razón, suele ser difícil discriminar entre estas dos funciones en el análisis de bondad de un ajuste. Por otro lado, a medida que la probabilidad se aproxima a 1, la función complementaria log-log se aproxima a infinito más lentamente que las funciones probit o logística. De igual modo, a medida que la probabilidad se aproxima a 0, la función log-log se aproxima a menos infinito más lentamente que las funciones probit o logística.

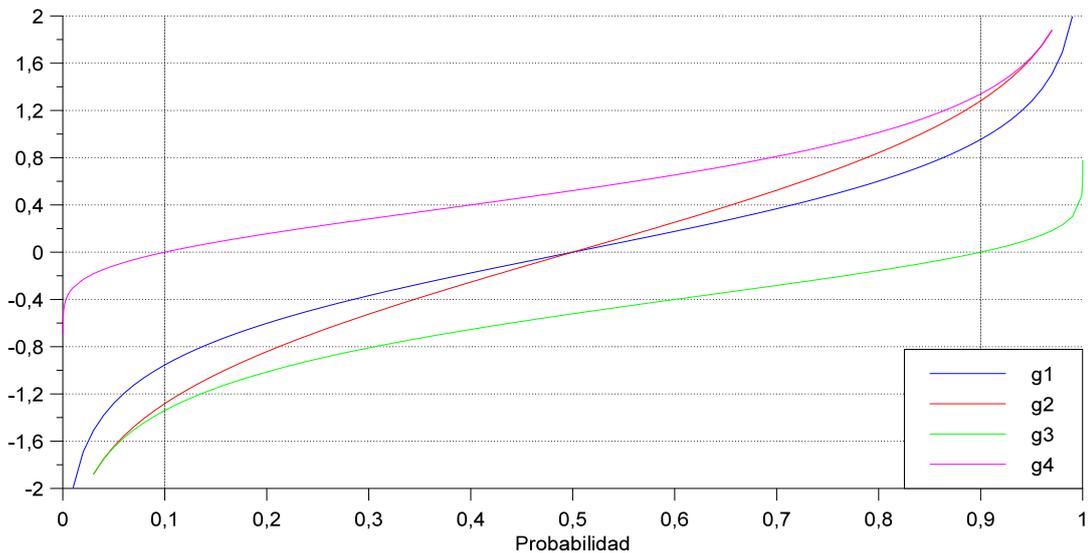


Figura 7.3.- Representación de cuatro funciones de unión (variable respuesta binaria), frente a la probabilidad de respuesta (π).

La función de unión empleada habitualmente en el desarrollo de modelos predictivos con variable respuesta binaria es la *función logística*, debido a las siguientes ventajas:

- Está casi linealmente relacionada en el intervalo de probabilidades $\pi \in [0.1, 0.9]$.
- Presenta propiedades más simples que el resto de funciones.
- Simplicidad de interpretación del término afectado por el logaritmo desde el punto de vista del estudio de probabilidades.
- Adecuación óptima para el análisis de datos recogidos retrospectivamente.

Debido a ello, en el siguiente apartado se presenta el estudio de interpretación de los parámetros contenidos en el modelo lineal generalizado con función de unión logística. Esta técnica de modelización será utilizada en la presente Tesis.

7.1.6.2.- Interpretación de parámetros en la función logística.

El proceso de obtención de conclusiones a partir de un modelo desarrollado se ve favorecido en gran medida si las magnitudes de los efectos estimados están expresadas en una escala fácilmente comprensible. No obstante, la escala más adecuada para este propósito es frecuentemente distinta de la escala o función de unión $g(\pi)$, expresada en función de la relación de aditividad de los efectos considerados en el modelo.

Como ejemplo, si se considera un modelo lineal logístico con dos variables explicativas (x_1, x_2), el modelo desarrollado vendrá expresado por:

$$\log\left(\frac{\pi}{1-\pi}\right) = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 \quad (7.18.)$$

Partiendo de la ecuación anterior (*Ecuación 7.18.*), se puede extraer la expresión matemática del cociente entre la probabilidad de una respuesta positiva frente a la probabilidad de la respuesta negativa:

$$\frac{\pi}{1-\pi} = e^{\beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2} \quad (7.19.)$$

Finalmente, puede obtenerse la expresión de la probabilidad de la respuesta positiva, en función de la relación aditiva entre las variables explicativas consideradas:

$$\pi = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2}} \quad (7.20.)$$

La *Ecuación 7.20.* corresponde a la función inversa de $g_1(\pi)$. Si se considera las variables explicativas como no correlacionadas, el efecto de una unidad de cambio en la variable x_i inducirá que el cociente $\pi/(1-\pi)$ varíe multiplicativamente por un factor de e^{β_i} en el mismo sentido, como se muestra en la *Ecuación 7.19.* No obstante, a la vista de la *Ecuación 7.20.*, resulta muy complicado en la escala de probabilidad deducir el efecto sobre π de una unidad de cambio en las variables explicativas.

7.1.6.3.- Interpretación de la respuesta del modelo de regresión logística.

Como ha sido mostrado en los apartados precedentes, los modelos de regresión logística son aplicables al abordar variables respuesta de naturaleza binaria, esto es, aquellas variables que únicamente puede adoptar dos estados, usualmente denotados como 0 y 1.

Dicho modelo estima la probabilidad de la respuesta positiva ($\pi \in [0, 1]$) como función de la relación aditiva entre las variables explicativas consideradas. La estimación del estado de la variable respuesta binaria observada a partir de la probabilidad π estimada responde habitualmente al criterio mostrado a continuación:

$$\begin{aligned}\pi \leq 0.5 &\Rightarrow \textit{Estado} = 0 \\ \pi > 0.5 &\Rightarrow \textit{Estado} = 1\end{aligned}\quad (7.21.)$$

Simultáneamente, la mayor o menor proximidad de la probabilidad estimada π al punto medio 0.5 denota, respectivamente, una menor o mayor ratificación del estado de la variable respuesta binaria.

7.1.7.- ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE UN MODELO LINEAL GENERALIZADO.

Dado un modelo, cuya componente sistemática viene definida a partir de las variables explicativas x_1, \dots, x_p , se genera un predictor lineal η , dado por la siguiente expresión:

$$\eta = \sum_1^p x_j \cdot \underline{\beta}_j \quad (7.22.)$$

donde $\underline{\beta}_j$ son los parámetros estimados, para cada una de las variables explicativas, a partir de los valores muestrales.

La estimación de dichos parámetros requiere la definición de una medida de la “bondad del ajuste” entre los valores observados y los predichos por el modelo. La medida empleada en la presente Tesis Doctoral se establece sobre el parámetro $-2.L(\hat{\vartheta})$ (definido como $-2LL$ en el programa estadístico SPSS[®]6.1¹, empleado en el presente trabajo de investigación). Así, el modelo estimado será óptimo cuando minimice dicho parámetro. Al mismo tiempo, si se efectúa un análisis de incorporación sucesiva de variables explicativas en el modelo, podrá evaluarse la mejora introducida por cada una de ellas a partir del análisis comparativo basado en el parámetro mostrado.

¹ SPSS es una marca comercial registrada, propiedad de SPSS Inc.

7.2.- Definición de la muestra.

7.2.1.- TÉCNICA DE RECOGIDA DE INFORMACIÓN MUESTRAL.

Tras la definición del ámbito de aplicación del estudio, según ha sido mostrado en el *Apartado 4.2.3.*, deben ser medidos los valores de las variables explicativas objetivas y respuesta en un conjunto de elementos de dicha población, los cuales serán utilizados durante la presente fase de ajuste del modelo de predicción.

De este modo y atendiendo al objeto de este estudio, cuando el objetivo es contrastar relaciones entre las variables y predecir sus valores futuros se utilizan *técnicas de diseño experimental* que consisten, como ha sido definido en el *Apartado 7.1.2.1.*, en fijar los valores de ciertas variables y medir la respuesta que inducen en otras. No obstante, los valores de los factores permanentes del medio considerados en la presente Tesis Doctoral no proceden de experimentos predeterminados, sino que están definidos a priori en los tramos de carretera evaluados, por lo que no serán empleadas técnicas de diseño experimental para la recogida de información sobre las variables involucradas.

Frente a esto, serán utilizados *métodos de muestreo*. En este caso, en lugar de desarrollar un estudio exhaustivo de todos los elementos de la población es seleccionado un conjunto de elementos de la misma, llamado *muestra*. Así, en el estudio que nos ocupa resultaría inviable la medida de los factores permanentes del medio en todos los tramos de curva de las autovías de España, debido a que:

- El estudio llevaría un tiempo excesivamente elevado.
- No resultaría abordable económicamente.

Seguidamente, son descritos los criterios tomados en consideración para la definición de la muestra analizada en este trabajo.

7.2.2.- CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LA MUESTRA.

Como ha sido presentado en apartados precedentes, la presente Tesis aborda la predicción del riesgo de ocurrencia de accidentes en tramos de curva en autovía, basado en variables explicativas objetivas definidas a partir de los factores permanentes del medio.

Los criterios de partida tomados en cuenta para la definición de los tramos de curva integrantes de la muestra que será analizada son:

- Proximidad a la ciudad de Madrid, punto de localización del equipo requerido para el desarrollo de esta investigación.
- Alejamiento del núcleo urbano de Madrid con objeto de eliminar la influencia de las características del tráfico urbano, no considerado en la presente Tesis.
- Ausencia de modificaciones en los factores permanentes del medio presentes en el trazado de los itinerarios evaluados durante el período de 1994, 1995 y 1996.

- Variabilidad en los valores de dichos factores permanentes del medio.

Estos criterios serán tenidos en cuenta durante el proceso de definición de la muestra abordado en el siguiente apartado.

7.2.3.- DEFINICIÓN DE LA MUESTRA.

Los itinerarios de autovía considerados en esta investigación son seleccionados como sigue:

- Se inician y transcurren en parte por la provincia de Madrid, debido a:
 - ▶ Proximidad al punto de localización del equipo requerido para el desarrollo del estudio.
 - ▶ Distribución radial del trazado de autovías en España con punto de origen en la ciudad de Madrid, por lo que dicha provincia posee el mayor número de kilómetros de autovía de las provincias españolas: el 10% del total de kilómetros de autovía de España en 1994.
- Algunos de los itinerarios, partiendo de la provincia de Madrid, transcurren por la provincia de Toledo. Esto está motivado por la ubicación de la capital de España, la cual se sitúa más cercana al límite meridional de la provincia (límite entre las provincias de Madrid y Toledo). Así, y dado que la longitud de los itinerarios analizados en continuo es de aproximadamente 60 kilómetros, algunos de ellos discurrirán por ambas provincias.
- El punto de inicio de dichos itinerarios ha sido fijado de manera que estén suficientemente alejados de la zona de influencia urbana de Madrid, por las características especiales que reúne el tráfico urbano, el cual no es objeto del presente estudio.
- En una primera aproximación al problema de la selección de los itinerarios en estudio, son consideradas todas las autovías localizadas en la provincia de Madrid y que transcurren radialmente desde la capital de España. No obstante, un análisis en profundidad de las mismas muestra las siguientes conclusiones:
 - ▶ Las autovías N-II y N-III presentan tramos de obras en las proximidades a la ciudad de Madrid, por lo que dichas vías son descartadas del presente estudio.
 - ▶ La vía N-VI presenta calificación de autopista (libre y de peaje, según los itinerarios), por lo que tampoco será tomada en cuenta.
 - ▶ La autovía N-V presenta tramos de obras a partir del P.K. 70, lo cual limita la longitud del itinerario medido en la misma.

Tomando esto en consideración, la muestra analizada consta de los itinerarios de autovía

presentados en la tabla siguiente (*Tabla 7.2.*), así como en la *Figura 7.4.*

| <i>Denominación de autovía</i> | <i>Nº kilómetros</i> | <i>Nº de tramos de curva</i> | <i>Tramos/km.</i> |
|--------------------------------|----------------------|------------------------------|-------------------|
| N-I (Carretera de Burgos) | 64 | 55 | 0,86 |
| N-IV (Carretera de Andalucía) | 70 | 29 | 0,42 |
| N-401 (Carretera de Toledo) | 56 | 27 | 0,48 |
| N-V (Carretera de Extremadura) | 35 | 5 | 0,14 |
| <i>Total</i> | 225 | 116 | |

Tabla 7.2.- Definición de la muestra considerada en el presente estudio.

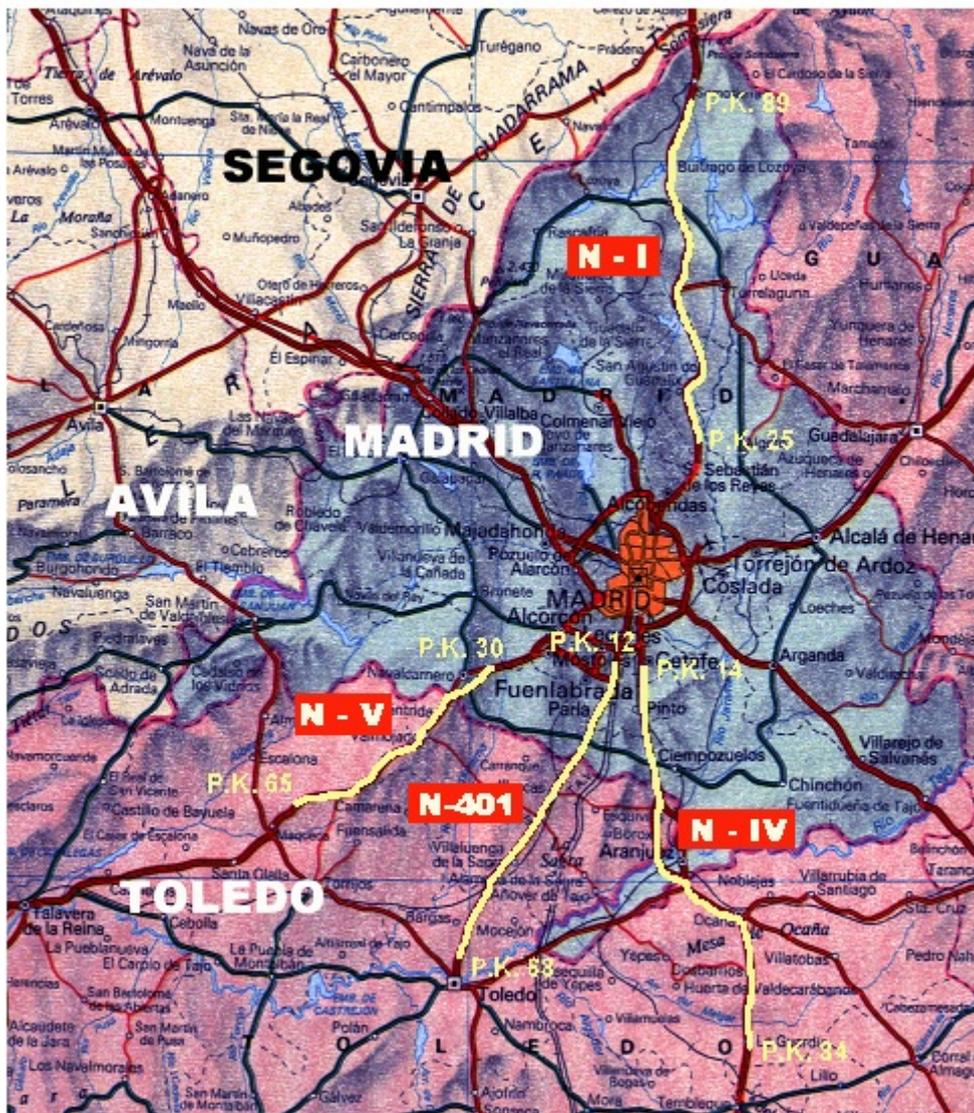


Figura 7.4.-Definición de la muestra considerada en el presente estudio.

El número total de kilómetros de autovía analizados es de 225 kilómetros. Estos discurren al 50% entre las provincias de Madrid y Toledo. Asimismo, dichos itinerarios constituyen el 5% del total de kilómetros de autovía de España.

Como se observa en la tabla precedente dichos itinerarios, incluso perteneciendo al mismo tipo de vía, muestran gran disparidad en cuanto al número de tramos de curva existentes por kilómetro. Dicho valor constituye un indicador del grado de sinuosidad del itinerario en estudio. La ubicación de los tramos de curva considerados se muestra en la *Tabla VII.1.*, así como en las figuras recogidas en el *Anexo X.*

El número total de tramos de curva analizados ha sido de 116 tramos. No obstante, la distribución de este número por kilómetro entre las diferentes autovías es bastante desigual, revelando lo siguiente:

- Las autovías N-401 y N-IV presentan un grado de sinuosidad similar, e intermedio entre las restantes autovías estudiadas.
- La autovía N-I muestra un trazado muy sinuoso.
- La autovía N-V posee un trazado muy poco sinuoso.

Estos resultados son adecuados a los objetivos del estudio, de modo que los itinerarios analizados incluyan gran variabilidad desde el punto de vista de los factores permanentes del medio.

7.2.4.- ANÁLISIS DE LA MUESTRA.

En el presente apartado se analiza en qué medida la muestra de itinerarios de autovía considerada es representativa del trazado de autovías de España, desde el punto de vista de los factores permanentes del medio que definen las variables explicativas tenidas en cuenta durante el proceso de generación de modelos de predicción de accidentes.

Para ello, se realiza el contraste de la hipótesis de ausencia de diferencias significativas entre la muestra y el resto de itinerarios de autovía, basado en la *comparación de proporciones* (*Apartado 4.1.2.2.*). Así, serán definidos pares de subpoblaciones independientes conforme a las propiedades en estudio. Seguidamente, será contrastada la hipótesis de identidad de proporciones de elementos con un atributo determinado entre dichos pares de subpoblaciones.

Teniendo en cuenta los objetivos del presente trabajo, serán elegidos como atributos para el contraste los siguientes:

- *Distribución de accidentes según la geometría del trazado: recta o curva.*
- *Distribución de accidentes según la configuración de la colisión.*

Para el desarrollo de este contraste son tomados en consideración los accidentes con víctimas ocurridos en autovías de España durante los años de 1994, 1995 y 1996, procedentes del Cuestionario Estadístico de Accidentes de Circulación con Víctimas, según se recoge en el *Anexo I*.

En dicho cuestionario se distingue la siguiente clasificación para los atributos de contraste previamente definidos:

- *Distribución de accidentes según la geometría del trazado: recta o curva.*
 - ▶ Recta.
 - ▶ Curva suave.
 - ▶ Curva fuerte sin señalizar.
 - ▶ Curva fuerte con señal y sin velocidad señalizada.
 - ▶ Curva fuerte con señal y velocidad señalizada.
 - ▶ En intersección.

- *Distribución de accidentes según la configuración de la colisión.*
 - ▶ Colisión frontal.
 - ▶ Colisión frontolateral.
 - ▶ Colisión lateral.
 - ▶ Colisión por alcance.
 - ▶ Colisión múltiple o en caravana.
 - ▶ Colisión con obstáculo en la calzada.
 - ▶ Atropello.
 - ▶ Vuelco en la calzada.
 - ▶ Salidas de la calzada por la izquierda.
 - ▶ Salidas de la calzada por la derecha.

Tomando en cuenta estos atributos, son definidas las hipótesis nula y alternativa del contraste. Estas hipótesis quedan definidas como sigue:

- H_0 : igualdad de proporciones de número de accidentes en autovía, según el atributo en estudio, entre los itinerarios de autovía contenidos en la muestra y el resto de itinerarios de autovía de España.

- H_1 : desigualdad de proporciones de número de accidentes en autovía, según el atributo en estudio, entre los itinerarios de autovía contenidos en la muestra y el resto de itinerarios de autovía de España.

Empleando dichas proporciones así como el número total de accidentes, es obtenida la medida de la discrepancia *-d-* para cada uno de los atributos (según *Ecuación 4.14.*). Seguidamente, es presentado el análisis de comparación de proporciones previamente descrito para las propiedades en estudio.

7.2.4.1.- Comparación de subpoblaciones según la geometría del trazado.

En primer lugar son evaluadas las proporciones de accidentes en autovía según el atributo “geometría del trazado” en los itinerarios de la muestra y en el resto de itinerarios de autovía de España. Dicho análisis de proporciones es presentado por separado para cada uno de los años considerados: 1994, 1995 y 1996, como se muestra en la *Tabla VII.2*.

Seguidamente, se evalúa el número total de accidentes en los itinerarios de autovía de la muestra así como en el resto de itinerarios de autovía de España. Los valores obtenidos son mostrados en la *Tabla VII.3*.

Finalmente, se procede a la *comparación de subpoblaciones* según el atributo analizado. De este modo, tras el cálculo de estas proporciones y teniendo en cuenta el número total de accidentes, es obtenida la medida de la discrepancia d para las distintas geometrías del trazado. Los valores así calculados son presentados en la *Tabla VII.4.*, y en la siguiente figura (*Figura 7.5.*).

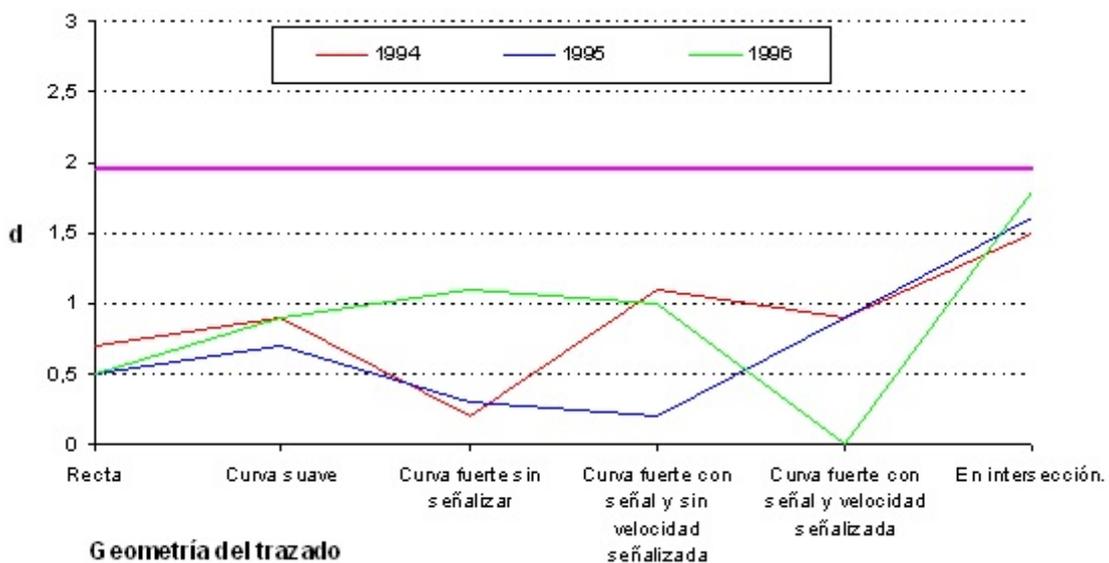


Figura 7.5.- Medida de la discrepancia según el atributo “geometría del trazado” entre la muestra y el resto de itinerarios de autovía de España (años 1994, 1995 y 1996).

7.2.4.2.- Comparación de subpoblaciones según la configuración de la colisión.

En primer lugar son evaluadas las proporciones de accidentes en autovía según el atributo “configuración de la colisión” en los itinerarios de la muestra y en el resto de itinerarios de autovía de España. Dicho análisis de proporciones es presentado por separado para cada uno de los años considerados: 1994, 1995 y 1996, como se muestra en la *Tabla VII.5*.

Finalmente, se procede a la *comparación de subpoblaciones* según el atributo analizado. De este modo, tras el cálculo de estas proporciones y teniendo en cuenta el número total de accidentes (*Tabla VII.3.*), es obtenida la medida de la discrepancia d para las distintas configuraciones de colisión. Los valores así calculados son presentados en la *Tabla VII.6.*, y en la siguiente figura (*Figura 7.6.*).

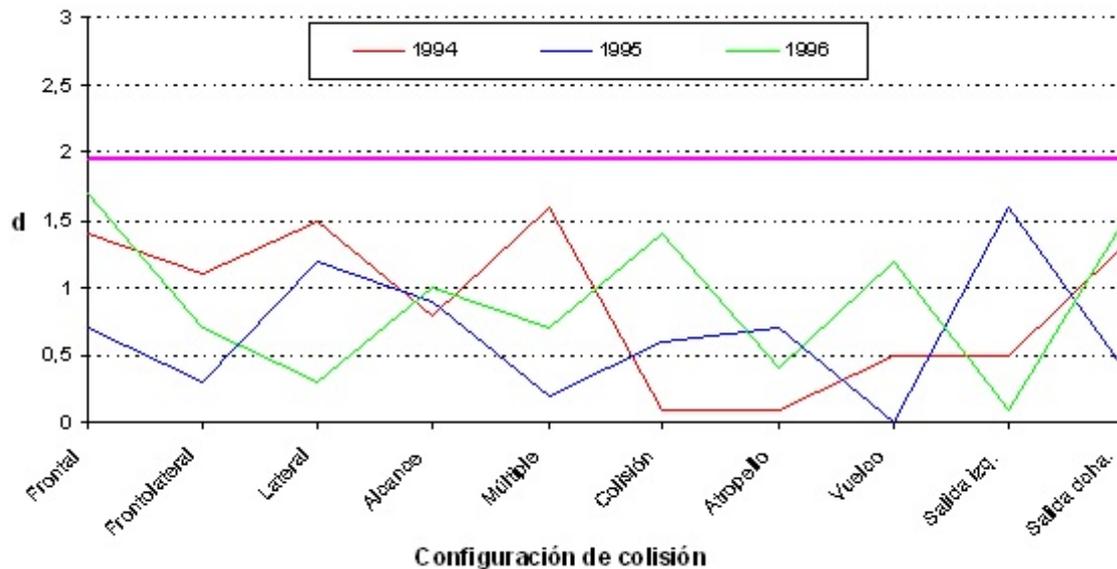


Figura 7.6.- Medida de la discrepancia según el atributo “configuración de la colisión” entre la muestra y el resto de itinerarios de autovía de España (años 1994, 1995 y 1996).

El análisis de *comparación de proporciones* desarrollado en tramos de autovía entre la muestra seleccionada y el resto de itinerarios de autovía de España proporciona los siguientes resultados:

- La medida de la discrepancia d no revela diferencias significativas entre ambas subpoblaciones desde el punto de vista de la geometría del trazado en que se producen los accidentes, en ninguno de los tres años tomados en consideración.
- Dicha discrepancia d tampoco muestra diferencias significativas entre ambas subpoblaciones desde el punto de vista de la configuración de las colisiones, en ninguno de dichos años.

Tomando en cuenta los resultados precedentes, puede concluirse la ausencia de diferencias significativas entre los itinerarios de autovía de la muestra y los del resto de autovías de España, desde el punto de vista de la configuración de la colisión así como de la geometría del trazado en que se producen los accidentes.

7.2.5.- CONCLUSIONES DEL PROCESO DE DEFINICIÓN DE LA MUESTRA.

Cuando el objetivo es contrastar relaciones entre las variables y predecir sus valores futuros se utilizan *técnicas de diseño experimental* que consisten básicamente en fijar los valores de ciertas variables y medir la respuesta que inducen en otras. No obstante, los valores de los factores permanentes del medio considerados en la presente Tesis Doctoral no proceden de experimentos predeterminados, sino que están definidos a priori en los tramos de carretera evaluados, por lo que no serán empleadas técnicas de diseño experimental para la recogida de información sobre las variables involucradas. Frente a esto, serán empleados *métodos de muestreo*.

Durante esta etapa de definición de la muestra, serán seleccionados itinerarios que se inician y discurren en parte por la provincia de Madrid (debido a su proximidad al punto de localización del equipo requerido para el desarrollo del estudio) junto a otros situados en la provincia de Toledo, y en los cuales no se han realizado obras de modificación de los factores permanentes del medio considerados durante el período de 1994, 1995 y 1996.

El número de kilómetros de autovía analizados es de 225 kilómetros, con un total de 116 tramos de curva. Los distintos itinerarios muestran gran disparidad en cuanto al número de tramos de curva existentes por kilómetro. Dicho valor constituye un indicador del grado de sinuosidad del itinerario en estudio. Estos resultados son adecuados a los objetivos del estudio, de modo que los itinerarios analizados incluyan gran variabilidad desde el punto de vista de los factores permanentes del medio.

Finalmente, no aparecen diferencias significativas entre los itinerarios de autovía de la muestra y los del resto de autovías de España, desde el punto de vista de la configuración de la colisión y de la geometría del trazado en que se producen los accidentes. Debido a ello se puede concluir que la muestra seleccionada es representativa de las autovías de España.

7.3.- Recogida de información muestral.

La fase de ajuste del modelo de predicción continúa con la recogida de información sobre las variables respuesta y los factores del medio en los itinerarios de la muestra definida en el apartado precedente. Estos últimos son evaluados mediante el sistema de medida CANE descrito en los *Apartados 5. y 6.* Posteriormente, y a partir de dicha información, serán obtenidas las variables explicativas consideradas en el modelo de predicción.

Los valores de las variables explicativas y respuesta son mostrados en los siguientes apartados.

7.3.1.- LA VARIABLE RESPUESTA.

Como fue definido en el *Apartado 4.3.*, en el presente trabajo son tenidas en cuenta dos variables respuesta de distinta naturaleza:

- *Variable respuesta discreta*: frecuencia de accidentes en tramos de curva en autovía.
- *Variable respuesta binaria*: tramo de concentración de accidentes, cuyos estados quedan definidos como sigue:
 - a) *Estado 0*: el número de accidentes del tramo considerado no es estadísticamente significativo.
 - b) *Estado 1*: el número de accidentes del tramo considerado es estadísticamente significativo.

Los valores de dicha variable respuesta binaria serán determinados a partir del modelo de distribución de la variable respuesta discreta.

7.3.1.1.- Frecuencia de accidentes en tramos.

El número total de accidentes acumulados en los tramos de curva analizados, durante el período comprendido entre 1994 y 1996, es de *98 accidentes*. La distribución de los mismos en dichos tramos es presentado en la siguiente figura (*Figura 7.7.*) y en el *Anexo VIII (Tabla VIII.1.)*. Asimismo, la ubicación de estos accidentes es representado en las figuras recogidas en el *Anexo X*.

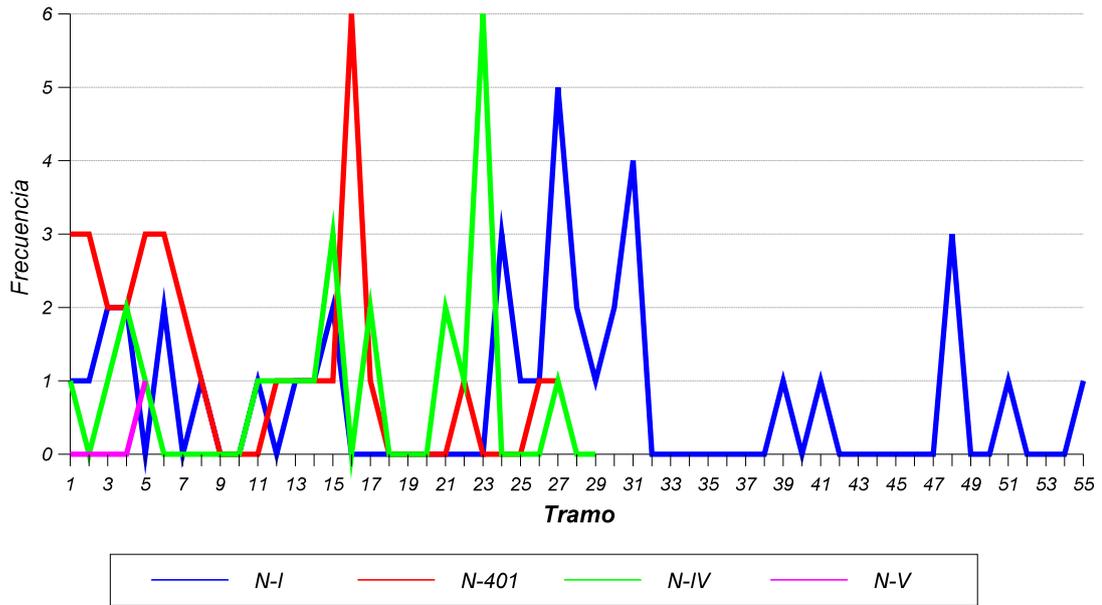


Figura 7.7.- Número de accidentes en tramos de las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V).

La tipología de los accidentes considerados se describe seguidamente:

- *Distribución por años*: el número de accidentes acumulados en cada uno de los años tenidos en cuenta se mantiene prácticamente uniforme, como se observa en la siguiente tabla (Tabla 7.3.) y figura (Figura 7.8.).

| Año | Frecuencia |
|------|------------|
| 1994 | 30 |
| 1995 | 36 |
| 1996 | 32 |

Tabla 7.3.- Distribución de accidentes según el año.

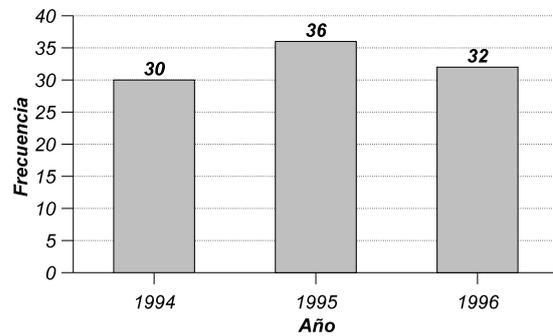


Figura 7.8.- Distribución de accidentes según año.

► *Distribución por configuración de la colisión*: los accidentes ocurridos en los tramos en estudio presentan tres configuraciones de colisión: salida de vía, frontolateral y alcance, siendo la primera de ellas la más frecuente (71.4 %). Así, las salidas de vía están influenciadas por una velocidad inadecuada según las condiciones del medio, mientras los alcances y colisiones frontolaterales están favorecidos por la presencia de accesos y/o salidas en el tramo de curva.

La distribución de los accidentes según la configuración de la colisión se presenta en la siguiente tabla (Tabla 7.4.) y figura (Figura 7.9.).

| <i>Configuración</i> | <i>Frecuencia</i> |
|----------------------|-------------------|
| Salida | 70 |
| Fronto-lateral | 16 |
| Alcance | 12 |

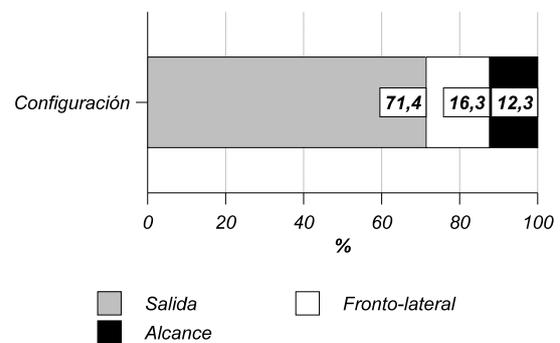


Tabla 7.4.- Distribución de accidentes según la configuración de colisión.

Figura 7.9.- Distribución de accidentes según la configuración de colisión.

► *Distribución según el número de vehículos involucrados por accidente*: este número está condicionado por la configuración de la colisión. Esta distribución se muestra en la siguiente tabla (Tabla 7.5.) y figura (Figura 7.10.).

| <i>Configuración</i> | <i>Nº vehículos</i> | <i>Frecuencia</i> |
|----------------------|---------------------|-------------------|
| Salida | | |
| | 1 | 69 |
| | 2 | 1 |
| Frontolateral | | |
| | 2 | 14 |
| | 3 | 1 |
| | 4 | 1 |
| Alcance | | |
| | 2 | 11 |
| | 3 | 1 |

Tabla 7.5.- Distribución de accidentes por número de vehículos implicados en el accidente, según la configuración de la colisión.

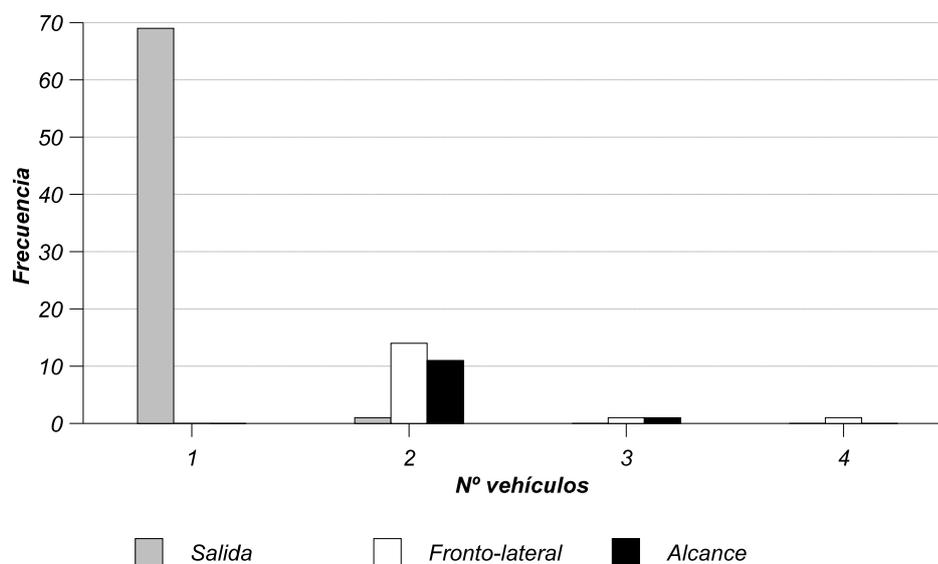


Figura 7.10.- Distribución de accidentes por número de vehículos implicados en el accidente, según la configuración de la colisión

Estos resultados permiten concluir que:

- La mayoría de los accidentes por salida de vía cuentan con un único vehículo involucrado.
- La situación predominante en colisiones frontolaterales y alcances son colisiones con dos vehículos implicados.
- No aparecen colisiones múltiples o en caravana. Este tipo de siniestros está determinado en menor medida por los factores permanentes del medio analizados en este trabajo.

7.3.1.2.- El modelo de distribución de la frecuencia de accidentes.

La estimación del modelo de distribución de la variable respuesta discreta “frecuencia de accidentes en tramos de curva de autovía” es requerida para la definición de la variable respuesta binaria, así como para la selección de la función de unión (según *Tabla 7.1.*) considerada durante el proceso de ajuste del modelo de predicción.

Como punto de partida para la estimación del modelo de distribución, y teniendo en cuenta los datos mostrados en el apartado precedente, se representa el histograma de la muestra analizada (*Tabla 7.6.* y *Figura 7.11.*).

| <i>Nº accidentes en tramo de curva</i> | <i>Frecuencia (tramos)</i> |
|--|----------------------------|
| 0 | 61 |
| 1 | 32 |
| 2 | 12 |
| 3 | 7 |
| 4 | 1 |
| 5 | 1 |
| 6 | 2 |
| Media muestral | 0,845 |

Tabla 7.6.- Distribución de frecuencias del número de accidentes en tramo de curva de autovía en muestra analizada.

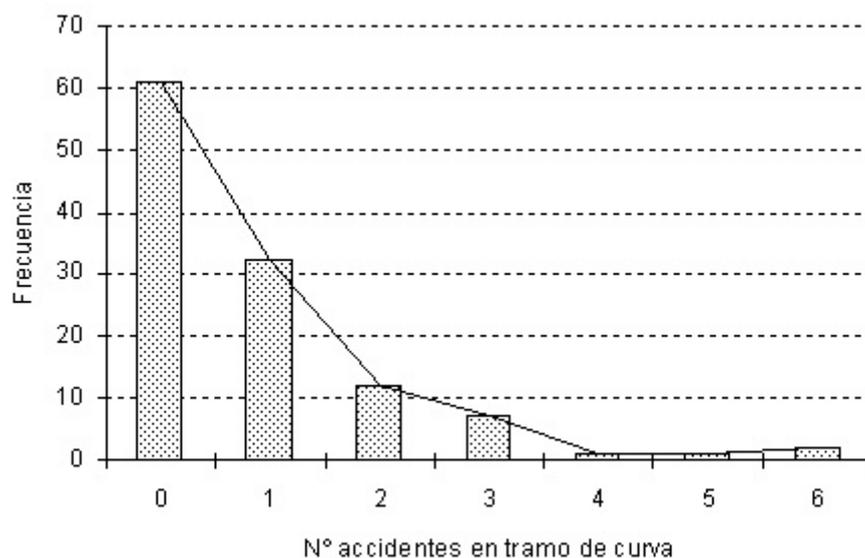


Figura 7.11.- Histograma de acumulación de accidentes en tramo de curva de autovía, en muestra analizada.

Como ha sido mostrado en el *Apartado 7.1.3.*, partiendo de una distribución conocida, los estimadores máximo-verosímiles (MV) se obtienen derivando en el logaritmo de la función de verosimilitud o función soporte $L(\lambda)$. La bibliografía analizada acerca de la generación de modelos de predicción de la frecuencia de accidentes (*Mountain, L; Fawaz, B., 1996 [34], Summersgill, I.; Layfield, R. E., 1996 [48], Karlsson, CH.; Schmeling, E., 1994 [22]*), acepta la hipótesis que el número de accidentes que se concentra en un tramo, en un período de tiempo determinado, sigue una *distribución de Poisson*. Dicha hipótesis es equivalente a considerar que la frecuencia media de accidentes en un tramo, en un período de tiempo dado, y mientras las condiciones de dicho tramo no se modifiquen, es constante.

Esta *distribución de Poisson* está caracterizada por el parámetro λ , de forma que:

$$\begin{aligned} E[x] &= \lambda \\ \text{Var}[x] &= \lambda \end{aligned} \quad (7.23.)$$

La expresión matemática de la función soporte en dicha distribución viene expresada como sigue:

$$l(\lambda) = e^{-n \cdot \lambda} \cdot \lambda^{n \cdot \bar{x}} \Rightarrow L(\lambda) = -n \cdot \lambda + n \cdot \bar{x} \cdot \ln \lambda \quad (7.24.)$$

donde \bar{x} representa la media de la muestra considerada, y n corresponde al número de elementos de la misma. Dicha media tiene el valor de $\bar{x} = 0.845$ accidentes/tramo, como ha sido mostrado en la *Tabla 7.6*, con $n=116$.

Considerando estos valores, la representación del valor de la función soporte en función del parámetro λ se presenta en la siguiente figura (*Figura 7.12.*).

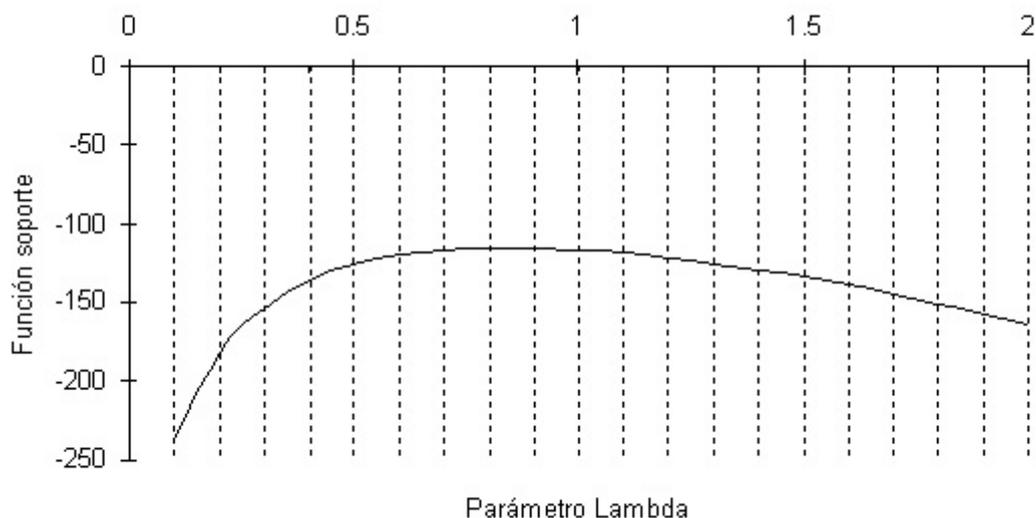


Figura 7.12.- Evolución de la función soporte frente al parámetro λ , en muestra analizada.

Aplicando el método de máxima verosimilitud, el estimador máximo verosímil del parámetro λ (λ_{MV}) será aquel que maximice la función soporte. Así, aplicando la *Ecuación 7.7.*, se obtendrá:

$$\frac{\partial L(\lambda)}{\partial(\lambda)} \Big|_{\lambda_{MV}} = -n + \frac{n \cdot \bar{x}}{\lambda_{MV}} = 0 \Rightarrow \lambda_{MV} = \bar{x} \quad (7.25.)$$

Así, la distribución de probabilidad de la población considerada, estimada a partir de la muestra seleccionada, vendrá expresada como sigue:

$$P(x = r) = \frac{\lambda^r}{r!} \cdot e^{-\lambda} \quad , \quad r = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (7.26.)$$

En la siguiente figura (*Figura 7.13.*) se representa la distribución de probabilidad estimada, junto a la distribución de probabilidad de la muestra analizada.

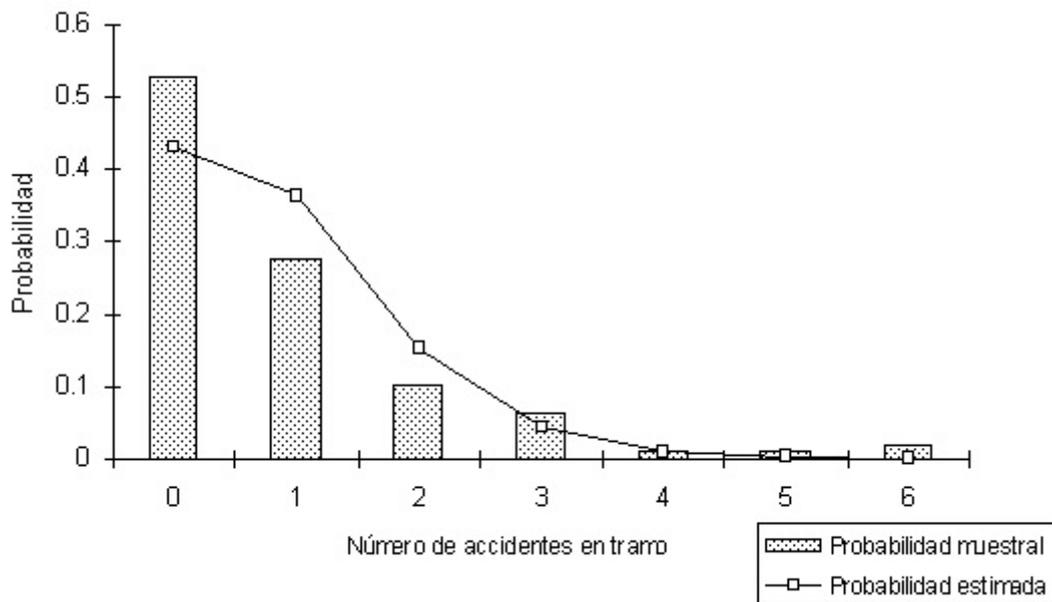


Figura 7.13.- Distribución de probabilidad muestral y estimada del número de accidentes en tramo de curva de autovía.

Finalmente, la desviación típica de la población así estimada vendrá dada por la siguiente expresión:

$$\hat{\sigma}_{MV} = \sqrt{\left[-\frac{\partial^2 L(\lambda_{MV})}{\partial \lambda^2} \right]^{-1}} = \sqrt{\frac{\lambda_{MV}}{n}} \quad (7.27.)$$

7.3.1.3.- Definición de la variable respuesta binaria “tramo de concentración de accidentes”.

Los estados de la variable respuesta binaria quedan definidos como sigue:

- a) *Estado 0*: el número de accidentes del tramo considerado no es estadísticamente significativo.
- b) *Estado 1*: el número de accidentes del tramo considerado es estadísticamente significativo.

La definición de dichos estados requiere la determinación del número de accidentes estadísticamente significativo. Para ello, es empleada la técnica del *contraste de hipótesis (según Apartado 4.1.2.)*.

El punto de partida para la aplicación de dicho contraste consiste en la estimación del modelo de distribución de la frecuencia de accidentes. Dicha distribución, como ha sido discutido en el *Apartado 7.3.1.2.*, corresponde a una distribución de Poisson caracterizada por el parámetro $\lambda = 0.845$ *accidentes/tramo*, de forma que:

$$\begin{aligned} E[x] &= 0.845 \\ \text{Var}[x] &= 0.845 \end{aligned}$$

Partiendo de dicho modelo de distribución, se define como *número de accidentes estadísticamente significativo*:

“El número de accidentes estadísticamente significativo es el número mínimo de accidentes significativamente mayor al estimador de la media de la distribución ($E[x]$). Dicho estimador de la media corresponde a una frecuencia de accidentes no representativa de diferencias entre los distintos tramos.”

Para efectuar la estimación de dicho número, será empleado un *contraste de tipo unilateral*, de acuerdo al proceso iterativo mostrado en la siguiente figura (*Figura 7.14.*). Para ello, son definidas las hipótesis nula y alternativa del contraste, como sigue:

- $H_0: \mu = \mu_0$
- $H_1: \mu > \mu_0$

Aplicando la técnica del contraste de hipótesis, el mínimo valor de μ_0 que haga falsa la hipótesis nula, esto es, aquel número de accidentes μ_0 significativamente distinto del estimador máximo-verosímil de la media de la distribución, será definido como el número de accidentes estadísticamente significativo.

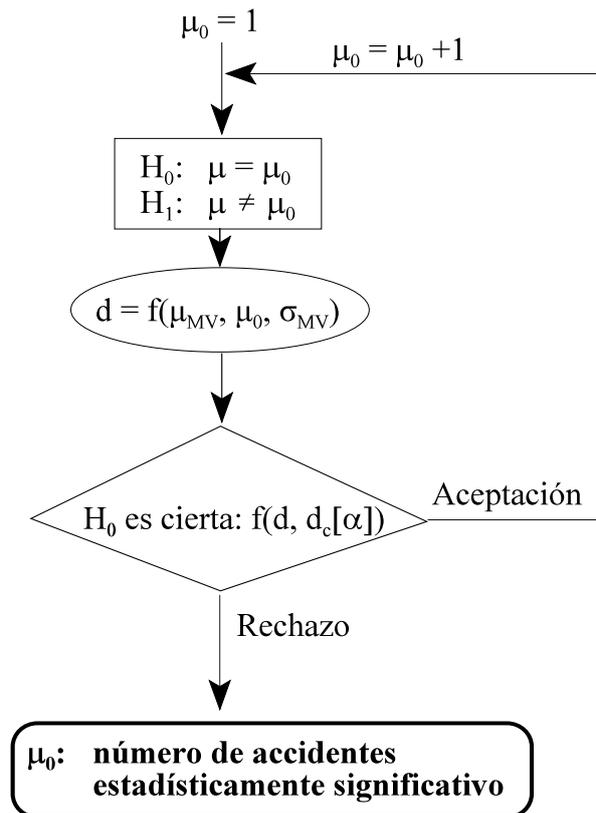


Figura 7.14.- Diagrama de estimación del número de accidentes estadísticamente significativo, mediante contraste de hipótesis.

Considerando la muestra analizada, se presenta seguidamente el proceso iterativo para la definición del número de accidentes estadísticamente significativo.

Iteración 1

Las hipótesis nula y alternativa en el primer paso de iteración se muestran seguidamente:

$$\begin{aligned} H_0: & \mu = 1 \\ H_1: & \mu > 1 \end{aligned} \quad (7.28)$$

La medida de la discrepancia presenta el siguiente valor:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{MV} &= 0.8450 \\ \sigma_{MV} &= 0.0853 \end{aligned} \right\} \Rightarrow d_{calculada} = 1.8171$$

Tomando en consideración un nivel de significación $\alpha = 0.001$, y considerando $d \in N [0, 1]$, se obtiene:

$$\text{Región de rechazo de hipótesis } H_0 \text{ es cierta: } d > 3.0902$$

Como resultado de esta iteración, y dado que $d_{\text{calculada}} < 3.0902$, no puede ser rechazada la hipótesis nula, lo cual exige una segunda etapa de iteración.

Iteración 2

Las hipótesis nula y alternativa en el segundo paso de iteración se muestran seguidamente:

$$\begin{aligned} H_0: & \mu = 2 \\ H_1: & \mu > 2 \end{aligned} \quad (7.29)$$

La medida de la discrepancia presenta el siguiente valor:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{MV} &= 0.8450 \\ \sigma_{MV} &= 0.0853 \end{aligned} \right\} \Rightarrow d_{\text{calculada}} = 13.5325$$

Tomando en consideración un nivel de significación $\alpha = 0.001$, y considerando $d \in N [0, 1]$, se obtiene:

$$\text{Región de rechazo de hipótesis } H_0 \text{ es cierta: } d > 3.0902$$

Como resultado de esta iteración, y dado que $d_{\text{calculada}} > 3.0902$, puede ser rechazada la hipótesis nula. Por ello, se alcanza la etapa final del proceso iterativo.

El resultado obtenido en la segunda iteración permite afirmar que un número de 2 accidentes por tramo es significativamente distinto del estimador de la media de la distribución. Por ello, los estados de la variable respuesta binaria *tramo de concentración de accidentes* quedan definidos como sigue:

$$\begin{aligned} \text{Estado } \langle 0 \rangle : & \frac{N^{\circ} \text{ accidentes}}{\text{tramo}} < 2 \\ \text{Estado } \langle 1 \rangle : & \frac{N^{\circ} \text{ accidentes}}{\text{tramo}} \geq 2 \end{aligned} \quad (7.30.)$$

7.3.1.4.- Tramos de concentración de accidentes.

Seguidamente, a partir de los valores de la variable respuesta discreta “frecuencia de accidentes en tramos de curva de autovía”, se obtiene el valor de la variable respuesta binaria *tramo de concentración de accidentes*, según ha sido definida en el apartado precedente. Los valores de dicha variable en los tramos analizados se muestra en la siguiente figura (Figura 7.15.), y en el Anexo VIII (Tabla VIII.2.). Finalmente (Figura 7.16.) se presenta la proporción de tramos de curva según la autovía con cada uno de los estados de la citada variable binaria.

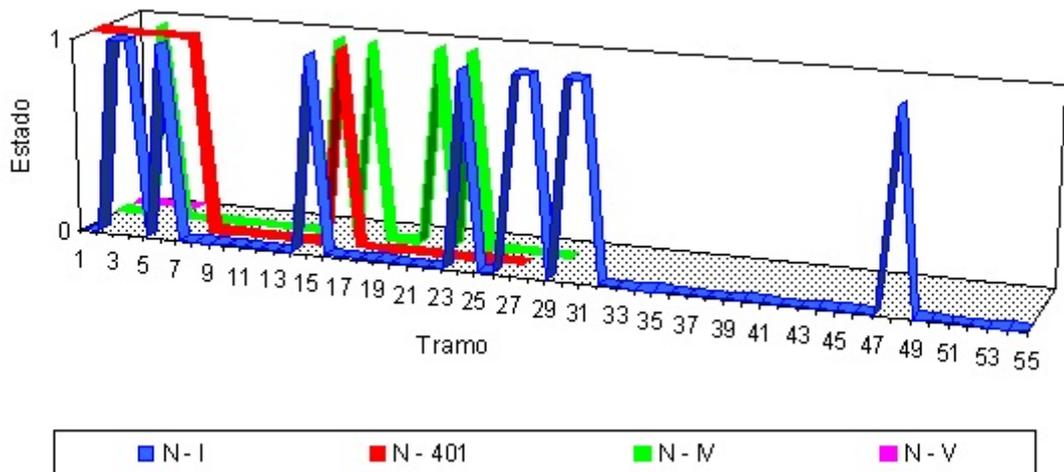


Figura 7.15.- Estado de la variable respuesta binaria “tramo de concentración de accidentes” en tramos de curva de las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V).

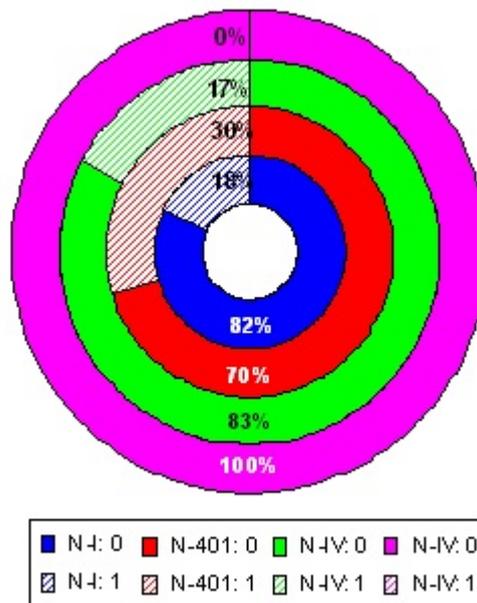


Figura 7.16.- Proporción de tramos por autovía con cada uno de los estados de la variable respuesta binaria “tramo de concentración de accidentes”.

7.3.2.- LAS VARIABLES EXPLICATIVAS.

Según ha sido definido en el *Apartado 4.3.*, el análisis accidentológico desarrollado en el presente trabajo se basa en el estudio de los factores permanentes del medio desencadenantes del accidente en tramos de curva de autovías. *El tramo de curva de autovía* ha sido definido como sigue:

“Tramo de curva.- Sección de la calzada cuyo radio del trazado en planta es inferior a 1000 metros ($R < 1000$ m). Dicha sección es ampliada en 100 metros de longitud en su zona posterior (zona de influencia de la misma).”

Posteriormente, basadas en dichos factores, serán evaluadas las variables explicativas consideradas durante el proceso de modelización.

7.3.2.1.- Factores permanentes del medio.

A continuación son mostrados los valores de los factores permanentes del medio en los itinerarios de la muestra analizada, obtenidos a partir de las medidas realizadas mediante el vehículo instrumentado CANE.

7.3.2.1.1.- Longitud de tramos (recta y curva).

Adoptando el criterio precedente, seguidamente (*Figuras 7.17. y 7.18.*) se representan los valores y la distribución de longitudes de los tramos de curva en los itinerarios analizados. Asimismo, estos valores son recogidos en el *Anexo VIII (Tabla VIII.3.)*.

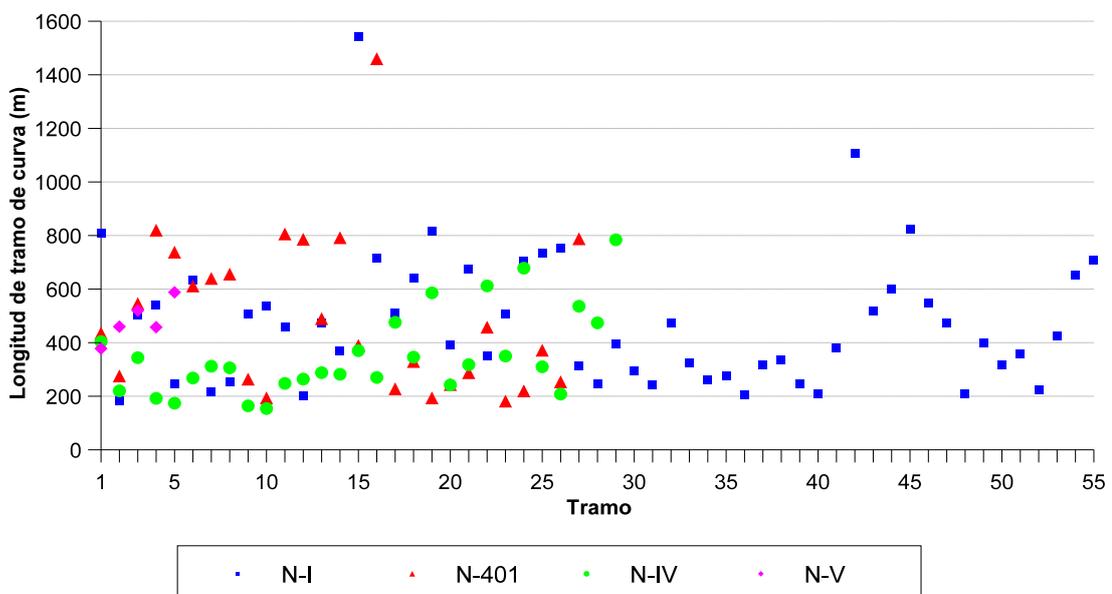


Figura 7.17.- Valores de longitudes de los tramos de curva en los itinerarios analizados.

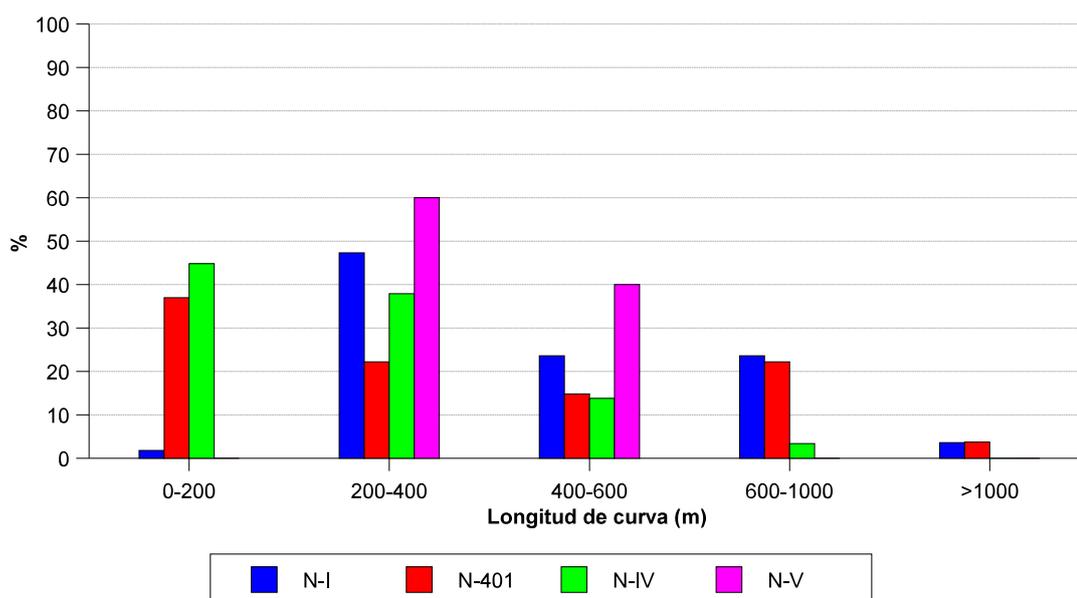


Figura 7.18.- Distribución de longitudes de los tramos de curva en los itinerarios analizados.

Las figuras precedentes muestran los siguientes resultados relacionados con la longitud de los tramos de curva:

- ▶ Excepto tres tramos, la longitud está comprendida entre 150 y 850 metros.
- ▶ La medida de centralización de esta longitud, expresada en función de la media, se presenta en la tabla siguiente (Tabla 7.7.):

| Denominación de vía | Media (m) |
|---------------------|-----------|
| N-I | 476 |
| N-401 | 499 |
| N-IV | 351 |
| N-V | 481 |
| Muestra total | 450 |

Tabla 7.7.- Medida de centralización de la longitud de los tramos de curva en la muestra analizada.

El rango de variación de los valores de las longitudes de los tramos de curva es elevado, lo cual es adecuado a los objetivos del presente trabajo.

► Considerando los intervalos de longitud de tramos de curva presentados en la *Figura 7.18.*, la *moda* (valor más frecuente) de los itinerarios de las autovías N-401 y N-IV es el intervalo [0, 200], mientras en las autovías N-I y N-V es [200, 400].

Este análisis es desarrollado de igual manera para la longitud de los tramos de recta. Así, los valores y la distribución de longitudes de los mismos es representado en las siguientes figuras (*Figuras 7.19.* y *7.20.*). Asimismo, estos valores son recogidos en el *Anexo VIII (Tabla VIII.4.)*.

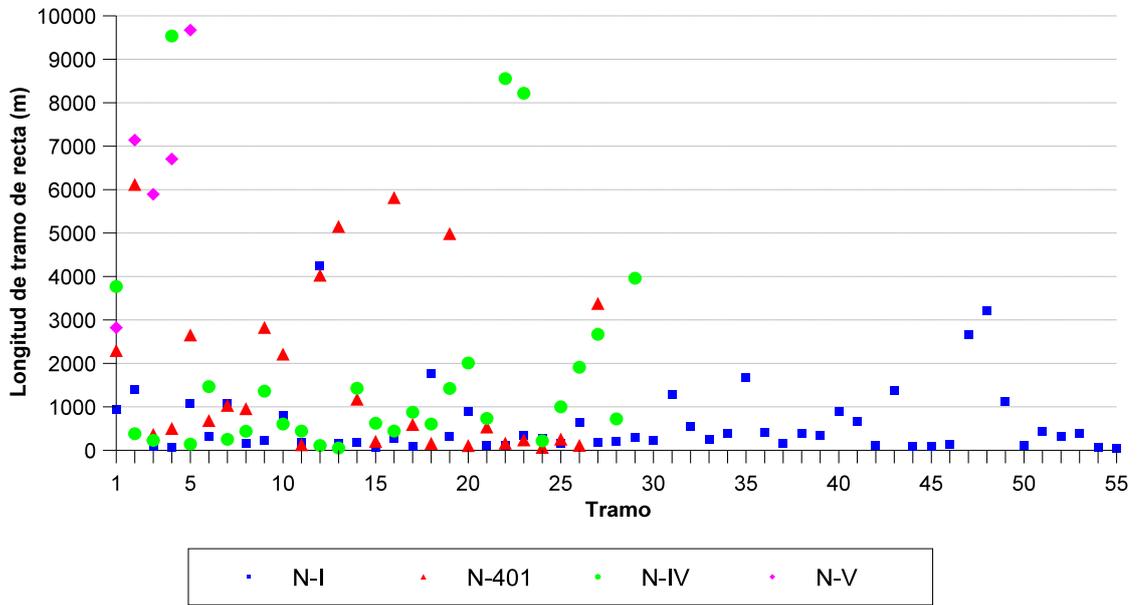


Figura 7.19.- Valores de longitudes de los tramos de recta en los itinerarios analizados.

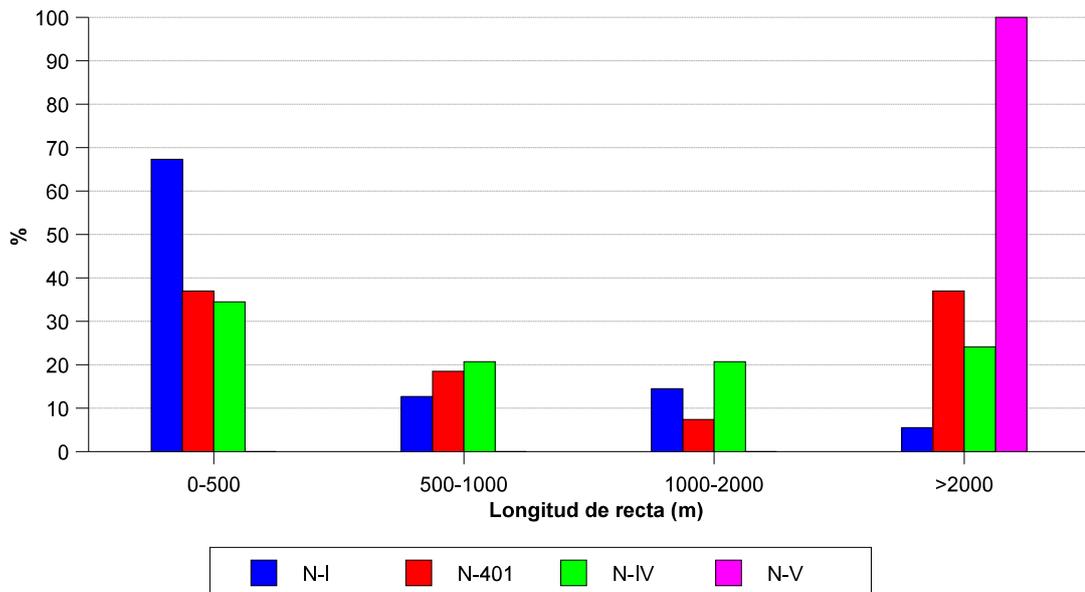


Figura 7.20.- Distribución de longitudes de los tramos de recta en los itinerarios analizados.

Las figuras precedentes muestran los siguientes resultados relacionados con la longitud de los tramos de recta:

- ▶ Existe una elevada variabilidad, de manera que la longitud está comprendida entre 50 y 10000 metros.
- ▶ La medida de centralización de esta longitud, expresada en función de la media, se presenta en la tabla siguiente (*Tabla 7.8.*):

| <i>Denominación de vía</i> | <i>Media (m)</i> |
|----------------------------|------------------|
| N-I | 620 |
| N-401 | 1734 |
| N-IV | 1868 |
| N-V | 6447 |
| Muestra total | 1443 |

Tabla 7.8.- Medida de centralización de la longitud de los tramos de recta en la muestra analizada.

El rango de variación de los valores de las longitudes de los tramos de recta es elevado, lo cual es adecuado a los objetivos del presente trabajo. Junto a esto, se observan notables diferencias entre los distintos itinerarios de autovía, dado que esta longitud de tramo de recta es un factor indicativo de la sinuosidad del trazado.

- ▶ Considerando los intervalos de longitud de tramos de recta presentados en la *Figura 7.20.*, la *moda* de los itinerarios de las autovías N-I y N-IV es el intervalo [0, 500], mientras en la autovía N-V es [>2000]. En la autovía N-401, la moda es compartida entre los dos intervalos extremos.

Los resultados precedentes permiten concluir que existe una elevada variabilidad en la distribución de longitudes de tramos de recta y de curva, debido fundamentalmente a que dichas distribuciones están condicionadas por la orografía del terreno. La combinación de rectas y curvas (junto con el trazado en alzado, el cual será descrito posteriormente) a lo largo del itinerario son factores determinantes de la velocidad de circulación por el mismo.

7.3.2.1.2.- Radio mínimo de tramos de curva.

El radio constituye una de las características esenciales de una alineación curva. Así, una curva consta, como ha sido descrito en el *Apartado 4.3.2.2.*, de una curva central circular y de dos curvas de acuerdo (clotoides) que permiten la transición gradual de la trayectoria rectilínea a la curvilínea de radio constante. El radio de la curva circular (radio mínimo de la curva) es un factor destacable en el riesgo de ocurrencia de los accidentes, en especial en combinación con los radios mínimos de las curvas precedentes.

Así, seguidamente (*Figuras 7.21. y 7.22.*) se representan los valores y la distribución de los radios mínimos de los tramos de curva en los itinerarios analizados. Asimismo, estos valores son recogidos en el *Anexo VIII (Tabla VIII.5.)*.

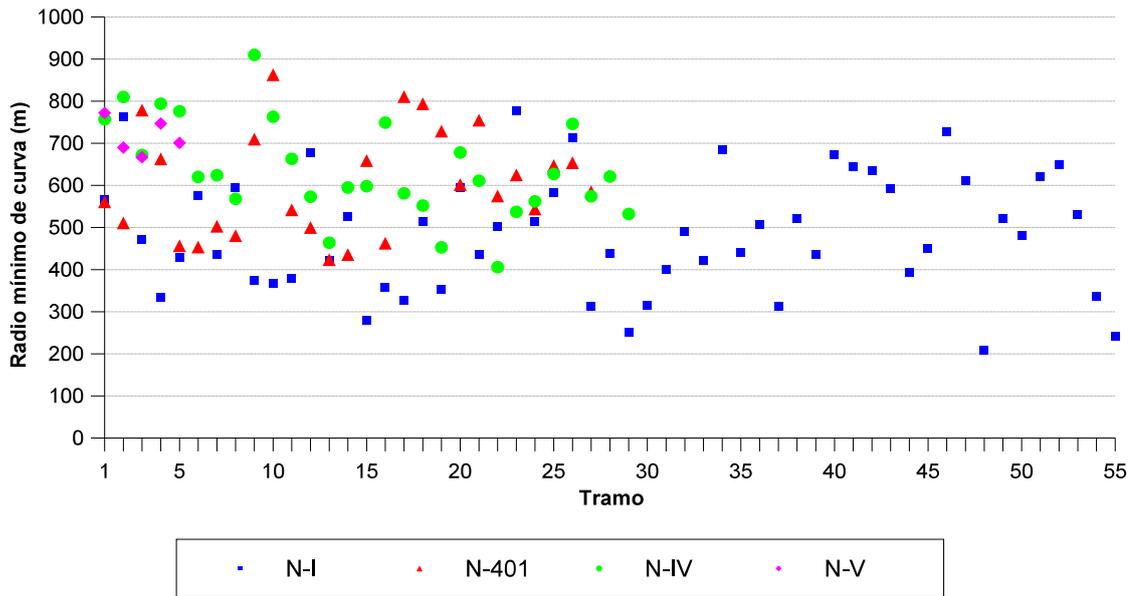


Figura 7.21.- Valores del radio mínimo del tramo de curva en los itinerarios analizados.

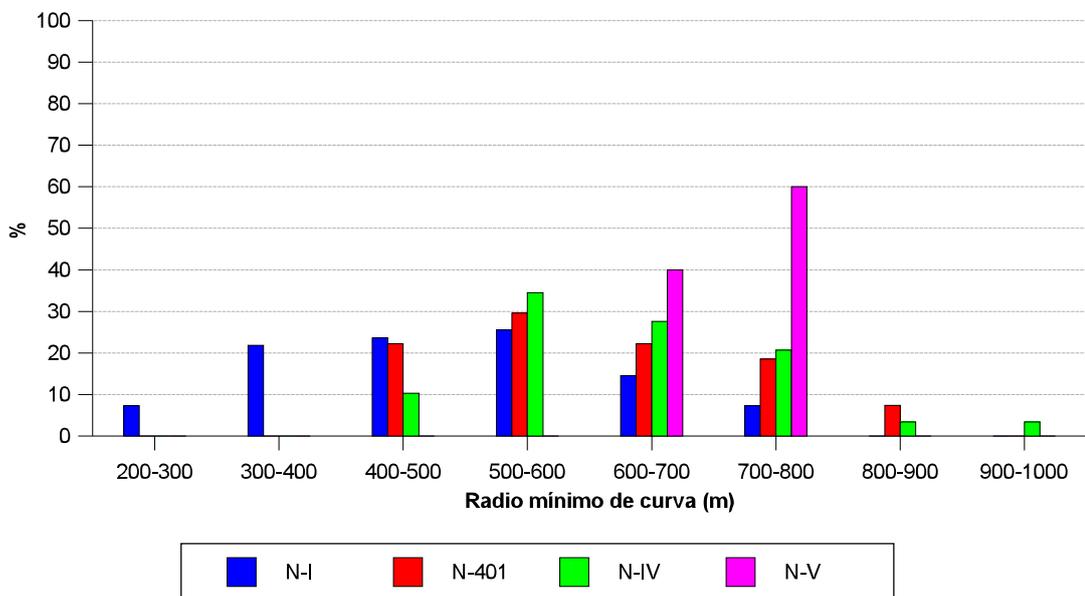


Figura 7.22.- Distribución del radio mínimo del tramo de curva en los itinerarios analizados.

La evolución del radio en los tramos de curva es representado en las figuras recogidas en el *Anexo X*.

Junto a estos valores, se presenta a continuación (*Figura 7.23.*) la distribución de los tramos de curva según el sentido de giro.

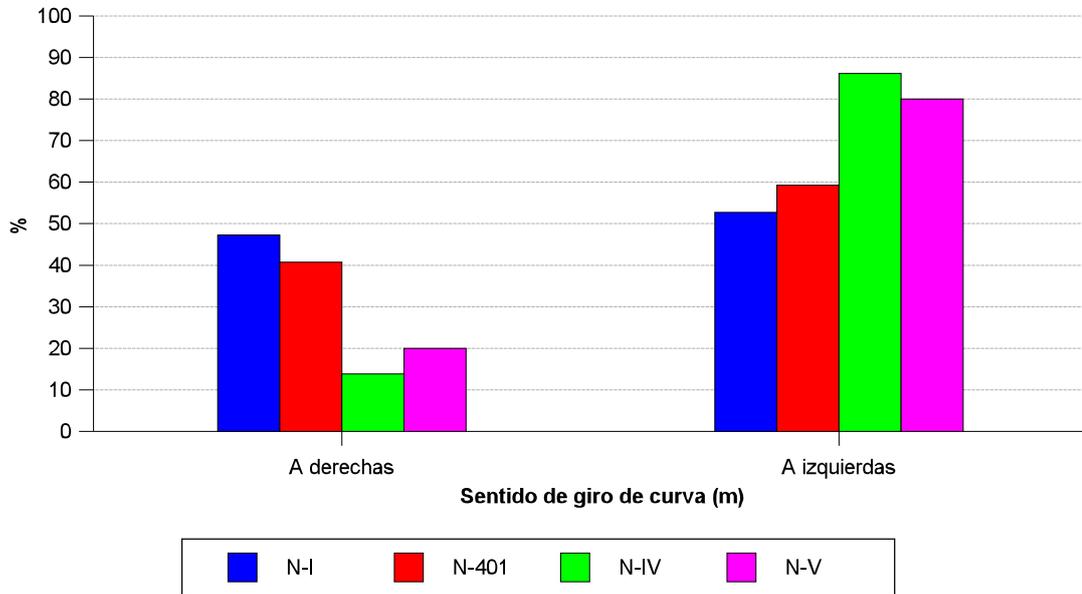


Figura 7.23.- Distribución de los tramos de curva según el sentido de giro, en los itinerarios analizados.

Las figuras precedentes muestran los siguientes resultados relacionados con el radio mínimo de los tramos de curva:

- ▶ Existe una elevada variabilidad, de manera que los radios mínimos están comprendidos entre 210 y 1000 metros. Así, y según se define en la *Instrucción de carreteras 3.1 - IC: Trazado de carreteras [30]*, este intervalo de valores se corresponde con velocidades específicas de circulación en curva entre 80 y 120 km/h, respectivamente.
- ▶ Las medidas de centralización y dispersión de este radio, expresadas en función de la media y de la desviación típica respectivamente, se presentan en la tabla siguiente (*Tabla 7.9.*).

La variabilidad es elevada respecto a la media, lo cual es adecuado a los objetivos del presente trabajo. Junto a esto, se observan diferencias entre los distintos itinerarios de autovía, lo cual condiciona la velocidad de circulación por cada uno de dichos itinerarios.

| <i>Denominación de vía</i> | <i>Media (m)</i> | <i>Desviación típica (m)</i> |
|----------------------------|------------------|------------------------------|
| N-I | 486 | 140 |
| N-401 | 605 | 127 |
| N-IV | 635 | 116 |
| N-V | 715 | 43 |
| Muestra total | 561 | 148 |

Tabla 7.9.- *Medidas de centralización y dispersión del radio mínimo de los tramos de curva en la muestra analizada.*

- ▶ Considerando los intervalos del valor del radio mínimo del tramo de curva presentados en la *Figura 7.22.*, la *moda* de los itinerarios de las autovías N-I, N-401 y N-IV es el intervalo [500, 600], mientras en la autovía N-V es [700, 800]. Junto a esto, cabe resaltar que los tramos con valores del radio mínimo inferiores a 400 metros pertenecen en su totalidad a la autovía N-I, mientras esta misma autovía no dispone de tramos con radios mínimos superiores a 800 metros.
- ▶ Todos los itinerarios considerados presentan mayor proporción de tramos de curva con sentido de giro a izquierdas, especialmente las autovías N-IV y N-V.

Los resultados precedentes permiten concluir que existe variabilidad en la distribución de radios mínimos de tramos de curva en los itinerarios analizados, debido fundamentalmente a que dichas distribuciones están condicionadas por la orografía del terreno. Dicha distribución influye sobre la velocidad de circulación por el itinerario.

7.3.2.1.3.- *Trazado conjunto en planta y alzado.*

El perfil de rampas/pendientes y el peralte constituyen parámetros de gran importancia en el diseño de la calzada. De este modo, la pendiente influye en la seguridad durante la circulación (incremento de velocidad en descensos prolongados, visibilidad,...), mientras la rampa condiciona fundamentalmente las condiciones de explotación (velocidad media de circulación de vehículos de transporte de mercancías y pasajeros). Asimismo, el peralte determina el límite de seguridad durante la circulación en curva, en combinación con el radio del trazado en planta.

Seguidamente, son mostrados los valores de rampa y peralte medidos en los itinerarios considerados.

A) PERALTE MÁXIMO EN TRAMOS DE CURVA.

Seguidamente (*Figuras 7.24. y 7.25.*) se representan los valores y la distribución de los peraltes máximos de los tramos de curva en los itinerarios analizados. Asimismo, estos valores son recogidos en el *Anexo VIII (Tabla VIII.6.)*.

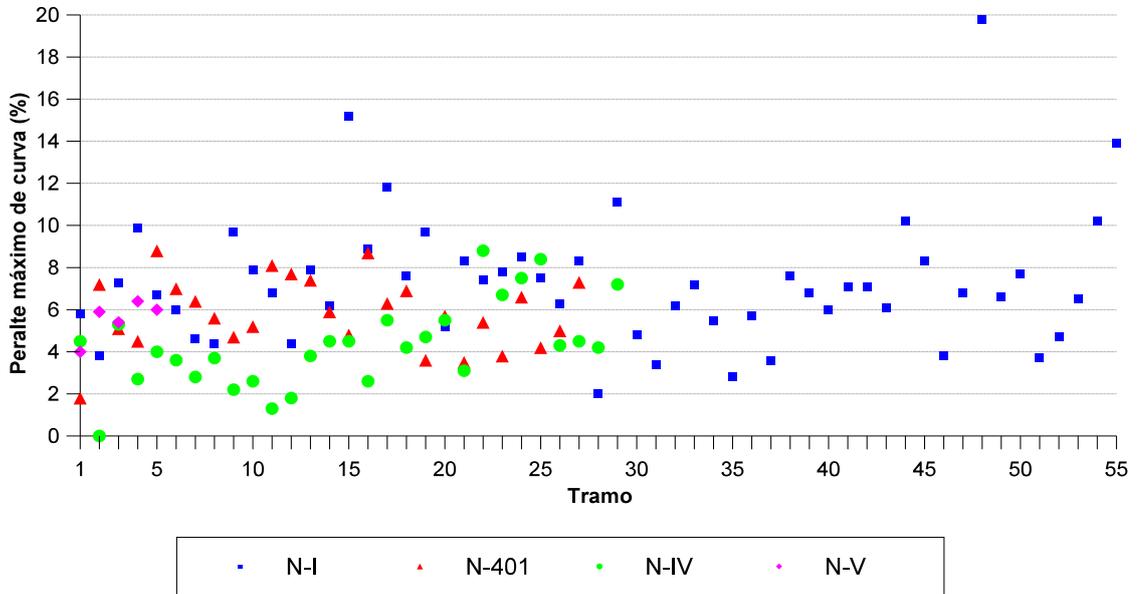


Figura 7.24.- Valores del peralte máximo del tramo de curva en los itinerarios analizados.

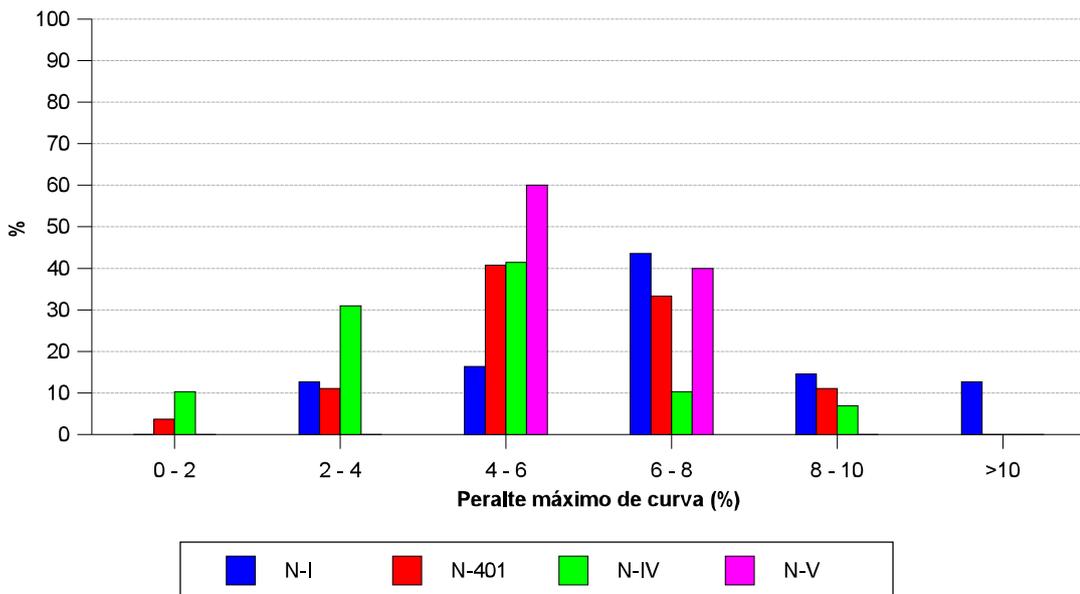


Figura 7.25.- Distribución del peralte máximo del tramo de curva en los itinerarios analizados.

Las figuras precedentes muestran los siguientes resultados relacionados con el peralte máximo de los tramos de curva:

- ▶ Existe una elevada variabilidad, de manera que los peraltes máximos están comprendidos entre 0 y 20 %.
- ▶ Las medidas de centralización y dispersión de este peralte, expresadas en función de la media y de la desviación típica respectivamente, se presentan en la tabla siguiente (Tabla 7.10.).

| <i>Denominación de vía</i> | <i>Media (%)</i> | <i>Desviación típica (%)</i> |
|----------------------------|------------------|------------------------------|
| N-I | 7 | 3 |
| N-401 | 6 | 2 |
| N-IV | 4 | 2 |
| N-V | 6 | 1 |
| Muestra total | 6 | 3 |

Tabla 7.10.- *Medidas de centralización y dispersión del peralte máximo de los tramos de curva en la muestra analizada.*

La variabilidad es elevada respecto a la media, lo cual es adecuado a los objetivos del presente trabajo.

- ▶ Considerando los intervalos del valor del peralte máximo del tramo de curva presentados en la *Figura 7.25.*, la *moda* de los itinerarios de las autovías N-401, N-IV y N-V es el intervalo [4, 6], mientras en la autovía N-I es [6, 8]. Este hecho está relacionado con los resultados obtenidos respecto al factor del medio “radio mínimo del tramo de curva”, donde los tramos con valores de dicho radio inferiores a 400 metros pertenecen en su totalidad a la autovía N-I.

Así, y como fue mostrado en el *Apartado 4.3.2.1.*, la velocidad máxima en curva depende del radio y del peralte del trazado. Por ello, y con objeto de mantener dicha velocidad lo más uniforme posible en un itinerario, los tramos de curva con radios menores requieren valores más elevados del peralte. Dicha relación es analizada en la siguiente figura (*Figura 7.26.*), donde se relaciona el radio mínimo con el peralte máximo en los tramos de curva de los itinerarios de la muestra analizada en el presente trabajo.

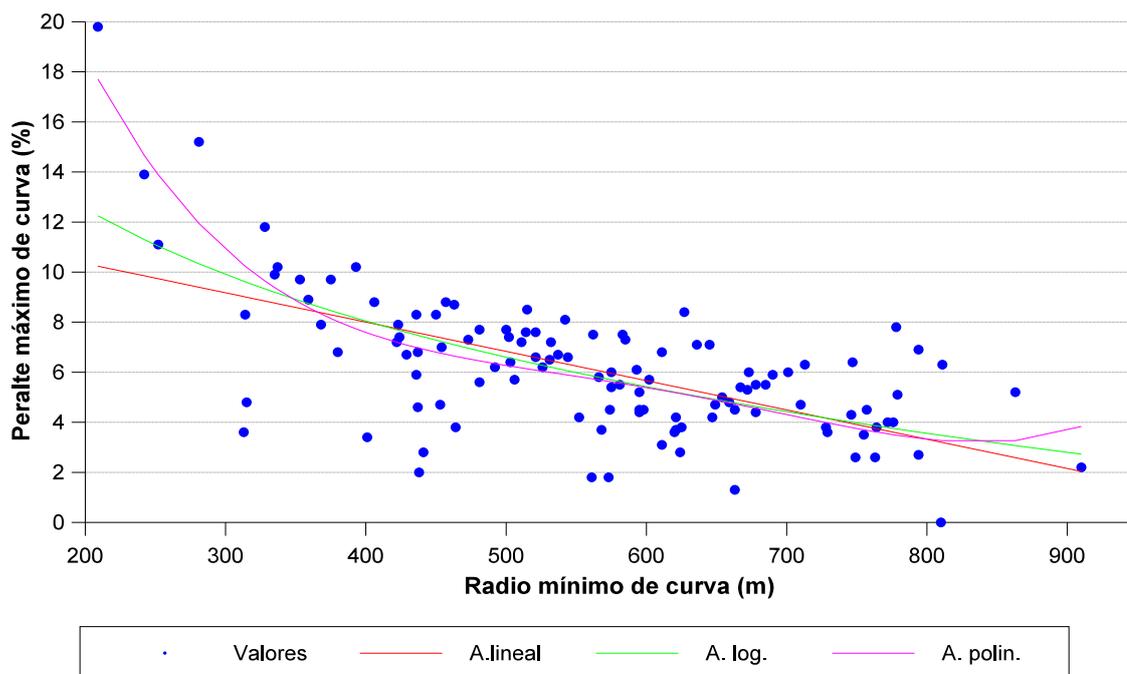


Figura 7.26.- Relación entre el radio mínimo y el peralte máximo del tramo de curva en los itinerarios analizados.

La figura precedente representa la relación existente entre ambos factores. Así, y a pesar de la elevada dispersión, existe dependencia entre las mismas. La cuantificación de dicha dependencia ha sido llevada a cabo mediante tres funciones de ajuste -función lineal, función logarítmica y función polinómica (4^o orden)-, cuyas expresiones matemáticas son presentadas a continuación. En estas expresiones, p representa el peralte máximo en curva (%) y R el radio mínimo (m).

• *Función lineal:*

$$p = -11,7 \cdot 10^{-3} \cdot R + 12,7 \quad (7.31)$$

• *Función logarítmica:*

$$p = -6,5 \cdot \ln(R) + 46,8 \quad (7.32)$$

• *Función polinómica:*

$$p = 4 \cdot 10^{-10} \cdot R^4 - 9 \cdot 10^{-7} \cdot R^3 + 9 \cdot 10^{-4} \cdot R^2 - 0,4 \cdot R + 62,1 \quad (7.33)$$

La evaluación de la dependencia entre los valores medidos y los estimados por cada una de las funciones de ajuste se basa en el *coeficiente de correlación* (r), el cual es definido como sigue:

$$r = \frac{\text{Cov}(x,y)}{s_x \cdot s_y} \quad (7.34.)$$

donde:

- Cov (x, y): covarianza entre las variables x e y .
- s_x, s_y : desviaciones típicas de las variables x e y .

Dicho coeficiente es adimensional, estando sus valores comprendidos entre -1 y 1 , de forma que la ausencia de relación viene dada por el valor 0 , y la relación exacta por los valores extremos del intervalo. Los valores de este coeficiente obtenidos para cada una de las funciones de ajuste utilizadas se muestran en la tabla siguiente (*Tabla 7.11.*).

| <i>Función de ajuste</i> | <i>Coficiente de correlación</i> |
|--------------------------|----------------------------------|
| Lineal | 0.62 |
| Logarítmica | 0.67 |
| Polinómica (4º orden) | 0.73 |

Tabla 7.11.- Coeficiente de correlación para el ajuste entre las variables radio mínimo y peralte máximo del tramo de curva.

El ajuste óptimo es conseguido mediante la función polinómica, la cual se adapta al cambio de pendiente que tiene lugar aproximadamente para radios inferiores a 400 metros.

► En todos los tramos de curva considerados, el peralte ha sido diseñado de manera que mejora las condiciones de circulación en curva, esto es, no aparece el fenómeno de “contraperalte” en ninguno de ellos.

B) PERFIL EN ALZADO (RAMPA/PENDIENTE).

Como ha sido descrito en los apartados precedentes, la pendiente influye en la seguridad durante la circulación (incremento de velocidad en descensos prolongados, visibilidad,...), mientras la rampa condiciona fundamentalmente las condiciones de explotación (velocidad media de circulación de vehículos de transporte de mercancías y pasajeros). Por ello, y a partir de las medidas en continuo efectuadas mediante el vehículo instrumentado, son evaluados los siguientes factores permanentes de influencia sobre el riesgo de ocurrencia de accidentes relacionados con el perfil en alzado:

- Rampa/pendiente promedio de tramo de recta precedente.
- Rampa/pendiente promedio de tramo de curva.
- Rampa/pendiente máxima de tramo de curva.

La evolución del perfil en alzado en los itinerarios medidos es representado en las figuras recogidas en el *Anexo X*. El criterio de signos considerado ha sido el siguiente:

- Rampa (ascendente): signo positivo.
- Pendiente (descendente): signo negativo.

Seguidamente (*Figuras 7.27. y 7.28.*) se representan los valores y la distribución de la rampa/pendiente promedio del tramo de recta precedente en los itinerarios analizados. Asimismo, estos valores son recogidos en el *Anexo VIII (Tabla VIII.7.)*.

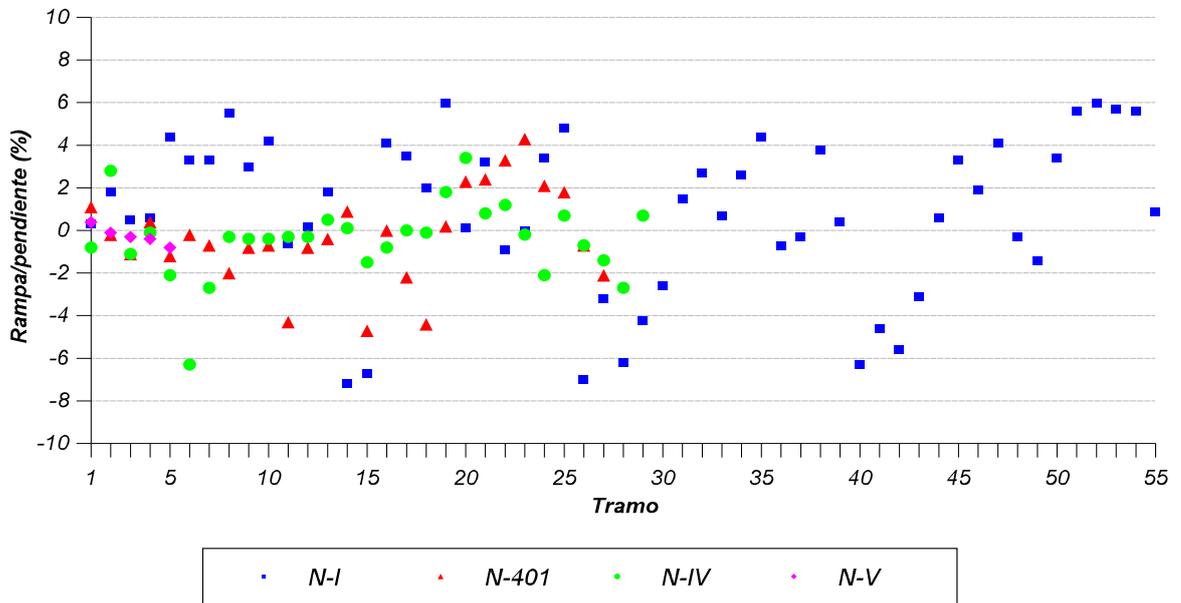


Figura 7.27.- Valores de rampa/pendiente promedio del tramo de recta precedente en los itinerarios analizados.

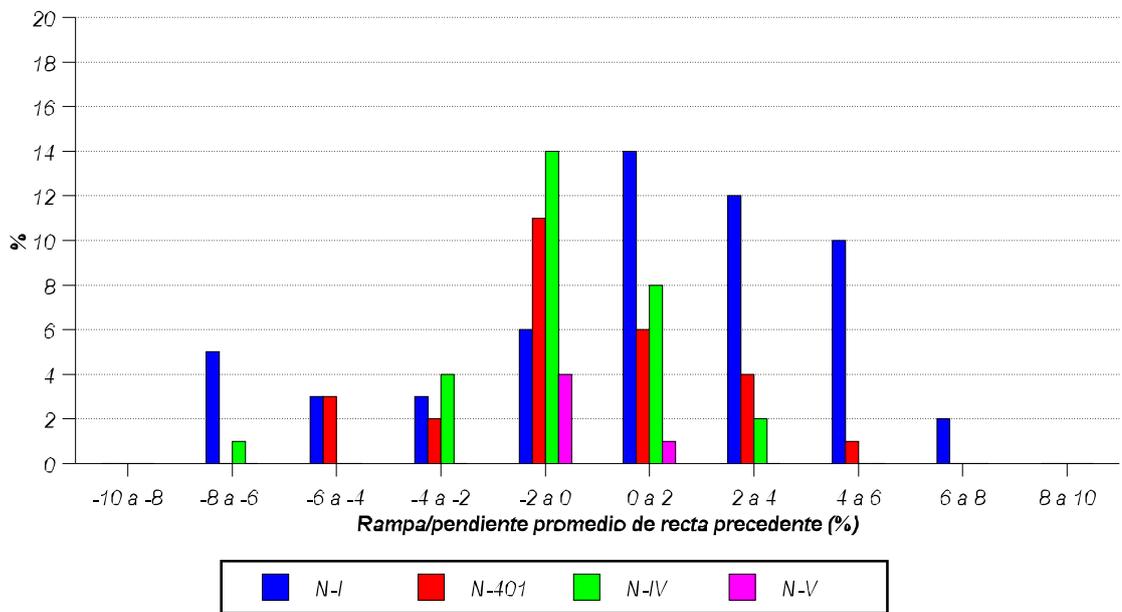


Figura 7.28.- Distribución de rampa/pendiente promedio del tramo de recta precedente en los itinerarios analizados.

Asimismo, a continuación (*Figuras 7.29. y 7.30.*) se representan los valores y la distribución de la rampa/pendiente promedio del tramo de curva en los itinerarios analizados. Estos valores son recogidos en el *Anexo VIII (Tabla VIII.8.)*.

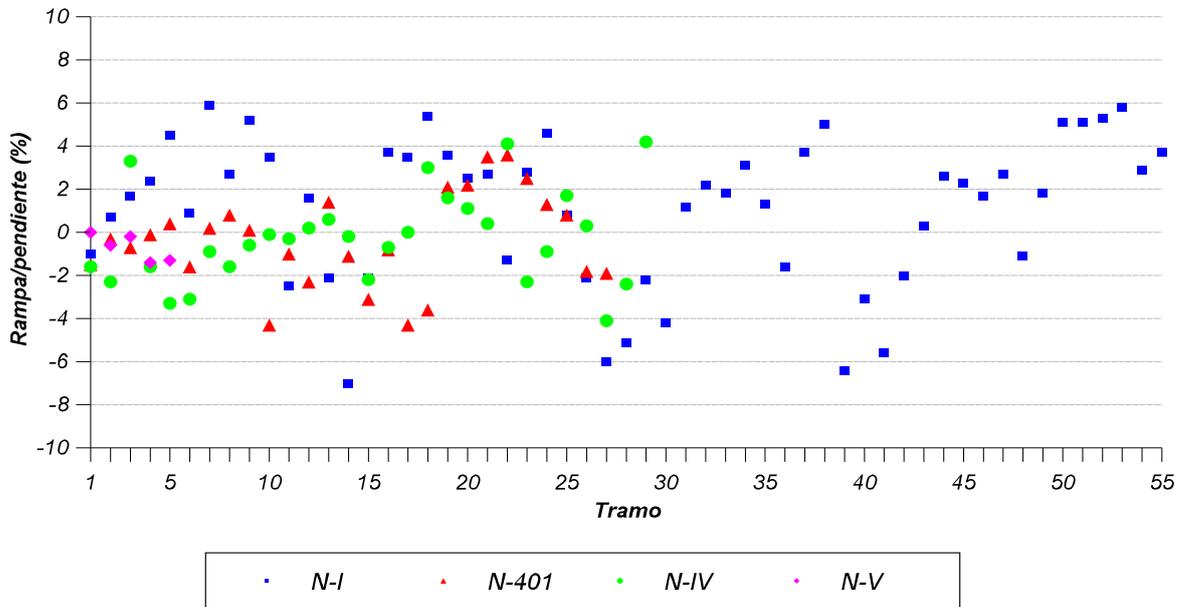


Figura 7.29.- Valores de rampa/pendiente promedio del tramo de curva en los itinerarios analizados.

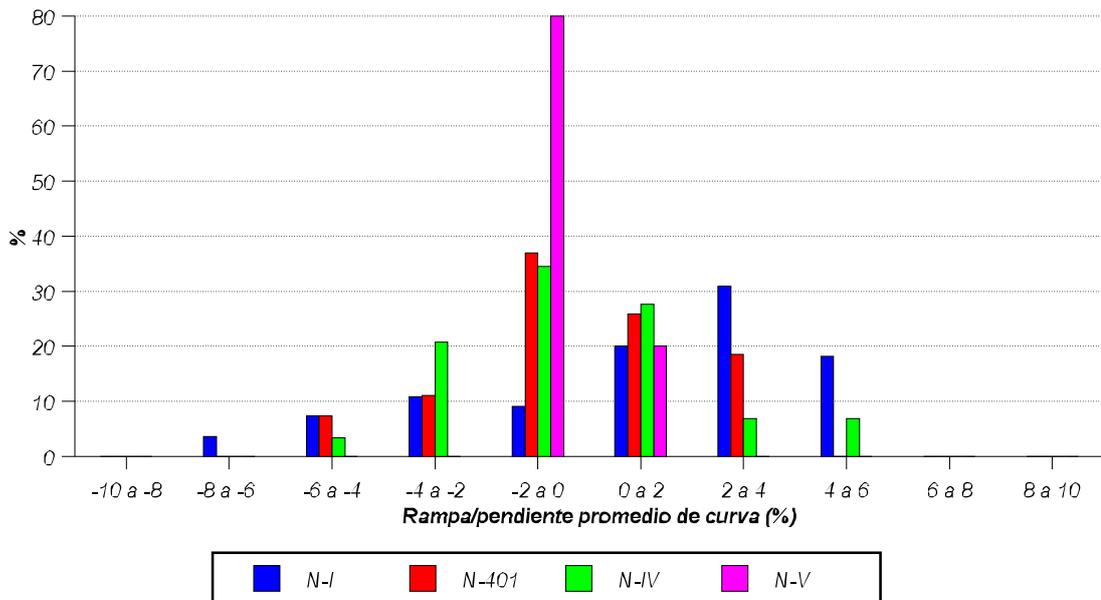


Figura 7.30.- Distribución de rampa/pendiente promedio del tramo de curva en los itinerarios analizados.

Finalmente, (Figuras 7.31. y 7.32.) se presentan los valores y la distribución de la rampa/pendiente máxima del tramo de curva en los itinerarios analizados. Estos valores son recogidos en el Anexo VIII (Tabla VIII.9.).

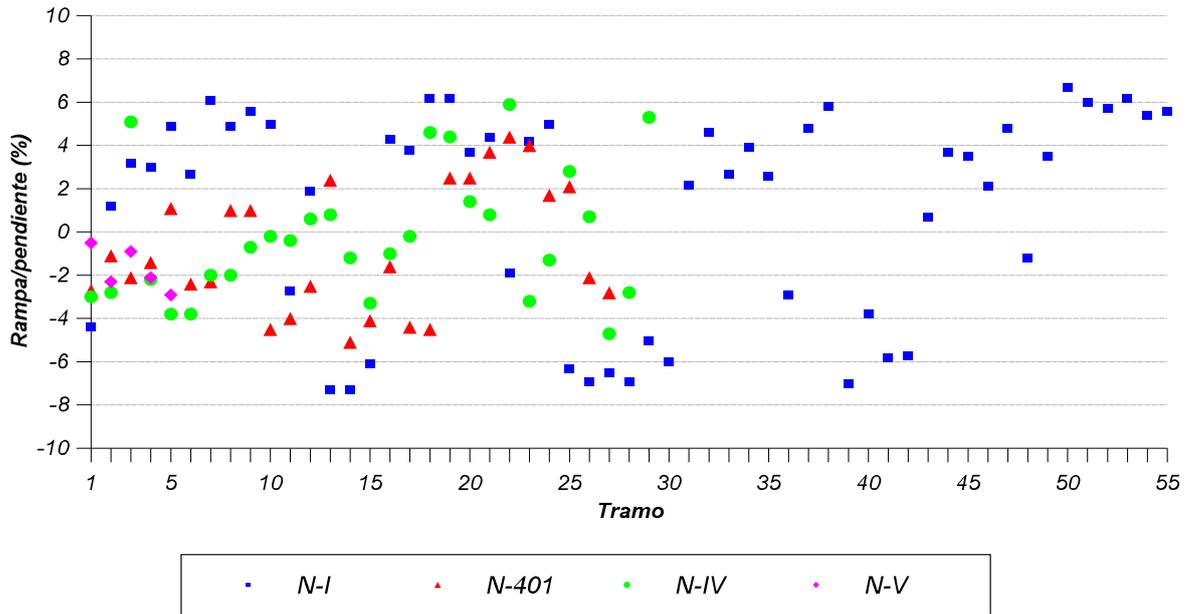


Figura 7.31.- Valores de rampa/pendiente máxima del tramo de curva en los itinerarios analizados.

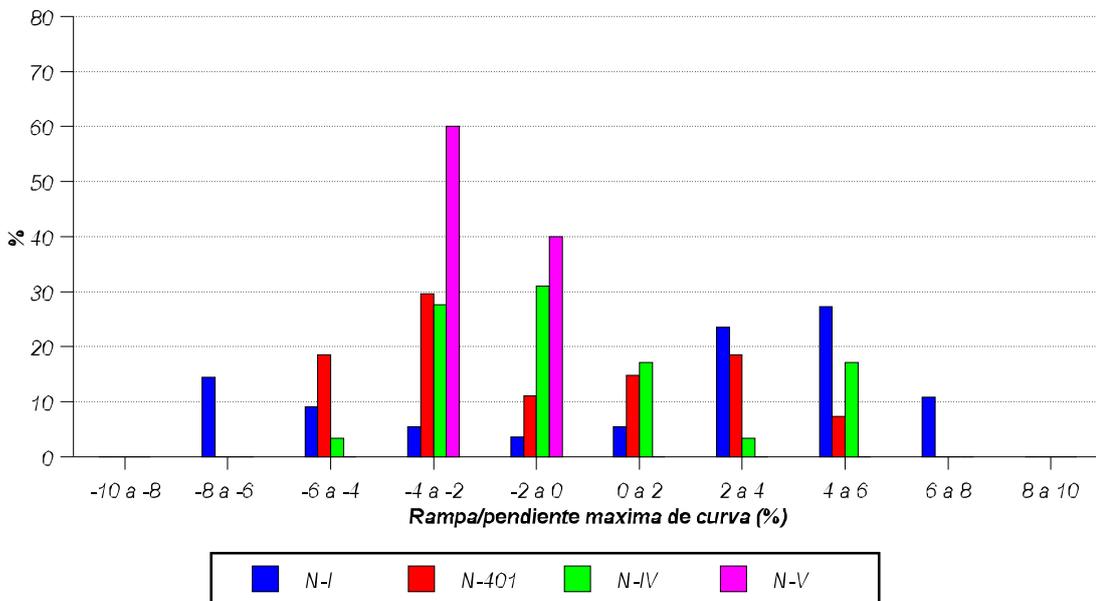


Figura 7.32.- Distribución de rampa/pendiente máxima del tramo de curva en los itinerarios analizados.

Las figuras precedentes muestran los siguientes resultados relacionados con la rampa/pendiente de los itinerarios considerados:

- ▶ Existe variabilidad en los resultados obtenidos, como se observa en los siguientes valores:
 - El valor medio de cada tramo de recta precedente varía entre -8 y 6 %.
 - El valor medio de cada tramo de curva varía entre -7 y 6 %.
 - El valor máximo de cada tramo de curva varía entre -8 y 7 %.
- ▶ Las medidas de centralización y dispersión de la rampa/pendiente, expresadas en función de la media y de la desviación típica respectivamente, se presentan en las tablas siguientes (Tablas 7.12., 7.13. y 7.14.).

| <i>Denominación de vía</i> | <i>Rampa (%)</i> | | <i>Pendiente (%)</i> | |
|----------------------------|------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| | <i>Media</i> | <i>Desv. típica</i> | <i>Media</i> | <i>Desv. típica</i> |
| N-I | 3.0 | 1.8 | -3.6 | 2.6 |
| N-401 | 1.9 | 1.3 | -1.7 | 1.5 |
| N-IV | 1.3 | 1.1 | -1.3 | 1.5 |
| N-V | 0.4 | - | -0.4 | 0.3 |
| Muestra total | 2.5 | 1.8 | -2.0 | 2.1 |

Tabla 7.12.- *Medidas de centralización y dispersión de la rampa/pendiente promedio de todos los tramos de rectas precedentes a las curvas en la muestra analizada.*

| <i>Denominación de vía</i> | <i>Rampa (%)</i> | | <i>Pendiente (%)</i> | |
|----------------------------|------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| | <i>Media</i> | <i>Desv. típica</i> | <i>Media</i> | <i>Desv. típica</i> |
| N-I | 3.1 | 1.6 | -3.3 | 2.0 |
| N-401 | 1.6 | 1.2 | -1.9 | 1.4 |
| N-IV | 1.9 | 1.5 | -1.7 | 1.2 |
| N-V | - | - | -0.9 | 0.6 |
| Muestra total | 2.6 | 1.6 | -2.2 | 1.7 |

Tabla 7.13.- *Medidas de centralización y dispersión de la rampa/pendiente promedio de todos los tramos de curvas en la muestra analizada.*

| Denominación de vía | Rampa (%) | | Pendiente (%) | |
|---------------------|-----------|--------------|---------------|--------------|
| | Media | Desv. típica | Media | Desv. típica |
| N-I | 4.2 | 1.5 | -5.2 | 1.9 |
| N-401 | 2.4 | 1.2 | -3.0 | 1.3 |
| N-IV | 2.9 | 2.1 | -2.1 | 1.4 |
| N-V | - | - | -1.7 | 1.0 |
| Muestra total | 3.7 | 1.8 | -3.3 | 2.0 |

Tabla 7.14.- Medidas de centralización y dispersión de la rampa/pendiente máximas de todos los tramos de curvas en la muestra analizada.

Las tablas precedentes muestran que el itinerario de la autovía N-I es el más accidentado, presentando las rampas y pendientes más pronunciadas.

► El análisis en detalle de estos resultados en cada una de las autovías permite concluir que:

- La *moda* de la rampa promedio del tramo de recta precedente en los itinerarios de todas las autovías es el intervalo [0, 2]. Asimismo, la *moda* de la pendiente en todos los itinerarios es el intervalo [-2, 0].
- La *moda* de la rampa promedio del tramo de curva en los itinerarios de las autovías N-401, N-IV y N-V es el intervalo [0, 2], mientras en la autovía N-I es el intervalo [2, 4]. Asimismo, la *moda* de la pendiente en los itinerarios de las autovías N-401, N-IV y N-V es el intervalo [-2, 0], mientras en la autovía N-I es el intervalo [-4, -2].
- La *moda* de la rampa máxima del tramo de curva en el itinerario de la autovía N-IV es el intervalo [0, 2], en la autovía N-401 es el intervalo [2, 4], y en la autovía N-I es el intervalo [4, 6]. Asimismo, la *moda* de la pendiente en el itinerario de la autovía N-IV es el intervalo [-2, 0], en los itinerarios de las autovías N-401 y N-V es el intervalo [-4, -2] y en la autovía N-I es el intervalo [-8, -6].

C) TRAZADO CONJUNTO EN PLANTA Y ALZADO.

Finalmente, y como ha sido mostrado en el *Apartado 4.4.1.1.3.*, las características del trazado combinado en planta y alzado ejercen influencia en la ocurrencia de accidentes, especialmente debido a las limitaciones en la distancia de visibilidad. De este modo, y según se define en la *Instrucción de carreteras 3.1-IC [30]*, la inclinación en alzado obliga a limitar el valor del peralte de forma que la línea de máxima pendiente no supere los valores mostrados en la *Figura 4.30.*

Seguidamente (*Figuras 7.33., 7.34 y 7.35.*) se representan los valores y la distribución de la inclinación de la línea de máxima pendiente del tramo de curva en los itinerarios analizados. Asimismo, estos valores son recogidos en el *Anexo VIII (Tabla VIII.10.)*.

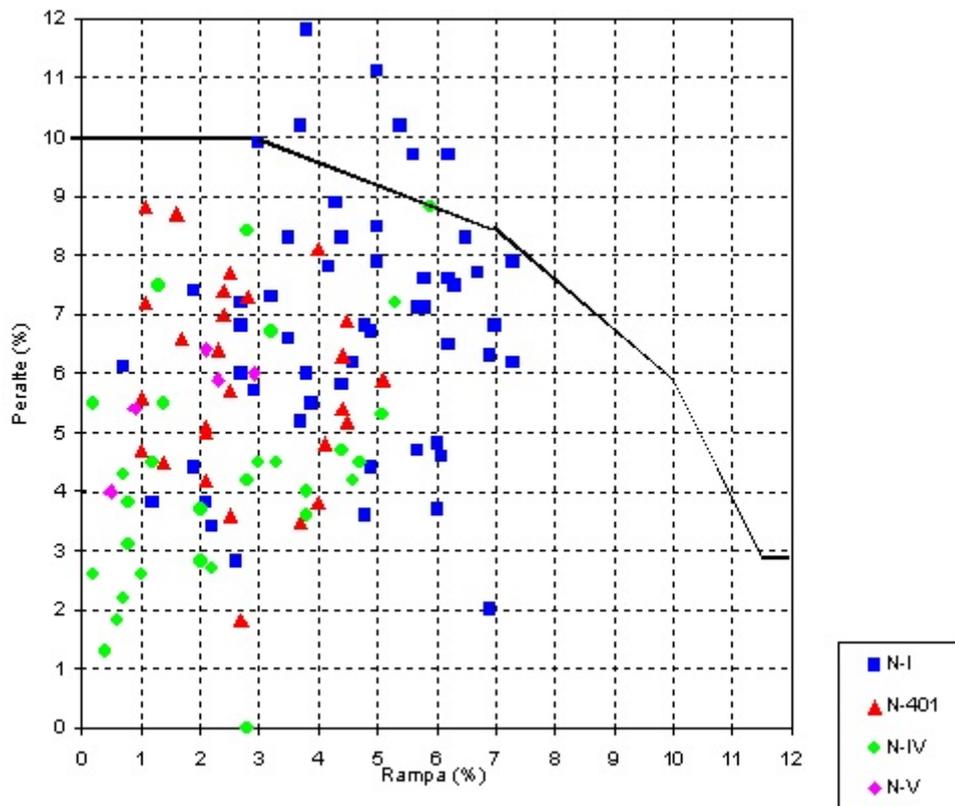


Figura 7.33.- Trazado conjunto en planta y alzado de los tramos de curva en los itinerarios analizados.

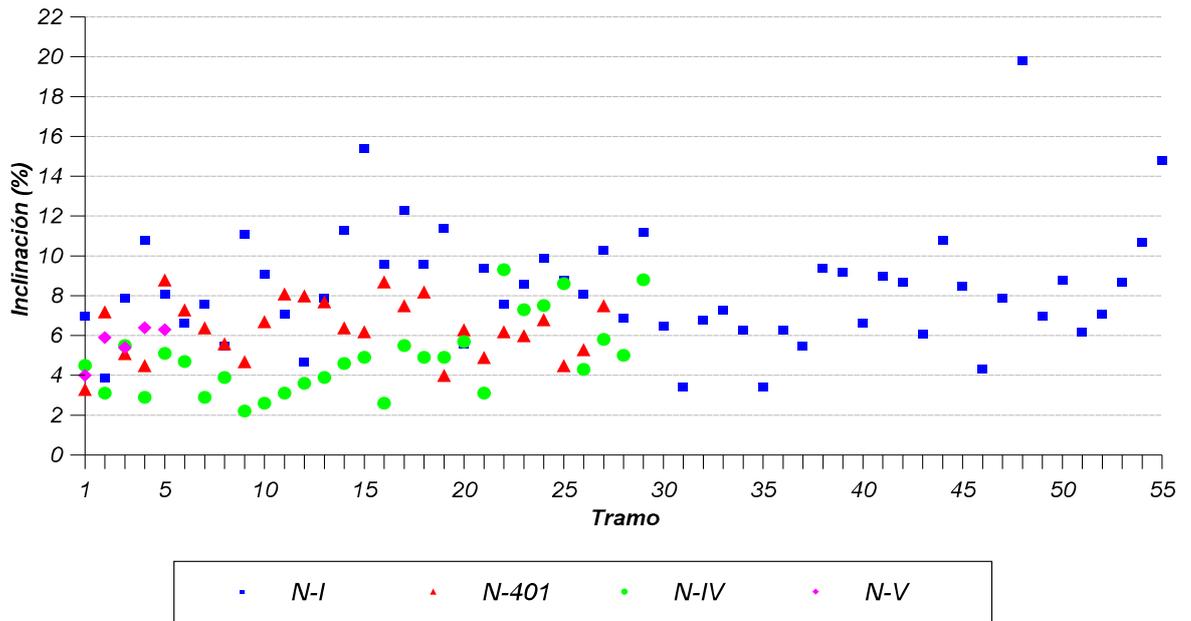


Figura 7.34.- Valores de inclinación de línea de máxima pendiente del tramo de curva en los itinerarios analizados.

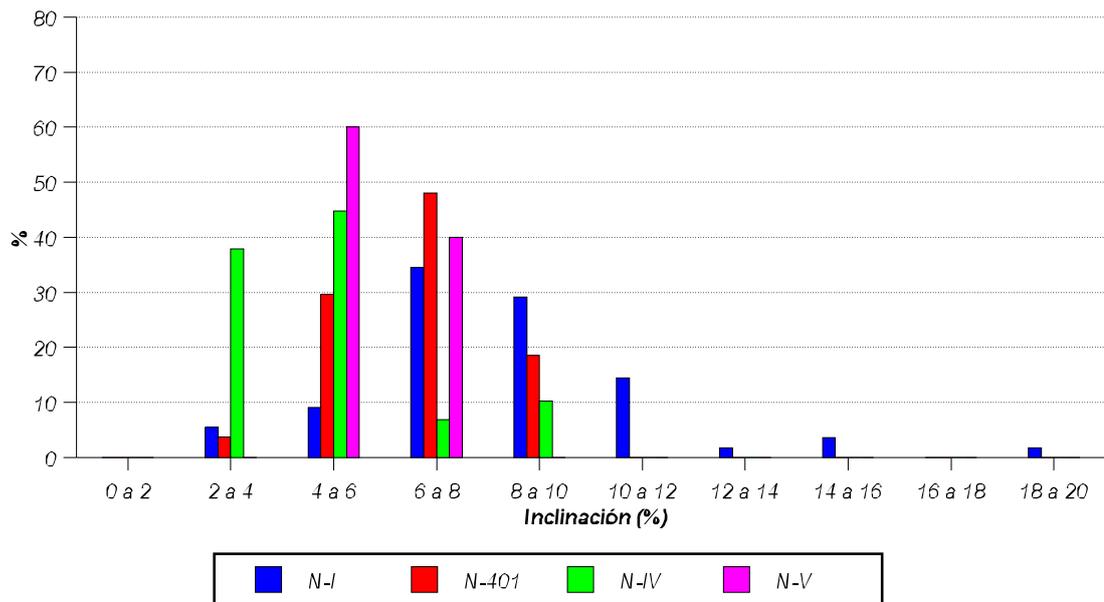


Figura 7.35.- Distribución de inclinación de línea de máxima pendiente del tramo de curva en los itinerarios analizados.

Las figuras precedentes muestran los siguientes resultados relacionados con la inclinación de la línea de máxima pendiente de los itinerarios considerados:

- ▶ Existe gran variabilidad en los resultados obtenidos, de modo que los valores de la inclinación de la línea de máxima pendiente varía entre 2 y 20 %.
- ▶ Las medidas de centralización y dispersión de dicha inclinación, expresadas en función de la media y de la desviación típica respectivamente, se presentan en la tabla siguiente (Tabla 7.15.).

| <i>Denominación de vía</i> | <i>Inclinación (%)</i> | |
|----------------------------|------------------------|---------------------|
| | <i>Media</i> | <i>Desv. típica</i> |
| N-I | 8,4 | 2,9 |
| N-401 | 6,4 | 1,5 |
| N-IV | 4,9 | 1,9 |
| N-V | 5,6 | 1,0 |
| Muestra total | 6,9 | 2,8 |

Tabla 7.15.- *Medidas de centralización y dispersión de la inclinación de la línea de máxima pendiente del tramo de curva en la muestra analizada.*

Las tablas precedentes muestran que el itinerario de la autovía N-I es el más accidentado, como ha quedado reflejado en los apartados anteriores.

- ▶ El análisis en detalle de estos resultados en cada una de las autovías permite concluir que la *moda* de la inclinación de la línea de máxima pendiente en los itinerarios de las autovías N-IV y N-V es el intervalo [4, 6]. Asimismo, la *moda* de dicha inclinación en los itinerarios de las autovías N-I y N-401 es el intervalo [6, 8].

7.3.2.2.- Variables explicativas.

7.3.2.2.1.- Variables asociadas a la geometría de la curva: velocidad máxima en curva (v_c).

A partir de la información del radio y peralte de la curva medidos, y según la definición contenida en el *Apartado 4.4.2.1.1.*, seguidamente (*Figuras 7.36. y 7.37.*) se representan los valores y la distribución de la velocidad máxima en curva en los itinerarios analizados. Asimismo, estos valores son recogidos en el *Anexo VIII (Tabla VIII.11.)*.

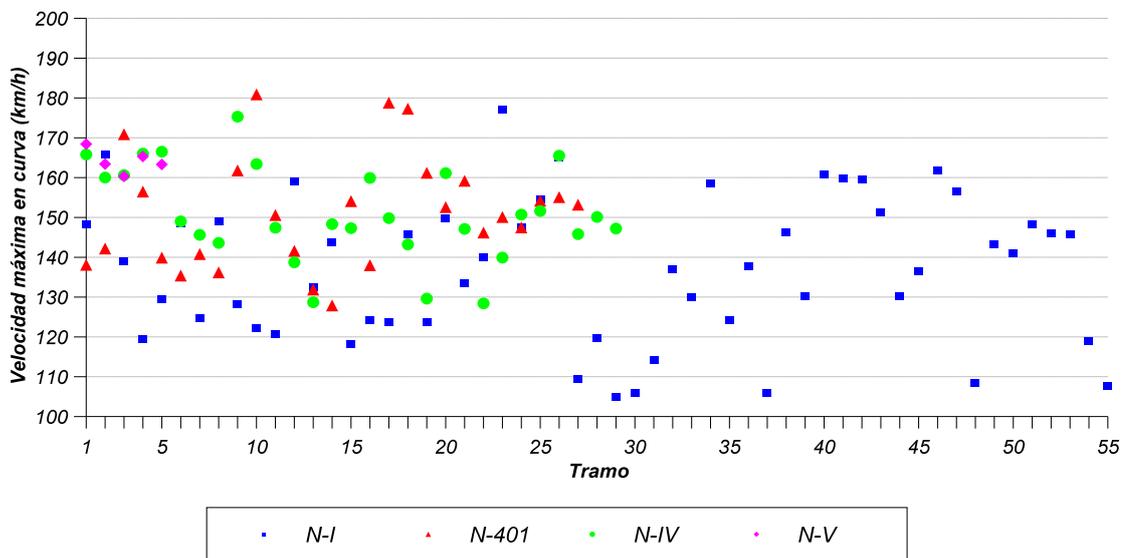


Figura 7.36.- Valores de velocidad máxima en curva de los tramos de curva en los itinerarios analizados.

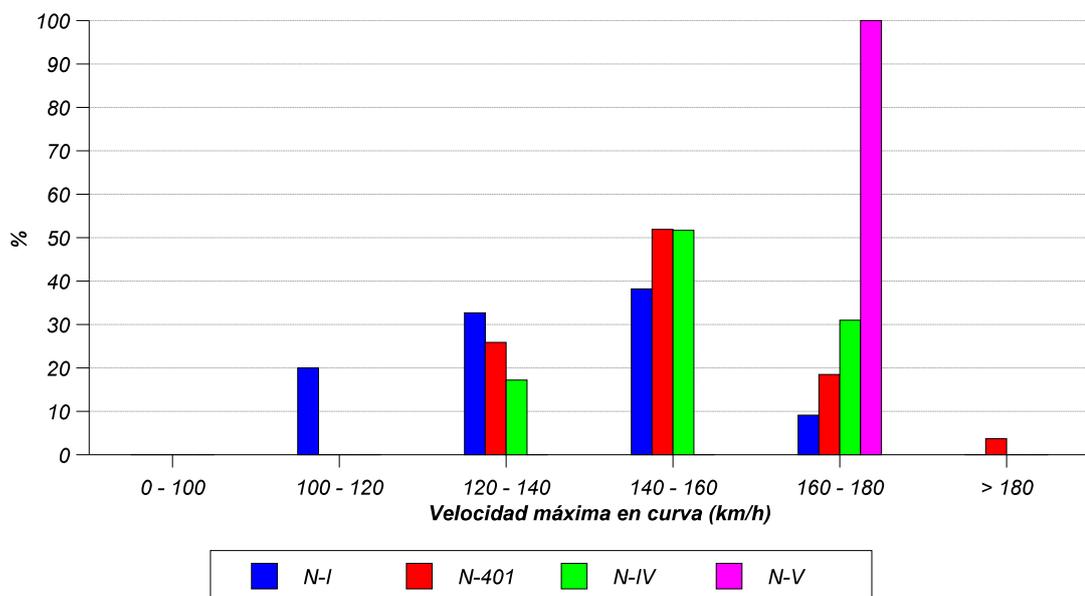


Figura 7.37.- Distribución de velocidad máxima en curva de los tramos de curva en los itinerarios analizados.

Las figuras precedentes muestran los siguientes resultados relacionados con la velocidad máxima en curva de los tramos de curva de los itinerarios considerados:

- ▶ Existe gran variabilidad en los resultados obtenidos, de modo que los valores de la velocidad máxima en curva varían entre 100 y 190 km/h.
- ▶ Las medidas de centralización y dispersión de dicha velocidad, expresadas en función de la media y de la desviación típica respectivamente, se presentan en la tabla siguiente (Tabla 7.16.).

| <i>Denominación de vía</i> | <i>Velocidad máxima en curva (km/h)</i> | |
|----------------------------|---|---------------------|
| | <i>Media</i> | <i>Desv. típica</i> |
| N-I | 137 | 18 |
| N-401 | 151 | 14 |
| N-IV | 151 | 12 |
| N-V | 164 | 3 |
| Muestra total | 145 | 17 |

Tabla 7.16.- *Medidas de centralización y dispersión de la velocidad máxima en curva del tramo de curva en la muestra analizada.*

La tabla precedente muestra que el itinerario de la autovía N-I presenta los tramos de curva con velocidades máximas en curva menores, frente a la autovía N-V, con los valores superiores. Estos resultados confirman las conclusiones recogidas en los apartados anteriores, donde queda reflejado que aquella posee el trazado más accidentado de los itinerarios considerados.

- ▶ El análisis en detalle de estos resultados en cada una de las autovías permite concluir que la *moda* de la velocidad máxima en curva en los itinerarios de las autovías N-I, N-401 y N-IV es el intervalo [140, 160]. Asimismo, la *moda* de dicha velocidad en el itinerario de la autovía N-V es el intervalo [160, 180].

7.3.2.2.2.- *Variables asociadas a la geometría de la curva: velocidad de aproximación (v_{ap}).*

Tomando en cuenta los criterios de cálculo de la velocidad de aproximación descritos en el Apartado 4.4.2.1.2., seguidamente (Figuras 7.38. y 7.39.) se representan los valores y la distribución de dicha velocidad en los itinerarios analizados. Asimismo, estos valores son recogidos en el Anexo VIII (Tabla VIII.12.).

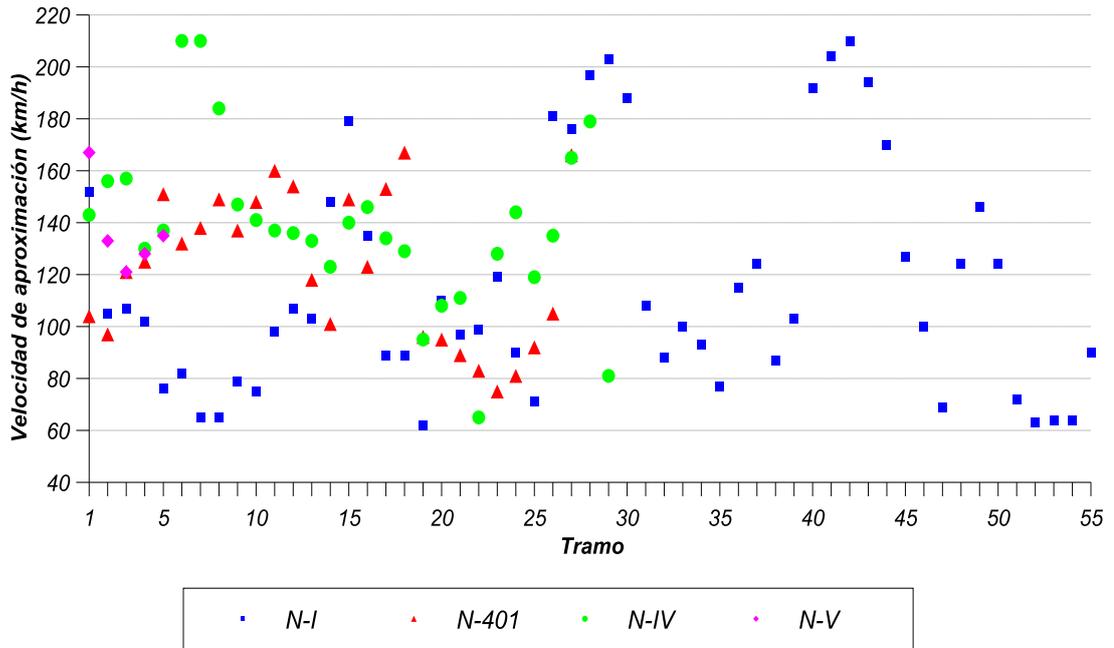


Figura 7.38.- Valores de velocidad de aproximación de los tramos de curva en los itinerarios analizados.

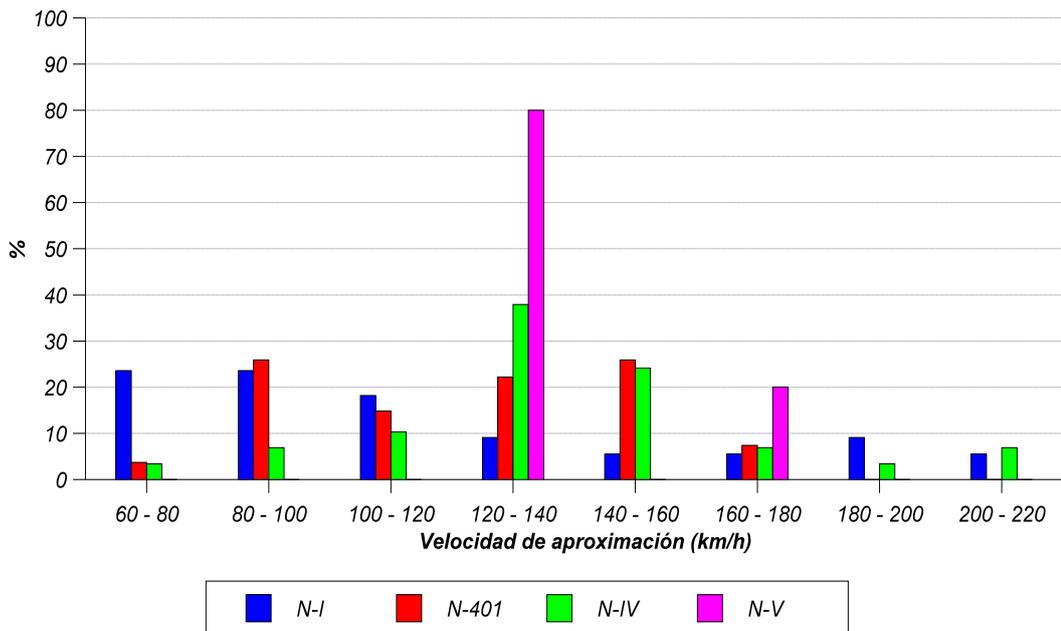


Figura 7.39.- Distribución de velocidad de aproximación de los tramos de curva en los itinerarios analizados.

Las figuras precedentes muestran los siguientes resultados relacionados con la velocidad de aproximación de los tramos de curva de los itinerarios considerados:

- ▶ Existe gran variabilidad en los resultados obtenidos, de modo que los valores de la velocidad de aproximación varían entre 60 y 210 km/h.
- ▶ Las medidas de centralización y dispersión de dicha velocidad, expresadas en función de la media y de la desviación típica respectivamente, se presentan en la tabla siguiente (Tabla 7.17.).

| Denominación de vía | Velocidad de aproximación (km/h) | |
|------------------------|----------------------------------|--------------|
| | Media | Desv. típica |
| N-I | 116 | 44 |
| N-401 | 123 | 29 |
| N-IV | 139 | 32 |
| N-V | 137 | 17 |
| Muestra total | 124 | 38 |

Tabla 7.17.- Medidas de centralización y dispersión de la velocidad de aproximación del tramo de curva en la muestra analizada.

La tabla precedente muestra que el itinerario de la autovía N-I presenta los tramos de curva con velocidades de aproximación menores, debido a lo accidentado del trazado.

- ▶ El análisis en detalle de estos resultados en cada una de las autovías permite concluir que la *moda* de la velocidad de aproximación en los itinerarios de las autovías N-I y N-401 es el intervalo [80, 100]. Asimismo, la *moda* de dicha velocidad en los itinerarios de las autovías N-IV y N-Ves el intervalo [120, 140].

7.3.2.2.3.- Variables asociadas a la geometría de la curva: factor de influencia de la velocidad en la curva (F_{vC}).

Tomando en consideración la definición mostrada en el Apartado 4.4.2.1.3., seguidamente (Figuras 7.40. y 7.41.) se representan los valores y la distribución de dicho factor en los itinerarios analizados. Asimismo, estos valores son recogidos en el Anexo VIII (Tabla VIII.13.).

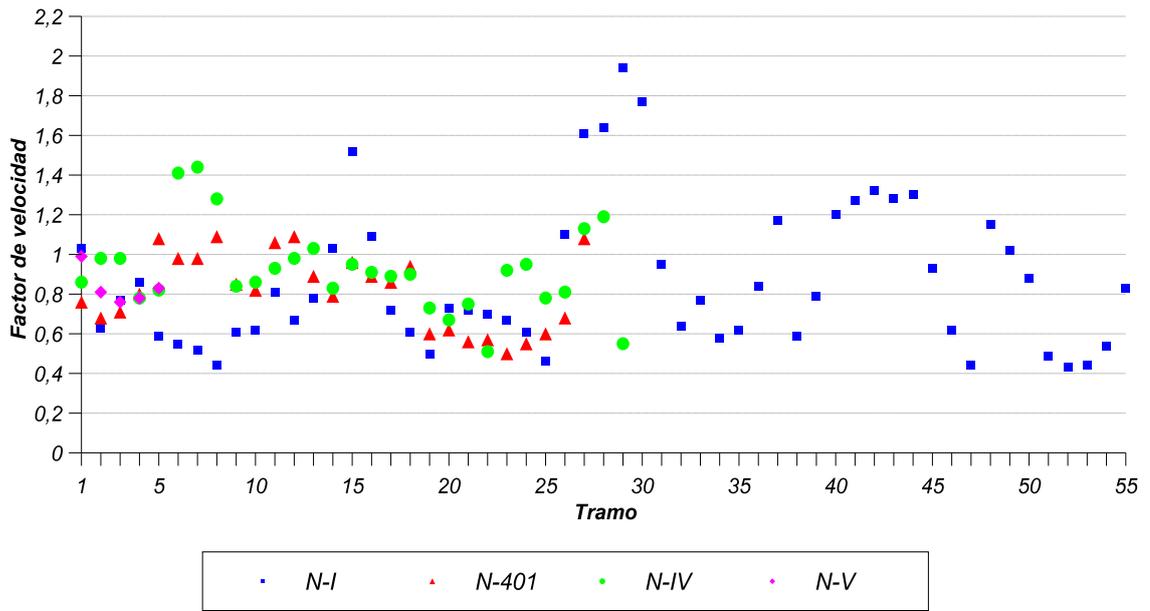


Figura 7.40.- Valores de factor de influencia de la velocidad de los tramos de curva en los itinerarios analizados.

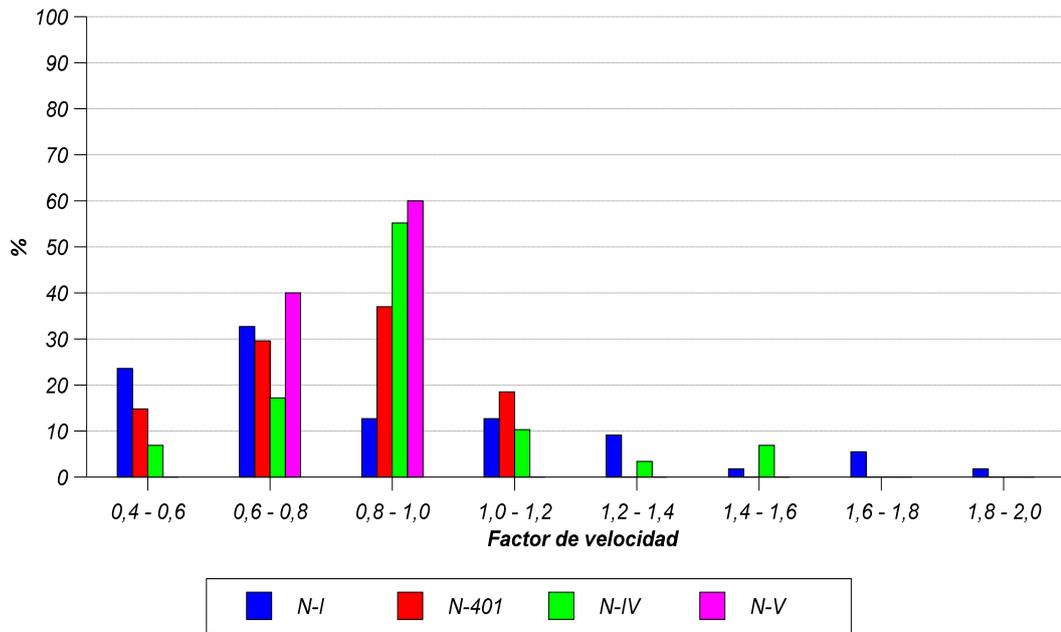


Figura 7.41.- Distribución de factor de influencia de la velocidad de los tramos de curva en los itinerarios analizados.

Las figuras precedentes muestran los siguientes resultados relacionados con el factor de influencia de la velocidad de los tramos de curva de los itinerarios considerados:

- ▶ Existe gran variabilidad en los resultados obtenidos, de modo que los valores del factor varían entre 0,4 y 2,0.
- ▶ Las medidas de centralización y dispersión de dicho factor, expresadas en función de la media y de la desviación típica respectivamente, se presentan en la tabla siguiente (Tabla 7.18.).

| <i>Denominación de vía</i> | <i>Factor de influencia de velocidad</i> | |
|----------------------------|--|---------------------|
| | <i>Media</i> | <i>Desv. típica</i> |
| N-I | 0,86 | 0,36 |
| N-401 | 0,81 | 0,19 |
| N-IV | 0,92 | 0,22 |
| N-V | 0,83 | 0,09 |
| Muestra total | 0,86 | 0,29 |

Tabla 7.18.- *Medidas de centralización y dispersión del factor de influencia de la velocidad del tramo de curva en la muestra analizada.*

- ▶ El análisis en detalle de estos resultados en cada una de las autovías permite concluir que la *moda* del factor de velocidad en el itinerario de la autovía N-I es el intervalo [0.6, 0.8]. Asimismo, la *moda* de dicho factor en los itinerarios de las autovías N-401, N-IV y N-V es el intervalo [0.8, 1.0].

Estos resultados muestran que, en la mayoría de los tramos de curva, la velocidad de aproximación inducida por la geometría del terreno es inferior a la velocidad máxima en curva. Junto a esto, el itinerario de la autovía N-I posee el mayor porcentaje de tramos de curva con valores extremos de este factor, motivado principalmente por lo accidentado del trazado.

7.3.2.2.4.- *Variables asociadas a la geometría de la curva: factor por influencia de las curvas precedentes (F_{cp}).*

Tomando en consideración la definición mostrada en el *Apartado 4.4.2.1.4.*, seguidamente (*Figuras 7.42. y 7.43.*) se representan los valores y la distribución de dicho factor en los itinerarios analizados. Asimismo, estos valores son recogidos en el *Anexo VIII (Tabla VIII.14.)*.

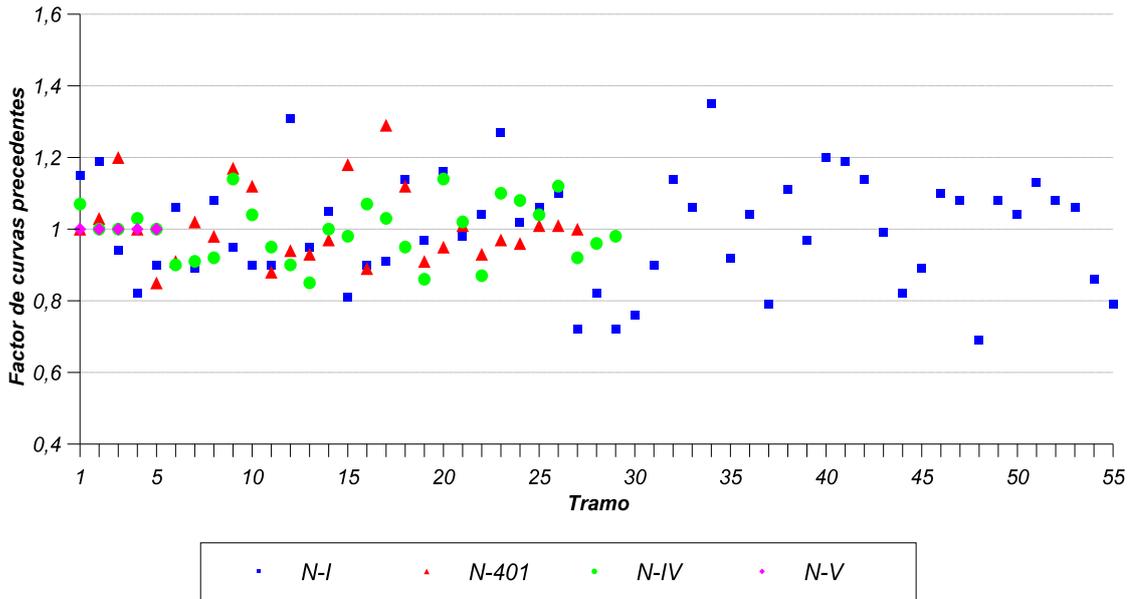
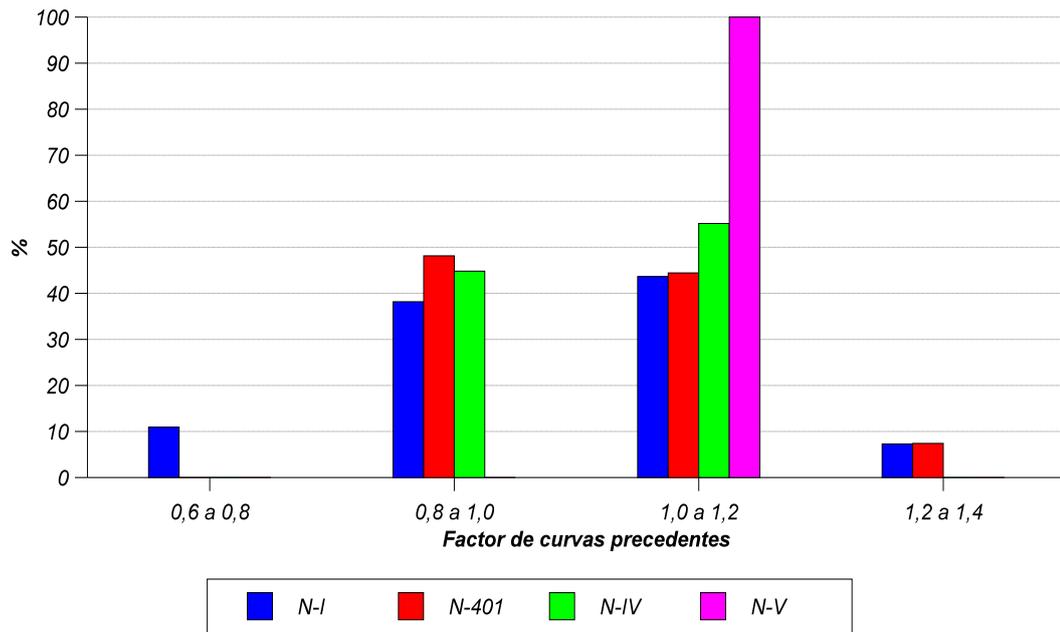


Figura 7.42.- Valores de factor de influencia de las curvas precedentes de los tramos de curva



en los itinerarios analizados.

Figura 7.43.- Distribución de factor de influencia de las curvas precedentes de los tramos de

curva en los itinerarios analizados.

Las figuras precedentes muestran los siguientes resultados relacionados con el factor de influencia de las curvas precedentes de los tramos de curva de los itinerarios considerados:

- ▶ Existe variabilidad en los resultados obtenidos, de modo que los valores del factor varían entre 0,6 y 1,4.
- ▶ Las medidas de centralización y dispersión de dicho factor, expresadas en función de la media y de la desviación típica respectivamente, se presentan en la tabla siguiente (Tabla 7.19.).

| <i>Denominación de vía</i> | <i>Factor de influencia de curvas precedentes</i> | |
|----------------------------|---|---------------------|
| | <i>Media</i> | <i>Desv. típica</i> |
| N-I | 0,98 | 0,13 |
| N-401 | 0,99 | 0,09 |
| N-IV | 0,92 | 0,08 |
| N-V | 1,00 | 0,00 |
| Muestra total | 0,98 | 0,11 |

Tabla 7.19.- *Medidas de centralización y dispersión del factor de influencia de las curvas precedentes del tramo de curva en la muestra analizada.*

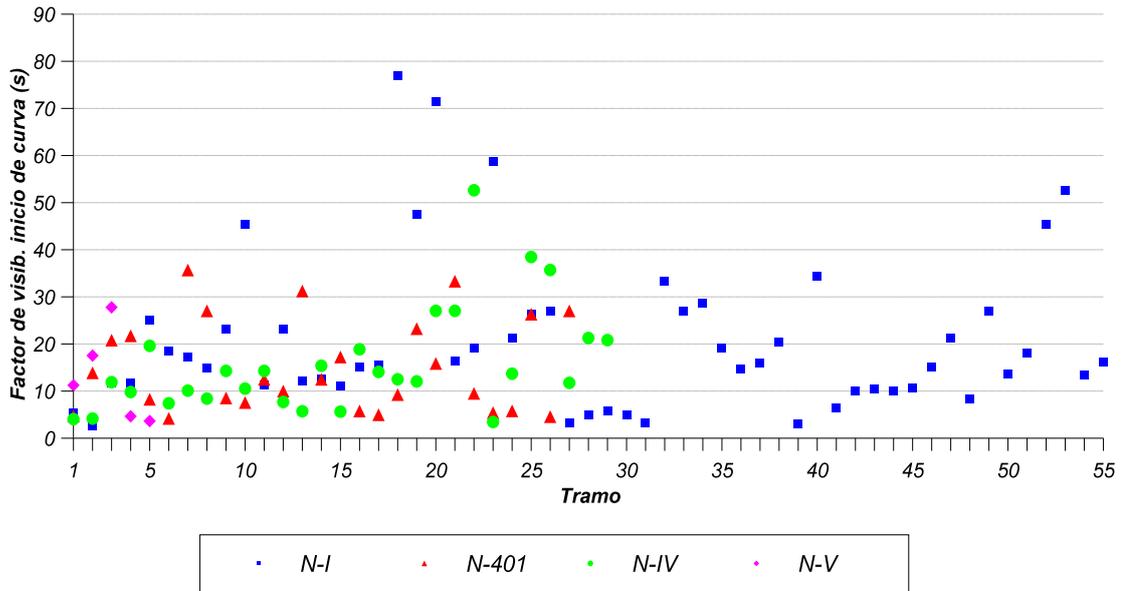
La tabla precedente muestra que los valores de este factor están muy próximos a 1, con baja dispersión en torno a este valor, lo que indica uniformidad en el trazado de las curvas de los itinerarios considerados, desde el punto de vista del radio y el peralte de las mismas.

- ▶ El análisis en detalle de estos resultados en cada una de las autovías permite concluir que la *moda* del factor de las curvas precedentes en el itinerario de la autovía N-401 es el intervalo [0.8, 1.0]. Asimismo, la *moda* de dicho factor en los itinerarios de las autovías N-I, N-IV y N-V es el intervalo [1.0, 1.2].

Estos resultados muestran que, en la mayoría de los tramos de curva, la velocidad máxima en curva está próxima a la velocidad máxima en curva promedio de los 5 kilómetros precedentes, lo que muestra la uniformidad en el trazado de las curvas analizadas. Junto a esto, el itinerario de la autovía N-I posee el mayor porcentaje de tramos de curva con valores extremos de este factor.

7.3.2.2.5.- *Variables asociadas a la geometría de la curva: factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (F_{visIC}).*

Tomando en consideración la definición mostrada en el *Apartado 4.4.2.1.5.*, seguidamente (*Figuras 7.44. y 7.45.*) se representan los valores y la distribución de dicho factor



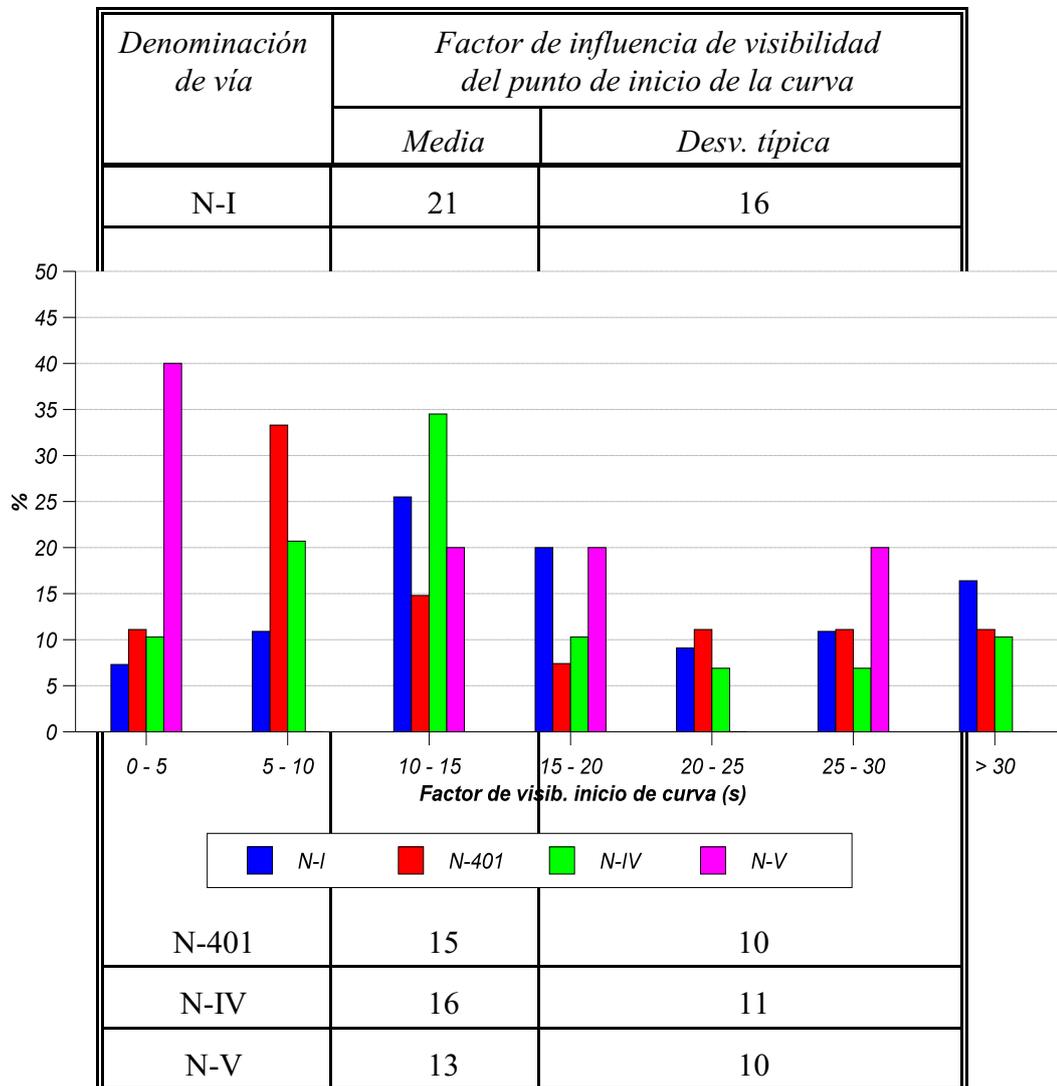
en los itinerarios analizados. Asimismo, estos valores son recogidos en el *Anexo VIII (Tabla VIII.15.)*.

Figura 7.44.- Valores de factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (s), de los tramos de curva en los itinerarios analizados.

Figura 7.45.- Distribución de factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (s), de los tramos de curva en los itinerarios analizados.

Las figuras precedentes muestran los siguientes resultados relacionados con el factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva, de los tramos de curva de los itinerarios considerados:

- ▶ Existe una elevada variabilidad en los resultados obtenidos, de modo que los valores del factor varían entre 0 y 80 s.
- ▶ Las medidas de centralización y dispersión de dicho factor, expresadas en función de la media y de la desviación típica respectivamente, se presentan en la tabla siguiente (Tabla 7.20.).



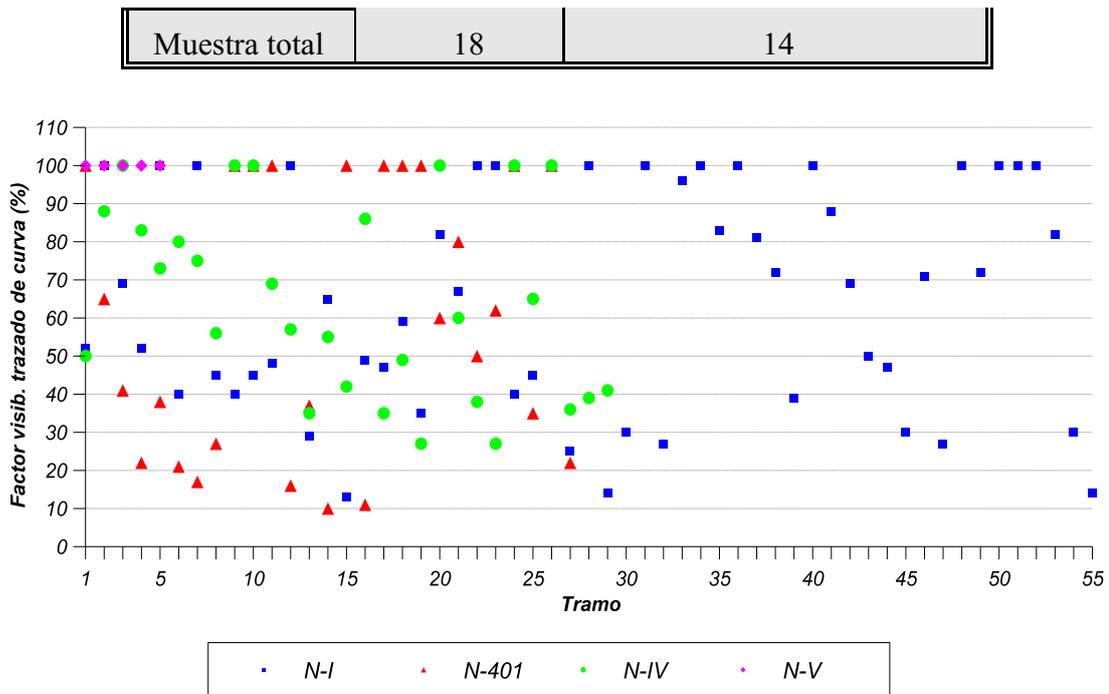


Tabla 7.20.- *Medidas de centralización y dispersión del factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva en la muestra analizada.*

La tabla precedente muestra que los valores de este factor presentan una elevada dispersión, lo que indica falta de uniformidad en el tiempo de visibilidad del punto de inicio de la curva, debido a limitaciones geométricas, en los itinerarios considerados.

► El análisis en detalle de estos resultados en cada una de las autovías permite concluir que:

- La *moda* de este factor en el itinerario de la autovía N-V es el intervalo [0, 5].
- La *moda* en el itinerario de la autovía N-401 es el intervalo [5, 10].
- La *moda* en los itinerarios de las autovías N-I y N-IV es el intervalo [10, 15].

Estos resultados reflejan nuevamente la falta de uniformidad en los valores de este factor de influencia.

7.3.2.2.6.- *Variables asociadas a la geometría de la curva: factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (F_{visTC}).*

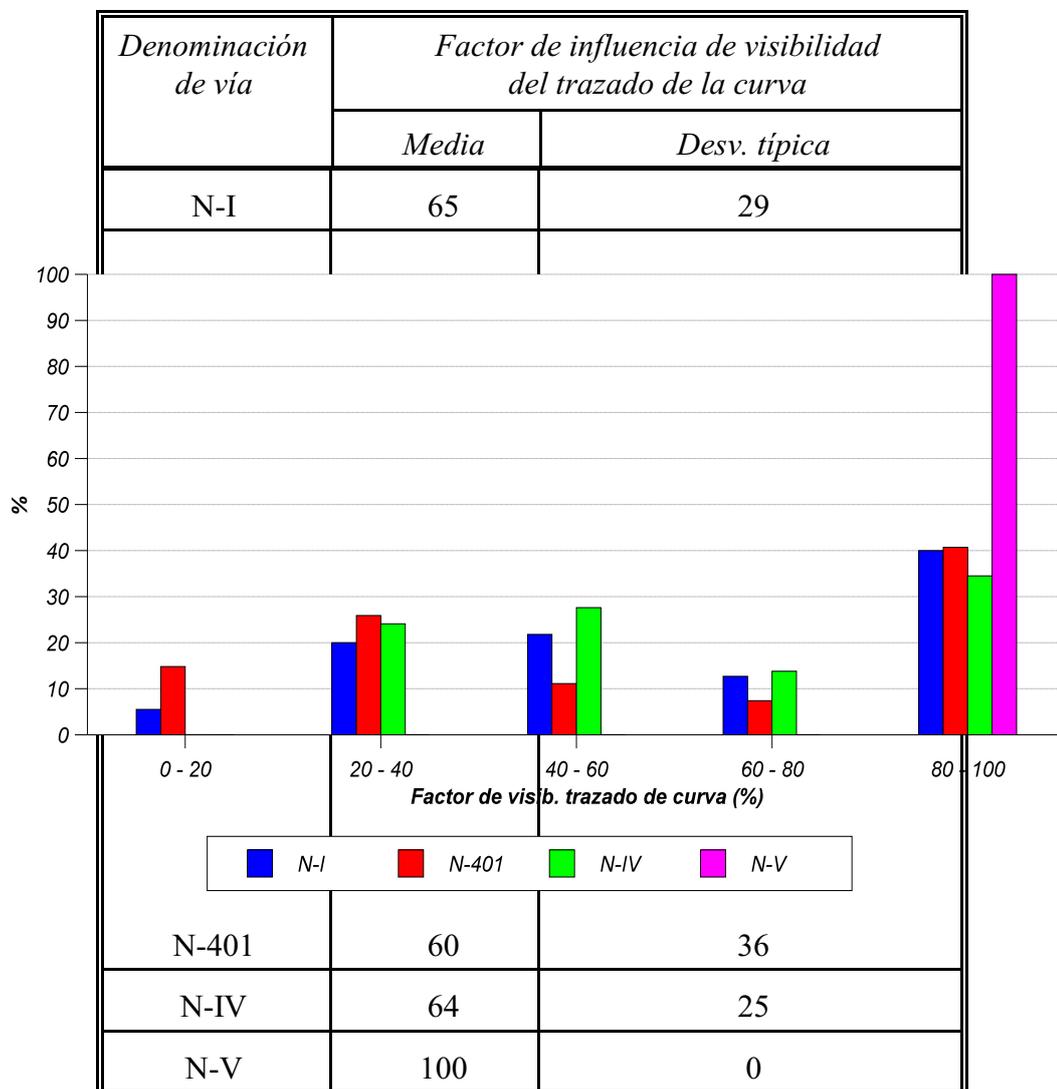
Tomando en consideración la definición mostrada en el *Apartado 4.4.2.1.6.*, seguidamente (*Figuras 7.46. y 7.47.*) se representan los valores y la distribución de dicho factor en los itinerarios analizados. Asimismo, estos valores son recogidos en el *Anexo VIII (Tabla VIII.16.)*.

Figura 7.46.- Valores de factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (%), de los tramos de curva en los itinerarios analizados.

Figura 7.47.- Distribución de factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (%), de los tramos de curva en los itinerarios analizados.

Las figuras precedentes muestran los siguientes resultados relacionados con el factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva, de los tramos de curva de los itinerarios considerados:

- ▶ Existe una elevada variabilidad en los resultados obtenidos, de modo que los valores del factor varían entre 0 y 100 %.
- ▶ Las medidas de centralización y dispersión de dicho factor, expresadas en función de la media y de la desviación típica respectivamente, se presentan en la tabla siguiente (Tabla 7.21.).



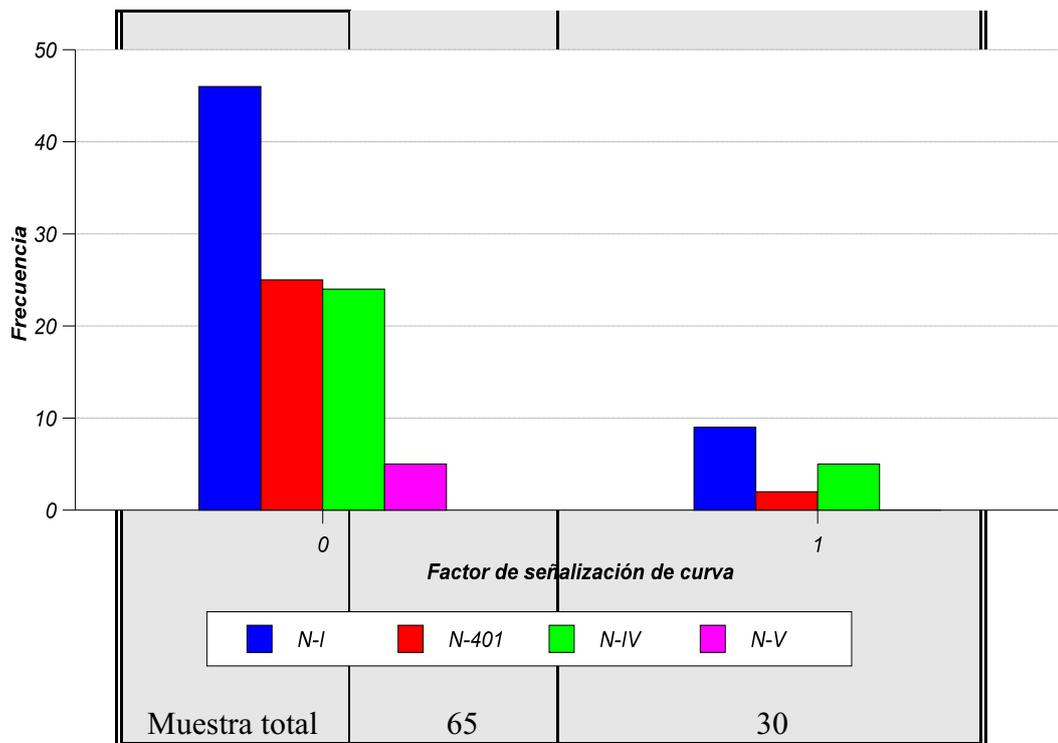


Tabla 7.21.- Medidas de centralización y dispersión del factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva en la muestra analizada.

La tabla precedente muestra que los valores de este factor presentan alta dispersión, lo que indica falta de uniformidad en el porcentaje de la longitud de la curva percibido desde un punto tal que permita la reacción del conductor en condiciones de seguridad, debido a limitaciones geométricas, en los itinerarios considerados.

- El análisis en detalle de estos resultados permite concluir que la *moda* en los itinerarios de todas las autovías consideradas es el intervalo [80, 100]. Estos resultados reflejan que la situación más frecuente es un tramo de curva donde las limitaciones geométricas permiten percibir la mayor parte del trazado del mismo.

7.3.2.2.7.-Factor de influencia de la señalización de la curva (F_{sc}).

Tomando en consideración la definición mostrada en el Apartado 4.4.2.1.7., seguidamente (Figura 7.48.) se representa la frecuencia de aparición de cada estado de dicho factor en los itinerarios analizados. Asimismo, los estados de esta variable en cada tramo de curva son recogidos en el Anexo VIII (Tabla VIII.17.).

Figura 7.48.- Frecuencia de factor de influencia de la señalización de la curva, de los tramos de curva en los itinerarios analizados.

La figura precedente muestra los siguientes resultados relacionados con el factor de

influencia de la señalización de la curva, en los itinerarios considerados:

- La mayoría de los tramos de curva considerados (86 %) no presentan señalización vertical de “peligro de curva” ni señalización vertical preceptiva de “velocidad limitada”.

7.3.2.2.8.- *Variables asociadas a los ramales: factor de influencia de configuración del ramal (F_{cRA} , F_{cRS}).*

Según la definición mostrada en el *Apartado 4.4.2.2.1.*, la siguiente figura (*Figura 7.49.*), presenta la distribución de los tramos de curva con ramales de acceso y salida, en las autovías analizadas.

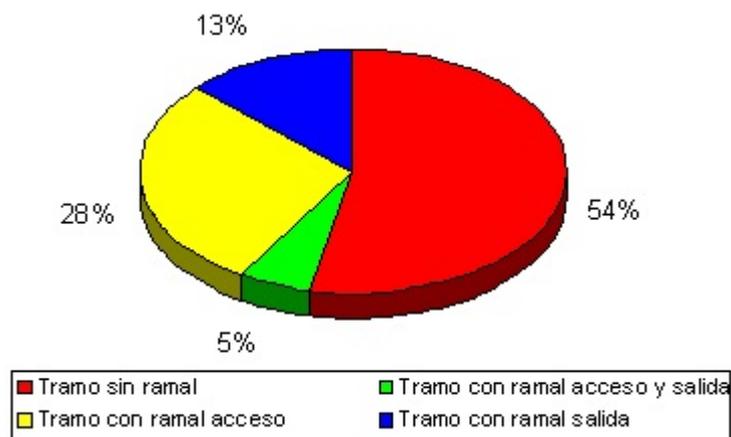


Figura 7.49.- Distribución de los tramos de curva con ramales de acceso y salida, en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V).

Junto a esto, se presenta en las siguientes figuras (*Figuras 7.50. y 7.51.*) y el *Anexo VIII (Tablas VIII.18 y VIII.19.)*, la frecuencia de aparición de los estados del factor de influencia de configuración del ramal en los tramos de las autovías analizadas, en el caso de ramales de acceso y salida.

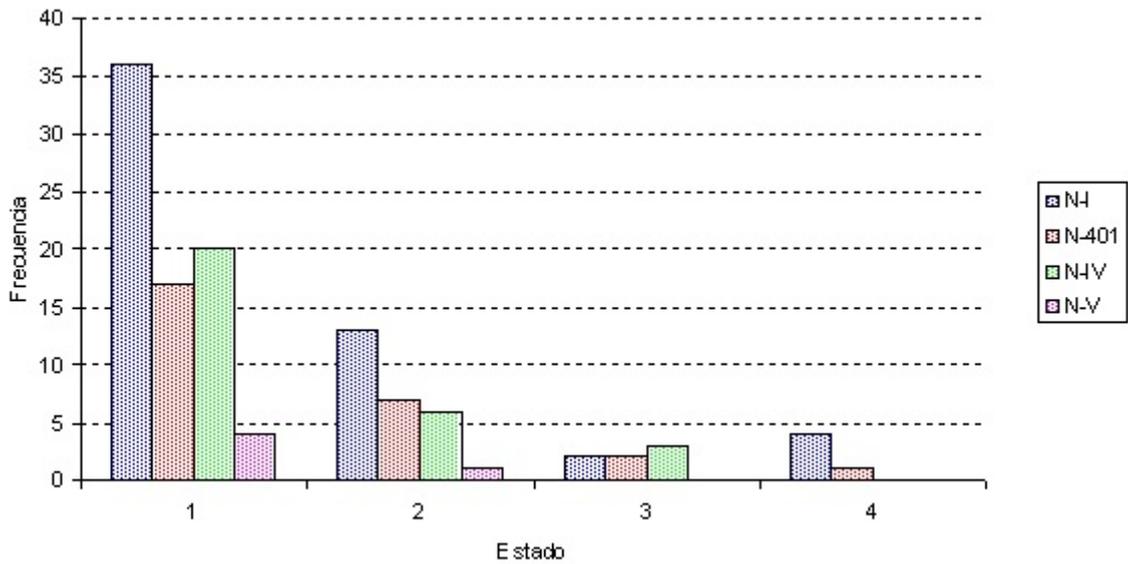


Figura 7.50.- Frecuencia de los estados de la variable F_{cRA} , en los tramos de las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V).

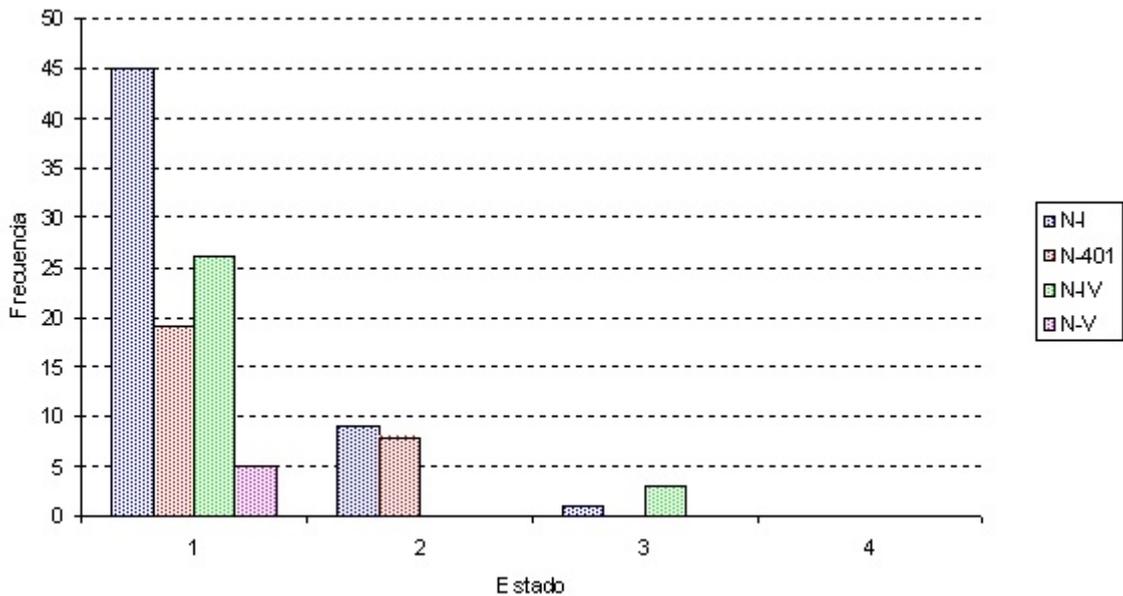


Figura 7.51.- Frecuencia de los estados de la variable F_{cRS} , en los tramos de las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V).

Las figuras precedentes muestran los siguientes resultados relacionados con el factor de influencia de la configuración del ramal (acceso/salida), en los itinerarios considerados:

- ▶ El 54 % de los tramos de curva no poseen ramales. En los restantes, predomina la existencia de ramales de acceso (28 %). Además, un 5% presenta la combinación de ambos ramales en el mismo tramo.
- ▶ La mayoría de los ramales existentes presentan una configuración adecuada (estado “2” de la variable), tanto desde el punto de vista de la señalización como del carril de incorporación /salida.

7.3.2.2.9.- *Variables asociadas a los ramales: factor de influencia de la velocidad en el ramal (F_{vRA} y F_{vRS}).*

Tomando en cuenta los criterios de cálculo de este factor descritos en el *Apartado 4.4.2.2.2.*, seguidamente (*Figuras 7.52., 7.53., 7.54. y 7.55.*) se representan los valores y la distribución del factor de influencia de la velocidad en el ramal. Asimismo, estos valores son recogidos en el *Anexo VIII (Tablas VIII.20. y VIII. 21.)*.

Los valores del factor igual a cero corresponden con tramos de curva donde no existe ningún ramal.

Figura 7.52.- *Valores del factor de influencia de la velocidad en el ramal de acceso, en los tramos de las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V).*

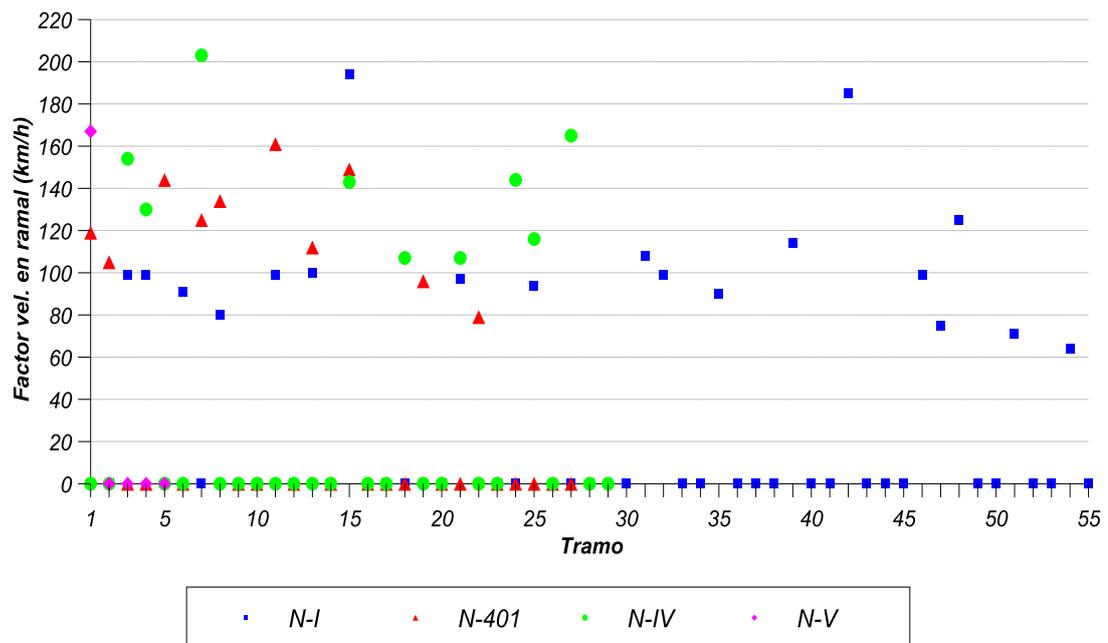
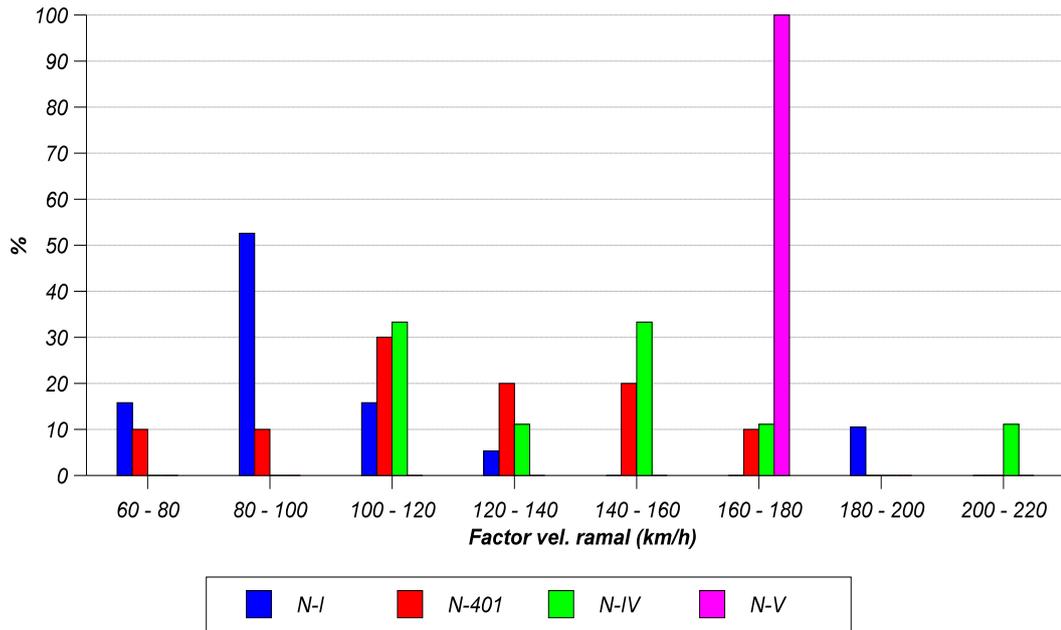


Figura 7.53.- Distribución del factor de influencia de la velocidad en el ramal de acceso, en



los tramos de las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V).

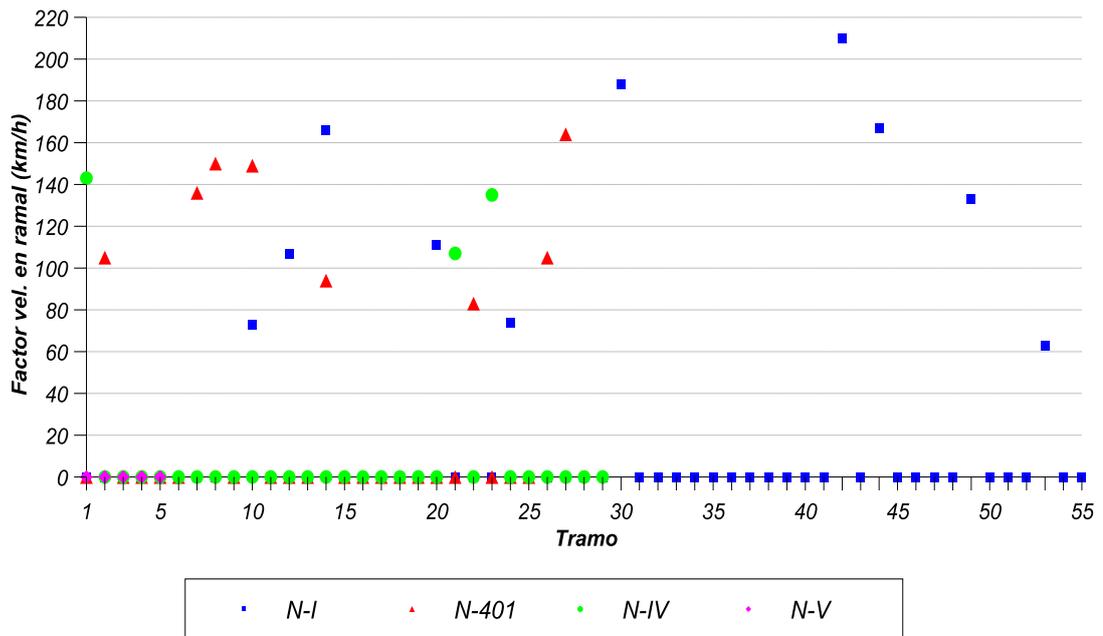


Figura 7.54.- Valores del factor de influencia de la velocidad en el ramal de salida, en los tramos de las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V).

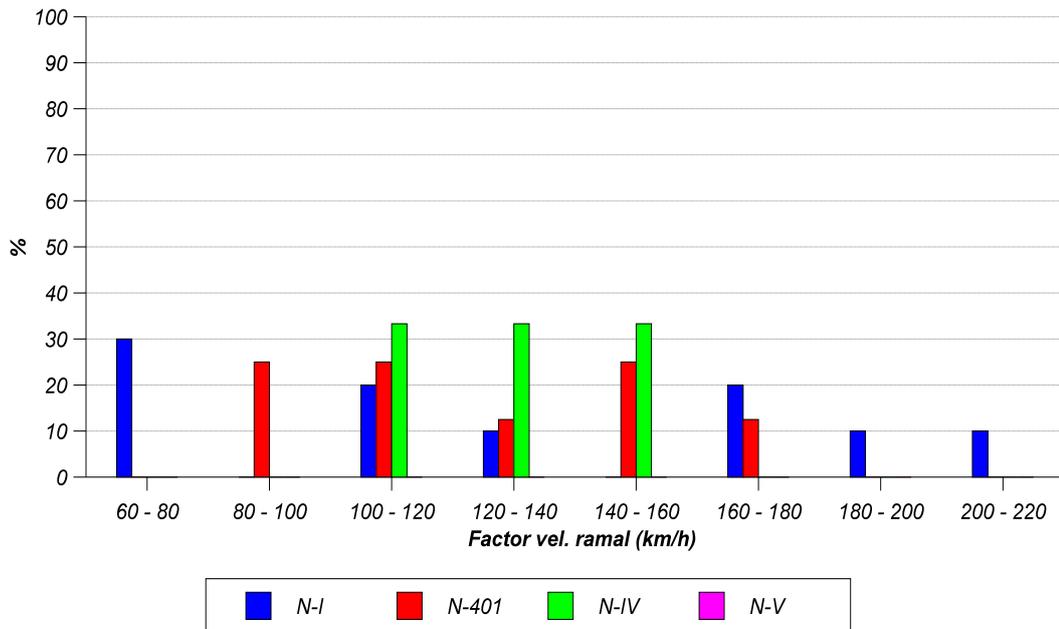


Figura 7.55.- Distribución del factor de influencia de la velocidad en el ramal de salida, en los tramos de las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V).

Las figuras precedentes muestran los siguientes resultados relacionados con el factor de influencia de la velocidad en el ramal, en los tramos de curva de los itinerarios considerados:

- Existe gran variabilidad en los resultados obtenidos, de modo que los valores de dicho factor, tanto en ramales de acceso como de salida, varía entre 60 y 210 km/h.
- Las medidas de centralización y dispersión de dicho factor, expresadas en función de la media y de la desviación típica respectivamente, se presentan en la tabla siguiente (Tabla 7.22.).

| Tipo de ramal | Factor de influencia de velocidad en el ramal (km/h) | |
|---------------|--|--------------|
| | Media | Desv. típica |
| Acceso | 119 | 34 |
| Salida | 127 | 40 |

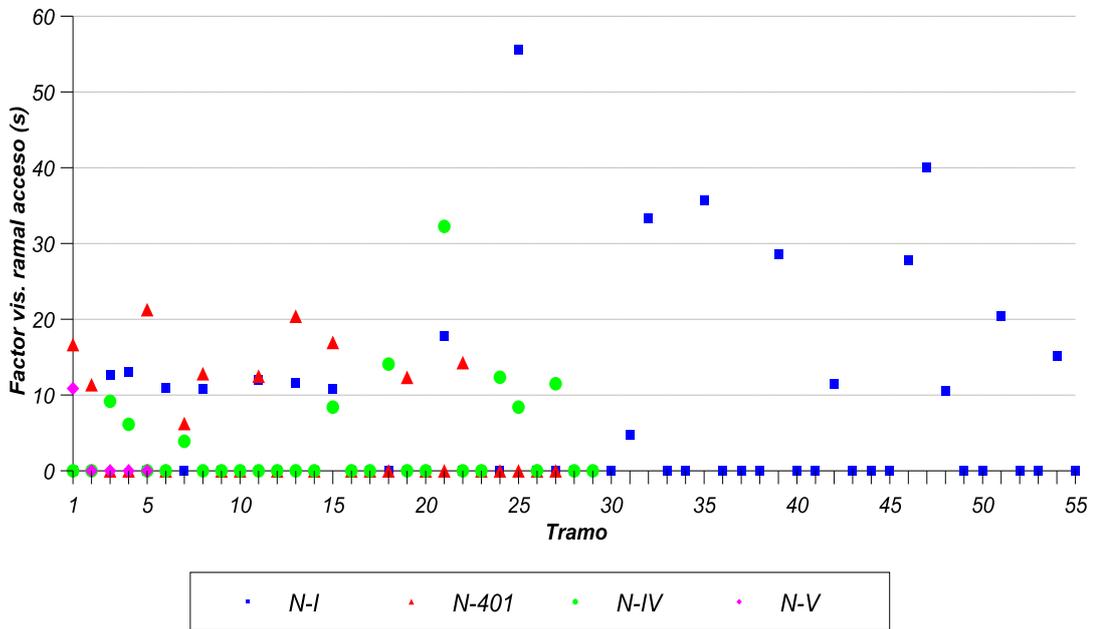
Tabla 7.22.- Medidas de centralización y dispersión del factor de influencia de la velocidad en el ramal en la muestra analizada.

7.3.2.2.10.- Variables asociadas a los ramales: factor de influencia de la visibilidad del ramal

(F_{visRA}, F_{visRS}) .

Tomando en cuenta los criterios de cálculo de este factor descritos en el *Apartado 4.4.2.2.3.*, seguidamente (*Figuras 7.56., 7.57., 7.58. y 7.59.*) se representan los valores y la distribución del factor de influencia de la visibilidad del ramal. Asimismo, estos valores son recogidos en el *Anexo VIII (Tablas VIII.22. y VIII. 23.)*. Los valores del factor igual a cero corresponden con tramos de curva donde no existe ningún ramal.

Figura 7.56.- Valores de factor de influencia de la visibilidad del ramal de acceso en tramos



de las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V).

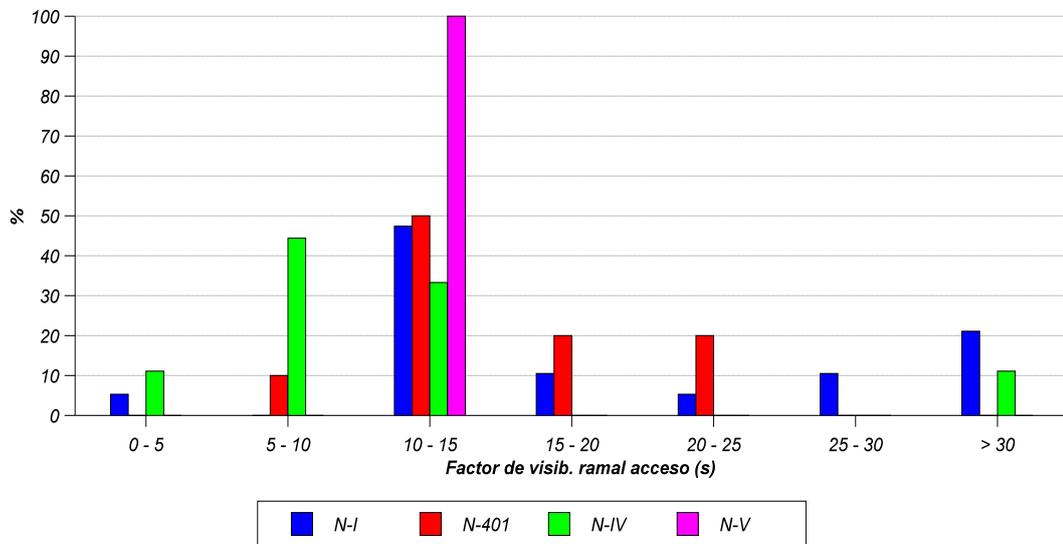
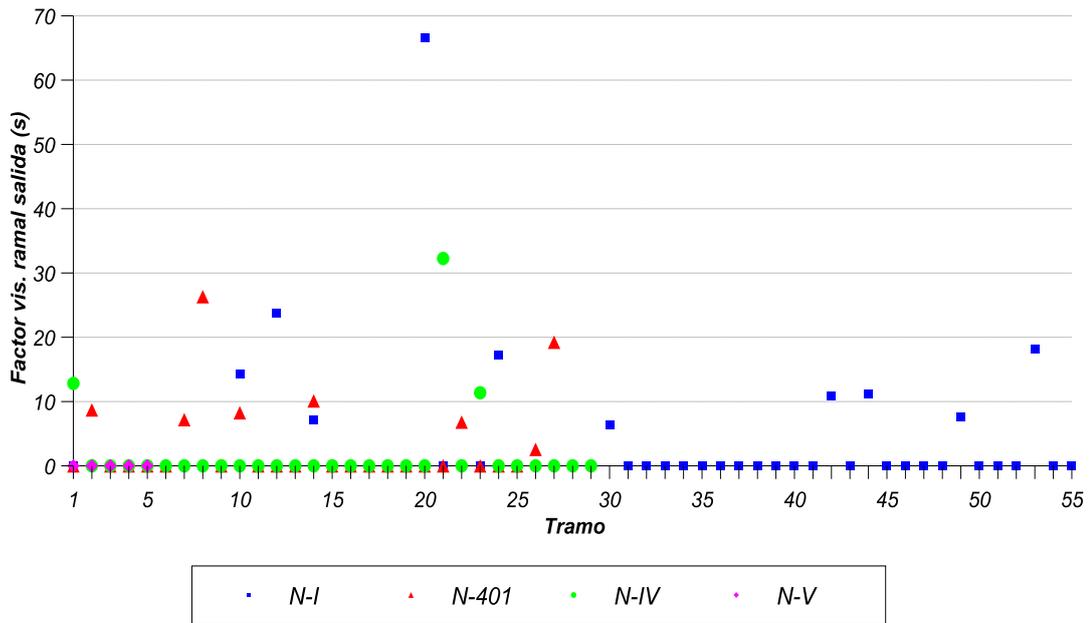


Figura 7.57.- Distribución de factor de influencia de la visibilidad del ramal de acceso en tramos de las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V).

Figura 7.58.- Valores de factor de influencia de la visibilidad del ramal de salida en tramos de



las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V).

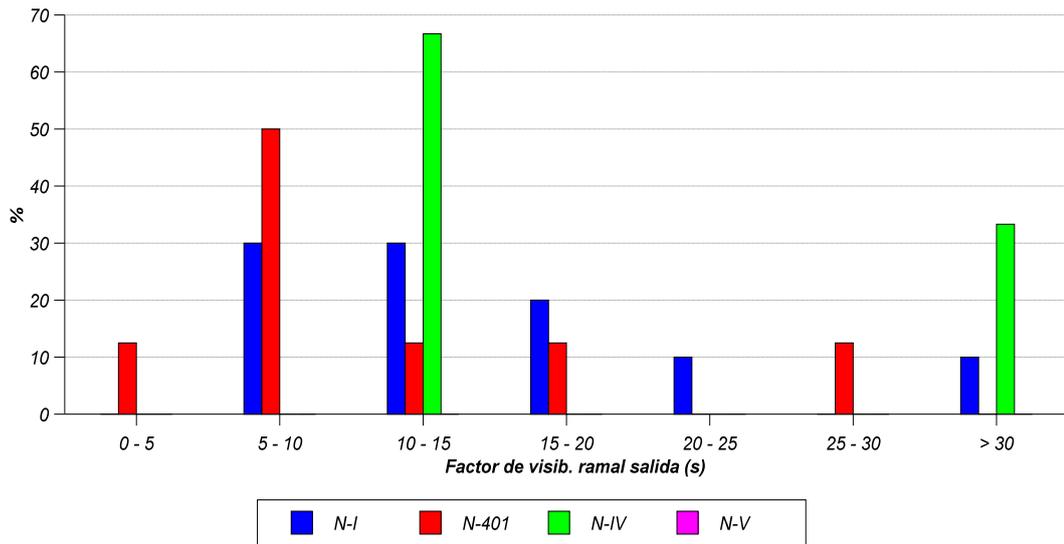


Figura 7.59.- Distribución de factor de influencia de la visibilidad del ramal de salida en tramos de las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V).

Las figuras precedentes muestran los siguientes resultados relacionados con el factor de influencia de la visibilidad del ramal (acceso/salida), de los tramos de curva de los itinerarios considerados:

- ▶ Existe una elevada variabilidad en los resultados obtenidos, de modo que los valores del factor varían entre 0 y 70 s.
- ▶ Las medidas de centralización y dispersión de dicho factor, expresadas en función de la media y de la desviación típica respectivamente, se presentan en la tabla siguiente (Tabla 7.23.).

| <i>Tipo de ramal</i> | <i>Factor de influencia de velocidad en el ramal (s)</i> | |
|----------------------|--|---------------------|
| | <i>Media</i> | <i>Desv. típica</i> |
| Acceso | 17 | 11 |
| Salida | 16 | 14 |

Tabla 7.23.- *Medidas de centralización y dispersión del factor de influencia de la visibilidad en el ramal en la muestra analizada.*

La tabla precedente muestra que los valores de este factor presentan una elevada dispersión, lo que indica falta de uniformidad en el tiempo de visibilidad del ramal (acceso/salida), debido a limitaciones geométricas, en los itinerarios considerados.

7.3.2.2.11.- *Variables asociadas a los ramales: factor de influencia de ramales adyacentes (F_{γ})*

Tomando en cuenta los criterios de cálculo de este factor descritos en el *Apartado 4.4.2.2.4.*, seguidamente (*Figura 7.60.*) se representan los valores del factor de influencia de ramales adyacentes.

La figura siguiente muestra como dicho factor sólo está presente en el 5% de los tramos de curva de los itinerarios analizados.

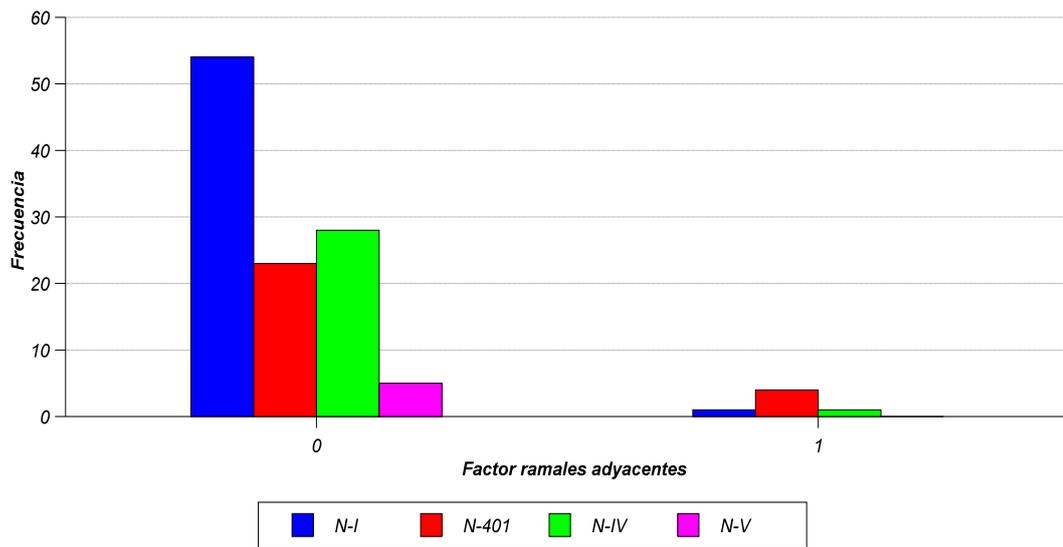


Figura 7.60.- Frecuencia de los estados de la variable “factor de influencia de ramales adyacentes” en tramos de las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V).

7.3.2.2.12.- Variables asociadas a las condiciones del tráfico: Intensidad Media Diaria (IMD).

En el momento de realización de este trabajo, han estado disponibles los mapas de IMD de España durante los años de 1994 y 1996. De este modo, y para el ajuste del modelo de predicción, ha sido empleado el promedio de ambos años en los distintos tramos de curva de la muestra de itinerarios considerada (únicamente en el sentido de la calzada analizado), como se muestra en la siguiente figura (Figura 7.61.)

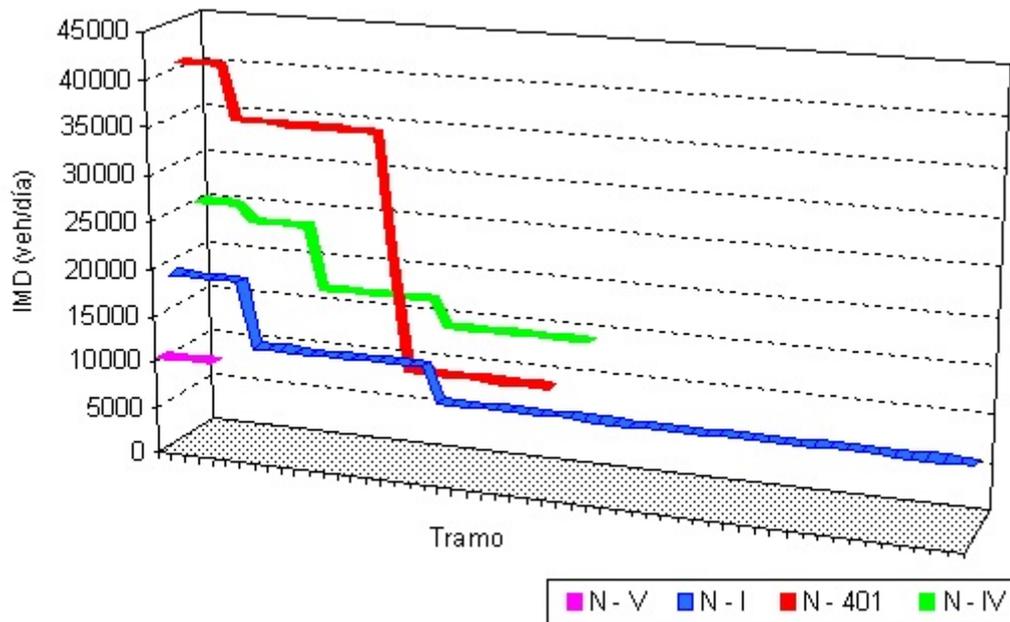


Figura 7.61.- IMD en tramos de las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV y N-V).

7.4.- Estimación del modelo de predicción.

7.4.1.- METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN.

Como ha sido mostrado en los objetivos de la presente Tesis, el modelo estimado a partir de las variables explicativas objetivas será analizado desde un doble punto de vista:

- 1.- Bondad de la predicción de la variable respuesta (frecuencia de accidentes o probabilidad de ocurrencia de accidentes).
- 2.- Análisis de la influencia de las variables explicativas sobre la variable respuesta estimada.

Durante el desarrollo del modelo de predicción son tenidas en cuenta las etapas presentadas seguidamente

ETAPA I: DEFINICIÓN DE VARIABLES EXPLICATIVAS.

Las variables explicativas tenidas en cuenta han sido definidas en el *Apartado 4*. Al mismo tiempo, durante el proceso de ajuste del modelo, serán consideradas nuevas variables compuestas, como combinación de las ya mostradas.

En el caso de regresión logística (empleada en la presente investigación), las variables discretas son procesadas de forma específica frente a las continuas. Así, cuando una variable discreta presenta más de dos niveles o categorías, son creadas nuevas variables cada una de ellas con dos niveles. El número de variables binarias requeridas para representar una variable discreta es uno menos que el número de categorías de la misma.

Cada una de las nuevas variables así definidas representa cada uno de los niveles de la variable discreta original, menos uno de ellos, tomado como referencia. Y de este modo, los efectos de cada una de las variables binarias sobre la variable respuesta es definido respecto al nivel de referencia.

Las nuevas variables binarias poseen dos valores:

- “ 0 “: es falso el nivel de la variable discreta original representada por la nueva variable binaria.
- “ 1 “: es verdadero el nivel de la variable discreta original representada por la nueva variable binaria.

ETAPA II: SELECCIÓN DEL MODELO.

Esta selección está condicionada por la distribución de la variable respuesta analizada. La aproximación estadística al problema de la modelización de la accidentalidad en tramos puede ser abordada, teniendo en cuenta la distribución de la variable respuesta analizada y de acuerdo a los trabajos de investigación desarrollados en este área, desde una doble perspectiva:

- a) Predicción de *la frecuencia de accidentes* acumulados en un tramo de curva de autovía: variable respuesta discreta.
- b) Predicción de *la probabilidad de ocurrencia de accidentes* en un tramo de curva de autovía: variable discreta binaria

La presente Tesis considera el desarrollo de dos modelos de predicción, de acuerdo a los dos planteamientos mostrados.

- 1.- La distribución de la frecuencia de accidentes entre tramos sigue una distribución de Gamma (como ha sido expuesto en el *Apartado 7.3.1.2.*), que será aproximada a una distribución de *Poisson*. Por ello, como se muestra en la *Tabla 7.1.*, la función de unión empleada será *la función logarítmica*. De este modo, el modelo analizado vendrá dado por la siguiente expresión:

$$Y = e^{\beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \dots + \beta_n \cdot X_n} \quad (7.35.)$$

- 2.- La predicción de la probabilidad de ocurrencia de accidentes requiere la definición de una variable respuesta binaria "*Tramo de concentración de accidentes*" (*Apartado 7.3.1.3.*), la cual será estimada conforme a un modelo de regresión *logística*. Así, el modelo de predicción de la probabilidad analizado vendrá dado por la siguiente expresión:

$$\pi = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \dots + \beta_n \cdot X_n}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \dots + \beta_n \cdot X_n}} \quad (7.36.)$$

donde:

- X_i : variables explicativas del modelo.
- β_i : coeficientes estimados de las variables explicativas.
- Y : variable respuesta estimada "*número de accidentes en tramos de curva*", acumulados durante los años de 1994, 1995 y 1996.
- π : probabilidad estimada de ocurrencia de la variable respuesta binaria "*Tramo de concentración de accidentes*".

ETAPA III: AJUSTE DEL MODELO POR ELIMINACIÓN PROGRESIVA.

Seguidamente, se desarrolla el ajuste del modelo. Para ello, el objetivo buscado es la obtención de un modelo lo más sencillo posible, con el mínimo número de variables explicativas significativas. Así, debe buscarse el mejor equilibrio posible entre la mejora introducida por la incorporación de nuevas variables, y el incremento no deseado de la complejidad del modelo.

Cuando se dispone a priori de un conjunto grande de variables explicativas es necesario definir un procedimiento operativo para construir el modelo. En el presente trabajo, es empleado el procedimiento de *eliminación progresiva*.

Este método comienza con el ajuste de la variable respuesta en función de todas las variables explicativas potencialmente influyentes. Seguidamente, se define un parámetro estadístico que permita el análisis de significación de los coeficientes de las variables estimados. Finalmente, se procede a la eliminación de las variables no significativas, esto es, aquellas cuyos coeficientes estimados no resultan significativamente distintos de “0”.

El procedimiento se repite hasta alcanzar un modelo cuyas variables explicativas sean significativas. Dicho proceso es mostrado en la siguiente figura (Figura 7.62.).

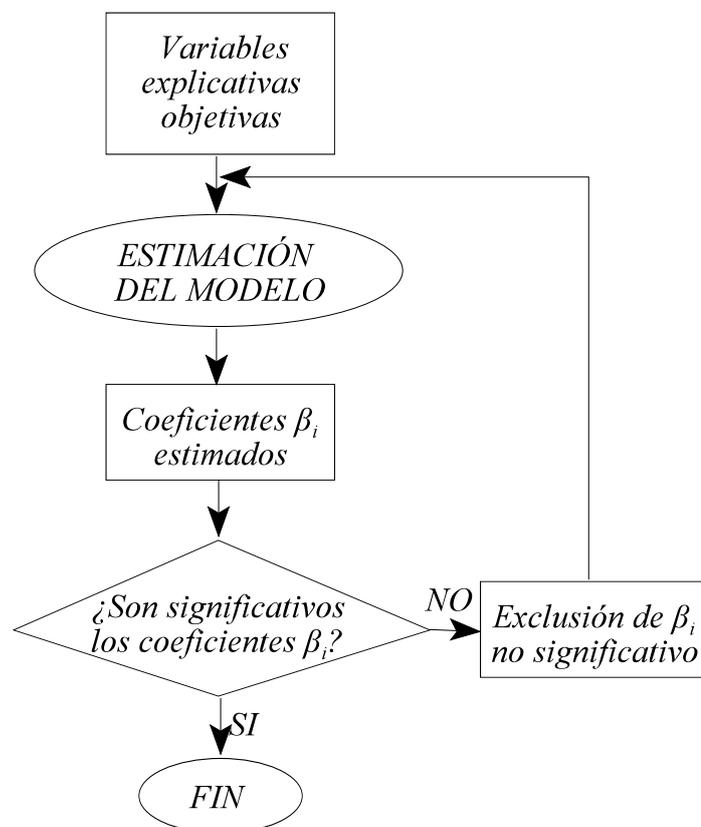


Figura 7.62.- Proceso iterativo de selección de variables explicativas significativas en el modelo de predicción.

La estrategia de eliminación progresiva tiene el inconveniente de utilizar mucha capacidad de cálculo, debido a que es posible que únicamente un subconjunto pequeño de variables sea significativo y este procedimiento obliga a efectuar estimaciones muy extensas. Además, conduce fácilmente al problema de multicolinealidad si hay variables muy relacionadas o el número de las mismas es muy elevado. En contrapartida, es excelente para evitar la exclusión de alguna variable significativa.

ETAPA IV: ANÁLISIS DE MULTICOLINEALIDAD.

Uno de los principales problemas que se presenta al incluir las variables explicativas del modelo es la dependencia entre las mismas. En este caso, es muy difícil separar sus efectos y medir la contribución individual de cada una de ellas a la respuesta, con lo que los estimadores de los parámetros serán inestables y con gran varianza.

Este problema se conoce con el nombre de *multicolinealidad*, y surge de intentar la misión imposible de extraer de la muestra más información que la que contiene.

Dicho problema no afecta desfavorablemente a la predicción de la variable respuesta ni al vector de residuos, que están siempre bien definidos. Por tanto, no es problema para las predicciones con el modelo, siempre que éstas se limiten a la zona observada. Sin embargo, afectará mucho a la precisión de la estimación de los coeficientes β_i , ya que la muestra no contiene información sobre los efectos de una variable cuando las demás permanecen constantes.

Una característica típica de la multicolinealidad (por el aumento de variabilidad en la estimación de los coeficientes) es que dichos coeficientes pueden resultar no significativamente distintos de cero a nivel individual, aunque su contraste conjunto sí sea muy significativo.

Por otro lado, este problema puede afectar mucho a algunos coeficientes y nada a otros. Los asociados a variables explicativas independientes o poco correlacionadas con las restantes no se verán afectados, y podrán ser estimados con precisión.

La identificación de variables colineales puede ser llevado a cabo como sigue:

1.- *La matriz de correlación entre las variables explicativas R.*

La presencia de correlaciones altas entre variables explicativas es una señal clara de multicolinealidad. Sin embargo, es posible que exista una relación perfecta entre una variable y el resto de las variables explicativas y, sin embargo, sus coeficientes de correlación siempre sean bajos.

Se define la *matriz de correlación* de las variables explicativas R a la matriz cuadrada simétrica de orden k cuyo término ij es el coeficiente de correlación simple entre las variables $X_i - X_j$. Esta matriz tendrá, por tanto, "1" en la diagonal principal y términos menores que uno fuera de ella. Así, como esta matriz contiene la información de las relaciones entre las variables explicativas tomadas de dos en dos, R^{-1} (matriz inversa de R) tendrá en cuenta la dependencia conjunta. De este modo, para k variables, se demuestra que los términos diagonales de R^{-1} son:

$$diag_i(R^{-1}) = \frac{1}{1 - R_{i,otras}^2} \quad (7.37.)$$

donde $R_{i,otras}$ es el coeficiente de correlación múltiple en la modelización de X_i en función del resto de las variables explicativas. Por tanto, elementos diagonales grandes (tomando como criterio valores mayores que 10 (Peña, D., 1989 [41])), en la matriz R^{-1} indican alta multicolinealidad.

Estos términos no presentan la limitación de los de R , ya que son función de todas las variables explicativas, y detectarán la existencia de multicolinealidad cuando una variable sea casi combinación lineal del resto.

2.- *Las raíces y vectores característicos de la matriz R.*

Otro método de análisis del problema de multicolinealidad se basa en las raíces características de la matriz de correlación. Para ello, se define el *índice de condicionamiento IC*, el cual viene dado por la siguiente expresión:

$$IC = \sqrt{\frac{\text{máximo valor propio de } R}{\text{mínimo valor propio de } R}} \geq 1 \quad (7.38.)$$

En general, se admite que (Peña, D., 1989 [41]):

- Alta multicolinealidad: $IC > 30$
- Moderada multicolinealidad: $10 < IC < 30$
- Baja multicolinealidad: $IC < 10$

La multicolinealidad es un problema de la muestra y, por tanto, no tiene solución simple debido a que se está pidiendo a los datos más información de la que contienen. Las dos únicas soluciones son:

- Eliminar variables explicativas: consiste en suprimir ciertas variables muy correlacionadas con las incluidas, o bien combinaciones lineales de ellas.
- Incluir información externa a los datos.

ETAPA V: BONDAD DEL AJUSTE DEL MODELO A LOS DATOS OBSERVADOS.

Una vez que el modelo más apropiado ha sido ajustado a los datos observados, y se ha analizado la carencia de multicolinealidad entre las variables explicativas consideradas, se lleva a cabo un análisis para la evaluación de la bondad de dicho ajuste.

Uno de los criterios de bondad del ajuste del modelo se establece sobre el parámetro $-2.L(\hat{\theta})$ (según ha sido definido en el *Apartado 7.1.3.*). Así, el modelo estimado será óptimo cuando minimice dicho parámetro de evaluación. Al mismo tiempo, si se efectúa un análisis de incorporación sucesiva de variables explicativas en el modelo, podrá evaluarse la mejora introducida por cada una de ellas a partir del análisis comparativo basado en el parámetro mostrado.

Por otro lado, puede definirse para cada uno de los modelos analizados en la presente Tesis Doctoral parámetros globales de evaluación de la bondad del ajuste. Esto será mostrado en los apartados presentados a continuación.

FASE VI: EVALUACIÓN DE SENSIBILIDAD DE LOS COEFICIENTES ESTIMADOS.

A pesar del esfuerzo desarrollado para la definición de las variables explicativas objetivas que influyen en la ocurrencia de accidentes en tramos de curva, es probable que no haya sido considerada alguna variable relevante o que, siendo tenida en cuenta, no haya resultado significativa en el proceso de ajuste, debido a la variabilidad de la muestra tomada.

Ante este hecho, es importante la realización de un análisis que permita evaluar la sensibilidad de los coeficientes estimados cuando alguna de las variables significativas es excluida. Para ello, se lleva a cabo un *análisis de sensibilidad*, evaluando la variabilidad que se induce en los coeficientes estimados de las variables explicativas cuando cada una de ellas es sucesivamente excluida del modelo.

Seguidamente, se presentan las fases previamente definidas aplicadas a los modelos considerados en el presente trabajo de investigación.

7.4.2.- MODELO DE ESTIMACIÓN DE LA FRECUENCIA DE ACCIDENTES EN TRAMOS DE CURVA.

7.4.2.1.- Introducción.

Como ha sido mostrado en el apartado precedente, la distribución de la frecuencia de accidentes entre tramos es aproximada mediante una distribución de *Poisson*. Por ello la función de unión considerada es *la función logarítmica*, donde el modelo analizado viene dado por la Ecuación 7.35.

Como punto de partida, se consideran las variables explicativas objetivas definidas en el *Apartado 4*. Dichas variables han sido clasificadas en tres grupos principales (*Tabla 4.8*):

- Variables asociadas a la geometría.
- Variables asociadas a los ramales.
- Variables asociadas a la intensidad del tráfico.

El procedimiento de eliminación progresiva empleado para el desarrollo del modelo requiere la definición de un estadístico que permita el análisis de significación de los coeficientes de las variables estimados $\hat{\beta}_i$. De este modo, dicho análisis será realizado mediante la definición de los *intervalos de confianza* para dichos coeficientes individuales. Estos intervalos quedan definidos como sigue:

$$\hat{\beta}_i \pm t(\alpha/2;g) \cdot \hat{s}(\hat{\beta}_i) \quad (7.39.)$$

donde $\hat{s}(\hat{\beta}_i)$ es la estimación de la desviación típica o error estándar del coeficiente estimado calculada con g grados de libertad, y $t(\alpha/2;g)$ el valor correspondiente de la distribución t con g grados de libertad.

Tomando en consideración dicho intervalo con una significación del 95% ($\alpha = 0.05$), un coeficiente estimado será considerado como significativo (significativamente distinto del valor “ 0 “) en la muestra elegida cuando los valores contenidos en el intervalo de confianza no cambien de signo.

Al mismo tiempo, serán consideradas variables adicionales, procedentes de relaciones multiplicativas entre algunas de las definidas anteriormente. En este sentido, al relacionar multiplicativamente dos variables, deberá preverse a priori que ambas variables afecten a la variable respuesta en el mismo sentido, para evitar que efectos contrapuestos de ambas redunden en la no significación de la variable explicativa combinada definida.

Seguidamente, se presenta la aplicación de las fases previamente definidas al modelo de predicción de la frecuencia de accidentes entre tramos.

7.4.2.2.- Ajuste del modelo por eliminación progresiva.

El proceso de eliminación progresiva de variables de influencia, basado en los intervalos de confianza (*Ecuación 7.39.*), es aplicado en varias etapas sucesivas. Durante dicho proceso será tomado en consideración el criterio de bondad del ajuste basado en el parámetro $-2.L(\theta)$ (*Apartado 7.1.3.*).

Así, partiendo de las variables explicativas presentadas en la *Tabla 4.8.*, este proceso de eliminación es llevado a cabo mediante el análisis de significación de las mismas según los grupos principales, como son:

- Variables asociadas a la intensidad del tráfico.
- Variables asociadas a la geometría.
- Variables asociadas a los ramales.

Finalmente, será estimado el modelo final mediante la integración de las variables que han resultado significativas en cada una de las etapas previas. El ajuste del modelo final será mostrado en el *Apartado 7.4.2.3.*

Seguidamente, se presentan las etapas más destacables del proceso de eliminación progresiva abordado en la presente Tesis durante el ajuste del modelo de estimación de la frecuencia de accidentes en tramos de curva.

7.4.2.2.1.- *Variables asociadas a la geometría.*

FASE 1:

Las variables incluidas en el modelo de partida son todas las variables explicativas asociadas a la geometría consideradas en la *Tabla 4.8.*, junto a la variable asociada a la intensidad del tráfico (IMD) como variable de exposición de vehículos a la ocurrencia de accidentes.

Asimismo, las variables de velocidad máxima en curva (v_s) y de velocidad de aproximación (v_{ap}) no son consideradas de forma independiente dado que ambas están incluidas en la definición del factor de influencia de la velocidad en la curva (F_{vc}). Las variables incorporadas en la parte sistemática del modelo de predicción durante esta primera fase se listan a continuación:

- X_1 : IMD.
- X_2 : factor de influencia de la velocidad en la curva (F_{vc}).
- X_3 : factor de influencia de las curvas precedentes (F_{cp}).
- X_4 : factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (F_{visIC}).
- X_5 : factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (F_{visTC}).
- X_6 : factor de influencia de la señalización de la curva (F_{sc}).
- X_7 : longitud de curva (L_c).

Los valores de los coeficientes estimados en este modelo, así como el error estándar y el intervalo de confianza al 95% de cada uno de ellos, se muestra en la tabla siguiente (*Tabla 7.24.*).

| Coeficiente | Valor estimado | Error estándar | Intervalo de confianza (95%) | |
|-------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|
| | | | Valor inferior | Valor superior |
| β_0 | 2.517 | 1.324 | -0.107 | 5.142 |
| β_1 | $1.890 \cdot 10^{-6}$ | $9.865 \cdot 10^{-6}$ | $-17.66 \cdot 10^{-6}$ | $21.44 \cdot 10^{-6}$ |
| β_2 | -0.223 | 0.353 | -0.922 | 0.476 |
| β_3 | -1.063 | 1.113 | -3.269 | 1.143 |
| β_4 | -0.135 | 0.027 | -0.188 | -0.081 |
| β_5 | $-8.10 \cdot 10^{-3}$ | $3.98 \cdot 10^{-3}$ | $-16.00 \cdot 10^{-3}$ | $-0.20 \cdot 10^{-3}$ |
| β_6 | 0.359 | 0.209 | -0.057 | 0.775 |
| β_7 | $7.45 \cdot 10^{-4}$ | $2.53 \cdot 10^{-4}$ | $2.44 \cdot 10^{-4}$ | $12.47 \cdot 10^{-4}$ |

Tabla 7.24.- Coeficientes estimados en el modelo de estimación de la frecuencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a la geometría. FASE 1.

El análisis de significación propuesto, basado en el intervalo de confianza, muestra como significativas las siguientes variables explicativas:

- X_4 : factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (F_{visIC}).
- X_5 : factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (F_{visTC}).
- X_7 : longitud de curva (L_c).

En relación con las variables explicativas que no han resultado significativas, puede indicarse lo siguiente:

- X_1 (IMD): la intensidad media diaria no resulta significativa como variable de exposición. Así, y como será definido en la fase 3, uno de los índices de exposición más frecuentemente utilizados es el número de vehículos por kilómetro (veh.*km), el cual tomará en cuenta la presencia de tramos de curva con longitud no uniforme.
- X_2 (factor de influencia de la velocidad en la curva): esto es motivado en gran medida por los elevados valores de la velocidad máxima en curva de autovía en los tramos considerados en el presente trabajo (*Figura 7.36.*), lo cual posibilita en la mayoría de los casos la circulación a velocidades superiores a la máxima en curva en condiciones de seguridad.

- X_3 (factor de influencia de las curvas precedentes): la influencia de las características del itinerario precedente sobre el conductor es un factor destacable determinante de la actitud de éste ante los itinerarios posteriores. No obstante, la variable definida en el presente trabajo no ha resultado significativa en la muestra considerada, debido a que los tramos de curva analizados presentan gran homogeneidad desde el punto de vista de la velocidad máxima en curva, lo cual es indicativo de un diseño óptimo del trazado.
- X_6 (factor de influencia de la señalización de la curva): la señalización de los tramos de curva es un factor de gran importancia, especialmente en vías que permiten una elevada velocidad de circulación, como es el caso de las autovías. No obstante, la no significación de esta variable en la muestra evaluada está motivado por:
 - El diseño óptimo de los tramos de curva, con velocidades máximas en curva elevadas, hace innecesario la señalización de dichas curvas en la mayoría de los casos.
 - Las señales de limitación de velocidad en autovía por debajo de la velocidad genérica de la vía no son habitualmente tomadas en consideración por la mayoría de los conductores.

FASE 2:

Tomando en consideración los resultados de la fase precedente, las variables incorporadas en la parte sistemática del modelo de predicción durante esta fase se listan a continuación. Dichas variables han resultado significativas:

- X_1 : factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (F_{visIC}).
- X_2 : factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (F_{visTC}).
- X_3 : longitud de curva (L_c).

Los valores de los coeficientes estimados en este modelo, así como el error estándar y el intervalo de confianza al 95% de cada uno de ellos, se muestra en la tabla siguiente (*Tabla 7.25.*).

| Coeficiente | Valor estimado | Error estándar | Intervalo de confianza (95%) | |
|-------------|----------------------|----------------------|------------------------------|----------------------|
| | | | Valor inferior | Valor superior |
| β_0 | 1.765 | 0.273 | 1.224 | 2.305 |
| β_1 | -0.139 | 0.026 | -0.191 | -0.086 |
| β_2 | -0.013 | 0.004 | -0.020 | -0.006 |
| β_3 | $5.58 \cdot 10^{-4}$ | $2.16 \cdot 10^{-4}$ | $1.30 \cdot 10^{-4}$ | $9.87 \cdot 10^{-4}$ |

Tabla 7.25.- Coeficientes estimados en el modelo de estimación de la frecuencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a la geometría. FASE 2.

El análisis de significación propuesto, basado en el intervalo de confianza, muestra como significativas todas las variables explicativas consideradas en esta fase. Junto a esto, el valor del parámetro $-2 \cdot L(\theta)$ es:

$$-2 \cdot L(\theta) = 109$$

FASE 3:

Tras las fases precedentes, durante las cuales se ha evaluado la contribución a la parte sistemática del modelo de las variables explicativas consideradas de manera independiente, se aborda el análisis de significación de nuevas variables definidas como combinación de las identificadas en el *Apartado 4.4.2.*, y cuya influencia esperada sobre la ocurrencia de accidentes es más significativa que la de las variables independientes que las constituyen.

Durante esta fase 3 se define una nueva variable de exposición al riesgo de ocurrencia de accidentes (F_{exp}), dado que la variable de exposición (IMD) incluida en la fase 1 no ha resultado significativa. Así, uno de los índices de exposición más frecuentemente utilizados es el número de vehículos por kilómetro (veh.*km). Tomando esto en consideración, la nueva variable F_{exp} representa el número de vehículos por kilómetro promedio al día (veh.*km/día), y engloba conjuntamente el efecto de una intensidad de tráfico variable y de una longitud de tramo de curva no uniforme. Dicha variable quedará como sigue:

$$F_{exp} = IMD \cdot L_c \cdot 10^{-6} \quad (7.40.)$$

Tomando en consideración los resultados de la fase precedente así como la nueva variable de exposición definida, las variables incorporadas en la parte sistemática del modelo de predicción durante esta fase se listan a continuación:

- X_1 : factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (F_{visIC}).
- X_2 : factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (F_{visTC}).
- X_3 : variable de exposición F_{exp} .

Los valores de los coeficientes estimados en este modelo, así como el error estándar y el intervalo de confianza al 95% de cada uno de ellos, se muestra en la tabla siguiente (*Tabla 7.26.*).

| Coeficiente | Valor estimado | Error estándar | Intervalo de confianza (95%) | |
|-------------|-----------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------|
| | | | Valor inferior | Valor superior |
| β_0 | 1.583 | 0.264 | 1.060 | 2.106 |
| β_1 | -0.111 | 0.022 | -0.154 | -0.067 |
| β_2 | -0.012 | 0.004 | -0.019 | -0.005 |
| β_3 | $24.17 \cdot 10^{-4}$ | $8.36 \cdot 10^{-4}$ | $7.60 \cdot 10^{-4}$ | $40.74 \cdot 10^{-4}$ |

Tabla 7.26.- Coeficientes estimados en el modelo de estimación de la frecuencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a la geometría. FASE 3.

El análisis de significación propuesto, basado en el intervalo de confianza, muestra como significativas todas las variables explicativas consideradas en esta fase. Junto a esto, el valor del parámetro $-2.L(\theta)$ es:

$$-2 \cdot L(\theta) = 107$$

La comparación de este parámetro de bondad entre las fases 2 y 3 presenta una mejora (disminución de $-2.L(\theta)$) debida a la incorporación de la nueva variable de exposición F_{exp} .

FASE 4:

El análisis de significación llevado a cabo en la fase 1 ha concluido como no significativo el factor de influencia de la velocidad en curva F_{vC} al ser incorporado en el modelo como variable explicativa individual. Esto es motivado en gran medida por los elevados valores de la velocidad máxima en curva de autovía en los tramos considerados en el presente trabajo (*Figura 7.36.*), lo cual posibilita en la mayoría de los casos la circulación a velocidades superiores a la máxima en curva en condiciones de seguridad.

No obstante, es previsible la influencia de este factor de velocidad en función de la visibilidad de la geometría de la curva, dado que una buena percepción de la curva posibilita la adecuada elección de la velocidad de paso por los tramos de curva.

Así, se define una nueva variable (F_{TC}) que combina la influencia sobre la ocurrencia de accidentes del citado factor de influencia de la velocidad en curva (F_{vC}), y de la longitud del desarrollo de la curva percibida (F_{visTC}), considerando que la influencia negativa de una posible velocidad de aproximación elevada (favorecida por las características geométricas del trazado previo a la curva) se ve agravada por una falta de visibilidad del trazado del tramo de curva.

No obstante, y según han sido definidas ambas variables explicativas, afectan a la variable respuesta en sentidos contrapuestos:

-El incremento de F_{vC} implica un incremento potencial del riesgo de accidentalidad.

-El incremento de F_{visTC} representa un incremento del porcentaje (%) del tramo de curva percibido desde el punto de percepción de la curva, lo cual implica un decremento potencial del riesgo de accidentalidad.

Ante esto, la variable F_{TC} quedará definida como sigue:

$$F_{TC} = F_{vC} \cdot (100 - F_{visTC}) \quad (7.41.)$$

Previsiblemente, el incremento de ambas variables favorece un incremento del número de accidentes.

Tomando en consideración los resultados de la fase precedente así como la nueva variable explicativa definida, las variables incorporadas en la parte sistemática del modelo de predicción durante esta fase se listan a continuación:

- X_1 : factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (F_{visIC}).
- X_2 : variable combinada F_{TC} .
- X_3 : variable de exposición F_{exp} .

Los valores de los coeficientes estimados en este modelo, así como el error estándar y el intervalo de confianza al 95% de cada uno de ellos, se muestra en la tabla siguiente (Tabla 7.27.).

| Coeficiente | Valor estimado | Error estándar | Intervalo de confianza (95%) | |
|-------------|-----------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------|
| | | | Valor inferior | Valor superior |
| β_0 | 0.559 | 0.238 | 0.087 | 1.031 |
| β_1 | -0.114 | 0.024 | -0.163 | -0.067 |
| β_2 | $5.75 \cdot 10^{-3}$ | $1.98 \cdot 10^{-3}$ | $1.83 \cdot 10^{-3}$ | $9.68 \cdot 10^{-3}$ |
| β_3 | $37.68 \cdot 10^{-4}$ | $7.42 \cdot 10^{-4}$ | $22.97 \cdot 10^{-4}$ | $52.39 \cdot 10^{-4}$ |

Tabla 7.27.- Coeficientes estimados en el modelo de estimación de la frecuencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a la geometría. FASE 4.

El análisis de significación propuesto, basado en el intervalo de confianza, muestra como significativas todas las variables explicativas consideradas en esta fase. Junto a esto, el valor del parámetro $-2 \cdot L(\theta)$ es:

$$-2 \cdot L(\theta) = 104$$

La comparación de este parámetro de bondad entre las fases 3 y 4 presenta una mejora (disminución de $-2 \cdot L(\theta)$) debida a la incorporación de la nueva variable F_{TC} .

FASE 5:

En la fase precedente, es esperable que el incremento de las variables F_{TC} y F_{exp} favorezca un incremento del número de accidentes. Esto es confirmado por el signo positivo de los coeficientes estimados en el modelo para ambas variables.

Frente a esto, el incremento de la variable F_{visIC} provoca la disminución de la frecuencia de accidentes. Por ello, y con objeto de mantener un criterio homogéneo en el sentido de influencia de las variables explicativas sobre el riesgo de accidentalidad, es redefinido el factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva como sigue:

$$F_{visIC}^* = \frac{1}{F_{visIC}} \quad (7.42.)$$

Tomando en consideración los resultados de la fase precedente así como la nueva variable explicativa definida, las variables incorporadas en la parte sistemática del modelo de predicción durante esta fase se listan a continuación:

- X_1 : variable combinada F_{visIC}^* .
- X_2 : variable combinada F_{TC} .
- X_3 : variable de exposición F_{exp} .

Los valores de los coeficientes estimados en este modelo, así como el error estándar y el intervalo de confianza al 95% de cada uno de ellos, se muestra en la tabla siguiente (Tabla 7.28.).

| Coeficiente | Valor estimado | Error estándar | Intervalo de confianza (95%) | |
|-------------|-----------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------|
| | | | Valor inferior | Valor superior |
| β_0 | -1.635 | 0.269 | -2.167 | -1.102 |
| β_1 | 6.292 | 0.857 | 4.593 | 7.992 |
| β_2 | $7.87 \cdot 10^{-3}$ | $1.80 \cdot 10^{-3}$ | $4.29 \cdot 10^{-3}$ | $11.44 \cdot 10^{-3}$ |
| β_3 | $45.42 \cdot 10^{-4}$ | $7.16 \cdot 10^{-4}$ | $31.23 \cdot 10^{-4}$ | $59.61 \cdot 10^{-4}$ |

Tabla 7.28.- Coeficientes estimados en el modelo de estimación de la frecuencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a la geometría. FASE 5.

El análisis de significación propuesto, basado en el intervalo de confianza, muestra como significativas todas las variables explicativas consideradas en esta fase. Junto a esto, el valor del parámetro $-2 \cdot L(\theta)$ es:

$$-2 \cdot L(\theta) = 97$$

La comparación de este parámetro de bondad entre las fases 4 y 5 presenta una mejora (disminución de $-2 \cdot L(\theta)$) debida a la incorporación de la nueva variable F_{visIC}^* .

7.4.2.2.2.- Variables asociadas a los ramales de acceso.

FASE 6:

Las variables incluidas en el modelo de partida son todas las variables explicativas asociadas a los ramales de acceso consideradas en la Tabla 4.8., junto a la variable de exposición F_{exp} definida en la Fase 3. De este modo, las variables incorporadas en la parte sistemática del modelo de predicción durante esta fase se listan a continuación:

- X_1 : factor de influencia de la configuración del ramal de acceso (F_{cRA}).
- X_2 : factor de influencia de la velocidad en el ramal de acceso (F_{vRA}).
- X_3 : factor de influencia de la visibilidad del ramal de acceso (F_{visRA}).
- X_4 : variable de exposición F_{exp} .

Los valores de los coeficientes estimados en este modelo, así como el error estándar y el intervalo de confianza al 95% de cada uno de ellos, se muestra en la tabla siguiente (Tabla 7.29.).

| Coeficiente | Valor estimado | Error estándar | Intervalo de confianza (95%) | |
|-------------|----------------|----------------|------------------------------|----------------|
| | | | Valor inferior | Valor superior |
| β_0 | -0.129 | 1.117 | -2.398 | 2.139 |
| β_1 | 0.329 | 0.171 | -0.019 | 0.6772 |
| β_2 | -0.002 | 0.007 | -0.018 | 0.013 |
| β_3 | -0.039 | 0.030 | -0.101 | 0.023 |
| β_4 | 0.002 | 0.002 | -0.002 | 0.006 |

Tabla 7.29.- Coeficientes estimados en el modelo de estimación de la frecuencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a los ramales de acceso. FASE 6.

El análisis de significación propuesto, basado en el intervalo de confianza, muestra como no significativas todas las variables explicativas consideradas en esta fase. No obstante, podría producirse la situación que la incorporación de un número excesivo de variables explicativas en la parte sistemática del modelo impidiera destacar la influencia de alguna de ellas sobre la variable respuesta.

Debido a ello, se continúa el análisis de significación mediante la eliminación progresiva de las variables de menor influencia esperada sobre el riesgo de ocurrencia de accidentes.

FASE 7:

Dada la importancia de los ramales de acceso sobre el riesgo de ocurrencia de accidentes por su efecto perturbador del flujo de tráfico, se continúa el análisis de significación de las variables explicativas asociadas a estos ramales. Así, se irán eliminando progresivamente las variables explicativas con una menor influencia esperada.

De este modo, en esta fase será eliminado el factor de influencia de la velocidad en el ramal de acceso (F_{vRA}). El coeficiente estimado de dicho factor, como se muestra en la tabla precedente, es el que presenta mayor error de estimación (error estándar). Esto es debido a que la influencia negativa de una velocidad de circulación elevada en el punto de intersección de la vía principal con el ramal de acceso está contrarrestada parcialmente por la existencia de varios carriles en cada sentido de circulación en tramos de autovía, lo cual reduce la interferencia entre los dos flujos de tráfico encontrados.

Las variables incorporadas en la parte sistemática del modelo de predicción durante esta fase se listan a continuación:

- X_1 : factor de influencia de la configuración del ramal de acceso (F_{cRA}).
- X_2 : factor de influencia de la visibilidad del ramal de acceso (F_{visRA}).
- X_3 : variable de exposición F_{exp} .

Los valores de los coeficientes estimados en este modelo, así como el error estándar y el intervalo de confianza al 95% de cada uno de ellos, se muestra en la tabla siguiente (*Tabla 7.30.*).

| Coeficiente | Valor estimado | Error estándar | Intervalo de confianza (95%) | |
|-------------|----------------|----------------|------------------------------|----------------|
| | | | Valor inferior | Valor superior |
| β_0 | -0.478 | 0.607 | -1.710 | 0.753 |
| β_1 | 0.360 | 0.146 | 0.064 | 0.656 |
| β_2 | -0.031 | 0.027 | -0.086 | 0.023 |
| β_3 | 0.002 | 0.002 | -0.002 | 0.006 |

Tabla 7.30.- Coeficientes estimados en el modelo de estimación de la frecuencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a los ramales de acceso. FASE 7.

El análisis de significación propuesto, basado en el intervalo de confianza, muestra como significativo el factor de influencia de la configuración del ramal de acceso (F_{cRA}). Junto a esto, el valor del parámetro $-2 \cdot L(\theta)$ es:

$$-2 \cdot L(\theta) = 40$$

FASE 8:

El análisis de significación llevado a cabo en la fase precedente ha concluido como no significativo el factor de influencia de la visibilidad del ramal de acceso, al ser incorporado en el modelo como variable explicativa individual. No obstante, la influencia de la configuración del ramal de acceso resultante de la fase precedente puede verse acentuada por la visibilidad de dicho ramal.

Debido a esto, se define una variable combinada de influencia del ramal de acceso a la autovía (F_{RA}). Dicha variable engloba la influencia sobre la ocurrencia de accidentes de la configuración del ramal (F_{cRA}), y de la visibilidad del mismo (F_{visRA}), considerando que la influencia negativa de una inadecuada configuración de dicho ramal se ve incrementada por una falta de visibilidad del mismo.

No obstante, y según han sido definidas ambas variables, afectan a la variable respuesta en sentidos contrapuestos:

-El incremento de F_{cRA} representa un empeoramiento de las condiciones de configuración, lo cual implica un incremento potencial del riesgo de accidentalidad.

-El incremento de F_{visRA} representa un incremento del tiempo de visibilidad del ramal, lo cual implica un decremento potencial del riesgo de accidentalidad.

Ante esto, la variable F_{RA} quedará definida como sigue:

$$F_{RA} = \frac{F_{cRA}}{F_{visRA}} \quad (7.43.)$$

Previsiblemente, el incremento de ambas variables favorece un incremento del número de accidentes.

Las variables incorporadas en la parte sistemática del modelo de predicción durante esta fase se listan a continuación:

- X_1 : variable F_{RA} .
- X_2 : variable de exposición F_{exp} .

Los valores de los coeficientes estimados en este modelo, así como el error estándar y el intervalo de confianza al 95% de cada uno de ellos, se muestra en la tabla siguiente (*Tabla 7.31.*).

| Coeficiente | Valor estimado | Error estándar | Intervalo de confianza (95%) | |
|-------------|----------------|----------------|------------------------------|----------------|
| | | | Valor inferior | Valor superior |
| β_0 | -0.567 | 0.401 | -1.381 | 0.246 |
| β_1 | 2.546 | 1.063 | 0.392 | 4.699 |
| β_2 | 0.002 | 0.002 | -0.002 | 0.006 |

Tabla 7.31.- Coeficientes estimados en el modelo de estimación de la frecuencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a los ramales de acceso. FASE 8.

El análisis de significación propuesto, basado en el intervalo de confianza, muestra como significativo la variable del ramal de acceso F_{RA} . Junto a esto, el valor del parámetro $-2.L(\theta)$ es:

$$-2 \cdot L(\theta) = 36$$

La comparación de este parámetro de bondad entre las fases 7 y 8 presenta una mejora (disminución de $-2.L(\theta)$) debida a la incorporación de la nueva variable F_{CA} .

7.4.2.2.3.- Variables asociadas a los ramales de salida.

FASE 9:

Las variables incluidas en el modelo de partida son todas las variables explicativas asociadas a los ramales de salida consideradas en la *Tabla 4.8.*, junto a la variable de exposición F_{exp} definida en la *Fase 3.* De este modo, las variables incorporadas en la parte sistemática del modelo de predicción durante esta fase se listan a continuación:

- X_1 : variable de configuración del ramal de salida (F_{cRS}^*). Inicialmente, se considera una variable definida con el criterio de la variable precedente F_{cRA} . No obstante, la variable así definida no resulta significativa para la muestra de datos recogida, debido a que ésta presenta una variabilidad reducida.

Por ello, y para tener en cuenta en el modelo la presencia de ramales de salida en tramos de curva de autovía, se define una variable explicativa simplificada que tome en consideración la configuración del ramal de salida. Así, será incorporada la variable binaria definida como sigue:

- *Estado "0"*: el tramo de curva no presenta ramal de salida, o existiendo, posee señalización adecuada (señalización de peligro de empalme) y longitud de carril también adecuada (longitud superior a 50 m).
- *Estado "1"*: el tramo de curva presenta ramal de salida con condiciones inadecuadas de señalización y de longitud de carril de salida.

- X_2 : factor de influencia de la velocidad en el ramal de salida (F_{vRS}).
- X_3 : factor de influencia de la visibilidad del ramal de salida (F_{visRS}).
- X_4 : variable de exposición F_{exp} .

Los valores de los coeficientes estimados en este modelo, así como el error estándar y el intervalo de confianza al 95% de cada uno de ellos, se muestra en la tabla siguiente (*Tabla 7.32.*).

| Coeficiente | Valor estimado | Error estándar | Intervalo de confianza (95%) | |
|-------------|----------------|----------------|------------------------------|----------------|
| | | | Valor inferior | Valor superior |
| β_0 | -0.456 | 1.265 | -2.226 | 3.138 |
| β_1 | 2.701 | 0.597 | 1.436 | 3.967 |
| β_2 | 0.007 | 0.010 | -0.013 | 0.028 |
| β_3 | -0.053 | 0.028 | -0.113 | 0.007 |
| β_4 | -0.029 | 0.015 | -0.061 | 0.002 |

Tabla 7.32.- Coeficientes estimados en el modelo de estimación de la frecuencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a los ramales de salida. FASE 9.

El análisis de significación propuesto muestra como significativo la variable de configuración del ramal de salida. No obstante, podría producirse la situación que la incorporación de un número excesivo de variables explicativas en la parte sistemática del modelo impidiera destacar la influencia de alguna de ellas sobre la variable respuesta. Debido a ello, ha sido realizado un análisis similar al efectuado sobre las variables asociadas a los ramales de acceso, no resultando significativas ninguna otra variable individual ni combinaciones de las mismas.

7.4.2.2.4.- Variables asociadas a los ramales.

FASE 10:

Las variables incluidas en el modelo son todas las variables explicativas asociadas a los ramales de acceso y salida y que han resultado significativas en las fases precedentes, junto a la variable de exposición F_{exp} definida en la Fase 3 y el factor de influencia de los ramales adyacentes (Tabla 4.8.). De este modo, las variables incorporadas en la parte sistemática del modelo de predicción durante esta fase se listan a continuación:

- X_1 : variable F_{RA} .
- X_2 : variable de configuración del ramal de salida (F^*_{CRS}).
- X_3 : factor de influencia de ramales adyacentes (F_T).
- X_4 : variable de exposición F_{exp} .

Los valores de los coeficientes estimados en este modelo, así como el error estándar y el intervalo de confianza al 95% de cada uno de ellos, se muestra en la tabla siguiente (Tabla 7.33.).

| Coeficiente | Valor estimado | Error estándar | Intervalo de confianza (95%) | |
|-------------|----------------|----------------|------------------------------|----------------|
| | | | Valor inferior | Valor superior |
| β_0 | -0.636 | 0.429 | -1.508 | 0.235 |
| β_1 | 2.567 | 1.136 | 0.260 | 4.874 |
| β_2 | 0.489 | 0.731 | -0.994 | 1.974 |
| β_3 | 0.583 | 0.385 | -0.198 | 1.365 |
| β_4 | 0.002 | 0.002 | -0.002 | 0.006 |

Tabla 7.33.- Coeficientes estimados en el modelo de estimación de la frecuencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a los ramales. FASE 10.

El análisis de significación propuesto muestra únicamente como significativa la variable combinada de influencia del ramal de acceso.

7.4.2.3.- Ajuste del modelo final.

Tras el proceso de eliminación progresiva, y tomando en consideración los resultados del análisis de significación de las variables explicativas (Apartado 7.4.2.2.), se estima el modelo final, el cual integra las variables de exposición, las asociadas a la geometría y las asociadas a los ramales.

De este modo, las variables incorporadas en la parte sistemática del modelo de predicción y que han resultado significativas se listan a continuación:

- X_1 : variable de exposición F_{exp} .
- X_2 : variable asociada a los ramales de acceso F_{RA} .
- X_3 : variable de configuración del ramal de salida F_{cRS}^* .
- X_4 : variable asociada a la geometría F_{visIC}^* .
- X_5 : variable asociada a la geometría F_{TC} .

El modelo así estimado quedará definido como sigue:

$$\hat{Y} = e^{\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \cdot X_1 + \hat{\beta}_2 \cdot X_2 + \hat{\beta}_3 \cdot X_3 + \hat{\beta}_4 \cdot X_4 + \hat{\beta}_5 \cdot X_5} \quad (7.44.)$$

donde:

- X_i : variables explicativas del modelo.
- $\hat{\beta}_i$: coeficientes estimados de las variables explicativas.
- \hat{Y} : variable respuesta estimada “*número de accidentes en tramos de curva*”, acumulados durante los años de 1994, 1995 y 1996.

Los valores de los coeficientes estimados en dicho modelo, así como el error estándar y el intervalo de confianza al 95% de cada uno de ellos, se muestra en la tabla siguiente (*Tabla 7.34.*).

| Coeficiente | Valor estimado | Error estándar | Intervalo de confianza (95%) | |
|-------------|----------------|----------------|------------------------------|----------------|
| | | | Valor inferior | Valor superior |
| β_0 | -2,144 | 0,301 | -2,741 | -1,547 |
| β_1 | 0,063 | 0,007 | 0,048 | 0,080 |
| β_2 | 3,071 | 0,508 | 2,064 | 4,078 |
| β_3 | 0,934 | 0,181 | 0,575 | 1,292 |
| β_4 | 7,051 | 0,796 | 5,473 | 8,628 |
| β_5 | 0,008 | 0,001 | 0,005 | 0,010 |

Tabla 7.34.- Coeficientes estimados en el modelo de estimación de la frecuencia de accidentes en tramos de curva. Modelo final.

A partir de los resultados mostrados en la tabla precedente, puede concluirse lo siguiente:

- Todos los coeficientes finalmente considerados en el modelo resultan significativos, conforme al criterio previamente definido, como resultado del proceso de eliminación progresiva de variables explicativas.

- Las variables explicativas X_i consideradas han sido definidas de modo que su incremento previsiblemente induce un incremento del número de accidentes. Así, el signo de los coeficientes estimados (todos positivos, excepto el término independiente), corresponde con el sentido de influencia esperado de cada una de dichas variables sobre la variable respuesta.

7.4.2.4.- Análisis de multicolinealidad.

El problema de la *multicolinealidad* surge cuando se pretende la misión imposible de extraer de la muestra más información que la que contiene. Dicho problema afectará mucho a la precisión de la estimación de los coeficientes β_i , ya que la muestra no contiene información sobre los efectos de una variable cuando las demás permanecen constantes.

El análisis de multicolinealidad se lleva a cabo mediante la matriz de correlación R . Los valores de la misma en el modelo estimado se muestra en la tabla siguiente (*Tabla 7.35.*).

| R | β_0 | β_1 | β_2 | β_3 | β_4 | β_5 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| β_0 | 1 | -0,73 | -0,71 | -0,33 | -0,31 | -0,56 |
| β_1 | -0,73 | 1 | 0,49 | 0,32 | 0,53 | 0,15 |
| β_2 | -0,71 | 0,49 | 1 | 0,43 | 0,38 | 0,46 |
| β_3 | -0,33 | 0,32 | 0,43 | 1 | -0,04 | 0,24 |
| β_4 | -0,31 | 0,53 | 0,38 | -0,04 | 1 | 0,23 |
| β_5 | -0,56 | 0,15 | 0,46 | 0,24 | 0,23 | 1 |

Tabla 7.35.- Matriz de correlación de los coeficientes estimados en el modelo. Modelo final de estimación de la frecuencia de accidentes.

Posteriormente, la identificación de variables colineales puede ser llevado a cabo como sigue:

- 1.- *La matriz de correlación entre las variables explicativas R .*

Uno de los procedimientos de evaluación del problema de multicolinealidad se basa en los términos diagonales de la matriz inversa de la matriz de correlación R^{-1} . Los valores de la misma en el modelo estimado se muestra en la tabla siguiente (*Tabla 7.36.*).

| R^{-1} | β_0 | β_1 | β_2 | β_3 | β_4 | β_5 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| β_0 | 7,2 | 5,14 | 2,75 | -1,2 | -2,24 | 2,75 |
| β_1 | 5,14 | 5,47 | 1,52 | -1,33 | -2,45 | 2,2 |
| β_2 | 2,75 | 1,52 | 2,88 | -0,98 | -1,22 | 0,47 |
| β_3 | -1,2 | -1,33 | -0,98 | 1,64 | 0,93 | -0,61 |
| β_4 | -2,24 | -2,45 | -1,22 | 0,93 | 2,39 | -1,1 |
| β_5 | 2,75 | 2,2 | 0,47 | -0,61 | -1,1 | 2,37 |

Tabla 7.36.- Matriz inversa de la matriz de correlación de los coeficientes estimados en el modelo. Modelo final de estimación de la frecuencia de accidentes.

Como ha sido definido previamente, elementos diagonales grandes (tomando como criterio valores mayores que 10 (Peña, D., 1989 [41])), en la matriz R^{-1} indican alta multicolinealidad. Los valores de estos elementos en el modelo estimado son significativamente menores que 10, por lo que puede concluirse que los coeficientes estimados en el modelo no presentan previsiblemente problemas de multicolinealidad.

2.- Las raíces y vectores característicos de la matriz R .

Otro método de análisis del problema de multicolinealidad se basa en las raíces características de la matriz de correlación. Para ello, ha sido definido el *índice de condicionamiento IC* (Ecuación 7.38.). De este modo, el valor de dicho índice en el modelo estimado es:

$$IC = 1.70$$

Así, es admitido que (Peña, D., 1989 [41]):

- Alta multicolinealidad: $IC > 30$
- Moderada multicolinealidad: $10 < IC < 30$
- Baja multicolinealidad: $IC < 10$

El valor de IC calculado es inferior a 10, por lo que puede concluirse (como ha sido evaluado en el análisis de los elementos de la diagonal de la inversa de la matriz de correlación) que los coeficientes estimados en el modelo no presentan previsiblemente problemas de multicolinealidad.

7.4.2.5.- Diagnosis de la bondad del ajuste.

Uno de los criterios de cuantificación de la bondad del ajuste del modelo se establece sobre el parámetro $-2.L(\hat{\theta})$. Así, el modelo estimado será óptimo cuando minimice dicho parámetro de evaluación. Al mismo tiempo, si se efectúa un análisis de incorporación sucesiva de variables explicativas en el modelo, podrá evaluarse la mejora introducida por cada una de ellas a partir del análisis comparativo basado en el parámetro mostrado.

Así, se ha llevado cabo la diagnosis del modelo estimado mediante dicho parámetro. Para ello, y partiendo del modelo más sencillo (modelo con únicamente el término independiente β_0), se ha efectuado la incorporación sucesiva de las variables explicativas consideradas hasta conformar el modelo estimado completo. El valor del parámetro definido en cada uno de los modelos considerados se muestra en la tabla siguiente (Tabla 7.37.), y en la Figura 7.63.

| Modelo | $-2.L(\hat{\theta})$ |
|---|----------------------|
| β_0 | 182 |
| $\beta_0 + \beta_1$ | 161 |
| $\beta_0 + \beta_1 + \beta_2$ | 149 |
| $\beta_0 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_3$ | 128 |
| $\beta_0 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4$ | 97 |
| $\beta_0 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 + \beta_5$ | 88 |

Tabla 7.37.- Mejora del parámetro “ $-2.L(\hat{\theta})$ ” por incorporación sucesiva de variables explicativas en el modelo. Modelo final de estimación de la frecuencia de accidentes.

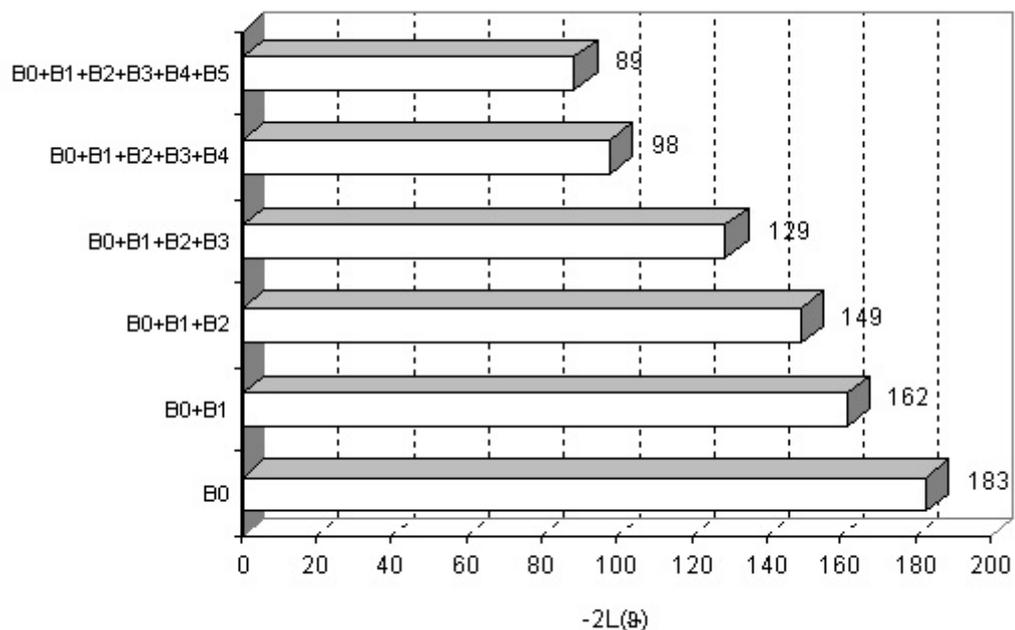


Figura 7.63.- Representación de la mejora del parámetro “ $-2.L(\hat{\theta})$ ” por incorporación sucesiva de variables explicativas en el modelo. Modelo final de estimación de la frecuencia de accidentes.

El análisis de los valores obtenidos del parámetro $-2.L(\hat{\theta})$ permite concluir lo siguiente:

- 1.- La incorporación sucesiva al modelo de las variables explicativas consideradas minimiza el valor de dicho parámetro, esto es, se mejora el ajuste del modelo de estimación de la frecuencia de accidentes en tramos de curva a los datos observados.
- 2.- La incorporación de variables adicionales podría inducir mejoras en dicho modelo. No obstante, el resto de las variables explicativas objetivas consideradas durante el proceso de eliminación progresiva han resultado no significativas en la muestra analizada en el presente trabajo de investigación.

Por otro lado, la bondad del ajuste puede ser evaluada a nivel global a partir de la relación lineal entre la variable respuesta predicha y la variable respuesta observada. Así, en la siguiente figura (Figura 7.64.) se muestra la evolución de dicha variable predicha frente a la observada.

A partir de estos valores, se ha llevado a cabo un análisis de regresión lineal entre ambas variables. Este análisis permite la estimación de una recta de regresión lineal (ajustada por mínimos cuadrado) para la estimación de la variable predicha por el modelo, a partir de los valores de la variable observada.

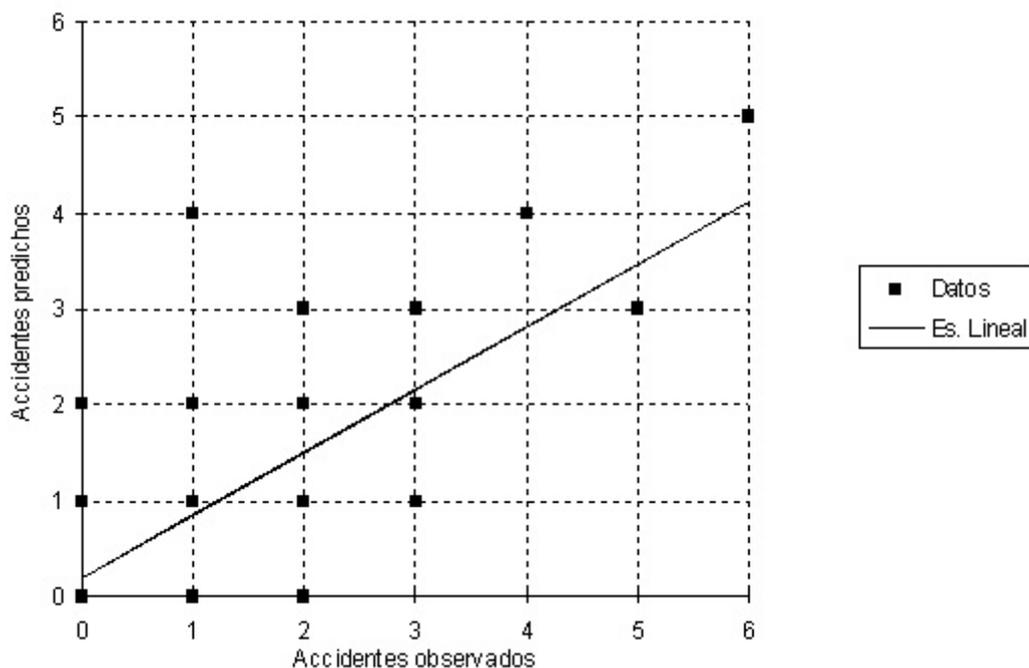


Figura 7.64.- Relación lineal entre la variable respuesta predicha y la variable respuesta observada. Modelo final de estimación de la frecuencia de accidentes.

Como parámetro de cuantificación global de la relación entre ambas variables, se define el coeficiente de correlación lineal entre las mismas r , el cual vendrá dado por la siguiente expresión:

$$r = \frac{\text{Cov}(x,y)}{s_x \cdot s_y} \quad (7.45.)$$

donde:

- x: variable respuesta observada.
- y: variable respuesta predicha.
- Cov(x, y): covarianza entre x e y.
- s_x, s_y : estimadores de la desviación típica de cada una de las variables.

Los valores de dicho parámetro están comprendidos entre “ 0 “ (no existe relación lineal entre ambas variables), y “ 1 “ (dependencia completa entre las variables). El valor de dicho parámetro en la muestra analizada es: $r = 0.77$

7.4.2.6.- Análisis de sensibilidad de los coeficientes estimados.

Durante el proceso de estimación de la variable respuesta a partir de las variables explicativas, es probable que no haya sido considerada alguna variable relevante o que, siendo tenida en cuenta, no haya resultado significativa en el proceso de ajuste, debido a la variabilidad de la muestra tomada. Ante este hecho, es importante la realización de un análisis que permita evaluar la sensibilidad de los coeficientes estimados cuando alguna de las variables significativas es excluida.

Para ello, se lleva a cabo un *análisis de sensibilidad*, evaluando la variabilidad que se induce en los coeficientes estimados de las variables explicativas cuando cada una de ellas es sucesivamente excluida del modelo. La evolución de dichos coeficientes en el análisis efectuado se muestra en la siguiente figura (Figura 7.65.).

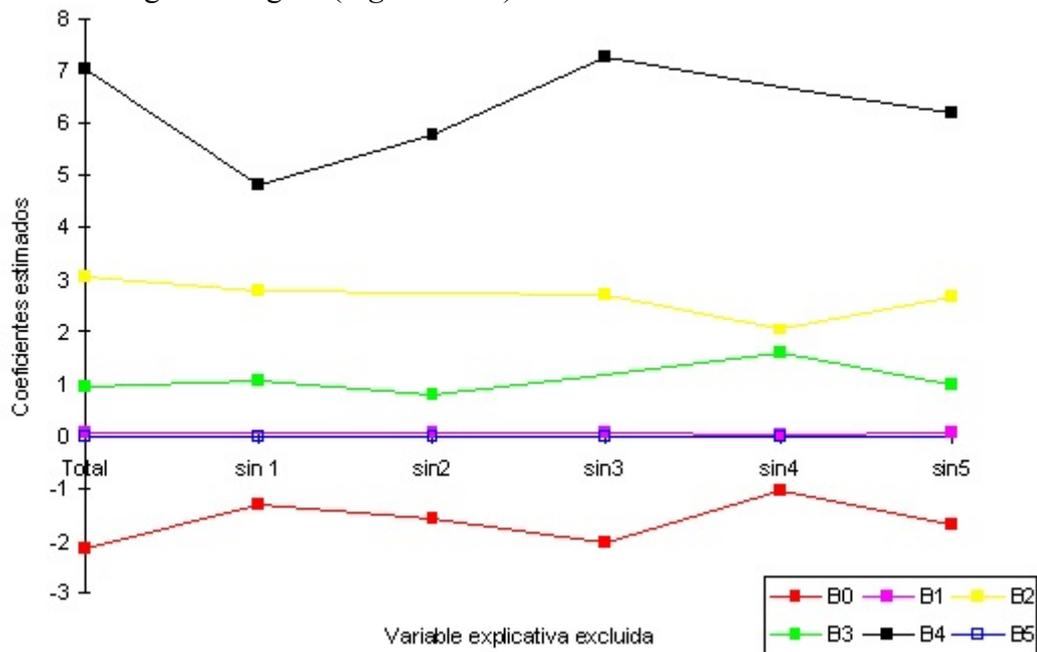


Figura 7.65.- *Análisis de sensibilidad de los coeficientes estimados de las variables explicativas. Modelo final de estimación de la frecuencia de accidentes.*

Los valores de los coeficientes estimados en el proceso de exclusión sucesiva de variables es mostrado en la tabla siguiente (Tabla 7.38.). Al mismo tiempo, se presenta la variabilidad de dichos coeficientes, evaluada a partir de la desviación típica en torno al valor medio.

| Coeficiente | Variable excluida | | | | | | Valor medio | Desviación típica |
|-------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|-------------|-------------------|
| | β_1 | β_2 | β_3 | β_4 | β_5 | Ninguna | | |
| β_0 | -1,28 | -1,56 | -2,02 | -1,02 | -1,66 | -2,14 | -1,61 | 0,43 |
| β_1 | 0,06 | 0,05 | 0,06 | 0,05 | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,01 |
| β_2 | 2,81 | 2,77 | 2,73 | 2,04 | 2,67 | 3,07 | 2,68 | 0,34 |
| β_3 | 1,04 | 0,78 | 1,18 | 1,58 | 0,97 | 0,93 | 1,08 | 0,28 |
| β_4 | 4,81 | 5,77 | 7,28 | 6,72 | 6,16 | 7,05 | 6,3 | 0,92 |
| β_5 | 0,008 | 0,007 | 0,007 | 0,008 | 0,004 | 0,008 | 0,007 | 0,001 |

Tabla 7.38.- Valores de los coeficientes estimados de las variables explicativas en el análisis de sensibilidad. Modelo final de estimación de la frecuencia de accidentes.

Considerando un modelo de distribución normal para los coeficientes estimados mostrados en la tabla precedente, se definen los intervalos de confianza al 95%, como se muestran en la tabla siguiente (Tabla 7.39.)

| Coeficiente | Valor medio | Desviación típica | Intervalo de confianza (95%) | |
|-------------|-------------|-------------------|------------------------------|----------------|
| | | | Valor inferior | Valor superior |
| β_0 | -1,61 | 0,43 | -2,45 | -0,77 |
| β_1 | 0,06 | 0,01 | 0,04 | 0,08 |
| β_2 | 2,68 | 0,34 | 2,01 | 3,35 |
| β_3 | 1,08 | 0,28 | 0,53 | 1,63 |
| β_4 | 6,3 | 0,92 | 4,5 | 8,1 |
| β_5 | 0,007 | 0,001 | 0,005 | 0,010 |

Tabla 7.39.- Intervalos de confianza para los valores de los coeficientes estimados en el análisis de sensibilidad. Modelo final de estimación de la frecuencia de accidentes.

A partir de los resultados mostrados en la tabla precedente, puede concluirse lo siguiente:

- Los intervalos de confianza han sido definidos a partir de los coeficientes estimados en el análisis de sensibilidad. Tomando en consideración un intervalo con una significación del 95%, un coeficiente estimado será considerado como significativo (significativamente distinto del valor “ 0 “) cuando los valores contenidos en el intervalo de confianza no cambien de signo.
- Todos los coeficientes obtenidos resultan significativos, conforme al criterio previamente definido, como resultado del proceso de eliminación sucesiva de variables explicativas.
- La exclusión de alguna de las variables significativas no induce una variabilidad significativa en el resto de los coeficientes estimados.

7.4.3.- MODELO DE ESTIMACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE ACCIDENTES EN TRAMOS DE CURVA.

7.4.3.1.- Introducción.

La predicción de la probabilidad de ocurrencia de accidentes requiere la definición de una variable respuesta binaria “*Tramo de concentración de accidentes*”, la cual será estimada conforme a un modelo de *regresión logística*. Así, el modelo analizado vendrá dado por la *Ecuación 7.35*.

El proceso de estimación de dicho modelo así como el análisis de diagnóstico del mismo, es mostrado a continuación.

Como punto de partida, se consideran las variables explicativas objetivas definidas en el *Apartado 4*. Al mismo tiempo, serán consideradas variables adicionales, procedentes de relaciones multiplicativas entre algunas de las definidas anteriormente. En este sentido, al relacionar multiplicativamente dos variables, deberá preverse a priori que ambas variables afecten a la variable respuesta en el mismo sentido, para evitar que efectos contrapuestos de ambas redunden en la no significación de la variable explicativa combinada definida.

El procedimiento de eliminación progresiva empleado para el desarrollo del modelo requiere la definición de un estadístico que permita el análisis de significación de los coeficientes de las variables estimados $\hat{\beta}_i$. De este modo, dicho análisis será realizado mediante la definición del *estadístico de Wald* para dichos coeficientes individuales.

El estadístico de Wald tiene una distribución de chi-cuadrado. Dicho parámetro viene definido como sigue:

$$Wald_i = \left(\frac{\text{Coeficiente estimado}_i}{\text{Desviación típica}_i} \right)^2 \quad (7.45.)$$

Seguidamente, es evaluado el nivel de significación de dicho estadístico. Tomando en consideración dicho nivel, un coeficiente estimado será considerado como significativo (significativamente distinto del valor “ 0 “) en la muestra elegida cuando el valor del nivel de significación del estadístico de Wald calculado para el mismo sea inferior a 0,05.

Seguidamente, se presenta la aplicación de las fases previamente definidas (*Apartado 7.4.1.*) al modelo de predicción de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos.

7.4.3.2.- Ajuste del modelo por eliminación progresiva.

El proceso de eliminación progresiva de variables de influencia, basado en el nivel de significación del estadístico de Wald (*Ecuación 7.45.*), es aplicado en varias etapas sucesivas. Durante dicho proceso será tomado en consideración el criterio de bondad del ajuste basado en el parámetro $-2.L(\theta)$ (*Apartado 7.1.3.*).

Así, partiendo de las variables explicativas presentadas en la *Tabla 4.14.*, este proceso de eliminación es llevado a cabo mediante el análisis de significación de las mismas según los grupos principales, como son:

- Variables asociadas a las condiciones del tráfico.
- Variables asociadas a la geometría.
- Variables asociadas a los ramales.

Finalmente, será estimado el modelo final mediante la integración de las variables que han resultado significativas en cada una de las etapas previas. El ajuste del modelo final será mostrado en el *Apartado 7.4.3.3.*

Seguidamente, se presentan las etapas más destacables del proceso de eliminación progresiva abordado en la presente Tesis durante el ajuste del modelo de predicción de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva.

7.4.3.2.1.- *Variables asociadas a la geometría.*

FASE 1:

Las variables incluidas en el modelo de partida son todas las variables explicativas asociadas a la geometría consideradas en la *Tabla 4.8.*, junto a la variable asociada a la intensidad del tráfico (IMD) como variable de exposición de vehículos a la ocurrencia de accidentes.

Asimismo, las variables de velocidad máxima en curva (v_s) y de velocidad de aproximación (v_{ap}) no son consideradas de forma independiente dado que ambas están incluidas

en la definición del factor de influencia de la velocidad en la curva (F_{vc}). Las variables incorporadas en la parte sistemática del modelo de predicción durante esta primera fase se listan a continuación:

- X_1 : IMD.
- X_2 : factor de influencia de la velocidad en la curva (F_{vc}).
- X_3 : factor de influencia de las curvas precedentes (F_{cp}).
- X_4 : factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (F_{visIC}).
- X_5 : factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (F_{visTC}).
- X_6 : factor de influencia de la señalización de la curva (F_{sc}).
- X_7 : longitud de curva (L_c).

Los valores de los coeficientes estimados en dicho modelo, así como el error estándar, el estadístico de Wald y el nivel de significación de cada uno de ellos, se muestra en la tabla siguiente (*Tabla 7.40.*).

| <i>Coeficiente</i> | <i>Valor estimado</i> | <i>Error estándar</i> | <i>Estadístico de Wald</i> | <i>Nivel de significación</i> |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------------|
| β_0 | 2.082 | 3.561 | 0.342 | 0.559 |
| β_1 | $7.63 \cdot 10^{-5}$ | $2.71 \cdot 10^{-5}$ | 7.908 | 0.005 |
| β_2 | -0.017 | 1.055 | 0.001 | 0.987 |
| β_3 | -3.764 | 3.115 | 1.460 | 0.227 |
| β_4 | -0.061 | 0.036 | 2.906 | 0.080 |
| β_5 | -0.014 | 0.008 | 3.151 | 0.065 |
| β_6 | 1.015 | 0.698 | 2.114 | 0.146 |
| β_7 | 0.001 | 0.001 | 0.435 | 0.509 |

Tabla 7.40.- Coeficientes estimados en el modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a la geometría. FASE 1.

El análisis propuesto, basado en el nivel de significación del estadístico de Wald, muestra como significativas las siguientes variables explicativas:

- X_1 : IMD.
- X_4 : factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (F_{visIC}). En este caso, el nivel de significación (0.080) es ligeramente superior a 0.050; no obstante, en esta primera fase del proceso de eliminación progresiva será incluida esta variable como

significativa.

- X_5 : factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (F_{visTC}). En este caso, como ocurre en la variable precedente, el nivel de significación (0.065) es ligeramente superior a 0.05; no obstante, en esta primera fase del proceso de eliminación progresiva será incluida esta variable como significativa.

En relación con las variables explicativas que no han resultado significativas, puede indicarse lo siguiente:

- X_2 (factor de influencia de la velocidad en la curva): esto es motivado en gran medida por los elevados valores de la velocidad máxima en curva de autovía en los tramos considerados en el presente trabajo (*Figura 7.36.*), lo cual posibilita en la mayoría de los casos la circulación a velocidades superiores a la máxima en curva en condiciones de seguridad.
- X_3 (factor de influencia de las curvas precedentes): la influencia de las características del itinerario precedente sobre el conductor es un factor destacable determinante de la actitud de éste ante los itinerarios posteriores. No obstante, la variable definida en el presente trabajo no ha resultado significativa en la muestra considerada, debido a que los tramos de curva analizados presentan gran homogeneidad desde el punto de vista de la velocidad máxima en curva, lo cual es indicativo de un diseño óptimo del trazado.
- X_6 (factor de influencia de la señalización de la curva): la señalización de los tramos de curva es un factor de gran importancia, especialmente en vías que permiten una elevada velocidad de circulación, como es el caso de las autovías. No obstante, la no significación de esta variable en la muestra evaluada está motivado por:
 - El diseño óptimo de los tramos de curva, con velocidades máximas en curva elevadas, hace innecesario la señalización de dichas curvas en la mayoría de los casos.
 - Las señales de limitación de velocidad en autovía por debajo de la velocidad genérica de la vía no son habitualmente tomadas en consideración por la mayoría de los conductores.

FASE 2:

Tomando en consideración los resultados de la fase precedente, las variables incorporadas en la parte sistemática del modelo de predicción durante esta fase se listan a continuación:

- X_1 : IMD.
- X_2 : factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (F_{visIC}).
- X_3 : factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (F_{visTC}).

Los valores de los coeficientes estimados en dicho modelo, así como el error estándar, el estadístico de Wald y el nivel de significación de cada uno de ellos, se muestra en la tabla siguiente (*Tabla 7.41.*).

| <i>Coefficiente</i> | <i>Valor estimado</i> | <i>Error estándar</i> | <i>Estadístico de Wald</i> | <i>Nivel de significación</i> |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------------|
| β_0 | -0.095 | 0.829 | 0.013 | 0.909 |
| β_1 | $6.60 \cdot 10^{-5}$ | $2.45 \cdot 10^{-5}$ | 7.237 | 0.007 |
| β_2 | -0.073 | 0.033 | 4.878 | 0.027 |
| β_3 | -0.023 | 0.009 | 6.45 | 0.010 |

Tabla 7.41.- *Coefficientes estimados en el modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a la geometría. FASE 2.*

El análisis de significación propuesto, basado en el nivel de significación del estadístico de Wald, muestra como significativas todas las variables explicativas consideradas en esta fase. Junto a esto, el valor del parámetro $-2 \cdot L(\theta)$ es:

$$-2 \cdot L(\theta) = 93$$

FASE 3:

Tras las fases precedentes, durante las cuales se ha evaluado la contribución a la parte sistemática del modelo de las variables explicativas consideradas de manera independiente, se aborda el análisis de significación de nuevas variables definidas como combinación de las identificadas en el *Apartado 4.4.2.*, y cuya influencia esperada sobre la ocurrencia de accidentes es más significativa que la de las variables independientes que las constituyen.

Durante esta fase se considera la variable de exposición al riesgo de ocurrencia de accidentes (F_{exp}) definida en el *Apartado 7.4.2.2.* Así, uno de los índices de exposición más frecuentemente utilizados es el número de vehículos por kilómetro (veh.*km). Tomando esto en consideración, la nueva variable F_{exp} representa el número de vehículos por kilómetro promedio al día (veh.*km/día), y engloba conjuntamente el efecto de una intensidad de tráfico variable y de una longitud de tramo de curva no uniforme.

Tomando en consideración los resultados de la fase precedente así como la nueva variable de exposición definida, las variables incorporadas en la parte sistemática del modelo de predicción durante esta fase se listan a continuación:

- X_1 : factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (F_{visIC}).
- X_2 : factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (F_{visTC}).
- X_3 : variable de exposición F_{exp} .

Los valores de los coeficientes estimados en dicho modelo, así como el error estándar, el estadístico de Wald y el nivel de significación de cada uno de ellos, se muestra en la tabla siguiente (*Tabla 7.42.*).

| <i>Coficiente</i> | <i>Valor estimado</i> | <i>Error estándar</i> | <i>Estadístico de Wald</i> | <i>Nivel de significación</i> |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------------|
| β_0 | -0.072 | 0.846 | 0.007 | 0.932 |
| β_1 | -0.075 | 0.033 | 5.187 | 0.023 |
| β_2 | -0.015 | 0.009 | 2.414 | 0.120 |
| β_3 | 0.097 | 0.041 | 5.733 | 0.017 |

Tabla 7.42.- *Coficientes estimados en el modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a la geometría. FASE 3.*

El análisis propuesto, basado en el nivel de significación del estadístico de Wald, muestra como significativas las siguientes variables explicativas:

- X_1 : factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (F_{visIC}).
- X_3 : variable de exposición F_{exp} .

Las fases 2 y 3 muestran los siguientes resultados:

- El factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva ha resultado significativo en ambos casos.
- La significación conjunta de la variable de exposición y del factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva no resulta concluyente a partir de las fases precedentes.

FASE 4:

El análisis de significación llevado a cabo en la fase 1 ha concluido como no significativo el factor de influencia de la velocidad en curva F_{vC} al ser incorporado en el modelo como variable explicativa individual. Esto es motivado en gran medida por los elevados valores de la velocidad máxima en curva de autovía en los tramos considerados en el presente trabajo (*Figura 7.36.*), lo cual posibilita en la mayoría de los casos la circulación a velocidades superiores a la máxima en curva en condiciones de seguridad.

No obstante, es previsible la influencia de este factor de velocidad en función de la visibilidad de la geometría de la curva, dado que una buena percepción de la curva posibilita la adecuada elección de la velocidad de paso por los tramos de curva.

Así, se considera la variable F_{TC} , definida en el *Apartado 7.4.2.2.*, que combina la influencia sobre la ocurrencia de accidentes del citado factor de influencia de la velocidad en curva (F_{vC}), y de la longitud del desarrollo de la curva percibida (F_{visTC}), considerando que la influencia negativa de una posible velocidad de aproximación elevada (favorecida por las características geométricas del trazado previo a la curva) se ve agravada por una falta de visibilidad del trazado del tramo de curva.

Tomando en consideración los resultados de las fases precedentes así como la nueva variable explicativa definida, las variables incorporadas en la parte sistemática del modelo de predicción durante esta fase se listan a continuación:

- X_1 : factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva ($F_{vis IC}$).
- X_2 : variable combinada F_{TC} .
- X_3 : IMD.

Los valores de los coeficientes estimados en dicho modelo, así como el error estándar, el estadístico de Wald y el nivel de significación de cada uno de ellos, se muestra en la tabla siguiente (Tabla 7.43.).

| <i>Coeficiente</i> | <i>Valor estimado</i> | <i>Error estándar</i> | <i>Estadístico de Wald</i> | <i>Nivel de significación</i> |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------------|
| β_0 | -2.426 | 0.732 | 10.996 | 0.001 |
| β_1 | -0.058 | 0.032 | 3.360 | 0.067 |
| β_2 | 0.018 | 0.007 | 6.221 | 0.013 |
| β_3 | $6.88 \cdot 10^{-5}$ | $2.42 \cdot 10^{-5}$ | 8.063 | 0.005 |

Tabla 7.43.- *Coeficientes estimados en el modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a la geometría. FASE 4.*

El análisis propuesto, basado en el nivel de significación del estadístico de Wald, muestra como significativas todas las variables explicativas consideradas en esta fase, aunque teniendo en cuenta que el nivel de significación del factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (0.067) es ligeramente superior a 0.050. Junto a esto, el valor del parámetro $-2 \cdot L(\theta)$ es:

$$-2 \cdot L(\theta) = 87$$

Este valor supone una mejora respecto al obtenido en la fase 2, debido a la introducción en la parte sistemática del modelo de la nueva variable F_{TC} .

FASE 5:

Tras los resultados obtenidos en la fase 3 respecto a la influencia de la incorporación de la variable de exposición, se aborda nuevamente la fase 4 con la sustitución de la variable de intensidad del tráfico por dicha variable de exposición. De este modo, las variables incorporadas en la parte sistemática del modelo de predicción durante esta fase se listan a continuación:

- X_1 : factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva ($F_{vis IC}$).
- X_2 : variable combinada F_{TC} .
- X_3 : variable de exposición F_{exp} .

Los valores de los coeficientes estimados en dicho modelo, así como el error estándar, el estadístico de Wald y el nivel de significación de cada uno de ellos, se muestra en la tabla siguiente (*Tabla 7.44.*).

| <i>Coeficiente</i> | <i>Valor estimado</i> | <i>Error estándar</i> | <i>Estadístico de Wald</i> | <i>Nivel de significación</i> |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------------|
| β_0 | -1.530 | 0.589 | 6.732 | 0.009 |
| β_1 | -0.066 | 0.032 | 4.189 | 0.040 |
| β_2 | 0.011 | 0.007 | 2.198 | 0.138 |
| β_3 | 0.104 | 0.039 | 6.949 | 0.008 |

Tabla 7.44.- Coeficientes estimados en el modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a la geometría. FASE 5.

El análisis propuesto, basado en el nivel de significación del estadístico de Wald, muestra como significativas las siguientes variables explicativas:

- X_1 : factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (F_{visIC}).
- X_3 : variable de exposición F_{exp} .

Las fases 4 y 5 muestran los siguientes resultados:

- El factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva ha resultado significativo en ambos casos.
- La significación conjunta de la variable de exposición y de la variable combinada F_{TC} no resulta concluyente a partir de las fases precedentes.

7.4.3.2.2.- Variables asociadas a los ramales de acceso.

FASE 6:

Las variables incluidas en el modelo de partida son todas las variables explicativas asociadas a los ramales de acceso consideradas en la *Tabla 4.8.*, junto a la variable de exposición F_{exp} definida en la *Fase 3*. No obstante, debe ser tenido en cuenta que en regresión logística las variables discretas requieren un tratamiento específico. De este modo, si una variable discreta presenta más de dos niveles, nuevas variables binarias serán definidas.

Dado que la variable de configuración del ramal de acceso es una variable discreta con cuatro niveles, serán creadas tres nuevas variables binarias. El nivel de la variable original (F_{cRA}) tomado como referencia es el nivel "1", correspondiente a la inexistencia de ramal de acceso en el tramo de curva de autovía. Las nuevas variables binarias quedarán definidas como se presenta en la tabla siguiente (*Tabla 7.45.*).

| <i>Variable binaria</i> | <i>Nivel equivalente de la variable F_{cRA}</i> |
|-------------------------|--|
| F_{cRA2} | 2 |
| F_{cRA3} | 3 |
| F_{cRA4} | 4 |

Tabla 7.45.- *Variables binarias creadas a partir de la variable discreta de configuración del ramal de acceso en el modelo de regresión logística.*

Así, las variables incorporadas en la parte sistemática del modelo de predicción durante esta fase se listan a continuación:

- X_1 : variable de exposición F_{exp} .
- X_2 : variable binaria de influencia de la configuración del ramal de acceso F_{cRA2} .
- X_3 : variable binaria de influencia de la configuración del ramal de acceso F_{cRA3} .
- X_4 : variable binaria de influencia de la configuración del ramal de acceso F_{cRA4} .
- X_5 : factor de influencia de la velocidad en el ramal de acceso (F_{vRA}).
- X_6 : factor de influencia de la visibilidad del ramal de acceso (F_{visRA}).

Los valores de los coeficientes estimados en dicho modelo, así como el error estándar, el estadístico de Wald y el nivel de significación de cada uno de ellos, se muestra en la tabla siguiente (Tabla 7.46.).

| <i>Coficiente</i> | <i>Valor estimado</i> | <i>Error estándar</i> | <i>Estadístico de Wald</i> | <i>Nivel de significación</i> |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------------|
| β_0 | 7.846 | 36.791 | 0.045 | 0.831 |
| β_1 | 0.092 | 0.066 | 1.921 | 0.166 |
| β_2 | -8.667 | 36.681 | 0.056 | 0.813 |
| β_3 | -7.649 | 36.680 | 0.044 | 0.835 |
| β_4 | -6.182 | 36.710 | 0.028 | 0.866 |
| β_5 | -0.002 | 0.015 | 0.014 | 0.906 |
| β_6 | -0.062 | 0.068 | 0.836 | 0.360 |

Tabla 7.46.- *Coficientes estimados en el modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a los ramales de acceso. FASE 6.*

El análisis de significación propuesto muestra como no significativas todas las variables explicativas consideradas en esta fase. No obstante, podría producirse la situación que la incorporación de un número excesivo de variables explicativas en la parte sistemática del modelo impidiera destacar la influencia de alguna de ellas sobre la variable respuesta.

Debido a ello, se continúa el análisis de significación mediante la eliminación progresiva de las variables de menor influencia esperada sobre el riesgo de ocurrencia de accidentes.

FASE 7:

Dada la importancia de los ramales de acceso sobre el riesgo de ocurrencia de accidentes por su efecto perturbador del flujo de tráfico, se continúa el análisis de significación de las variables explicativas asociadas a estos ramales. Así, se irán eliminando progresivamente las variables explicativas con una menor influencia esperada.

De este modo, en esta fase será eliminado el factor de influencia de la velocidad en el ramal de acceso (F_{vRA}). El coeficiente estimado de dicho factor, como se muestra en la tabla precedente, es el que presenta mayor error de estimación (error estándar). Esto es debido a que la influencia negativa de una velocidad de circulación elevada en el punto de intersección de la vía principal con el ramal de acceso está contrarrestada parcialmente por la existencia de varios carriles en cada sentido de circulación en tramos de autovía, lo cual reduce la interferencia entre los dos flujos de tráfico encontrados.

Las variables incorporadas en la parte sistemática del modelo de predicción durante esta fase se listan a continuación:

- X_1 : variable de exposición F_{exp} .
- X_2 : variable binaria de influencia de la configuración del ramal de acceso F_{cRA2} .
- X_3 : variable binaria de influencia de la configuración del ramal de acceso F_{cRA3} .
- X_4 : variable binaria de influencia de la configuración del ramal de acceso F_{cRA4} .
- X_5 : factor de influencia de la visibilidad del ramal de acceso F_{visRA} .

Los valores de los coeficientes estimados en dicho modelo, así como el error estándar, el estadístico de Wald y el nivel de significación de cada uno de ellos, se muestra en la tabla siguiente (Tabla 7.47.).

| <i>Coeficiente</i> | <i>Valor estimado</i> | <i>Error estándar</i> | <i>Estadístico de Wald</i> | <i>Nivel de significación</i> |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------------|
| β_0 | 7.478 | 36.659 | 0.042 | 0.838 |
| β_1 | 0.088 | 0.059 | 2.199 | 0.138 |
| β_2 | -8.543 | 36.666 | 0.054 | 0.816 |
| β_3 | -7.541 | 36.669 | 0.042 | 0.837 |
| β_4 | -5.998 | 36.677 | 0.027 | 0.870 |
| β_5 | -0.058 | 0.060 | 0.949 | 0.329 |

Tabla 7.47.- Coeficientes estimados en el modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a los ramales de acceso. FASE 7.

El análisis de significación propuesto muestra como no significativas todas las variables explicativas consideradas en esta fase, aunque ha mejorado respecto a la fase precedente la significación de la variable de exposición y del factor de influencia de la visibilidad del ramal de acceso. Debido a ello, y como ha sido concluido en el *Apartado 7.4.2.2.2.*, es previsible la posible influencia de este factor en combinación con el factor de influencia de la configuración del ramal de acceso. Este análisis es abordado en la fase siguiente.

FASE 8:

Como ha sido descrito en la fase precedente y como fue definido en el *Apartado 7.4.2.2.2.*, se define una variable combinada de influencia del ramal de acceso a la autovía (F_{RA}). Dicha variable engloba la influencia sobre la ocurrencia de accidentes de la configuración del ramal (F_{cRA}), y de la visibilidad del mismo (F_{visRA}), considerando que la influencia negativa de una inadecuada configuración de dicho ramal se ve incrementada por una falta de visibilidad del mismo.

Ante esto, y tomando en cuenta las variables binarias contenidas en la *Tabla 7.45.*, se definen las siguientes variables explicativas combinadas:

$$F_{RA2} = \frac{F_{cRA2}}{F_{visRA}} \quad | \quad F_{RA3} = \frac{F_{cRA3}}{F_{visRA}} \quad | \quad F_{RA4} = \frac{F_{cRA4}}{F_{visRA}} \quad (7.47.)$$

Las variables incorporadas en la parte sistemática del modelo de predicción durante esta fase se listan a continuación:

- X_1 : variable de exposición F_{exp} .
- X_2 : variable F_{RA2} .
- X_3 : variable F_{RA3} .
- X_4 : variable F_{RA4} .

Los valores de los coeficientes estimados en dicho modelo, así como el error estándar, el estadístico de Wald y el nivel de significación de cada uno de ellos, se muestra en la tabla siguiente (*Tabla 7.48.*).

| <i>Coeficiente</i> | <i>Valor estimado</i> | <i>Error estándar</i> | <i>Estadístico de Wald</i> | <i>Nivel de significación</i> |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------------|
| β_0 | -2.832 | 0.464 | 37.250 | 0.001 |
| β_1 | 0.121 | 0.036 | 11.302 | 0.001 |
| β_2 | 8.766 | 5.033 | 3.034 | 0.080 |
| β_3 | 22.337 | 9.829 | 5.164 | 0.023 |
| β_4 | 38.555 | 13.424 | 8.249 | 0.004 |

Tabla 7.48.- Coeficientes estimados en el modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a los ramales de acceso. FASE 8.

El análisis propuesto muestra como significativas las siguientes variables explicativas:

- X_1 : variable de exposición F_{exp} .
- X_2 : variable F_{RA2} . En este caso, el nivel de significación (0.080) es ligeramente superior a 0.050
- X_3 : variable F_{RA3} .
- X_4 : variable F_{RA4} .

7.4.3.2.3.- Variables asociadas a los ramales de salida.

FASE 9:

Las variables incluidas en el modelo de partida son todas las variables explicativas asociadas a los ramales de salida consideradas en la *Tabla 4.8.*, junto a la variable de exposición F_{exp} definida en la *Fase 3.* De este modo, las variables incorporadas en la parte sistemática del modelo de predicción durante esta fase se listan a continuación:

- X_1 : variable de exposición F_{exp} .
- X_2 : variable de configuración del ramal de salida (F_{cRS}^*). Inicialmente, se considera una variable definida con el criterio de la variable precedente F_{cRA} . No obstante, la variable así definida no resulta significativa para la muestra de datos recogida, debido a que ésta presenta una variabilidad reducida.

Por ello, y para tener en cuenta en el modelo la presencia de ramales de salida en tramos de curva de autovía, se define una variable explicativa simplificada que tome en consideración la configuración del ramal de salida. Así, será incorporada la variable binaria definida como sigue:

- *Estado "0"*: el tramo de curva no presenta ramal de salida, o existiendo, posee señalización adecuada (señalización de peligro de empalme) y longitud de carril también adecuada (longitud superior a 50 m).
- *Estado "1"*: el tramo de curva presenta ramal de salida con condiciones inadecuadas de señalización y de longitud de carril de salida.

- X_3 : factor de influencia de la velocidad en el ramal de salida (F_{vRS}).
- X_4 : factor de influencia de la visibilidad del ramal de salida (F_{visRS}).

Los valores de los coeficientes estimados en dicho modelo, así como el error estándar, el estadístico de Wald y el nivel de significación de cada uno de ellos, se muestra en la tabla siguiente (*Tabla 7.49.*).

| <i>Coficiente</i> | <i>Valor estimado</i> | <i>Error estándar</i> | <i>Estadístico de Wald</i> | <i>Nivel de significación</i> |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------------|
| β_0 | -1.230 | 2.452 | 0.252 | 0.616 |
| β_1 | 0.039 | 0.088 | 0.192 | 0.661 |
| β_2 | 3.159 | 1.613 | 3.837 | 0.050 |
| β_3 | 0.001 | 0.015 | 0.003 | 0.955 |
| β_4 | -0.057 | 0.079 | 0.512 | 0.474 |

Tabla 7.49.- *Coficientes estimados en el modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a los ramales de salida. FASE 9.*

El análisis de significación propuesto muestra como significativo la variable de configuración del ramal de salida. No obstante, podría producirse la situación que la incorporación de un número excesivo de variables explicativas en la parte sistemática del modelo impidiera destacar la influencia de alguna de ellas sobre la variable respuesta. Debido a ello, ha sido realizado un análisis similar al efectuado sobre las variables asociadas a los ramales de acceso, no resultando significativas ninguna otra variable individual ni combinaciones de las mismas.

7.4.3.2.4.- *Variables asociadas a los ramales.*

FASE 10:

Las variables incluidas en el modelo son todas las variables explicativas asociadas a los ramales de acceso y salida y que han resultado significativas en las fases precedentes, junto a la variable de exposición F_{exp} definida en la *Fase 3* y el factor de influencia de los ramales adyacentes (*Tabla 4.8.*). De este modo, las variables incorporadas en la parte sistemática del modelo de predicción durante esta fase se listan a continuación:

- X_1 : variable de exposición F_{exp} .
- X_2 : variable de configuración del ramal de salida (F_{cRS}^*).
- X_3 : factor de influencia de ramales adyacentes (F_T).
- X_4 : variable F_{RA2} .
- X_5 : variable F_{RA3} .
- X_6 : variable F_{RA4} .

Los valores de los coeficientes estimados en dicho modelo, así como el error estándar, el estadístico de Wald y el nivel de significación de cada uno de ellos, se muestra en la tabla siguiente (*Tabla 7.50.*).

| <i>Coeficiente</i> | <i>Valor estimado</i> | <i>Error estándar</i> | <i>Estadístico de Wald</i> | <i>Nivel de significación</i> |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------------|
| β_0 | -3.331 | 0.559 | 35.478 | 0.001 |
| β_1 | 0.137 | 0.038 | 13.005 | 0.001 |
| β_2 | 3.316 | 1.311 | 6.397 | 0.011 |
| β_3 | 6.265 | 25.842 | 0.059 | 0.808 |
| β_4 | 10.864 | 5.318 | 4.173 | 0.041 |
| β_5 | 26.716 | 10.247 | 6.797 | 0.009 |
| β_6 | 39.965 | 14.281 | 7.831 | 0.005 |

Tabla 7.50.- *Coeficientes estimados en el modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva. Variables asociadas a los ramales. FASE 10.*

El análisis propuesto muestra como significativas las siguientes variables explicativas:

- X_1 : variable de exposición F_{exp} .
- X_2 : variable de configuración del ramal de salida (F^*_{cRS}).
- X_4 : variable F_{RA2} .
- X_5 : variable F_{RA3} .
- X_6 : variable F_{RA4} .

Frente a esto, no ha resultado significativo el factor de influencia de ramales adyacentes (F_T). Esto se debe a que los itinerarios considerados en el presente trabajo de investigación contienen un número muy reducido de situaciones en que se presenten ramales adyacentes, por lo que es esperable que el análisis de significación no detecte la posible influencia de dicha variable explicativa.

7.4.3.3.- Ajuste del modelo final.

Tras el proceso de eliminación progresiva, y tomando en consideración los resultados del análisis de significación de las variables explicativas (*Apartado 7.4.3.2.*), se estima el modelo final, el cual integra las variables de exposición, las asociadas a la geometría y las asociadas a los ramales.

De este modo, las variables incorporadas en la parte sistemática del modelo de predicción y que han resultado significativas se listan a continuación:

- X_1 : variable de exposición F_{exp} .
- X_2 : variable F_{RA2} .
- X_3 : variable F_{RA3} .

- X_4 : variable F_{RA4} .
- X_5 : variable de configuración del ramal de salida F^*_{CRS} .
- X_6 : variable asociada a la geometría F^*_{visIC} .
- X_7 : variable asociada a la geometría F_{TC} .

El modelo así estimado quedará definido como sigue:

$$\pi = \frac{e^{\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \cdot X_1 + \hat{\beta}_2 \cdot X_2 + \hat{\beta}_3 \cdot X_3 + \hat{\beta}_4 \cdot X_4 + \hat{\beta}_5 \cdot X_5 + \hat{\beta}_6 \cdot X_6 + \hat{\beta}_7 \cdot X_7}}{1 + e^{\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \cdot X_1 + \hat{\beta}_2 \cdot X_2 + \hat{\beta}_3 \cdot X_3 + \hat{\beta}_4 \cdot X_4 + \hat{\beta}_5 \cdot X_5 + \hat{\beta}_6 \cdot X_6 + \hat{\beta}_7 \cdot X_7}} \quad (7.48.)$$

donde:

- X_i : variables explicativas del modelo.
- $\hat{\beta}_i$: coeficientes estimados de las variables explicativas.
- π : probabilidad estimada de ocurrencia de la variable respuesta binaria “*Tramo de concentración de accidentes*”.

Los valores de los coeficientes estimados en dicho modelo, así como el error estándar, el estadístico de Wald y el nivel de significación de cada uno de ellos, se muestra en la tabla siguiente (Tabla 7.51.).

| <i>Coficiente</i> | <i>Valor estimado</i> | <i>Error estándar</i> | <i>Estadístico de Wald</i> | <i>Nivel de significación</i> |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------------|
| β_0 | -5,355 | 1,014 | 27,89 | 0,001 |
| β_1 | 0,139 | 0,043 | 10,449 | 0,001 |
| β_2 | 12,820 | 5,662 | 5,127 | 0,023 |
| β_3 | 31,700 | 11,784 | 7,237 | 0,007 |
| β_4 | 52,841 | 14,641 | 13,026 | 0,001 |
| β_5 | 3,938 | 1,427 | 7,616 | 0,006 |
| β_6 | 10,323 | 3,953 | 6,82 | 0,009 |
| β_7 | 0,017 | 0,08 | 3,130 | 0,023 |

Tabla 7.51.- *Coficientes estimados en el modelo final de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva.*

A partir de los resultados mostrados en la tabla precedente, puede concluirse lo siguiente:

- Todos los coeficientes finalmente considerados en el modelo resultan significativos, conforme al criterio previamente definido, como resultado del proceso de eliminación progresiva de variables explicativas.

- Las variables explicativas X_i consideradas han sido definidas de modo que su incremento previsiblemente induce un incremento de la probabilidad de ocurrencia de accidentes. Así, el signo de los coeficientes estimados (todos positivos, excepto el término independiente), corresponde con el sentido de influencia esperado de cada una de dichas variables sobre la variable respuesta.

- Los coeficientes de las variables X_2, X_3, X_4 indican el incremento de la probabilidad de ocurrencia de accidentes respecto al nivel de referencia de la variable F_{cRA} (nivel "1").

7.4.3.4.- Análisis de multicolinealidad.

El problema de la *multicolinealidad* surge cuando se pretende la misión imposible de extraer de la muestra más información que la que contiene. Dicho problema afectará mucho a la precisión de la estimación de los coeficientes β_i , ya que la muestra no contiene información sobre los efectos de una variable cuando las demás permanecen constantes.

El análisis de multicolinealidad se lleva a cabo mediante la matriz de correlación R . Los valores de la misma en el modelo estimado se muestra en la tabla siguiente (*Tabla 7.52.*).

| R | β_0 | β_1 | β_2 | β_3 | β_4 | β_5 | β_6 | β_7 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| β_0 | 1 | -0,6 | -0,43 | -0,44 | -0,46 | -0,4 | -0,68 | -0,38 |
| β_1 | -0,6 | 1 | 0,1 | 0,18 | 0,19 | 0,23 | 0,35 | -0,07 |
| β_2 | -0,43 | 0,1 | 1 | 0,29 | 0,26 | 0,18 | 0,13 | 0,19 |
| β_3 | -0,44 | 0,18 | 0,29 | 1 | 0,24 | 0,21 | 0,13 | 0,26 |
| β_4 | -0,46 | 0,19 | 0,26 | 0,24 | 1 | 0,2 | 0,25 | 0,18 |
| β_5 | -0,4 | 0,23 | 0,18 | 0,21 | 0,2 | 1 | 0,22 | 0,11 |
| β_6 | -0,68 | 0,35 | 0,13 | 0,13 | 0,25 | 0,22 | 1 | -5 |
| β_7 | -0,38 | -0,07 | 0,19 | 0,26 | 0,18 | 0,11 | -5 | 1 |

Tabla 7.52.- Matriz de correlación de los coeficientes estimados en el modelo final de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva.

Posteriormente, la identificación de variables colineales será llevado a cabo mediante el análisis de los términos diagonales de la matriz inversa de la matriz de correlación R^{-1} . Los valores de la misma en el modelo estimado se muestra en la tabla siguiente (*Tabla 7.53.*).

| R^{-1} | β_0 | β_1 | β_2 | β_3 | β_4 | β_5 | β_6 | β_7 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| β_0 | 9,72 | 3,62 | 1,76 | 1,22 | 1,11 | 0,89 | 4,64 | 3,23 |
| β_1 | 3,62 | 2,56 | 0,65 | 0,3 | 0,31 | 0,16 | 1,39 | 1,35 |
| β_2 | 1,8 | 0,67 | 1,49 | -0,01 | 0,01 | 0,07 | 0,81 | 0,48 |
| β_3 | 1,22 | 0,3 | -0,01 | 1,37 | 0,01 | 0,01 | 0,55 | 0,16 |
| β_4 | 1,11 | 0,31 | 0,01 | 0,01 | 1,32 | 0,01 | 0,32 | 0,21 |
| β_5 | 0,89 | 0,16 | 0,06 | 0,01 | 0,01 | 1,22 | 0,28 | 0,22 |
| β_6 | 4,64 | 1,39 | 0,78 | 0,55 | 0,32 | 0,28 | 3,43 | 1,65 |
| β_7 | 3,2 | 1,34 | 0,45 | 0,16 | 0,21 | 0,21 | 1,64 | 2,2 |

Tabla 7.53.- Matriz inversa de la matriz de correlación de los coeficientes estimados en el modelo final de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva.

Como ha sido definido previamente, elementos diagonales grandes (tomando como criterio valores mayores que 10 (Peña, D., 1989 [41]), en la matriz R^{-1} indican alta multicolinealidad. Los valores de estos elementos en el modelo estimado son significativamente menores que 10 (excepto el término independiente β_0 , cuyo elemento diagonal está próximo a dicho límite), por lo que puede concluirse que los coeficientes estimados en el modelo no presentan previsiblemente problemas de multicolinealidad.

7.4.3.5.- Diagnósis de la bondad del ajuste.

Uno de los criterios de cuantificación de la bondad del ajuste del modelo se establece sobre el parámetro $-2.L(\hat{\theta})$. Así, el modelo estimado será óptimo cuando minimice dicho parámetro de evaluación. Al mismo tiempo, si se efectúa un análisis de incorporación sucesiva de variables explicativas en el modelo, podrá evaluarse la mejora introducida por cada una de ellas a partir del análisis comparativo basado en el parámetro mostrado.

Así, se ha llevado cabo la diagnósis del modelo estimado mediante dicho parámetro. Para ello, y partiendo del modelo más sencillo (modelo con únicamente el término independiente β_0), se ha efectuado la incorporación sucesiva de las variables explicativas consideradas hasta conformar el modelo estimado completo. El valor del parámetro definido en cada uno de los modelos considerados se muestra en la tabla siguiente (Tabla 7.54.), y en la Figura 7.66.

| Modelo | $-2.L(\hat{\theta})$ |
|---|----------------------|
| β_0 | 116 |
| $\beta_0 + \beta_1$ | 103 |
| $\beta_0 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4$ | 89 |
| $\beta_0 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 + \beta_5$ | 73 |
| $\beta_0 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 + \beta_5 + \beta_6$ | 69 |
| $\beta_0 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 + \beta_5 + \beta_6 + \beta_7$ | 65 |

Tabla 7.54.- Mejora del parámetro “ $-2.L(\hat{\theta})$ ” por incorporación sucesiva de variables explicativas en el modelo final de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva.

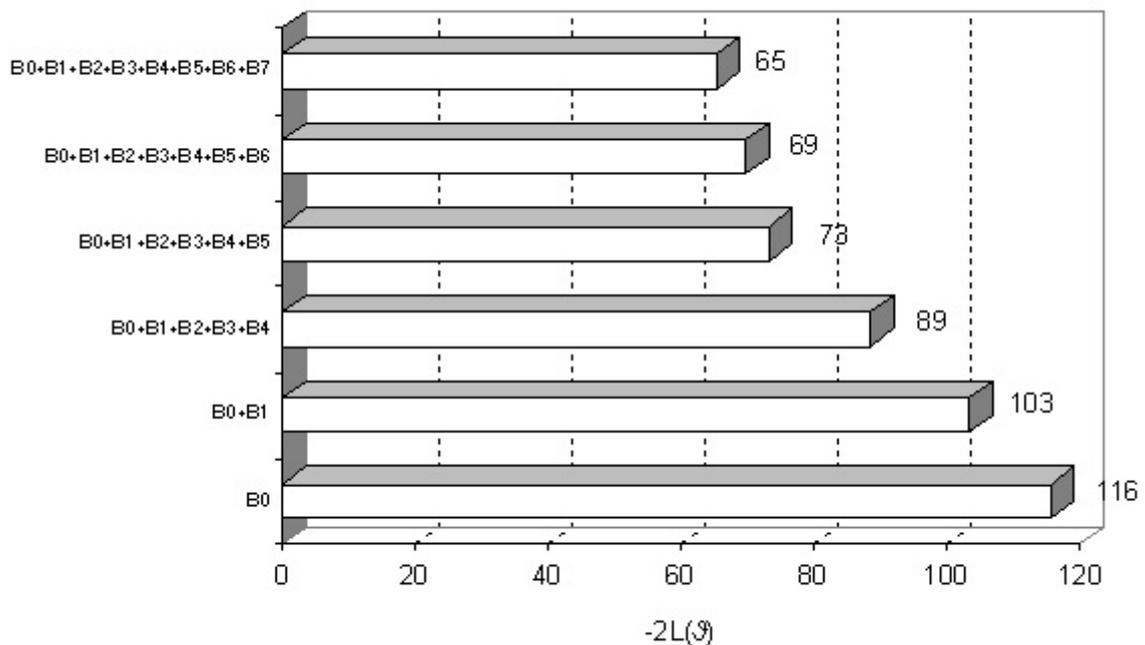


Figura 7.66.- Representación de la mejora del parámetro “ $-2.L(\hat{\theta})$ ” por incorporación sucesiva de variables explicativas en el modelo final de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva.

El análisis de los valores obtenidos del parámetro $-2.L(\hat{\theta})$ permite concluir lo siguiente:

- 1.- La incorporación sucesiva al modelo de las variables explicativas consideradas minimiza el valor de dicho parámetro, esto es, se mejora el ajuste del modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva a los datos observados.
- 2.- La incorporación de variables adicionales podría inducir mejoras en dicho modelo. No obstante, el resto de las variables explicativas objetivas consideradas durante el proceso de eliminación progresiva han resultado no significativas en la muestra analizada en el presente estudio.

Por otro lado, la bondad del ajuste puede ser evaluada a nivel global mediante la *tabla de clasificación*. Para la generación de dicha tabla se tiene en consideración el siguiente criterio:

- Una probabilidad estimada π de ocurrencia de accidentes inferior a 0,5 predice el estado “0” de la variable binaria Tramo de concentración de accidentes.
- Una probabilidad estimada π de ocurrencia de accidentes igual o superior a 0,5 predice el estado “1” de la variable binaria Tramo de concentración de accidentes.

Así, la relación entre los valores de probabilidad predichos por el modelo y los valores observados de la variable binaria “tramo de concentración de accidentes” se presenta en la siguiente figura (Figura 7.67.).

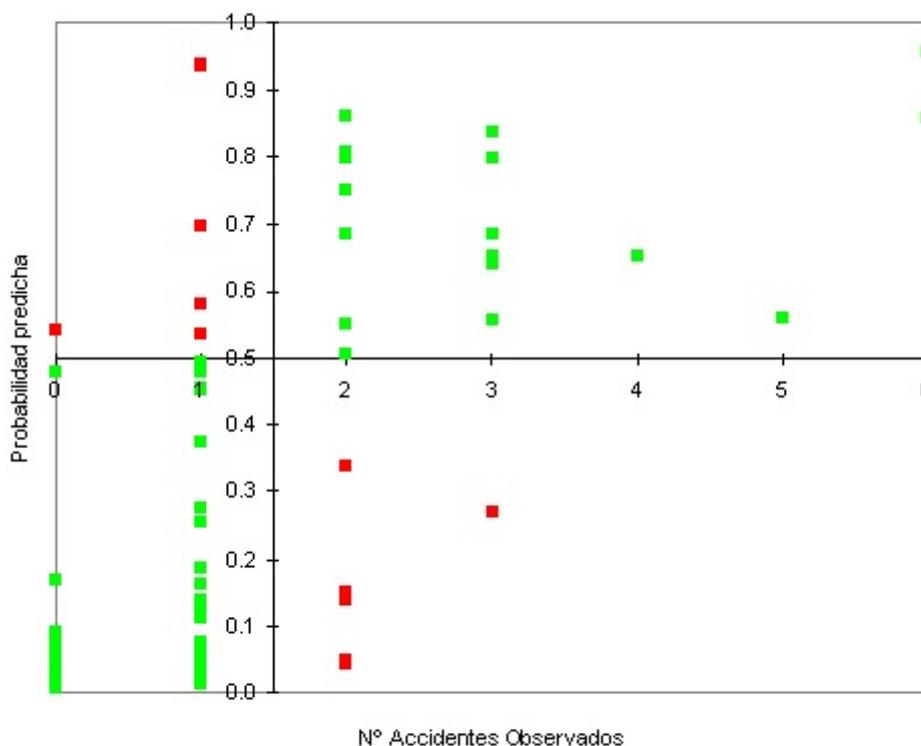


Figura 7.67.- Representación del ajuste global entre la probabilidad predicha y los valores observados de la variable binaria “tramo de concentración de accidentes”.

A partir de estos valores se define la tabla de clasificación, la cual compara los valores observados de la variable binaria “tramo de concentración de accidentes”, con los valores predichos por el modelo de la misma, de acuerdo al criterio definido. Dicha tabla es mostrada seguidamente (Tabla 7.55.).

| Número de casos Observados | Predichos | | Aciertos (%) |
|-------------------------------|-----------|----|--------------|
| | 0 | 1 | |
| 0 | 88 | 5 | 94,6 |
| 1 | 6 | 17 | 73,9 |
| Total | | | 90,5 |

Tabla 7.55.- Tabla de clasificación del modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva.

Teniendo en cuenta los resultados de dicha tabla, puede concluirse lo siguiente:

- El modelo de regresión logística desarrollado estima adecuadamente el 94,6% de los casos de tramos donde no se concentra un número significativo de accidentes en los tres años considerados. Al mismo tiempo, el modelo estima adecuadamente el 73,9% de los casos de tramos donde se concentra un número significativo de accidentes en los tres años considerados.
- En conjunto, el modelo estima adecuadamente el 90,5% de los tramos de concentración de accidentes.

7.4.3.6.- Análisis de sensibilidad de los coeficientes estimados.

Durante el proceso de estimación de la variable respuesta a partir de las variables explicativas, es probable que no haya sido considerada alguna variable relevante o que, siendo tomada en cuenta, no haya resultado significativa en el proceso de ajuste, debido a la variabilidad de la muestra tomada. Ante este hecho, es importante la realización de un análisis que permita evaluar la sensibilidad de los coeficientes estimados cuando alguna de las variables significativas es excluida.

Para ello, se lleva a cabo un *análisis de sensibilidad*, evaluando la variabilidad que se induce en los coeficientes estimados de las variables explicativas cuando cada una de ellas es sucesivamente excluida del modelo. La evolución de dichos coeficientes en el análisis efectuado se muestra en la siguiente figura (*Figura 7.68.*).

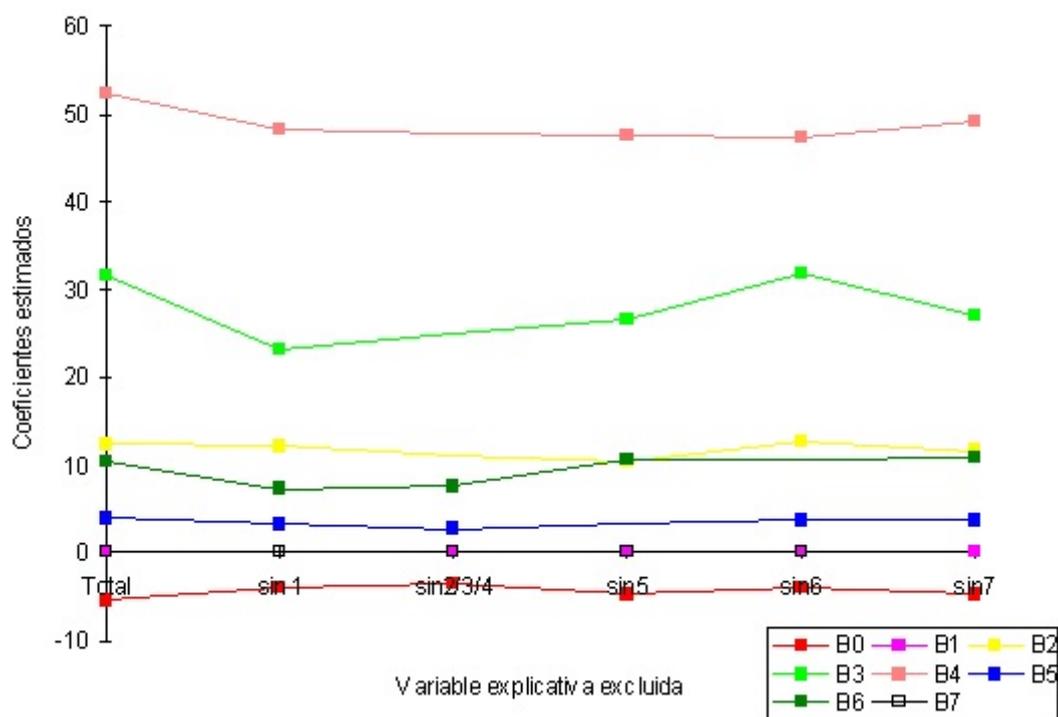


Figura 7.68.- Análisis de sensibilidad de los coeficientes estimados de las variables explicativas en el modelo final de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva.

Los valores de los coeficientes estimados en el proceso de exclusión sucesiva de variables es mostrado en la tabla siguiente (Tabla 7.56). Al mismo tiempo, se presenta la variabilidad de dichos coeficientes, evaluada a partir de la desviación típica en torno al valor medio.

| Coeficiente | Variable excluida | | | | | | Valor medio | Desviación típica |
|-------------|-------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|---------|-------------|-------------------|
| | β_1 | $\beta_{2/3/4}$ | β_5 | β_6 | β_7 | Ninguna | | |
| β_0 | -3,92 | -3,54 | -4,78 | -4,07 | -4,76 | -5,35 | -4,4 | 0,67 |
| β_1 | 0,131 | 0,123 | 0,125 | 0,115 | 0,156 | 0,139 | 0,132 | 0,014 |
| β_2 | 12,17 | 11,27 | 10,36 | 12,51 | 11,63 | 12,32 | 11,71 | 0,81 |
| β_3 | 23,19 | 24,85 | 26,49 | 31,85 | 27,11 | 31,7 | 27,53 | 3,56 |
| β_4 | 48,11 | 47,84 | 47,57 | 47,35 | 49,16 | 52,34 | 48,73 | 1,88 |
| β_5 | 3,25 | 2,8 | 3,29 | 3,79 | 3,76 | 3,93 | 3,47 | 0,43 |
| β_6 | 7,28 | 7,57 | 10,57 | 10,69 | 10,82 | 10,33 | 9,54 | 1,65 |
| β_7 | 0,022 | 0,010 | 0,015 | 0,020 | 0,010 | 0,017 | 0,016 | 0,005 |

Tabla 7.56.- Valores de los coeficientes estimados de las variables explicativas en el análisis de sensibilidad en el modelo final de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva.

Considerando un modelo de distribución normal para los coeficientes estimados mostrados en la tabla precedente, se definen los intervalos de confianza al 95%, como se muestran en la tabla siguiente (Tabla 7.57.)

| Coeficiente | Valor medio | Desviación típica | Intervalo de confianza (95%) | |
|-------------|-------------|-------------------|------------------------------|----------------|
| | | | Valor inferior | Valor superior |
| β_0 | -4,4 | 0,67 | -5,71 | -3,09 |
| β_1 | 0,132 | 0,014 | 0,105 | 0,159 |
| β_2 | 11,71 | 0,81 | 10,12 | 13,3 |
| β_3 | 27,53 | 3,56 | 20,55 | 34,51 |
| β_4 | 48,73 | 1,88 | 45,05 | 52,41 |
| β_5 | 3,47 | 0,43 | 2,63 | 4,31 |
| β_6 | 9,54 | 1,65 | 6,31 | 12,77 |
| β_7 | 0,016 | 0,005 | 0,007 | 0,025 |

Tabla 7.57.- Intervalos de confianza para los valores de los coeficientes estimados en el análisis de sensibilidad en el modelo final de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva.

A partir de los resultados mostrados en la tabla precedente, puede concluirse lo siguiente:

- Los intervalos de confianza han sido definidos a partir de los coeficientes estimados en el análisis de sensibilidad. Tomando en consideración un intervalo con una significación del 95%, un coeficiente estimado será considerado como significativo (significativamente distinto del valor “ 0 “) cuando los valores contenidos en el intervalo de confianza no cambien de signo.
- Todos los coeficientes obtenidos resultan significativos, conforme al criterio previamente definido, como resultado del proceso de eliminación sucesiva de variables explicativas.
- La exclusión de alguna de las variables significativas no induce una variabilidad significativa en el resto de los coeficientes estimados.

7.4.4.- EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES EXPLICATIVAS INCORPORADAS EN LA PARTE SISTEMÁTICA DE LOS MODELOS DE PREDICCIÓN.

El proceso de modelización desarrollado en este apartado ha permitido la identificación de un conjunto de variables permanentes del medio que ejercen una influencia estadísticamente significativa sobre la ocurrencia de accidentes de tráfico en tramos de curva de autovía. Para ello, se ha partido de las variables definidas en el *Apartado 4. (Tabla 4.8.)*.

Los dos procedimientos de generación de modelos predictivos empleados en este trabajo han identificado las mismas variables explicativas como integrantes de la parte sistemática de los mismos.

La influencia de las distintas variables consideradas es evaluada seguidamente:

Variables asociadas a la geometría.

- Las variables de velocidad máxima en curva y velocidad de aproximación no son consideradas de manera independiente, sino mediante su relación en el factor de influencia de la velocidad en la curva (F_{vC}). Este factor no ha resultado significativo en la muestra considerada como variable independiente. Esto es motivado en gran medida por los elevados valores de la velocidad máxima en curva de autovía en los tramos considerados en el presente trabajo (*Figura 7.36.*), lo cual posibilita en la mayoría de los casos la circulación a velocidades superiores a la máxima en curva en condiciones de seguridad.
- La influencia de las características del itinerario precedente sobre el conductor es un factor destacable determinante de la actitud de éste ante los itinerarios posteriores. No obstante, la variable definida en el presente estudio (factor de influencia de las curvas precedentes) no ha resultado significativa en la muestra empleada en este trabajo, debido a que los tramos de curva analizados presentan gran homogeneidad desde el punto de vista de la velocidad máxima en curva, lo cual es indicativo de un diseño óptimo del trazado.
- La influencia de la visibilidad disponible ante la aproximación a tramos de curva ha resultado significativa a través de las dos variables definidas en la presente Tesis:
 - El factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva, el cual ha resultado estadísticamente significativo como variable independiente (F_{visIC}^*).
 - El factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva, como variable combinada. Así, ha sido definida una nueva variable (F_{TC}) que combina la influencia sobre la ocurrencia de accidentes del factor de influencia de la velocidad en curva (F_{vC}), y de la longitud del desarrollo de la curva percibida (F_{visTC}), considerando que la influencia negativa de una posible velocidad de aproximación elevada (favorecida por las

características geométricas del trazado previo a la curva) se ve agravada por una falta de visibilidad del trazado del tramo de curva.

- La señalización es un factor de notable importancia, pues ayuda al conductor a tomar decisiones con antelación al afrontar tramos de curva, objeto del presente trabajo. No obstante, el factor de influencia de la señalización de la curva no ha resultado significativo en la muestra abordada en el presente estudio motivado por:

- El diseño óptimo de los tramos de curva, con velocidades máximas en curva elevadas, hace innecesario la señalización de dichas curvas en la mayoría de los casos.

- Las señales de limitación de velocidad en autovía por debajo de la velocidad genérica de la vía no son habitualmente tomadas en consideración por la mayoría de los conductores.

Variables asociadas a los ramales.

- Los ramales, como elementos de perturbación del flujo de tráfico en la vía principal, constituyen un elemento de notable influencia sobre el riesgo de ocurrencia de accidentes. Este hecho es especialmente destacable en el caso de los ramales de acceso, donde las facilidades presentes en la vía para la incorporación del vehículo procedente del ramal condiciona la gravedad de la perturbación generada.

De este modo, la configuración de dichos ramales (combinación de las características del carril del ramal y de la señalización presente en la vía principal), tanto en el caso de ramales de acceso como de salida, ha resultado significativa en los modelos generados (F_{cRA} y F_{cRS}^*).

Asimismo, ha resultado también significativo el factor de influencia de la visibilidad del ramal de acceso, en combinación con el factor de influencia de la configuración del ramal de acceso (F_{RA}).

- Frente a lo anterior, no ha resultado estadísticamente significativo el factor de influencia de la velocidad en el ramal. Esto es debido a que la influencia negativa de una velocidad de circulación elevada en el punto de intersección de la vía principal con el ramal de acceso está contrarrestada parcialmente por la existencia de varios carriles en cada sentido de circulación en tramos de autovía, lo cual reduce la interferencia entre los dos flujos de tráfico encontrados.

- Asimismo, tampoco ha resultado significativo el factor de influencia de ramales adyacentes (F_T). Esto se debe a que los itinerarios considerados en el presente trabajo de investigación contienen un número muy reducido de situaciones en que se presenten ramales adyacentes, por lo que es esperable que el análisis de significación no detecte la posible influencia de dicha variable explicativa.

Variables asociadas a la intensidad de tráfico.

- Durante este trabajo ha sido definida la variable de exposición F_{exp} . Así, uno de los índices de exposición más frecuentemente utilizados es el número de vehículos por kilómetro (veh.*km). Tomando esto en consideración, la nueva variable F_{exp} representa el número de vehículos por kilómetro promedio al día (veh.*km/día), y engloba conjuntamente el efecto de una intensidad de tráfico variable y de una longitud de tramo de curva no uniforme.

7.5.- Resumen del capítulo 7.

El proceso de modelización desarrollado en el presente capítulo ha proporcionado los resultados siguientes:

1.- En este trabajo han sido seleccionados itinerarios que se inician y discurren en parte por la provincia de Madrid junto a otros situados en la provincia de Toledo. El número de kilómetros de autovía analizados es de 225 kilómetros, con un total de 116 tramos de curva. Los distintos itinerarios muestran gran disparidad en cuanto al número de tramos de curva existentes por kilómetro. Estos resultados son adecuados a los objetivos del estudio, de modo que los itinerarios analizados incluyan gran variabilidad desde el punto de vista de los factores permanentes del medio.

No aparecen diferencias significativas entre los itinerarios de autovía de la muestra y los del resto de autovías de España, desde el punto de vista de la configuración de la colisión y de la geometría del trazado en que se producen los accidentes. Debido a ello se puede concluir que la muestra seleccionada es representativa de las autovías de España.

2.- En este trabajo, se acepta la hipótesis que el número de accidentes que se concentra en un tramo, en un período de tiempo determinado, sigue una *distribución de Poisson*. Dicha hipótesis es equivalente a considerar que la frecuencia media de accidentes en un tramo, en un período de tiempo dado, y mientras las condiciones de dicho tramo no se modifiquen, es constante.

3.- Partiendo de dicho modelo de distribución, se define como *número de accidentes estadísticamente significativo* el número mínimo de accidentes significativamente mayor al estimador de la media de la distribución. Dicho estimador de la media corresponde a una frecuencia de accidentes no representativa de diferencias entre los distintos tramos.

El análisis efectuado permite definir como *tramo de concentración de accidentes* aquel tramo de curva en el que se concentra un número mínimo de 2 accidentes durante los tres años considerados.

4.- Durante la etapa de recogida de información muestral, es necesario definir los rangos de variación de los factores permanentes del medio en la muestra. De este modo, el modelo desarrollado será aplicable a itinerarios de autovía cuyos factores del medio estén contenidos dentro de los rangos previamente definidos.

5.- Teniendo en cuenta la distribución del número de accidentes que se concentra en un tramo, la aproximación estadística al problema de la modelización de la accidentalidad puede ser abordada desde una doble perspectiva:

- a) Predicción de *la frecuencia de accidentes* acumulados en un tramo de curva de autovía: la función de unión empleada será *la función logarítmica*.
- b) Predicción de *la probabilidad de ocurrencia de accidentes* en un tramo de curva

de autovía: generación de un modelo de *regresión logística*.

6.- Las variables explicativas consideradas durante el proceso de modelización han sido definidas a partir de los factores permanentes del medio de influencia en la ocurrencia de accidentes. Dicho proceso de determinación de variables ha sido presentado en el *Apartado 4*.

7.- En el presente trabajo, ha sido empleado el procedimiento de *eliminación progresiva*, basado en el análisis de significación de las variables involucradas, como procedimiento operativo para la identificación de las variables integrantes de la parte sistemática del modelo.

Tras este proceso de eliminación progresiva, han resultado significativas las variables mostradas seguidamente:

VARIABLES ASOCIADAS A LA GEOMETRÍA

- F_{visIC}^* : variable de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva.
- F_{TC} : variable que combina la influencia sobre la ocurrencia de accidentes de la relación entre la velocidad de aproximación a la curva y la velocidad máxima en curva (F_{vC}), y de la longitud del desarrollo de la curva percibida (F_{visTC}).

VARIABLES ASOCIADAS A LOS RAMALES

- F_{RA} : Dicha variable engloba la influencia sobre la ocurrencia de accidentes de la configuración del ramal de acceso (F_{cRA}), y de la visibilidad del mismo (F_{visRA}).
- F_{cRS}^* : variable de influencia de la configuración del ramal de salida.

VARIABLES ASOCIADAS A LA INTENSIDAD EL TRÁFICO

- F_{exp} : variable de exposición, obtenida del producto de la Intensidad Media Diaria (IMD), y de la longitud de la curva (L_c).

Al mismo tiempo, el signo de los coeficientes estimados para cada una de estas variables en el proceso de modelización coincide con la influencia esperada de las mismas sobre la variable respuesta considerada.

8.- Tras el proceso de eliminación progresiva, han resultado significativas las mismas variables combinadas en los dos procedimientos de modelización abordados.

9.- La falta de significación del resto de variables explicativas objetivas consideradas puede ser debido a:

- a) La variable considerada no influye significativamente en el riesgo de ocurrencia de accidentes en los tramos de curva del tipo de vía considerada.
- b) Aunque exista una relación muy estrecha entre una variable explicativa y la variable respuesta, si el rango de variación de aquella es pequeño y el error experimental alto, es frecuente no observar una relación significativa.

La razón es que la precisión en la estimación depende del rango de variación de la variable explicativa y si éste es pequeño, la varianza del coeficiente estimado será alta y no permitirá concluir que existe relación.

10.- La fase final del proceso ha consistido en la diagnosis del modelo desarrollado. Para ello, se han llevado a cabo dos análisis sobre los coeficientes estimados en dicho proceso:

- *Análisis de multicolinealidad.*
- *Análisis de sensibilidad.*

El resultado de ambos análisis revela una configuración óptima de los coeficientes estimados.

***CAPÍTULO 8.- APLICACIÓN DEL MODELO DE PREDICCIÓN
DESARROLLADO A UN TRAMO DE LA N-I***

CAPÍTULO 8.- APLICACIÓN DEL MODELO DE PREDICCIÓN DESARROLLADO A UN TRAMO DE LA N-I.

8.1.- Introducción.

La predicción está relacionada con la obtención de valores probables de eventos no observados, no necesariamente en el futuro. Para resultar verdaderamente útiles, los valores predichos deben ir acompañados de mediciones precisas.

Así, el objetivo final consiste en la extensión de los modelos, desarrollados sobre una muestra de tramos de curva de autovía, a la predicción de la ocurrencia de accidentes en el resto de tramos de curva de las autovías españolas. Este proceso se basa en la aceptación de las hipótesis siguientes:

- 1.- Las condiciones de toma de datos permanecen invariables.
- 2.- Las variables explicativas significativas del modelo ejercen una influencia uniforme en todos los tramos de curva situados en el tipo de vía analizada: la autovía.

Para ello, ha sido escogido un itinerario de autovía no empleado en el desarrollo de los modelos predictivos. En dicho itinerario, se analizará el error cometido en la predicción de la ocurrencia de accidentes en los tramos de curva mediante los modelos generados en el *Apartado 7*. El itinerario referido se define en la tabla siguiente (*Tabla 8.1.*).

| <i>Denominación de autovía</i> | <i>Itinerario (P.K.inicial - P.K. final)</i> | <i>Nº kilómetros</i> |
|--------------------------------|--|----------------------|
| N-I (Carretera de Burgos) | 96 - 126 | 30 |

Tabla 8.1.- Itinerario de autovía al que se aplica los modelos de predicción desarrollados.

Seguidamente, se muestra la metodología de aplicación de los modelos predictivos al itinerario considerado.

8.2.- Las variables explicativas.

El proceso de predicción se inicia con la medición de los factores permanentes del medio de influencia en la parte sistemática del modelo de predicción, para el posterior cálculo de las variables explicativas en los tramos de curva del itinerario en estudio. Durante este proceso, y con objeto de validar la aplicabilidad del modelo de predicción desarrollado al itinerario considerado, es necesario verificar que el rango de variación de dichos factores está incluido dentro del rango de los mismos en los itinerarios utilizados para el ajuste del modelo de predicción, según han sido mostrados en el *Apartado 7*.

Junto a esto, el número de tramos de curva en un itinerario constituye un indicador del grado de sinuosidad del mismo. Dicho valor en el itinerario considerado se presenta en la tabla siguiente (*Tabla 8.2.*).

| <i>Denominación de autovía</i> | <i>Nº kilómetros</i> | <i>Nº de tramos de curva</i> | <i>Tramos/km.</i> |
|--------------------------------|----------------------|------------------------------|-------------------|
| N-I (Carretera de Burgos) | 30 | 19 | 0,63 |

Tabla 8.2.- Número de tramos de curva en el itinerario de autovía analizado.

Los valores de los factores del medio y de las variables explicativas consideradas en los modelos desarrollados se muestran a continuación.

8.2.1.- FACTORES PERMANENTES DEL MEDIO.

A continuación son mostrados los valores de los factores permanentes del medio en el itinerario analizado, obtenidos a partir de las medidas realizadas mediante el vehículo instrumentado CANE.

8.2.1.1.- Longitud de tramos (recta y curva).

Seguidamente (*Figuras 8.1. y 8.2.*) se representan los valores de las longitudes de los tramos de curva y de recta en los tramos medidos. Asimismo, estos valores son recogidos en el *Anexo IX (Tablas IX.1. y IX.2.)*.

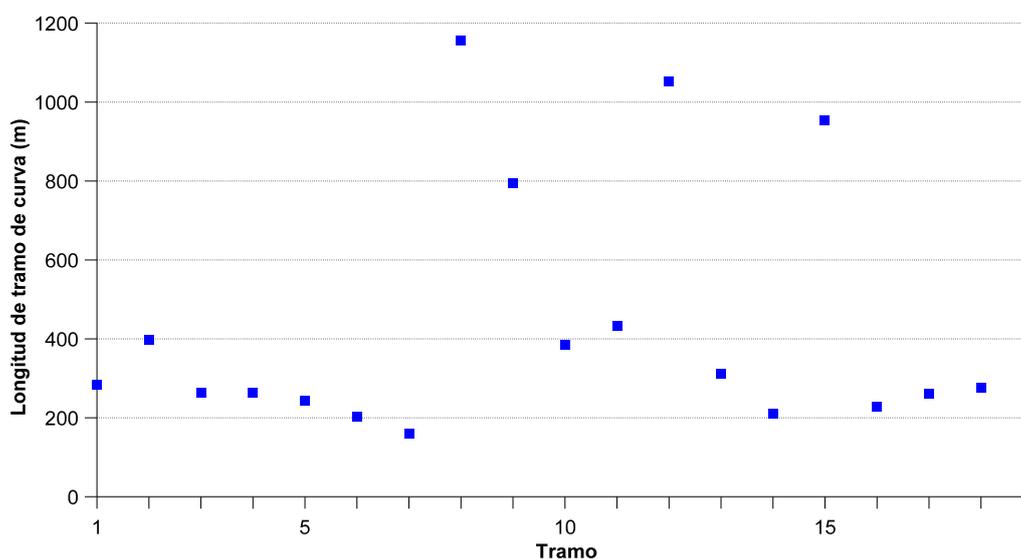


Figura 8.1.- Valores de longitudes de los tramos de curva.

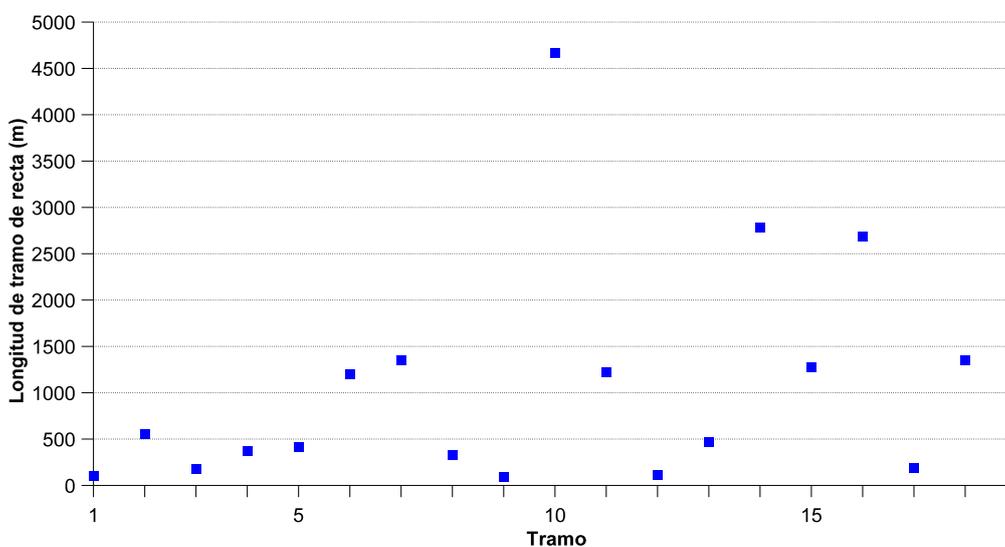


Figura 8.2.- Valores de longitudes de los tramos de recta.

Las figuras precedentes muestran los siguientes resultados relacionados con las longitudes de los tramos de curva y recta:

- ▶ La longitud del tramo de curva varía entre 160 y 1156 m.
- ▶ La longitud del tramo de recta varía entre 92 y 4670 m.
- ▶ El rango de variación de ambos factores está comprendido dentro del rango de los mismos en los itinerarios empleados durante el ajuste del modelo de predicción (*Figuras 7.17. y 7.19.*).

8.2.1.2.- Radio mínimo de tramos de curva.

Seguidamente (*Figura 8.3.*) se representa los valores de los radios mínimos de los tramos de curva en el itinerario medido. Asimismo, estos valores son recogidos en el *Anexo IX (Tabla IX.3.)*.

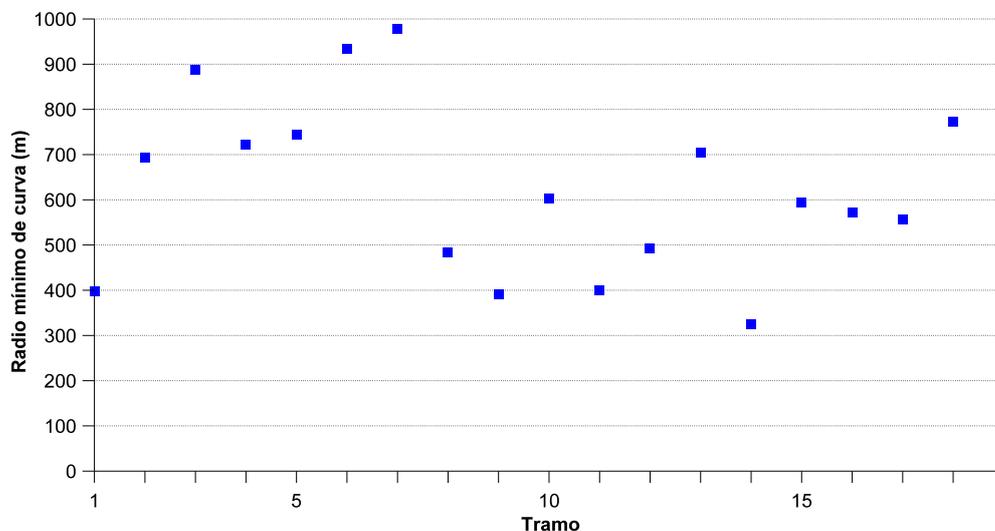


Figura 8.3.- Valores del radio mínimo de los tramos de curva.

La figura precedente muestra los siguientes resultados relacionados con el radio mínimo de los tramos de curva:

- ▶ El radio mínimo del tramo de curva varía entre 300 y 1000 m.
- ▶ El rango de variación de este factor está comprendido dentro del rango del mismo en los itinerarios empleados durante el ajuste del modelo de predicción (*Figura 7.21.*).

8.2.1.3.- Trazado conjunto en planta y alzado.

8.2.1.3.1.- *Peralte máximo en tramos de curva.*

A continuación (*Figura 8.4.*) se representa los valores del peralte máximo de los tramos de curva en el itinerario medido. Asimismo, estos valores son recogidos en el *Anexo IX (Tabla IX.4.)*.

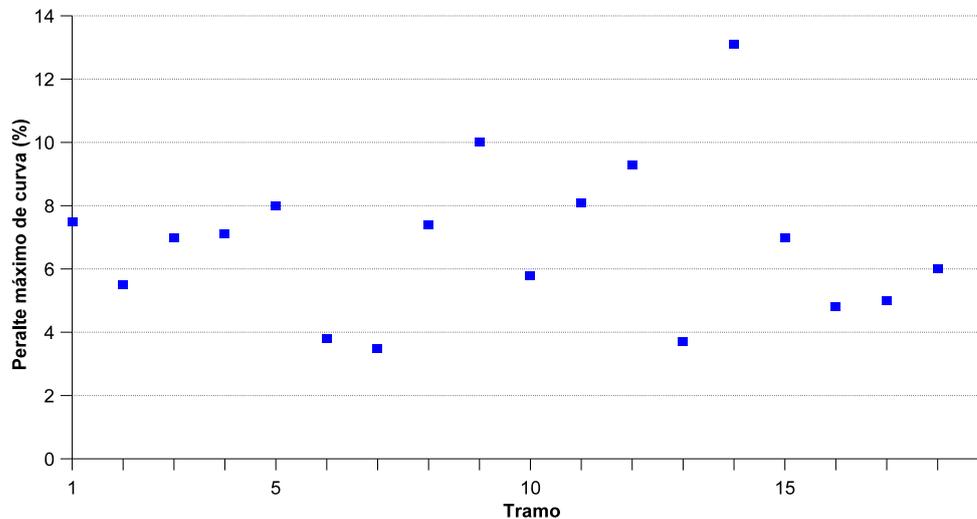


Figura 8.4.- Valores del peralte máximo de los tramos de curva.

La figura precedente muestra los siguientes resultados relacionados con el peralte máximo de los tramos de curva:

- ▶ Dicho peralte varía entre 3 y 14 %.
- ▶ El rango de variación de este factor está comprendido dentro del rango del mismo en los itinerarios empleados durante el ajuste del modelo de predicción (*Figura 7.24.*).

8.2.1.3.2.- *Rampa/pendiente promedio de tramo de recta precedente.*

Seguidamente (*Figura 8.5.*) se representa los valores de la rampa/pendiente promedio del tramo de recta precedente en el itinerario medido. Asimismo, estos valores son recogidos en el *Anexo IX (Tabla IX.5.)*.

El criterio de signos considerado ha sido el siguiente:

- Rampa (ascendente): signo positivo.
- Pendiente (descendente): signo negativo.

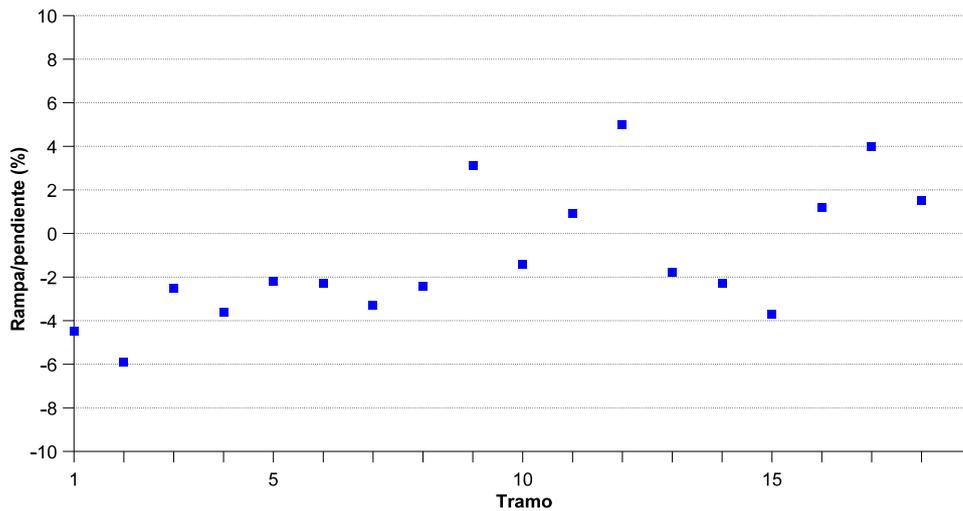


Figura 8.5.- Valores de la rampa/pendiente promedio del tramo de recta precedente.

La figura precedente muestra los siguientes resultados relacionados con la rampa/pendiente promedio del tramo de recta precedente:

- ▶ La inclinación de la rasante varía entre -5,9 y 5 %.
- ▶ El rango de variación de este factor está comprendido dentro del rango del mismo en los itinerarios empleados durante el ajuste del modelo de predicción (Figura 7.27.).

8.2.1.3.3.- Rampa/pendiente promedio de tramo de curva.

A continuación (Figura 8.6.) se representa los valores de la rampa/pendiente promedio del tramo de curva en el itinerario medido. Asimismo, estos valores son recogidos en el Anexo IX (Tabla IX.6.).

La figura siguiente muestra los siguientes resultados relacionados con la rampa/pendiente promedio del tramo de curva:

- ▶ La inclinación de la rasante varía entre -6 y 6 %.
- ▶ El rango de variación de este factor está comprendido dentro del rango del mismo en los itinerarios empleados durante el ajuste del modelo de predicción (Figura 7.29.).

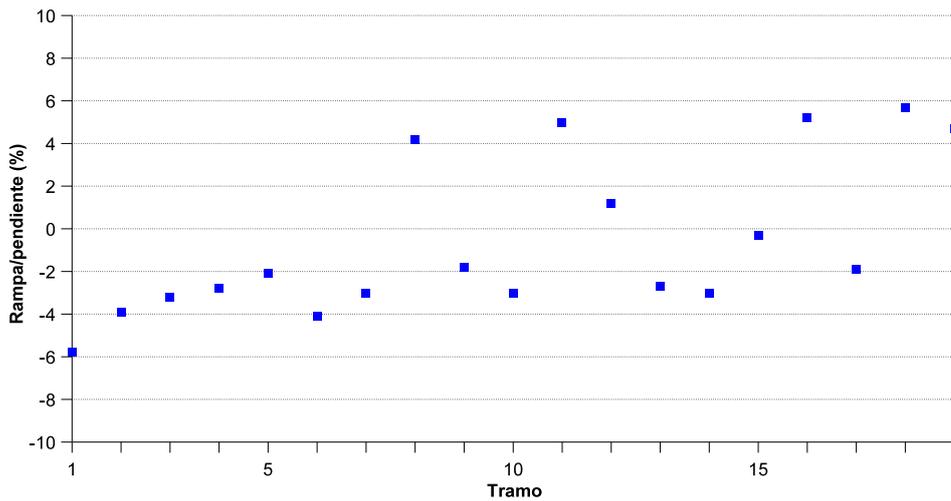


Figura 8.6.- Valores de la rampa/pendiente promedio del tramo de curva.

8.2.1.3.4.- Rampa/pendiente máxima de tramo de curva.

A continuación (Figura 8.7.) se representa los valores de la rampa/pendiente máxima del tramo de curva en el itinerario medido. Asimismo, estos valores son recogidos en el *Anexo IX (Tabla IX.7.)*.

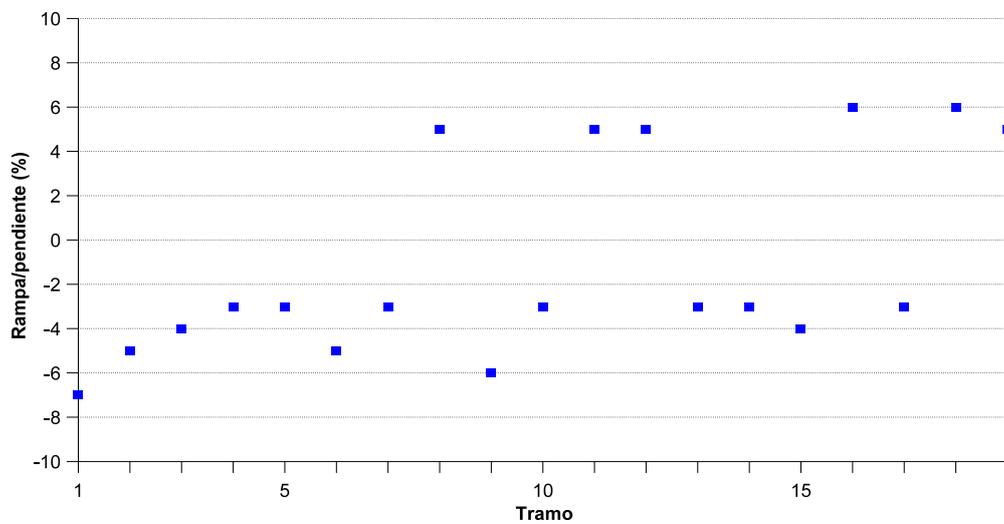


Figura 8.7.- Valores de la rampa/pendiente máxima del tramo de curva.

La figura siguiente muestra los siguientes resultados relacionados con la rampa/pendiente máxima del tramo de curva:

- ▶ La inclinación de la rasante varía entre -7 y 6 %.
- ▶ El rango de variación de este factor está comprendido dentro del rango del mismo en los itinerarios empleados durante el ajuste del modelo de predicción (*Figura 7.31.*).

8.2.1.3.5.- Trazado conjunto en planta y alzado.

Seguidamente (*Figuras 8.8. y 8.9.*) se representa los valores de la inclinación de la línea de máxima pendiente del tramo de curva en el itinerario medido. Asimismo, estos valores son recogidos en el *Anexo IX (Tabla IX.8.)*.

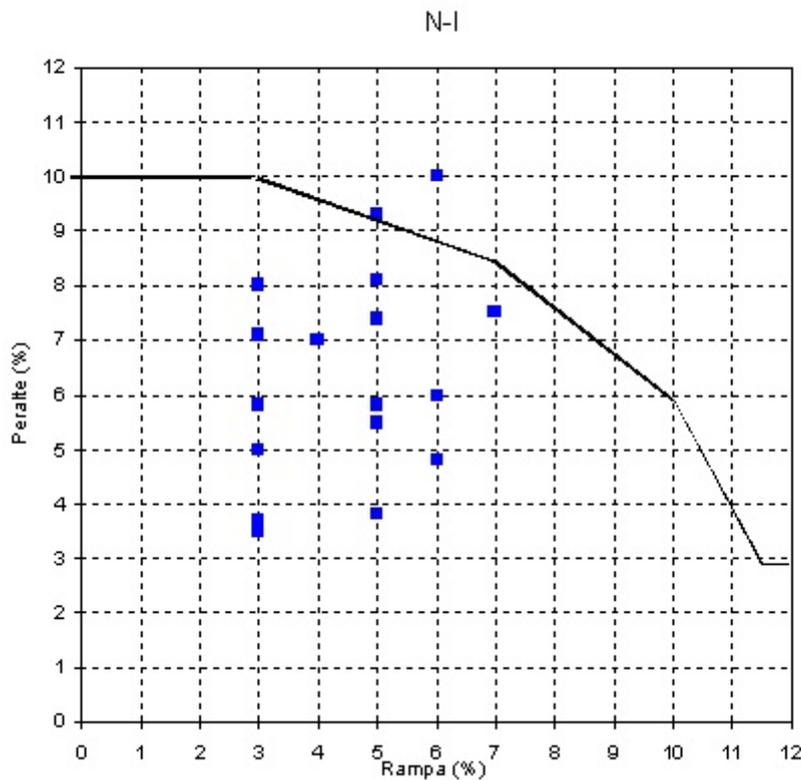


Figura 8.8.- Trazado conjunto en planta y alzado de los tramos de curva.

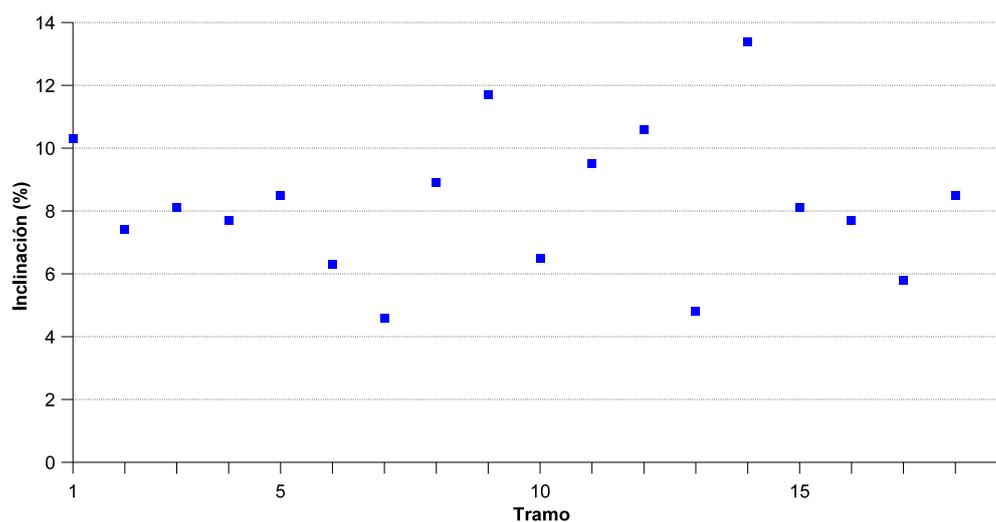


Figura 8.9.- Valores de inclinación de línea de máxima pendiente del tramo de curva.

Las figuras precedentes muestran los siguientes resultados relacionados con la inclinación de la línea de máxima pendiente del tramo de curva:

- ▶ La inclinación varía entre 4 y 14 %.
- ▶ El rango de variación de este factor está comprendido dentro del rango del mismo en los itinerarios empleados durante el ajuste del modelo de predicción (Figura 7.34.).

8.2.2.- VARIABLES EXPLICATIVAS.

8.2.2.1.- Variables asociadas a la geometría de la curva: velocidad máxima en curva (v_s).

A partir de la información del radio y peralte de la curva medidos, seguidamente (*Figura 8.10.*) se representan los valores de la velocidad máxima en curva en el itinerario analizado. Asimismo, estos valores son recogidos en el *Anexo IX (Tabla IX.9.)*.

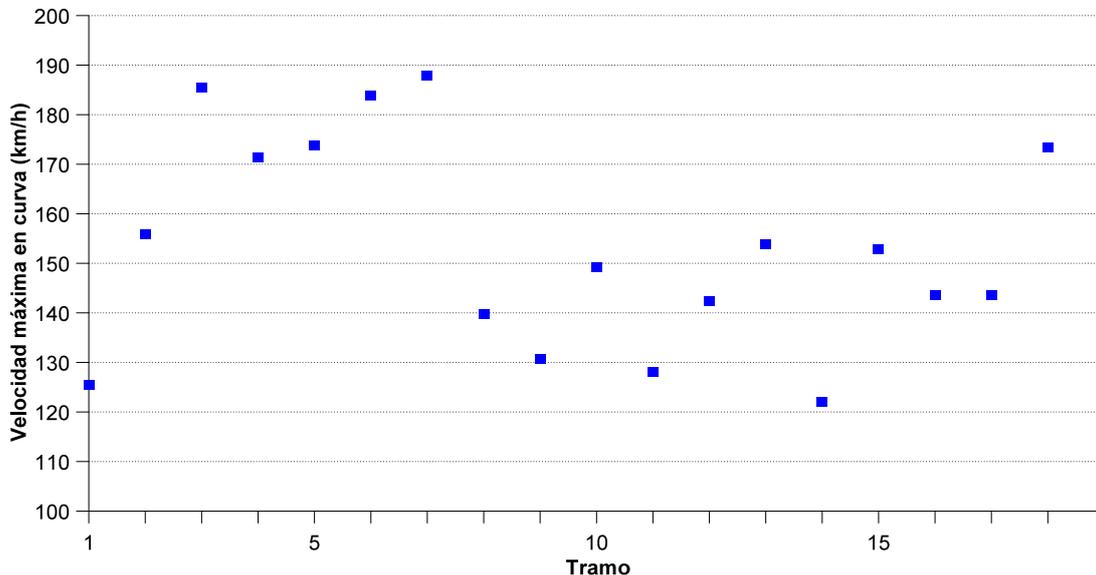


Figura 8.10.- Valores de velocidad máxima en curva del tramo de curva.

La figura precedente muestra los siguientes resultados relacionados con la velocidad máxima en curva del tramo de curva:

- ▶ Dicha velocidad varía entre 122 y 188 km/h.
- ▶ El rango de variación de este factor está comprendido dentro del rango del mismo en los itinerarios empleados durante el ajuste del modelo de predicción (*Figura 7.36.*).

8.2.2.2.- Variables asociadas a la geometría de la curva: velocidad de aproximación (v_{ap}).

Tomando en cuenta los criterios de cálculo de la velocidad de aproximación descritos en el *Apartado 4.4.2.1.2.*, seguidamente (*Figura 8.11.*) se representan los valores de dicha velocidad en el itinerario analizado. Asimismo, estos valores son recogidos en el *Anexo IX (Tabla IX.10.)*.

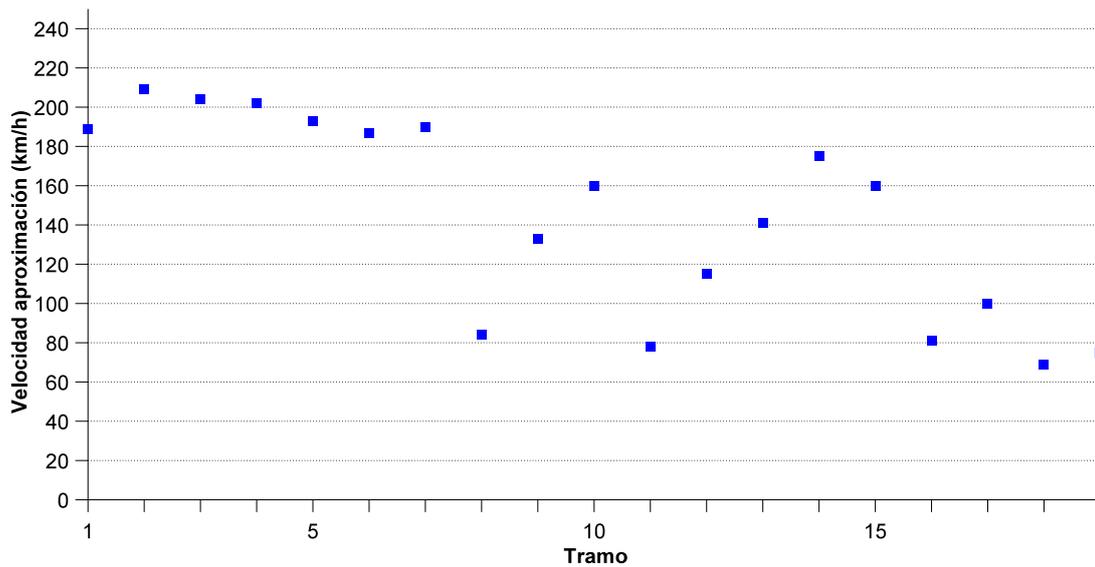


Figura 8.11.- Valores de velocidad de aproximación al tramo de curva.

La figura precedente muestra los siguientes resultados relacionados con la velocidad de aproximación al tramo de curva:

- ▶ Dicha velocidad varía entre 69 y 210 km/h.
- ▶ El rango de variación de este factor está comprendido dentro del rango del mismo en los itinerarios empleados durante el ajuste del modelo de predicción (Figura 7.38.).

8.2.2.3.- Variables asociadas a la geometría de la curva: factor de influencia de la velocidad en la curva ($E_{v,c}$).

Tomando en consideración la definición mostrada en el Apartado 4.4.2.1.3., seguidamente (Figura 8.12.) se representan los valores de dicho factor en el itinerario analizado. Asimismo, estos valores son recogidos en el Anexo IX (Tabla IX.11.).

La figura siguiente muestra los siguientes resultados relacionados con el factor de influencia de la velocidad en la curva:

- ▶ Dicho factor varía entre 0,4 y 1,6.
- ▶ El rango de variación de este factor está comprendido dentro del rango del mismo en los itinerarios empleados durante el ajuste del modelo de predicción (Figura 7.40.).

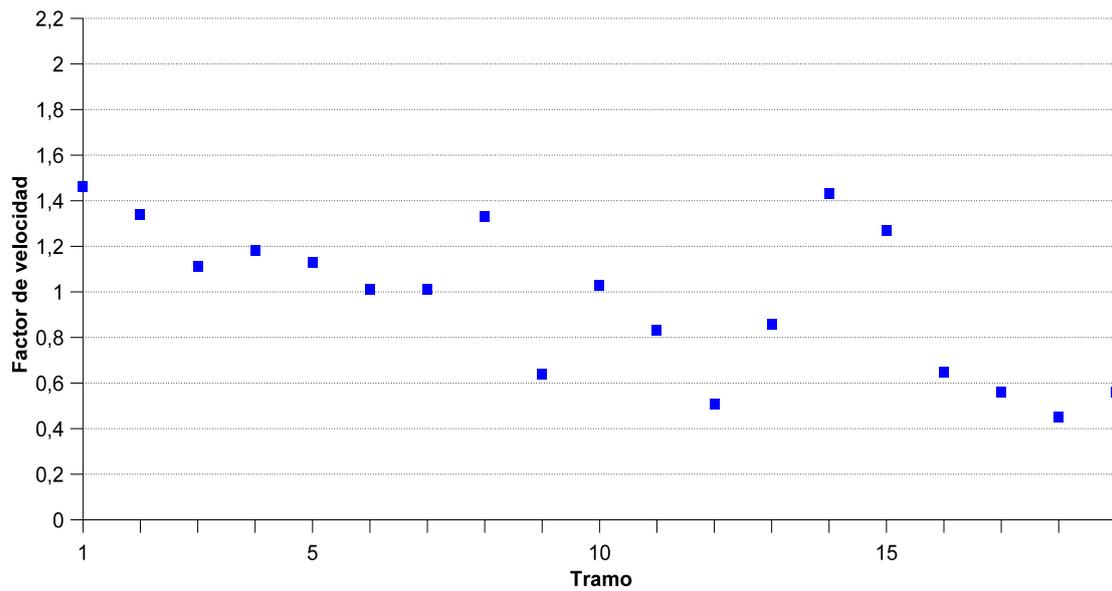


Figura 8.12.- Valores de factor de influencia de la velocidad en la curva.

8.2.2.4.- Variables asociadas a la geometría de la curva: factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (F_{visIC}).

Tomando en consideración la definición mostrada en el *Apartado 4.4.2.1.5.*, seguidamente (*Figura 8.13.*) se representan los valores de dicho factor en el itinerario analizado. Asimismo, estos valores son recogidos en el *Anexo IX (Tabla IX.12.)*.

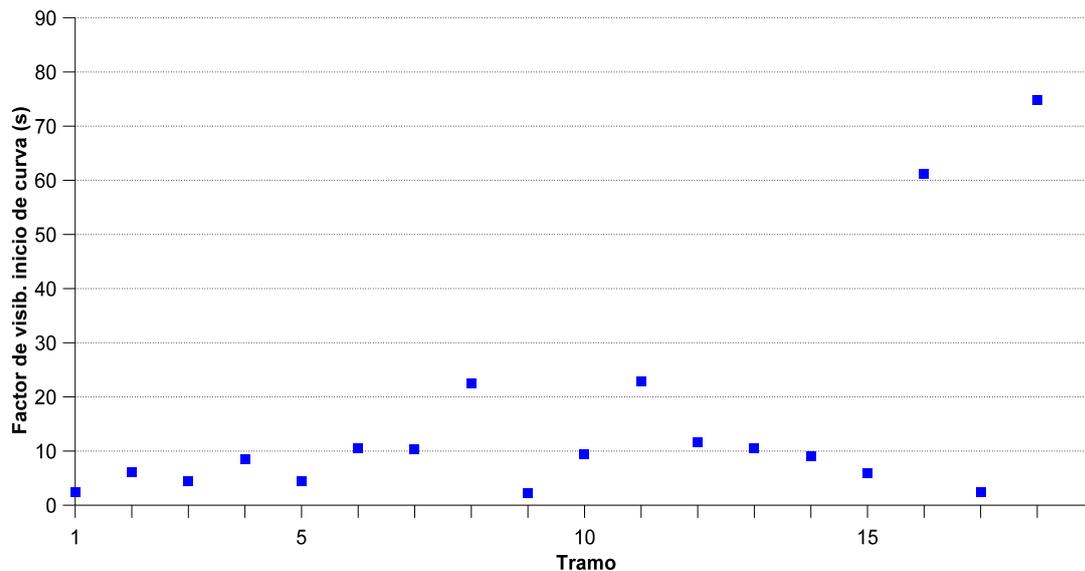


Figura 8.13.- Valores de factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva.

La figura precedente muestra los siguientes resultados relacionados con el factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva:

- ▶ Dicho factor varía entre 0 y 80 s.
- ▶ El rango de variación de este factor está comprendido dentro del rango del mismo en los itinerarios empleados durante el ajuste del modelo de predicción (*Figura 7.44.*).

8.2.2.5.- Variables asociadas a la geometría de la curva: factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (F_{visTC}).

Tomando en consideración la definición mostrada en el *Apartado 4.4.2.1.6.*, seguidamente (*Figura 8.14.*) se representan los valores de dicho factor en los itinerarios analizados. Asimismo, estos valores son recogidos en el *Anexo IX (Tabla IX.13.)*.

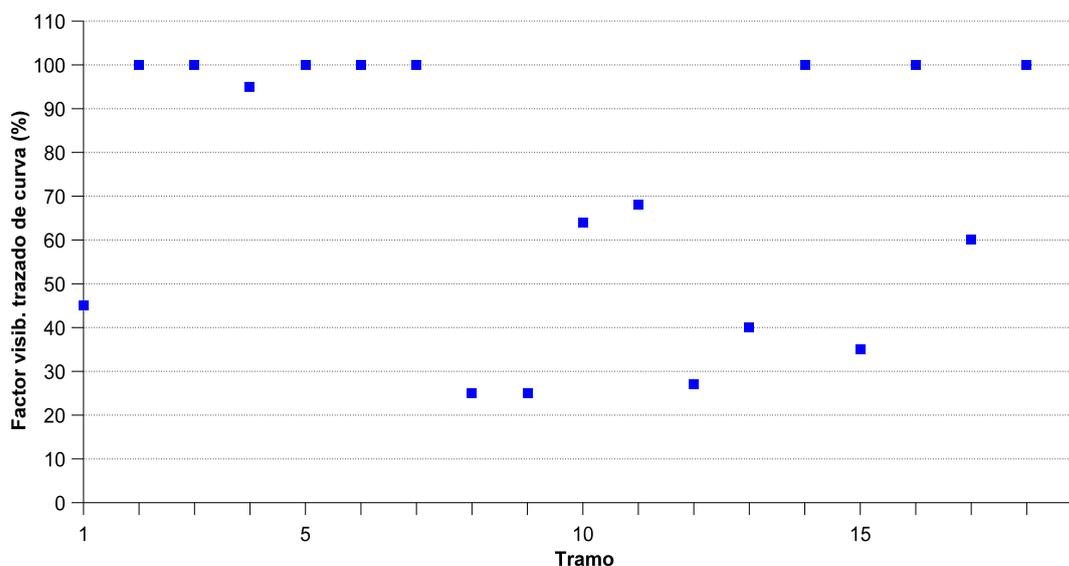


Figura 8.14.- Valores de factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva.

La figura precedente muestra los siguientes resultados relacionados con el factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva:

- ▶ Dicho factor varía entre 25 y 100 %.
- ▶ El rango de variación de este factor está comprendido dentro del rango del mismo en los itinerarios empleados durante el ajuste del modelo de predicción (*Figura 7.46.*).

8.2.2.6.- Variable de exposición (F_{exp}).

La siguiente figura (Figura 8.15.) y el Anexo IX (Tabla IX.14.), presenta los valores de la variable combinada, obtenida del producto de la Intensidad Media Diaria (IMD), y de la Longitud de la curva (L_c).

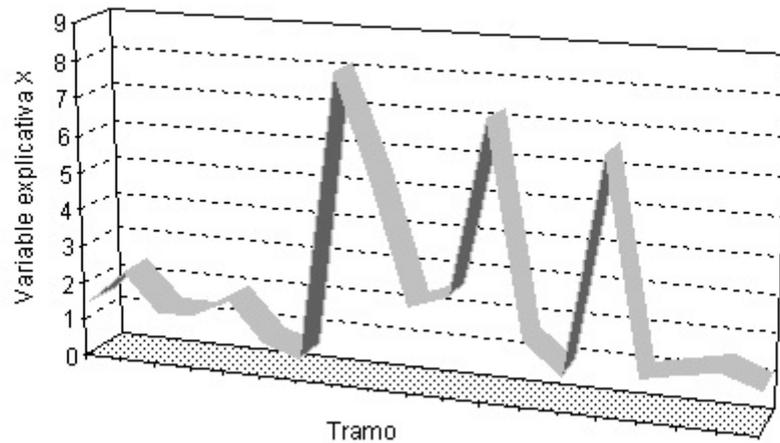


Figura 8.15.- Variable explicativa F_{exp} en tramos de curva del itinerario analizado.

8.2.2.7.- Variable asociada a los ramales de acceso (F_{RA}).

La siguiente figura (Figura 8.16.) y el Anexo IX (Tabla IX.15.), presenta los valores de la variable combinada de influencia del ramal de acceso a la autovía.

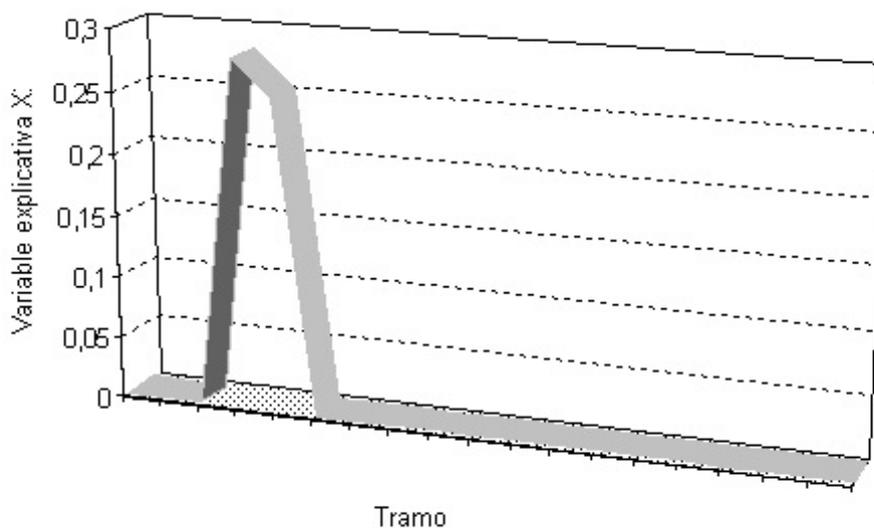


Figura 8.16.- Variable explicativa F_{RA} en tramos de curva del itinerario analizado.

8.2.2.8.- Variable de configuración del ramal de salida (F^*_{CRS}).

La siguiente figura (Figura 8.17.) y el Anexo IX (Tabla IX.16.), presenta los valores de la variable de influencia del ramal de salida de la autovía.

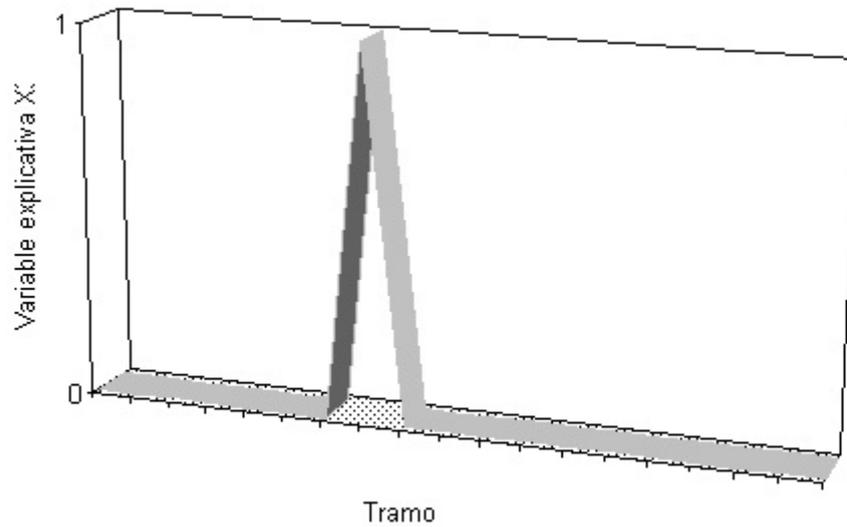


Figura 8.17.- Variable explicativa F^*_{CRS} en tramos de curva del itinerario analizado.

8.2.2.9.- Variable asociada a la geometría F^*_{visIC} .

La siguiente figura (Figura 8.18.) y el Anexo IX (Tabla IX.17.), presenta los valores de la variable de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva.

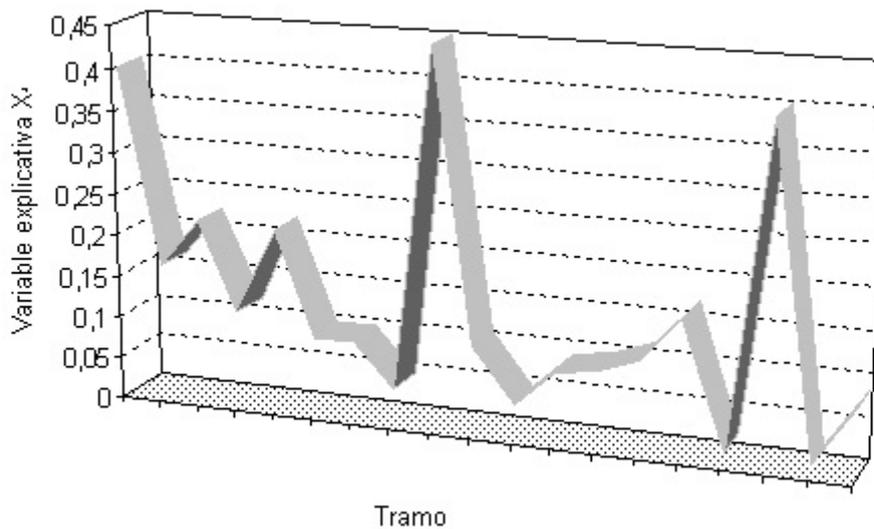


Figura 8.18.- Variable explicativa F^*_{visIC} en tramos de curva del itinerario analizado.

8.2.2.10.- Variable asociada a la geometría F_{TC} .

La siguiente figura (Figura 8.19.) y el Anexo IX (Tabla IX.18.), presenta los valores de la variable que combina la influencia de la relación entre la velocidad de aproximación a la curva y la velocidad máxima en curva de la misma (F_{vC}), y de la longitud del desarrollo de la curva percibida (F_{visTC}).

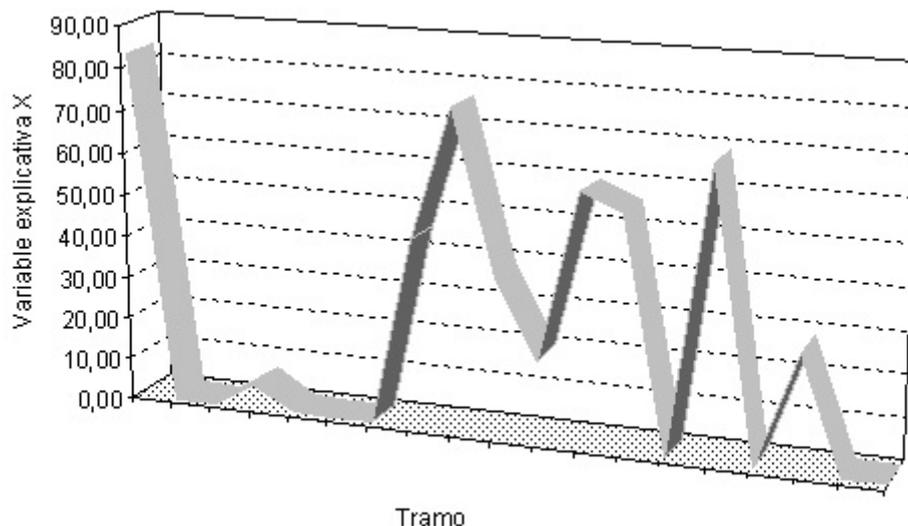


Figura 8.19.- Variable explicativa F_{TC} en tramos de curva del itinerario analizado.

8.2.2.11.- La variable asociada a los ramales de acceso (F_{RA}) en el modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes.

Las variables explicativas del modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva coinciden con las variables consideradas en el modelo de estimación de la frecuencia de accidentes.

No obstante, la variable F_{RA} engloba la influencia sobre la ocurrencia de accidentes de una variable discreta (configuración del ramal - F_{cRA} -), y de una variable continua (visibilidad del mismo - F_{visRA} -).

Así, como ha sido descrito en el Apartado 7., en el caso de regresión logística (empleada en el modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes), las variables discretas son procesadas de forma específica frente a las continuas. Así, cuando una variable discreta presenta más de dos niveles o categorías, son creadas nuevas variables cada una de ellas con dos niveles. El número de variables binarias requeridas para representar una variable discreta es uno menos que el número de categorías de la misma.

Así, dicha variable de configuración posee cuatro niveles, por lo que serán creadas tres variables binarias. El nivel de la variable original (F_{cRA}) tomado como referencia es el nivel “1”, correspondiente a la inexistencia de ramal de acceso en el tramo de curva de autovía.

Ante esto, han sido definidas tres nuevas variables explicativas combinadas (F_{RA2} , F_{RA3} , F_{RA4}) en sustitución de la variable original F_{RA} . Los valores de estas variables son mostradas en la siguiente figura (Figura 8.20.).

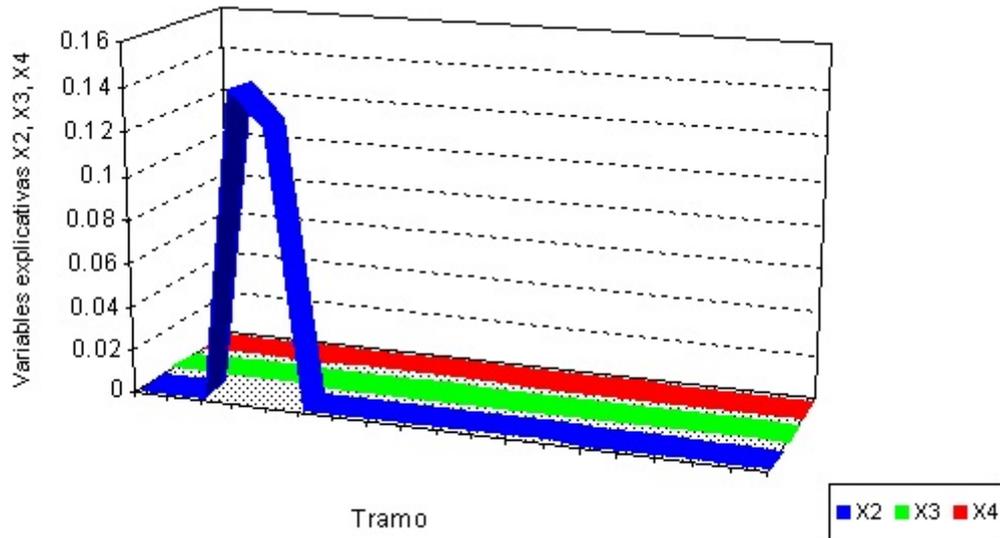


Figura 8.20.- Variables explicativas F_{RA2} , F_{RA3} , F_{RA4} en tramos de curva del itinerario analizado.

8.3.- Predicción de ocurrencia de accidentes en curva.

8.3.1.- MODELO DE ESTIMACIÓN DE LA FRECUENCIA DE ACCIDENTES EN TRAMOS DE CURVA.

El modelo de predicción de la frecuencia de accidentes viene dado por la siguiente ecuación:

$$\hat{Y} = e^{-2,14 + 0,063 \cdot X_1 + 3,07 \cdot X_2 + 0,934 \cdot X_3 + 7,05 \cdot X_4 + 0,008 \cdot X_5} \quad (8.1.)$$

La aplicación de este modelo al itinerario considerado genera el resultado mostrado en la siguiente figura (Figura 8.21.).

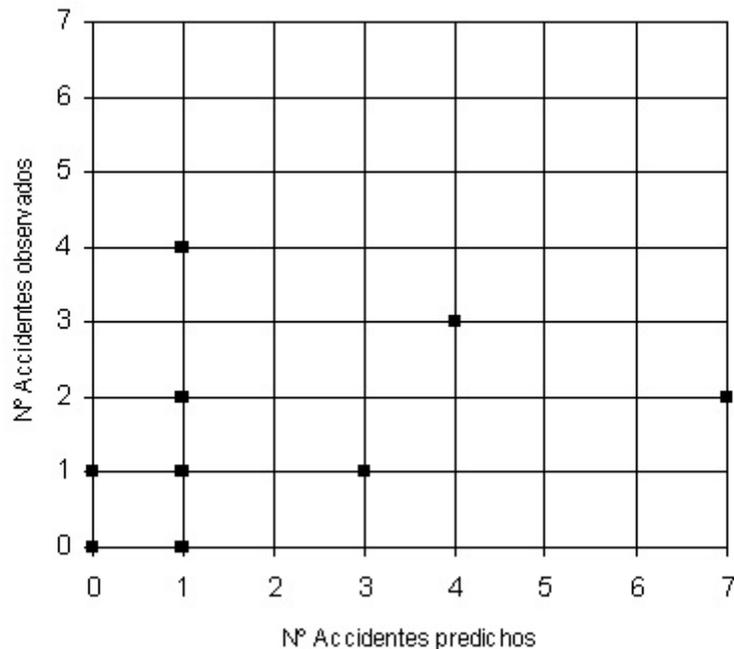


Figura 8.21.- Relación entre número de accidentes observados y predichos por el modelo.

Considerando como parámetro de cuantificación global de la relación entre ambas variables el coeficiente de correlación lineal entre las mismas r , el valor de dicho coeficiente en el itinerario considerado es:

$$r = 0.51$$

8.3.2.- MODELO DE ESTIMACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE ACCIDENTES EN TRAMOS DE CURVA.

El modelo de predicción de la probabilidad de ocurrencia de accidentes viene dado por la siguiente ecuación:

$$\pi = \frac{e^{-5,35 + 0,139 \cdot X_1 + 12,82 \cdot X_2 + 31,70 \cdot X_3 + 52,84 \cdot X_4 + 3,94 \cdot X_5 + 10,32 \cdot X_6 + 0,017 \cdot X_7}}{1 + e^{-5,35 + 0,139 \cdot X_1 + 12,82 \cdot X_2 + 31,70 \cdot X_3 + 52,84 \cdot X_4 + 3,94 \cdot X_5 + 10,32 \cdot X_6 + 0,017 \cdot X_7}} \quad (8.2.)$$

La aplicación de este modelo al itinerario considerado genera el resultado mostrado en la siguiente figura (*Figura 8.22.*).

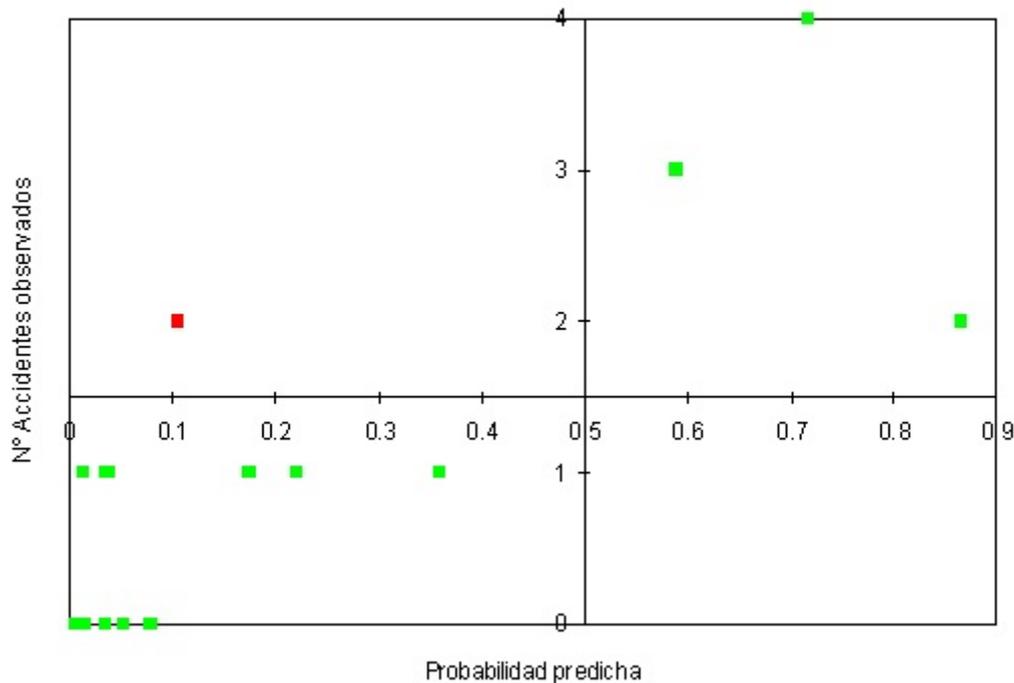


Figura 8.22.- Representación del ajuste global entre la probabilidad predicha y los valores observados de la variable binaria “tramo de concentración de accidentes”.

A partir de estos valores se define la tabla de clasificación, la cual compara los valores observados de la variable binaria “tramo de concentración de accidentes”, con los valores predichos por el modelo de la misma, de acuerdo al criterio definido. Dicha tabla es mostrada seguidamente (*Tabla 8.4.*).

| Número de casos Observados | Predichos | | Aciertos (%) |
|-------------------------------|-----------|---|--------------|
| | 0 | 1 | |
| 0 | 15 | 0 | 100 |
| 1 | 1 | 3 | 75 |
| Total | | | 94,7 |

Tabla 8.3.- *Tabla de clasificación del modelo de estimación de la probabilidad de ocurrencia de accidentes en tramos de curva.*

8.4.- Resumen del capítulo 8.

El análisis de la aplicación de los modelos desarrollados al itinerario considerado permite concluir lo siguiente:

- 1.- Los rangos de variación de los factores permanentes del medio en el itinerario de autovía considerado están incluidos dentro de dichos rangos en los itinerarios de autovía de la muestra seleccionada para el ajuste de los modelos de predicción, lo cual posibilita la aplicabilidad de los mismos a este itinerario.

- 2.- La predicción de la frecuencia de accidentes en tramos de curva en el itinerario considerado no resulta concluyente. A diferencia del anterior, la predicción de “tramos de concentración de accidentes “ mediante el modelo de predicción de la probabilidad de ocurrencia de accidentes proporciona resultados significativos.

CAPÍTULO 9.- CONCLUSIONES

9.- CONCLUSIONES.

El proceso de generación de modelos de predicción de la ocurrencia de accidentes en tramos de carretera desarrollado en la presente Tesis Doctoral, basado en la medición en continuo de los valores de los factores del medio involucrados mediante un vehículo sensorizado, permite concluir lo siguiente:

Primera.- El fenómeno del accidente tiene lugar cuando se producen determinadas asociaciones de actos inseguros por parte de los conductores y condiciones inseguras en los factores asociados al vehículo y al medio. La influencia del conductor como parte fundamental de la función de control del sistema hace prácticamente imposible la definición de un número finito de tales asociaciones para explicar la mayoría de los accidentes.

No obstante lo anterior, cabe aplicar el principio de aleatorización a la función de influencia del conductor, considerándolo como un factor no controlado por el experimentador. Frente a esto, serán tenidos en cuenta en este trabajo de investigación los factores permanentes del medio. Los factores transitorios del medio (condiciones climatológicas, obras en la calzada,...) no son contemplados, lo cual constituirá una de las principales fuentes de error durante el presente proceso de modelización.

Segunda.- La generación de modelos estadísticos constituye una tarea laboriosa, con objeto que los resultados obtenidos puedan ser aplicables a la población considerada. La presente Tesis Doctoral aborda la elaboración de modelos de predicción de la ocurrencia de accidentes a partir de los factores permanentes del medio, lo cual ha requerido del seguimiento de una metodología constituida por las fases siguientes:

- *Planteamiento del problema.*
- *Desarrollo del sistema de medida.*
- *Ajuste del modelo de predicción.*

Tercera.- El primer paso para la elaboración de un modelo estadístico consiste en la definición del ámbito de aplicación del mismo, esto es, la población. La población debe estar integrada por elementos homogéneos desde el punto de vista de la propiedad estudiada.

La influencia de los factores permanentes del medio sobre el riesgo de ocurrencia de accidentes está fuertemente condicionada por dos propiedades del trazado:

- Tipo de vía.
- Características del trazado en planta de la calzada: recta frente a curva.

Tomando esto en consideración, y utilizando como criterios principales de selección la frecuencia y gravedad de los accidentes por el tipo de vía, así como los tramos cuya accidentalidad está notablemente influida por su geometría, ha sido definido el ámbito de aplicación de la presente Tesis como sigue:

Tramos en curva de autovías españolas, donde serán identificados los principales factores de riesgo potencial asociados a las condiciones permanentes del medio presentes en los mismos, los cuales condicionan el comportamiento de los conductores influyendo sobre la ocurrencia de accidentes de tráfico.

Esta etapa es fundamental, ya que las conclusiones obtenidas al final del estudio sólo se aplicarán a los miembros de la población considerada.

Cuarta.- Posteriormente, se aborda la etapa de definición de las variables del modelo. En este estudio son consideradas dos variables respuesta de distinta naturaleza:

- *Variable respuesta discreta:* frecuencia de accidentes en tramos de curva.
- *Variable respuesta binaria:* tramo de curva de concentración de accidentes.

Finalmente han sido identificadas, a partir de los factores permanentes del medio de influencia en la ocurrencia de accidentes, las variables explicativas que serán consideradas en la parte sistemática del modelo predictivo. Dichas variables se listan seguidamente:

- ASOCIADAS A LA GEOMETRÍA.
 - ▶ Velocidad máxima en curva (v_s).
 - ▶ Velocidad de aproximación (v_{ap}).
 - ▶ Factor de influencia de la velocidad en la curva (F_{vC}).
 - ▶ Factor de influencia de las curvas precedentes (F_{cp}).
 - ▶ Factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (F_{visIC}).
 - ▶ Factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (F_{visTC}).
 - ▶ Factor de influencia de la señalización de la curva (F_{sC}).
 - ▶ Longitud de curva (L_c).
- ASOCIADAS A LOS RAMALES.
 - ▶ Factor de influencia de configuración del ramal (F_{cR}).
 - ▶ Factor de influencia de la velocidad en el ramal (F_{vR}).
 - ▶ Factor de influencia de la visibilidad del ramal (F_{visR}).
 - ▶ Factor de influencia de ramales adyacentes (F_T).
- ASOCIADAS A LA INTENSIDAD DEL TRÁFICO.
 - ▶ Intensidad Media Diaria (IMD).

Quinta.- La bondad del análisis de significación de las variables explicativas se fundamenta en la precisión en la medida de dichos factores del medio. Esta medición constituye habitualmente una tarea laboriosa, no existiendo sistemas de medida específicos de aplicación a la investigación accidentalológica para el registro en continuo de dichos factores.

Debido a ello, ha sido desarrollado un sistema de medida (vehículo CANE) basado en un vehículo turismo de serie para la medición en continuo de los factores del medio. Esto posibilita la medición de itinerarios prolongados con una mínima perturbación del flujo de tráfico. La elaboración de dicho sistema ha sido abordado teniendo en consideración los siguientes criterios:

- Utilización de un vehículo turismo de serie como plataforma del sistema.
- Medición en continuo de las variables del medio con una mínima perturbación del flujo de tráfico.
- Facilidad de manejo.
- Optimización de los algoritmos de cálculo.
- Coste la más reducido posible.

Para la consecución de este objetivo, han sido embarcados en dicho vehículo el mínimo número de sensores capaces de proporcionar medidas adecuadas al objetivo del estudio. Dichos *equipos de medida* se listan seguidamente:

- Equipo de medida de velocidad sin contacto.
- Equipo de medida del ángulo de giro de volante.
- Servo inclinómetro de dos ejes (longitudinal y transversal).
- Cámara de video.
- Equipo de registro de señales, basado en un ordenador embarcado.

Sexta.- La obtención de las variables del medio a partir de las medidas registradas en continuo mediante el vehículo instrumentado requiere un procesamiento en laboratorio de dichas medidas.

De este modo, y dado que uno de los criterios fundamentales de diseño del sistema ha sido la facilidad de manejo del mismo, tanto durante el proceso de medición sobre el itinerario, como durante el posterior tratamiento de las señales y generación de las variables de interés, ha sido desarrollada una aplicación informática a medida para la obtención de los perfiles en planta y alzado de la calzada y el cálculo de algunas de las variables explicativas consideradas en los modelos de predicción de la ocurrencia de accidentes. Esta aplicación es denominada DISET.

No obstante, existen un conjunto de variables explicativas objetivas que no pueden ser medidas mediante los sensores embarcados. Para la determinación de dichas variables se emplean las imágenes registradas en continuo mediante la cámara de vídeo embarcada en el vehículo instrumentado CANE, e instalada en el interior del habitáculo de conducción, aproximadamente a la altura del punto de vista del conductor, con objeto de obtener una visión lo más próxima posible a la imagen percibida por el mismo durante la circulación por el trazado de carretera.

Séptima.- La etapa final del proceso de desarrollo del sistema de media en continuo ha consistido en la validación de los parámetros calculados mediante ensayos dinámicos en pista de pruebas (pista del INTA) y en carretera (M-607 y N-I).

Los resultados obtenidos permiten concluir que la metodología de cálculo de estas magnitudes empleada en la presente Tesis resulta adecuada para los objetivos pretendidos de estimación de la ocurrencia de accidentes.

Octava.- Los valores de los factores permanentes del medio considerados en la presente Tesis Doctoral están definidos a priori en los itinerarios de carretera evaluados, por lo que serán empleados *métodos de muestreo* para la selección de la muestra de tramos de curva empleados.

En este trabajo han sido seleccionados itinerarios que se inician y discurren en parte por la provincia de Madrid junto a otros situados en la provincia de Toledo. El número de kilómetros de autovía analizados es de 225 kilómetros, con un total de 116 tramos de curva.

No aparecen diferencias significativas entre los itinerarios de autovía de la muestra y los del resto de autovías de España, desde el punto de vista de la configuración de la colisión y de la geometría del trazado en que se producen los accidentes. Debido a ello se puede concluir que la muestra seleccionada es representativa de las autovías de España.

Noveno.- En este estudio, ha sido verificada la hipótesis que el número de accidentes que se concentra en un tramo, en un período de tiempo determinado, sigue una *distribución de Poisson*. Teniendo en cuenta esta distribución, la aproximación estadística al problema de la modelización de la accidentalidad ha sido abordada desde una doble perspectiva:

- Predicción de la *frecuencia de accidentes* acumulados en un tramo de curva de autovía: la función de unión empleada será *la función logarítmica*.
- Predicción de la *probabilidad de ocurrencia de accidentes* en un tramo de curva de autovía: generación de un modelo de *regresión logística*.

Décimo.- Durante la etapa de recogida de información muestral, han sido definidos los rangos de variación de los factores permanentes del medio en la muestra empleado para el posterior proceso de ajuste del modelo. De este modo, los modelos desarrollados serán aplicables a itinerarios de autovía cuyos factores del medio estén contenidos dentro de los rangos previamente definidos.

Undécimo.- Utilizando el procedimiento estadístico de *eliminación progresiva* de variables de influencia en el modelo, han sido identificadas aquellas variables permanentes del medio que ejercen una influencia estadísticamente significativa sobre el fenómeno de ocurrencia de accidentes de tráfico.

Tomando esto en consideración, han resultado significativas las variables mostradas seguidamente:

VARIABLES ASOCIADAS A LA GEOMETRÍA

- F_{visIC}^* : variable de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva.
- F_{TC} : variable que combina la influencia sobre la ocurrencia de accidentes de la relación entre la velocidad de aproximación a la curva y la velocidad máxima en curva (F_{vC}), y de la longitud del desarrollo de la curva percibida (F_{visTC}).

VARIABLES ASOCIADAS A LOS RAMALES

- F_{RA} : dicha variable engloba la influencia sobre la ocurrencia de accidentes de la configuración del ramal de acceso (F_{cRA}), y de la visibilidad del mismo (F_{visRA}).
- F_{cRS}^* : variable de influencia de la configuración del ramal de salida.

VARIABLES ASOCIADAS A LA INTENSIDAD EL TRÁFICO

- F_{exp} : variable de exposición, obtenida del producto de la Intensidad Media Diaria (IMD), y de la longitud de la curva (L_c).

Al mismo tiempo, el signo de los coeficientes estimados para cada una de estas variables en el proceso de modelización coincide con la influencia esperada de las mismas sobre la variable respuesta considerada.

El procedimiento de diagnosis aplicado, basado en un análisis de multicolinealidad y de sensibilidad, revela una configuración óptima de los coeficientes estimados.

Frente a lo anterior, no han resultado significativas en la muestra considerada en este trabajo las variables presentadas a continuación:

VARIABLES ASOCIADAS A LA GEOMETRÍA

- F_{vC} : factor de influencia de la velocidad en la curva. Esto es motivado en gran medida por los elevados valores de la velocidad máxima en curva de autovía en los tramos considerados en el presente trabajo (*Figura 7.36.*), lo cual posibilita en la mayoría de los casos la circulación a velocidades superiores a la máxima en curva en condiciones de seguridad.
- F_{cp} : factor de influencia de las curvas precedentes. Esto es motivado porque los tramos de curva analizados presentan gran homogeneidad desde el punto de vista de la velocidad máxima en curva, lo cual es indicativo de un diseño óptimo del trazado.

- F_{SC} : factor de influencia de la señalización de la curva. Dicho factor no ha resultado significativo en la muestra abordada en el presente estudio motivado por:

- ➔ El diseño óptimo de los tramos de curva, con velocidades máximas en curva elevadas, hace innecesario la señalización de dichas curvas en la mayoría de los casos.
- ➔ Las señales de limitación de velocidad en autovía por debajo de la velocidad genérica de la vía no son habitualmente tomadas en consideración por la mayoría de los conductores.

VARIABLES ASOCIADAS A LOS RAMALES

- F_{VR} : factor de influencia de la velocidad en el ramal. Esto es debido a que la influencia negativa de una velocidad de circulación elevada en el punto de intersección de la vía principal con el ramal de acceso está contrarrestada parcialmente por la existencia de varios carriles en cada sentido de circulación en tramos de autovía, lo cual reduce la interferencia entre los dos flujos de tráfico encontrados.

- F_T : factor de influencia de ramales adyacentes. Esto se debe a que los itinerarios considerados en el presente trabajo de investigación contienen un número muy reducido de situaciones en que se presenten ramales adyacentes, por lo que es esperable que el análisis de significación no detecte la posible influencia de dicha variable explicativa.

Duodécimo.- Tras el proceso de eliminación progresiva, han resultado significativas las mismas variables explicativas en los dos procedimientos de modelización abordados.

Décimo tercera.-

La generalización del modelo predictivo desarrollado mediante su aplicación a tramos de autovía (N-I) que no han sido empleados durante el proceso de generación de dicho modelo ha concluido lo siguiente:

- La predicción de la frecuencia de accidentes en tramos de curva en el itinerario considerado no resulta concluyente. Esto puede estar motivado por la baja variabilidad de algunas de las variables explicativas obtenidas en dicho itinerario.
- A diferencia del anterior, la predicción de “tramos de concentración de accidentes” mediante el modelo de predicción de la probabilidad de ocurrencia de accidentes proporciona resultados satisfactorios.

Décimo cuarta.-

Una de las causas principales de errores durante el proceso de predicción mediante los modelos desarrollados está en la ausencia en el modelo de variables explicativas que consideren los factores transitorios del medio. Dichos factores son decisivos en algunas ocasiones en la ocurrencia de un accidente de tráfico.

No obstante, estos factores transitorios no han sido el objeto de la presente Tesis Doctoral.

CAPÍTULO 10.- APORTACIONES

10.- APORTACIONES.

El trabajo de investigación llevado a cabo en la presente Tesis Doctoral proporciona las siguientes aportaciones en el área de la investigación accidentológica en profundidad:

Primera.- Desarrollo de un instrumento de medida de alto rendimiento y de una metodología para la recogida de información en continuo de las variables del medio de aplicación específica a la investigación de los factores permanentes del trazado que influyen en el riesgo de ocurrencia de accidentes.

Para alcanzar este objetivo, han tenido que ser resueltos los siguientes problemas:

- Ajuste de un algoritmo de cálculo, el cual lleva a cabo las siguientes acciones:
 - Posicionamiento en la calzada de las variables consideradas. Para ello, es necesario referir dichas variables al espacio, el cual ha sido calculado a partir de la señal de velocidad adquirida mediante el equipo de medida de la velocidad sin contacto embarcado.
 - Inferencia del radio de la trayectoria a partir del ángulo girado por el volante y de la velocidad longitudinal del vehículo.
 - Compensación del efecto perturbador de la dinámica longitudinal y lateral sobre las medidas de los ángulos girados por la carrocería del vehículo.
- Estimación experimental de la relación de desmultiplicación entre el volante y las ruedas delanteras directrices, como parámetro básico utilizado por el modelo de simulación de la dinámica del vehículo implementado para el cálculo de la trayectoria en planta seguida por el mismo.
- Validación del algoritmo de cálculo mediante ensayos dinámicos en pista y en carretera abierta. Dichos ensayos han permitido estimar los errores cometidos en el cálculo de las siguientes magnitudes: distancia recorrida, radio de la trayectoria seguida por el vehículo, y ángulos de inclinación de la calzada (rampa/pendiente y peralte).
- Análisis en laboratorio de las imágenes recogidas mediante una cámara de video instalada en el interior del habitáculo de conducción, aproximadamente a la altura del punto de vista del conductor, con objeto de obtener una visión lo más próxima posible a la imagen percibida por el mismo durante la circulación por el itinerario de carretera

Dicho análisis es requerido dado que existen un conjunto de variables explicativas objetivas involucradas en la generación de los modelos de predicción de la ocurrencia de accidentes que no pueden ser medidas mediante los sensores embarcados.

- Desarrollo de una aplicación informática en entorno Windows[®] 3.11., denominada DISET, a medida para la presente Tesis Doctoral. Esto ha sido requerido dado que uno de los criterios fundamentales de diseño del sistema ha sido la facilidad de manejo del mismo, tanto durante el proceso de medición sobre el itinerario, como durante el posterior tratamiento de las señales y generación de las variables de interés.
- Los hitos kilométricos reales, requeridos para la localización de los accidentes acumulados en los tramos de curva, no están uniformemente distanciados 1000 metros. Por ello y para subsanar estas desviaciones, han sido empleadas las referencias de tiempo sincronizado, de adquisición y de película de video, para el posicionamiento de los accidentes en la carretera medida.

Segunda.-

Elaboración de una metodología de predicción de la ocurrencia de accidentes de tráfico, basada en la información recogida mediante el instrumento de medida en continuo. La aproximación estadística al problema de la modelización de la accidentalidad en tramos ha sido abordada simultáneamente desde una doble perspectiva, en función del tipo de la variable respuesta considerada:

- Predicción de *la frecuencia de accidentes* acumulados en un tramo carretera.
- Predicción de *la probabilidad de ocurrencia de accidentes* en tramos, basada en la definición de la variable respuesta binaria tramo de concentración de accidentes.

Para alcanzar este objetivo, han tenido que ser resueltos los siguientes problemas:

- Selección de itinerarios del tipo de vía considerada, en los cuales no se hayan efectuado modificaciones durante el período de concentración de accidentes tenido en cuenta. En dichos itinerarios, han sido medidas las variables de interés mediante el instrumento de medida desarrollado.
- Definición de variables explicativas objetivas de influencia en la ocurrencia de accidentes, a partir de los factores permanentes del medio. Durante este proceso, han sido tomados en cuenta diversos criterios presentes en la bibliografía consultada, así como otros propuestos por el doctorando.
- Identificación de variables explicativas significativas en la muestra definida.
- Diagnóstico de los modelos predictivos ajustados.

Tercera.- La metodología de medida en continuo de factores del medio y de modelización de la accidentalidad en tramos permite:

- Evaluar los factores permanentes del medio que influyen significativamente sobre el riesgo de ocurrencia de accidentes.
- Comparar la influencia de dichos factores según el tipo de vía, para el establecimiento de criterios de bondad del diseño del trazado desde el punto de vista de la seguridad vial.

CAPÍTULO 11.- FUTUROS DESARROLLOS

11.- FUTUROS DESARROLLOS.

Como continuación al trabajo desarrollado en la presente Tesis Doctoral, se proponen las siguientes acciones futuras:

Primera.- Incorporación de nuevos sensores embarcados en el vehículo de medida, para el incremento de la precisión en la medición de alguno de los parámetros del medio adquiridos, como son:

- Giróscopos de orientación, basados en una referencia inercial, los cuales poseen mayor precisión en la medida de los ángulos que los inclinómetros, aunque su coste es significativamente más elevado.
- Equipo de medida del ángulo de giro de las ruedas directrices, con objeto de reducir la incertidumbre de dicha medida al ser evaluado dicho ángulo a través del ángulo girado por el volante.
- Sensores de medida del desplazamiento relativo entre la masa suspendida (carrocería del vehículo) y la masa no suspendida (neumáticos).

Durante la presente Tesis ha sido descartada la validez de medida de dicho movimiento relativo mediante sensores potenciométricos de hilo, debido a que la respuesta en frecuencia de dichos sensores no resulta adecuada para el fenómeno analizado.

Frente a esto, se propone la utilización de sensores LVDT (transformadores diferenciales de variación lineal) los cuales presentan un comportamiento en frecuencia más adecuado al fenómeno considerado, aunque con el inconveniente de un precio más elevado y una menor robustez de funcionamiento.

Segunda.- Continuación de los trabajos de modelización de la dinámica vehicular y del contacto neumático-calzada con objeto de incrementar la precisión de cálculo de la trayectoria seguida por el vehículo, base fundamental del algoritmo de cálculo de los parámetros del trazado propuesto en la presente Tesis.

Tercera.- Optimización de dicho algoritmo de cálculo de los parámetros del trazado. Esto, unido al espectacular incremento de la velocidad de procesamiento de los microprocesadores, permitirá la predicción del riesgo de ocurrencia de accidentes en tiempo real, como dispositivo embarcado para el incremento de la seguridad activa de los vehículos.

- Cuarta.-** Ampliación de la muestra de itinerarios de autovía, así como extensión de la metodología desarrollada a la predicción de la ocurrencia de accidentes en otros tipos de vía.
- Quinta.-** Incorporación al modelo de predicción de factores transitorios del medio, no considerados durante el trabajo elaborado en esta Tesis.
- Sexta.-** Implementación en el sistema de medida de dispositivos de *visión artificial* para la detección de los elementos situados delante del vehículo, a partir de las imágenes capturadas mediante cámaras de televisión CCD. Este equipo mejorará sustancialmente, tanto en velocidad de procesamiento como en precisión de los resultados, la metodología de cálculo de las variables explicativas del medio basadas en las imágenes registradas mediante la cámara de vídeo embarcada.

CAPÍTULO 12.- BIBLIOGRAFÍA

CAPÍTULO 12.- BIBLIOGRAFÍA.

- [1] AL-SENAN S. H.; WRIGHT, P. H. (1986).- *Prediction of Head-on accident sites*. Publicación: Transportation Research Record 1122.
- [2] AMIS, G. (1996).- *An application of generalised linear modelling to the analysis of traffic accidents*. Publicación: Traffic Engineering and Control (December, 1996).
- [3] APARICIO IZQUIERDO, F.; VERA ÁLVAREZ, C.; DÍAZ LÓPEZ, V. (1995).- *Teoría de los vehículos automóviles*. Sección de Publicaciones de la ETSII. Universidad Politécnica de Madrid.
- [4] ASOCIACIÓN TÉCNICA DE CARRETERAS (1987).- *Manual de capacidad de carreteras*. Ed. Asociación técnica de carreteras.
- [5] BLUMENTHAL, M. (1968).- *Dimensions of the traffic safety problem*. Publicación: Traffic Safety Research review (Nº 12, 1968).
- [6] BROWN, I. D. (1990).- *Drivers' margins of safety considered as a focus for research on error*. Publicación: Ergonomics (Vol. 33, Nº 10/11).
- [7] CATLING, I. (1994).- *Advanced Technology for Road Transport: IVHS and ATT*. Ed. Artech House.
- [8] CUEVA, J. M.; GARCÍA, M. P. A.; LÓPEZ, B.; LUENGO, M. C.; ALONSO, M. (1994).- *Introducción a la programación estructurada y orientada a objetos con Pascal*. Publicación: E.U. de Lenguajes y Sistemas Informáticos de la Universidad de Oviedo. Dpto. De Matemáticas. Cuaderno Didáctico Nº 69.
- [9] DAVISON, P. A. (1978).- *The role of drivers vision in road safety*. Publicación: Lighting Research and Technology (Nº 10).
- [10] DENIS, R. (1988).- *The concept of risk and behaviour models in traffic psychology*. Publicación: Ergonomics (Vol. 31, Nº 4).
- [11] EVANS, L.; ROTHERY, R. (1977).- *Perceptual thresholds in car-following and target size on apparent inter-vehicular spacing*. Publicación: Transportation Science (Nº 11).
- [12] EVANS, L. (1991).- *Traffic Safety and the driver*. Ed. Van Nostrand Reinhold, New York.
- [13] GROEGER, J. A.; BROWN, I. D. (1989).- *Assessing one's own and others' driving ability: influences of sex, age and experience*. Publicación: Accident Analysis and Prevention (Nº 21).

- [14] HALE, A. R.; STOOP, J.; HOMMELS, J. (1990).- *Human error models as predictors of accident scenarios for designers in road transport systems*. Publicación: Ergonomics (Vol. 33, N° 10/11).
- [15] HAMM, L.; CHARENTENAY, F.; HOFFLINGER, B.; REISTER, D.; SANDEWALL, E. (1990).- *Improved driver information and driver assistance by Prometheus systems*. Publicación: SAE Paper N° 905181.
- [16] HARVEY, C. F.; JENKINS, D.; SUMMER, R. (1975).- *Driver error*. Publicación: Department of the Environment, Transport and Road Research Laboratory (supplementary report, 149 UC).
- [17] HOUSNER, G. W.; HUDSON, D. E. (1960).- *Mecánica aplicada dinámica*. Ed. Compañía Editorial Continental.
- [18] JOHANSSON, L.; RUMAR, K. (1966).- *Driver and road signs: a preliminary investigation of the capacity of car drivers to get information from road signs*. Publicación: Ergonomics (N° 9).
- [19] JORGENSEN, N. O. (1988).- *Risky behaviour at traffic signals: a traffic engineer's view*. Publicación: Ergonomics (Vol. 31, N° 4).
- [20] KAHENEMAN, D.; BEN-ISHAI, R.; LOTAN, M. (1973).- *Relation of a test of attention to road accidents*. Publicación: Journal of applied psychology (N° 58).
- [21] KALAKOTA, K. R.; NAZRUL, M.; SENEVIRATNE, P. N. (1990).- *Influence of geometric design variables on accident rates on two-lane rural highways*. Publicación: VTI Rapport 380A.
- [22] KARLSSON, CH.; SCHMELING, E. (1994).- *On the effects of modelling errors and uncertainty in models for the number of traffic accidents*. Publicación: Linköping University, Sweden. (November, 1994).
- [23] LECHNER, D; FERRANDEZ, F. (1983).- *Maneuvres and demands in emergency situations*. Publicación: INRETS Report.
- [24] LÓPEZ ROSADO, A. (1994).- *Predicción de situaciones inseguras en vehículos automóviles. Tesis Doctoral*. Sección de Publicaciones de la ETSII. Universidad Politécnica de Madrid.
- [25] McCULLAGH, P.; NELDER, J. A. (1989).- *Generalized Linear Models (2nd Edition)*. Ed. Chapman and Hall.
- [26] McSHANE, W. R.; ROESS, R. P. (1990).- *Traffic engineering*. Ed. Prentice Hall.
- [27] MILLMAN, J.; GRABEL, A. (1993).- *Microelectrónica*. Ed. Hispano Europea S.A.

- [28] MINISTERIO DE JUSTICIA E INTERIOR (1992).- *Seguridad vial. Ley y Reglamento general de circulación*. Ed. Segura.
- [29] MINISTERIO DE JUSTICIA E INTERIOR (1995).- *Boletín Informativo de Accidentes de 1995*. Ed. Dirección General de Tráfico.
- [30] MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y URBANISMO.- *Instrucción de carreteras 3.1 - IC: Trazado*. Publicación: MOPU.
- [31] MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y URBANISMO.- *Norma complementaria de la 3.1 - IC: Trazado de autopistas*. Publicación: MOPU.
- [32] MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y URBANISMO.- *Instrucción de carreteras 8.1 - IC: Señalización vertical*. Publicación: MOPU.
- [33] MORRISON, R. (1986).- *Grounding and shielding techniques in instrumentation*. Ed.: John Wiley & Sons.
- [34] MOUNTAIN, L.; FAWAZ, B. (1996).- *Estimating accidents at junctions using routinely-available input data*. Publicación: Traffic Engineering Control (November, 1996).
- [35] MOURANT, R. R.; ROCKWELL, T. H. (1972).- *Strategies of visual search by novice and experienced drivers*. Publicación: Human Factors (Nº 14).
- [36] NÄÄTÄNEN, R.; SUMMALA, H. (1976).- *Road user behaviour and traffic accidents*. Ed. North Holland.
- [37] NORTON, H. N. (1984).- *Sensores y analizadores*. Ed. Gustavo Gili, S. A.
- [38] OLSON, P. L.; SIVAK, M. (1986).- *Perception-response time to unexpected roadway hazards*. Publicación: Human Factors.
- [39] PALLÁS, R. (1993).- *Adquisición y distribución de señales*. Ed.: Marcombo S.A.
- [40] PALLÁS, R. (1994).- *Sensores y acondicionadores de señal*. Ed.: Marcombo S.A.
- [41] PEÑA, D. (1989).- *Estadística. Modelos y Métodos. 2. Modelos lineales y series temporales (2ª Edición)*. Ed. Alianza Universidad Textos.
- [42] PEÑA, D. (1991).- *Estadística. Modelos y Métodos. 1. Fundamentos (2ª Edición)*. Ed. Alianza Universidad Textos.
- [43] PERRETT K.E.; STEVENS A. (1996).- *Review of the potential benefits of road transport telematics*. Publicación: TRL Report 220.
- [44] REGTIEN, P.P.L. (1987).- *Instrumentation Electronics*. Ed.: Prentice Hall.

- [45] RUMAR, K. (1983).- *Man. The weak link in road traffic*. Publicación: Int. J. of Vehicle Design (Nº 2).
- [46] SÁNCHEZ PÉREZ, A. M. (1993).- *Sistema de calibración industrial. Seminario de metrología y calibración*. Publicación: E.T.S.I. Industriales de Madrid. Dpto. de Física Aplicada.
- [47] SHINAR, D. (1978).- *Psychology on the road. The human factor in traffic safety*. Ed. John Wiley, New York.
- [48] SUMMERGILL, I.; LAYFIELD, R. E. (1996).- *Non-junction accidents on urban single-carriageway roads*. Publicación: TRL Report 183.
- [49] TENENBAUM, A. M.; AUGENSTEIN, M. J. (1988).- *Estructura de datos en Pascal*. Ed. Prentice Hall.
- [50] TREAT, J. R.; TUMBAR N. S.; McDONALD, S. T.; SHINAR, D.; HUME, R.D.; MAYER, R. E.; STANSIFER, R. L.; y CASTELLAU, N. I. (1977).- *Trilevel study of the causes of traffic accidents*. Publicación: Rapport Nº DOT-HS.034.3-535-77 (TAC).
- [51] VERA, C.; APARICIO, F.; FELEZ, J. (1993).- *Simulación de sistemas dinámicos mediante la técnica de Bond Graph*. Ed. Sección de Publicaciones de la E.T.S.I. Industriales de Madrid.
- [52] VERA, C.; FELEZ, J. (1994).- *Dinámica vehicular basada en la técnica de Bond Graph*. Ed. Sección de Publicaciones de la E.T.S.I. Industriales de Madrid.
- [53] WAGENAAR, W. A.; REASON, J. T. (1990). -*Types and tokens in road accident causation*. Publicación: Ergonomics (Vol. 33, Nº 10/11).
- [54] WILDE, G. J. S. (1982).- *The theory of risk homeostasis: implications for safety and health*. Publicación: Risk Analysis (Nº 2).
- [55] WILDE, G. J. S. (1988).- *Risk homeostasis theory and traffic accidents: propositions, deductions and discussion of dissension in recent reactions*. Publicación: Ergonomics (Vol. 31, Nº 31).
- [56] WITTE, R.A. (1993).- *Electronic Test Instruments.Theory and applications*. Ed.: Prentice Hall.
- [57] YERPEZ, J; FERRANDEZ, F. (1986).- *Road Characteristics and Safety. Inrets synthesis Nº 2*. Ed. INRETS.

***ANEXO I.- CUESTIONARIO ESTADÍSTICO DE ACCIDENTES
DE CIRCULACIÓN CON VÍCTIMAS (D.G.T.)***

**ANEXO I.- CUESTIONARIO ESTADÍSTICO DE ACCIDENTES DE CIRCULACIÓN
CON VÍCTIMAS (D.G.T.).**

***ANEXO II.- ÁMBITO DE APLICACIÓN DE LA TESIS.
TABLAS Y FIGURAS DE RESULTADOS***

ANEXO II.- ÁMBITO DE APLICACIÓN DE LA TESIS. TABLAS Y FIGURAS DE RESULTADOS.

II.1.- Influencia del tipo de vía.

II.1.1.- COMPARACIÓN DE POBLACIONES SEGÚN CONFIGURACIÓN DE LA COLISIÓN.

| Tipo de vía (año) | P1 (%) | | | P2 (%) | | | P21 (%) | | | P22 (%) | | | P23 (%) | | | |
|-------------------|--------|----|----|--------|----|----|---------|----|----|---------|----|----|---------|----|----|----|
| Configuración | % | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 |
| Frontal | | 4 | 4 | 4 | 10 | 10 | 10 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 13 | 13 | 12 |
| Frontolateral | | 29 | 27 | 29 | 17 | 18 | 18 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 22 | 22 | 22 |
| Lateral | | 13 | 13 | 11 | 6 | 6 | 6 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 7 | 7 | 7 |
| Por alcance | | 12 | 14 | 16 | 11 | 12 | 12 | 18 | 19 | 18 | 20 | 21 | 20 | 10 | 10 | 10 |
| Múltiple | | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 5 | 6 | 7 | 5 | 5 | 6 | 2 | 2 | 2 |
| Con obstáculo | | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 2 | 6 | 6 | 5 | 5 | 4 | 4 | 2 | 2 | 2 |
| Atropello | | 24 | 23 | 23 | 6 | 6 | 6 | 3 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 | 7 | 7 | 6 |
| Vuelco | | 4 | 4 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 2 | 3 | 4 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| Salida izq. | | 3 | 3 | 3 | 16 | 17 | 17 | 23 | 23 | 23 | 21 | 22 | 23 | 15 | 15 | 15 |
| Salida dcha. | | 4 | 4 | 4 | 20 | 21 | 21 | 31 | 28 | 29 | 29 | 29 | 28 | 19 | 19 | 19 |

Tabla II.1.- Proporciones de accidentes según el atributo “configuración de la colisión” para cada tipo de vía considerada.

| Tipo de vía \ Año | 1994 | 1995 | 1996 |
|------------------------------|-------|-------|-------|
| Vías urbana y travesía (P1) | 44120 | 46369 | 48154 |
| Vía interurbana (P2) | 33968 | 36823 | 37056 |
| Autopista (P21) | 2245 | 2317 | 2472 |
| Autovía (P22) | 4447 | 4947 | 5116 |
| Carretera convencional (P23) | 24400 | 26746 | 26773 |

Tabla II.2.- Número total de accidentes para cada tipo de vía considerada.

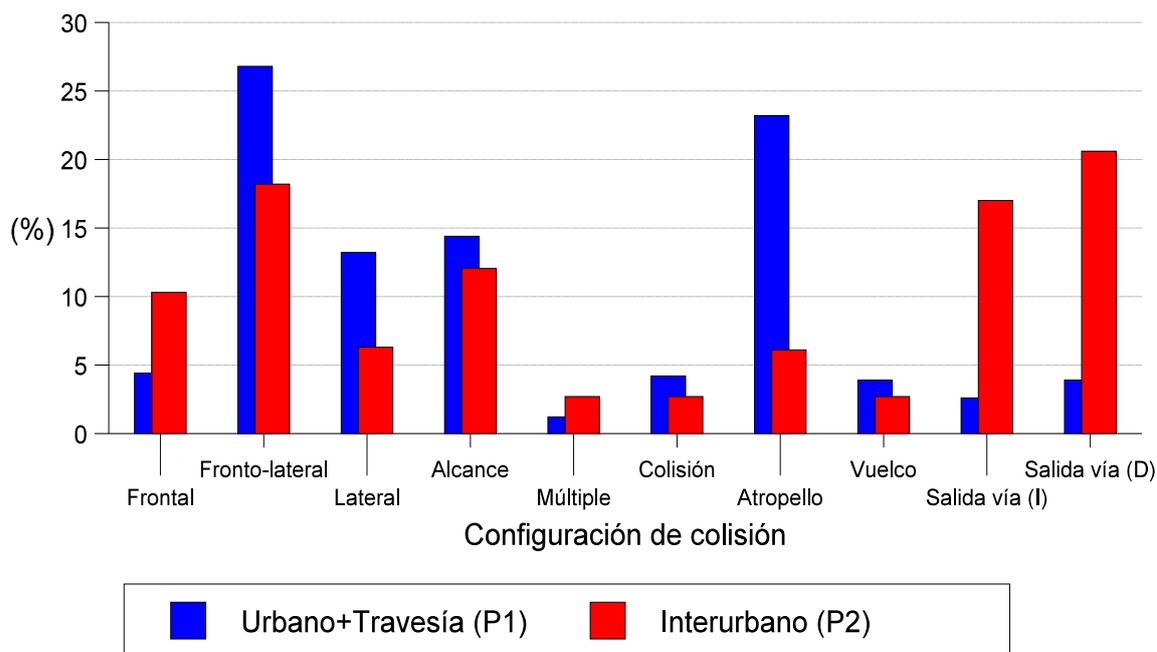


Figura II.1.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según tipos principales de vías (1995).

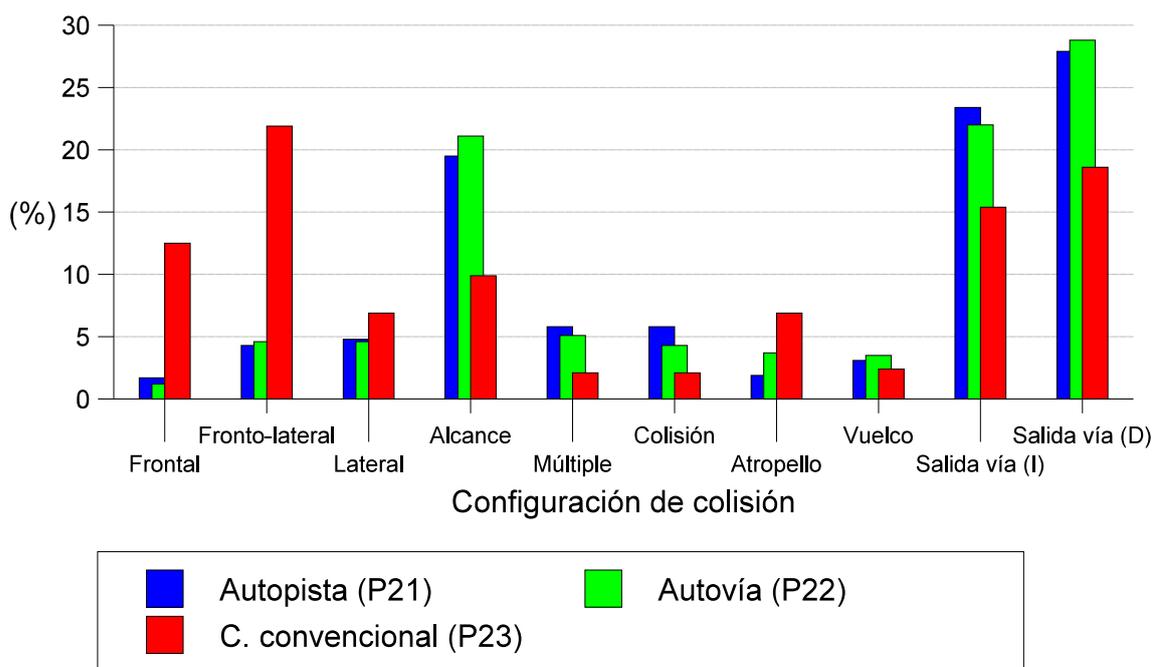


Figura II.2.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según tipos de vías interurbanas (1995).

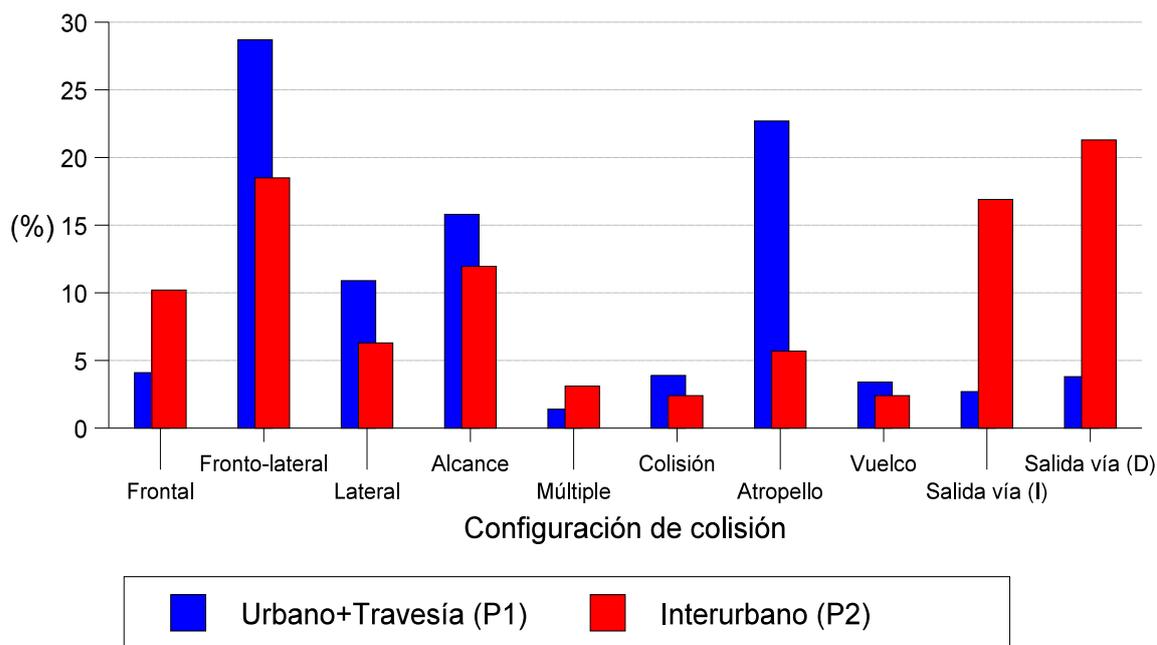


Figura II.3.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según tipos principales de vías (1996).

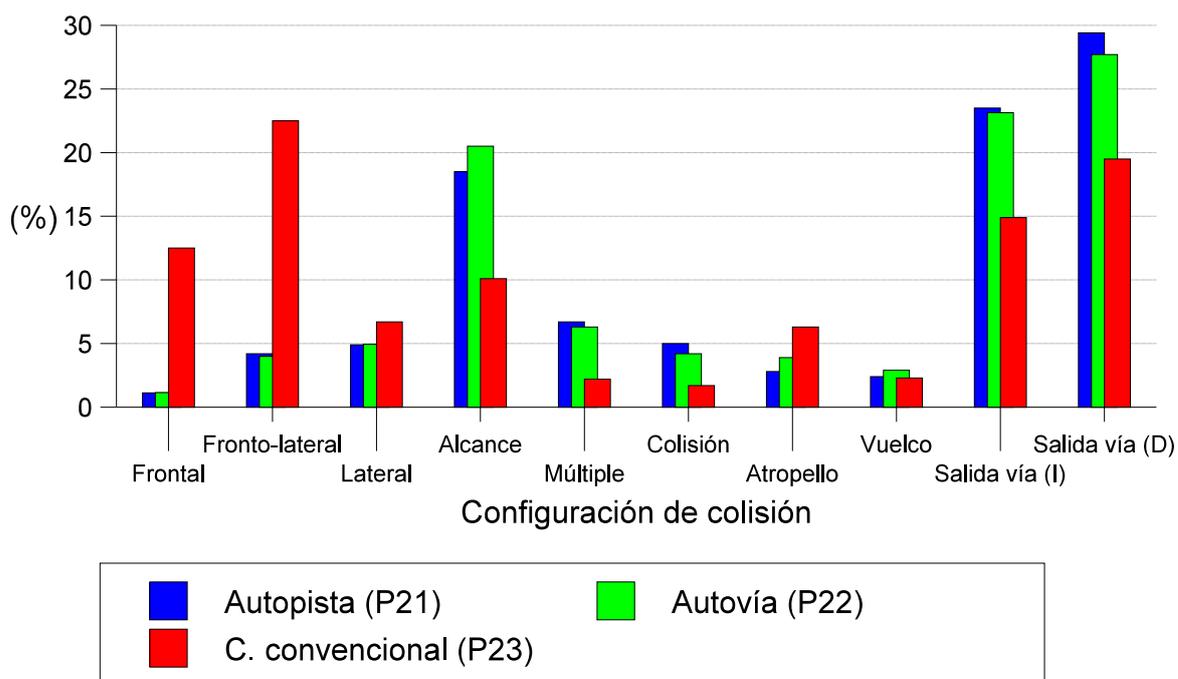


Figura II.4.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según tipos de vías interurbanas (1996).

| Tipo de vía (año) | P1 (%) | | | P2 (%) | | | d | | |
|----------------------|--------|------|------|--------|------|------|------|------|------|
| | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 |
| Configuración | | | | | | | | | |
| Frontal | 4.4 | 4.4 | 4.1 | 9.6 | 10.3 | 10.2 | 28.7 | 33.3 | 34.7 |
| Frontolateral | 28.6 | 26.8 | 28.7 | 17.2 | 18.2 | 18.5 | 37.2 | 29.2 | 34.4 |
| Lateral | 12.9 | 13.2 | 10.9 | 6.3 | 6.3 | 6.3 | 30.2 | 32.5 | 23.5 |
| Por alcance | 11.6 | 14.4 | 15.8 | 11.3 | 12.0 | 11.9 | 1.6 | 10.0 | 16.1 |
| Múltiple | 1.1 | 1.2 | 1.4 | 2.4 | 2.7 | 3.1 | 14.1 | 16.2 | 16.1 |
| Con obstáculo | 4.6 | 4.2 | 3.9 | 2.6 | 2.7 | 2.4 | 14.2 | 11.7 | 12.7 |
| Atropello | 24.4 | 23.2 | 22.7 | 5.9 | 6.1 | 5.7 | 69.4 | 67.6 | 68.3 |
| Vuelco | 3.6 | 3.9 | 3.4 | 2.2 | 2.7 | 2.4 | 11.3 | 10.0 | 8.3 |
| Salida izq. | 3.0 | 2.6 | 2.7 | 15.6 | 17.0 | 16.9 | 62.2 | 72.2 | 71.8 |
| Salida dcha. | 4.0 | 3.9 | 3.8 | 19.6 | 20.6 | 21.3 | 69.8 | 75.9 | 79.6 |

Tabla II.3.- Medida de la discrepancia “d” entre P1 y P2 según el atributo “configuración de la colisión”.

| Tipo de vía (año) | P21 (%) | | | P22 (%) | | | d | | |
|----------------------|---------|------|------|---------|------|------|-----|-----|-----|
| | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 |
| Configuración | | | | | | | | | |
| Frontal | 1.4 | 1.7 | 1.1 | 1.3 | 1.2 | 1.1 | 0.3 | 1.7 | 0.1 |
| Frontolateral | 4.2 | 4.3 | 4.2 | 4.8 | 4.6 | 4.0 | 1.2 | 0.5 | 0.5 |
| Lateral | 5.2 | 4.8 | 4.9 | 4.8 | 4.6 | 4.9 | 0.8 | 0.5 | 0.1 |
| Por alcance | 18.0 | 19.5 | 18.5 | 20.5 | 21.1 | 20.5 | 2.4 | 1.6 | 2.0 |
| Múltiple | 5.0 | 5.8 | 6.7 | 4.6 | 5.1 | 6.3 | 0.8 | 1.3 | 0.6 |
| Con obstáculo | 5.8 | 5.8 | 5.0 | 5.1 | 4.3 | 4.2 | 1.4 | 2.7 | 1.6 |
| Atropello | 2.7 | 1.9 | 2.8 | 4.4 | 3.7 | 3.9 | 3.3 | 3.9 | 2.5 |
| Vuelco | 2.7 | 3.1 | 2.4 | 3.1 | 3.5 | 2.9 | 0.7 | 0.8 | 1.2 |
| Salida izq. | 22.9 | 23.4 | 23.5 | 21.3 | 22.0 | 23.1 | 1.5 | 1.3 | 0.4 |
| Salida dcha. | 30.8 | 27.9 | 29.4 | 29.1 | 28.8 | 27.7 | 1.4 | 0.7 | 1.5 |

Tabla II.4.- Medida de la discrepancia “d” entre P21 y P22 según el atributo “configuración de la colisión”.

| Tipo de vía (año) Configuración | P21 (%) | | | P23 (%) | | | d | | |
|---------------------------------------|---------|------|------|---------|------|------|------|------|------|
| | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 |
| Frontal | 1.4 | 1.7 | 1.1 | 12.7 | 12.5 | 12.5 | 15.9 | 15.6 | 16.9 |
| Frontolateral | 4.2 | 4.3 | 4.2 | 22.1 | 21.9 | 22.5 | 20.1 | 20.1 | 21.3 |
| Lateral | 5.2 | 4.8 | 4.9 | 7.2 | 6.9 | 6.7 | 7.1 | 3.8 | 3.5 |
| Por alcance | 18.0 | 19.5 | 18.5 | 9.8 | 9.9 | 10.1 | 12.2 | 14.1 | 12.9 |
| Múltiple | 5.0 | 5.8 | 6.7 | 2.0 | 2.1 | 2.2 | 9.0 | 11.4 | 13.3 |
| Con obstáculo | 5.8 | 5.8 | 5.0 | 2.1 | 2.1 | 1.7 | 11.1 | 11.2 | 11.0 |
| Atropello | 2.7 | 1.9 | 2.8 | 6.9 | 6.8 | 6.3 | 7.8 | 9.1 | 7.1 |
| Vuelco | 2.7 | 3.1 | 2.4 | 2.2 | 2.4 | 2.3 | 1.6 | 2.1 | 0.6 |
| Salida izq. | 22.9 | 23.4 | 23.5 | 15.3 | 15.4 | 14.9 | 9.4 | 10.0 | 11.2 |
| Salida dcha. | 30.8 | 27.9 | 29.4 | 18.7 | 18.6 | 19.5 | 13.7 | 10.9 | 11.7 |

Tabla II.5.- Medida de la discrepancia “d” entre P21 y P23 según el atributo “configuración de la colisión”.

| Tipo de vía (año) Configuración | P22 (%) | | | P23 (%) | | | d | | |
|---------------------------------------|---------|------|------|---------|------|------|------|------|------|
| | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 |
| Frontal | 1.3 | 1.2 | 1.1 | 12.7 | 12.5 | 12.5 | 22.5 | 23.7 | 24.1 |
| Frontolateral | 4.8 | 4.6 | 4.0 | 22.1 | 21.9 | 22.5 | 26.8 | 28.4 | 30.5 |
| Lateral | 4.8 | 4.6 | 4.9 | 7.2 | 6.9 | 6.7 | 5.8 | 6.1 | 4.7 |
| Por alcance | 20.5 | 21.1 | 20.5 | 9.8 | 9.9 | 10.1 | 20.7 | 22.4 | 21.2 |
| Múltiple | 4.6 | 5.1 | 6.3 | 2.0 | 2.1 | 2.2 | 10.0 | 12.4 | 16.1 |
| Con obstáculo | 5.1 | 4.3 | 4.2 | 2.1 | 2.1 | 1.7 | 11.4 | 9.4 | 11.0 |
| Atropello | 4.4 | 3.7 | 3.9 | 6.9 | 6.8 | 6.3 | 6.4 | 8.3 | 6.7 |
| Vuelco | 3.1 | 3.5 | 2.9 | 2.2 | 2.4 | 2.3 | 3.5 | 4.4 | 2.8 |
| Salida izq. | 21.3 | 22.0 | 23.1 | 15.3 | 15.4 | 14.9 | 9.9 | 11.5 | 14.6 |
| Salida dcha. | 29.1 | 28.8 | 27.7 | 18.7 | 18.6 | 19.5 | 15.8 | 16.3 | 13.4 |

Tabla II.6.- Medida de la discrepancia “d” entre P22 y P23 según el atributo “configuración de la colisión”.

II.1.2.- COMPARACIÓN DE POBLACIONES SEGÚN GRAVEDAD DE LA COLISIÓN.

| Tipo de vía (año) | P1 (%) | | | P2 (%) | | | P21 (%) | | | P22 (%) | | | P23 (%) | | | |
|-------------------|--------|----|----|--------|----|----|---------|----|----|---------|----|----|---------|----|----|----|
| Gravedad | % | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 |
| Gravedad 1 | | 70 | 72 | 74 | 50 | 49 | 52 | 50 | 50 | 55 | 50 | 52 | 54 | 48 | 49 | 51 |
| Gravedad 2 | | 28 | 26 | 25 | 42 | 42 | 40 | 39 | 40 | 36 | 39 | 38 | 37 | 43 | 42 | 41 |
| Gravedad 3 | | 2 | 2 | 2 | 10 | 9 | 9 | 12 | 11 | 9 | 11 | 10 | 10 | 9 | 9 | 9 |

Tabla II.7.- *Proporciones de accidentes según el atributo “gravedad de la colisión” para cada tipo de vía considerada.*

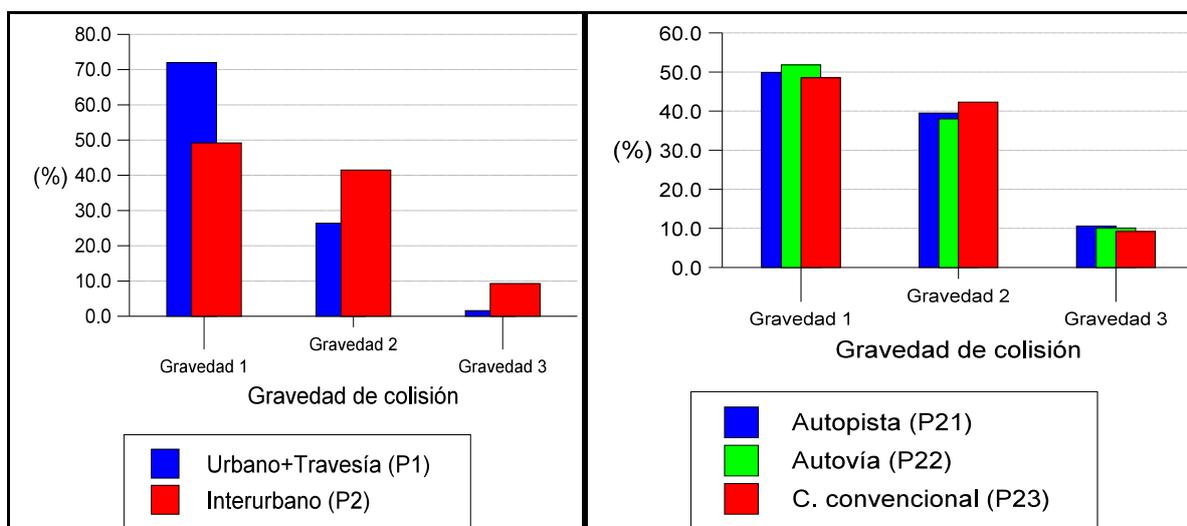


Figura II.5.- *Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos principales de vías (1995).*

Figura II.6.- *Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos de vías interurbanas (1995).*

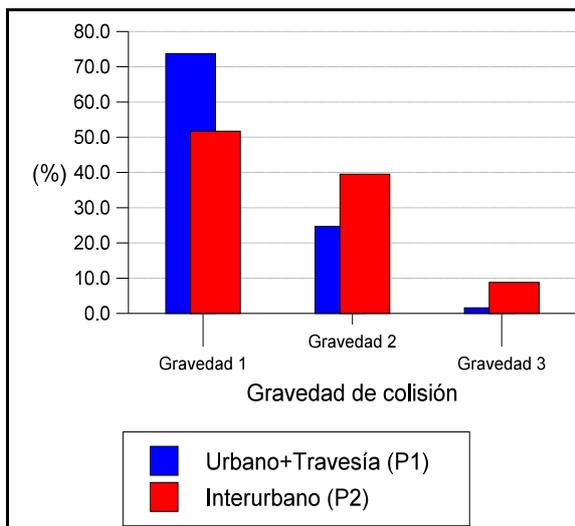


Figura II.7.- Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos principales de vías (1996).

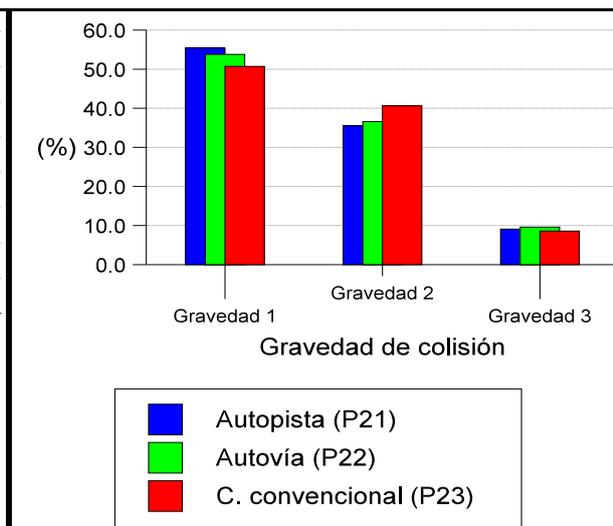


Figura II.8.- Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos de vías interurbanas (1996).

| Tipo de vía (año) | P1 (%) | | | P2 (%) | | | d | | |
|-------------------|--------|------|------|--------|------|------|------|------|------|
| | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 |
| Gravedad 1 | 70.4 | 72.0 | 73.7 | 50 | 49.2 | 51.7 | 63.5 | 67.4 | 66.6 |
| Gravedad 2 | 27.8 | 26.4 | 24.7 | 42.3 | 41.5 | 39.5 | 42.4 | 46.0 | 46.4 |
| Gravedad 3 | 1.8 | 1.6 | 1.6 | 9.7 | 9.3 | 8.8 | 49.0 | 50.9 | 49.5 |

Tabla II.8.- Medida de la discrepancia “d” entre P1 y P2 según el atributo “gravedad de la colisión”.

| Tipo de vía (año) | P21 (%) | | | P22 (%) | | | d | | |
|-------------------|---------|------|------|---------|------|------|-----|-----|-----|
| | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 |
| Gravedad 1 | 49.8 | 49.9 | 55.4 | 49.9 | 51.8 | 53.8 | 0.1 | 1.5 | 1.3 |
| Gravedad 2 | 38.7 | 39.5 | 35.5 | 39.4 | 38.0 | 36.6 | 0.6 | 1.2 | 0.9 |
| Gravedad 3 | 11.5 | 10.6 | 9.1 | 10.7 | 10.1 | 9.6 | 0.9 | 0.7 | 0.7 |

Tabla II.9.- Medida de la discrepancia “d” entre P21 y P22 según el atributo “gravedad de la colisión”.

| Tipo de vía (año) | P21 (%) | | | P23 (%) | | | d | | |
|----------------------|---------|------|------|---------|------|------|-----|-----|-----|
| | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 |
| Gravedad 1 | 49.8 | 49.9 | 55.4 | 47.5 | 48.5 | 50.7 | 2.2 | 1.3 | 4.5 |
| Gravedad 2 | 38.7 | 39.5 | 35.5 | 43.2 | 42.3 | 40.6 | 4.1 | 2.7 | 5.0 |
| Gravedad 3 | 11.5 | 10.6 | 9.1 | 9.3 | 9.2 | 8.6 | 3.3 | 2.3 | 0.8 |

Tabla II.10.- Medida de la discrepancia “d” entre P21 y P23 según el atributo “gravedad de la colisión”.

| Tipo de vía (año) | P22 (%) | | | P23 (%) | | | d | | |
|----------------------|---------|------|------|---------|------|------|-----|-----|-----|
| | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 |
| Gravedad 1 | 49.9 | 51.8 | 53.8 | 47.5 | 48.5 | 50.7 | 3.0 | 4.3 | 4.0 |
| Gravedad 2 | 39.4 | 38.0 | 36.6 | 43.2 | 42.3 | 40.6 | 4.7 | 5.6 | 5.4 |
| Gravedad 3 | 10.7 | 10.1 | 9.6 | 9.3 | 9.2 | 8.6 | 2.8 | 2.1 | 2.3 |

Tabla II.11.- Medida de la discrepancia “d” entre P22 y P23 según el atributo “gravedad de la colisión”.

II.2.- Influencia del trazado en planta de la calzada.

II.2.1.- COMPARACIÓN DE POBLACIONES SEGÚN CONFIGURACIÓN DE LA COLISIÓN.

| Tipo de alineación y vía | P1' (%) | | | P2' (%) | | | P3' (%) | | | P4' (%) | | | P5' (%) | | | P6' (%) | | |
|--------------------------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|
| | 9 4 | 9 5 | 9 6 |
| Frontal | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Frontolateral | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Lateral | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 7 | 7 | 6 | 5 | 5 | 5 |
| Por alcance | 2 1 | 2 3 | 2 3 | 1 2 | 1 4 | 1 2 | 2 6 | 2 6 | 2 5 | 1 1 | 1 2 | 1 1 | 1 5 | 1 5 | 1 6 | 3 | 3 | 3 |
| Múltiple | 6 | 7 | 8 | 3 | 4 | 5 | 6 | 6 | 8 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| Con obstáculo | 5 | 5 | 4 | 8 | 8 | 6 | 5 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Atropello | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 3 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 1 2 | 1 2 | 1 1 | 3 | 3 | 3 |
| Vuelco | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 4 | 4 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| Salida izq. | 2 2 | 2 2 | 2 1 | 2 6 | 2 7 | 2 8 | 1 8 | 1 9 | 2 0 | 3 0 | 3 0 | 3 2 | 1 3 | 1 4 | 1 4 | 2 5 | 2 4 | 2 3 |
| Salida dcha. | 2 9 | 2 6 | 2 7 | 3 5 | 3 2 | 3 3 | 2 7 | 2 7 | 2 6 | 3 6 | 3 5 | 3 2 | 1 9 | 1 8 | 2 0 | 2 7 | 2 8 | 2 9 |

Tabla II.12.- Proporciones de accidentes según el atributo “configuración de la colisión” para cada tipo de alineación y vía.

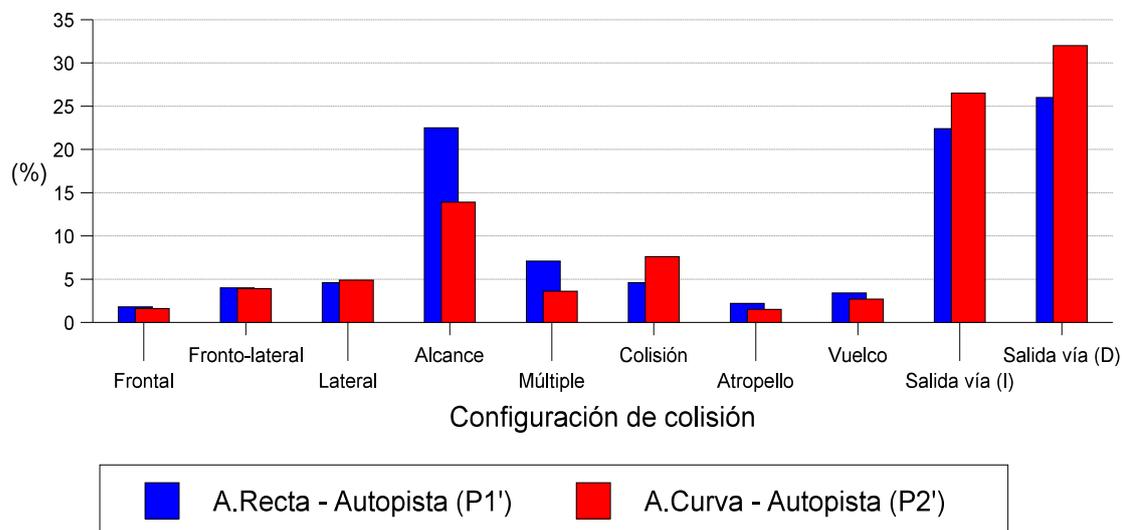


Figura II.9.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según el

tipo de alineación en autopista (1995).

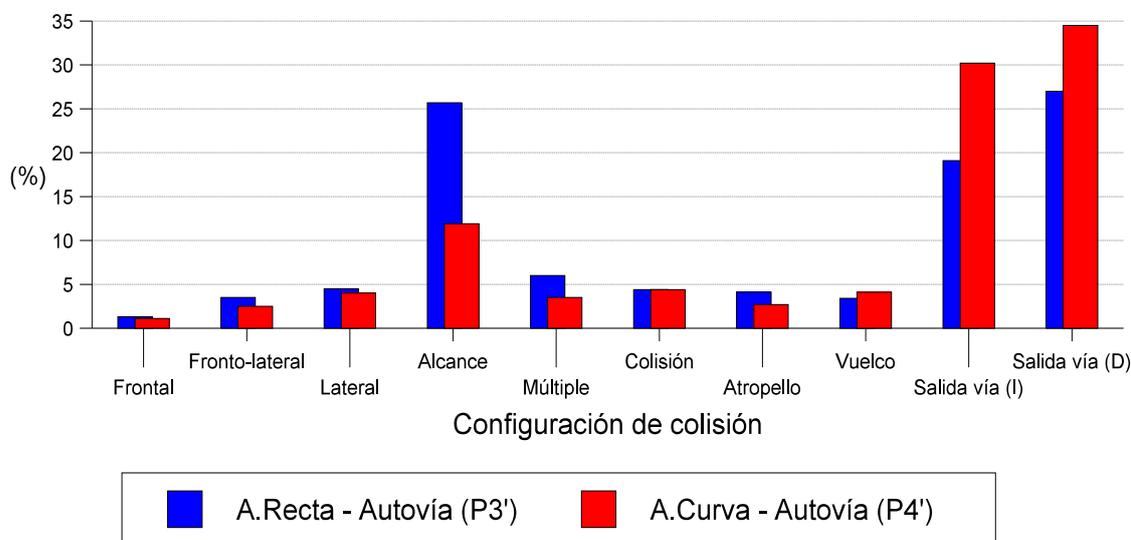


Figura II.10.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según el tipo de alineación en autovía (1995).

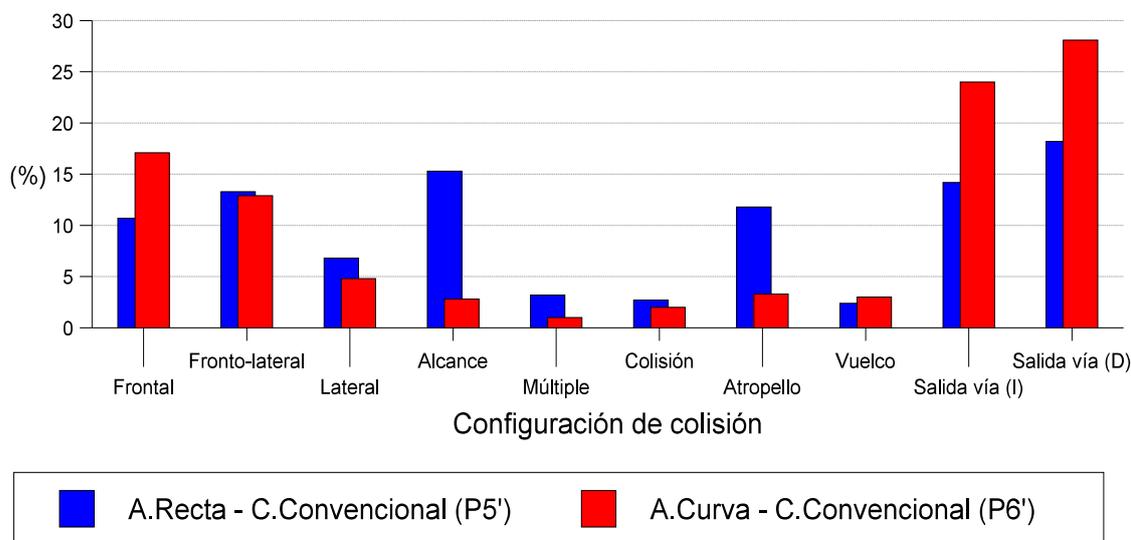


Figura II.11.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según el tipo de alineación en carretera convencional (1995).

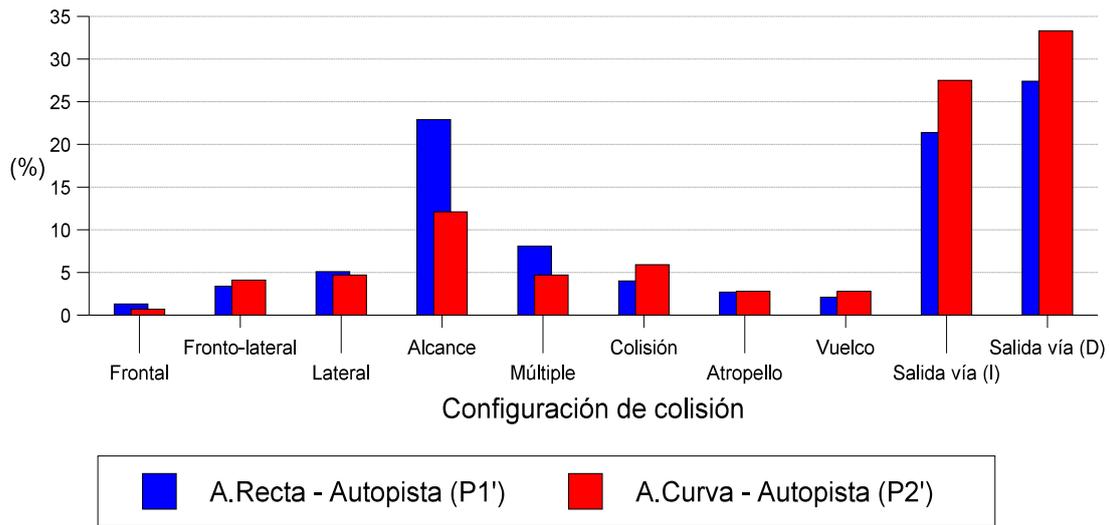


Figura II.12.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según el tipo de alineación en autopista (1996).

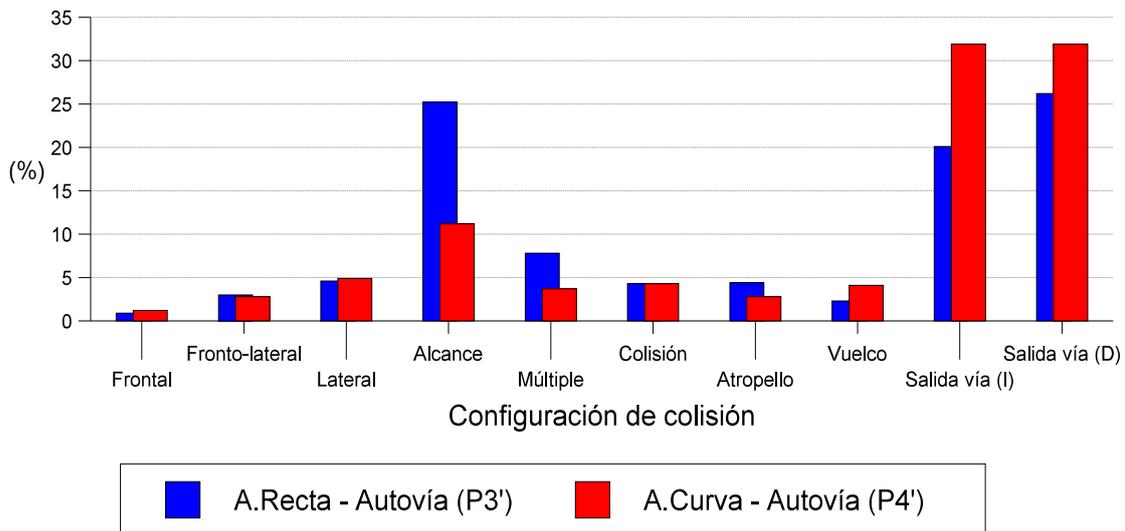


Figura II.13.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según el tipo de alineación en autovía (1996).

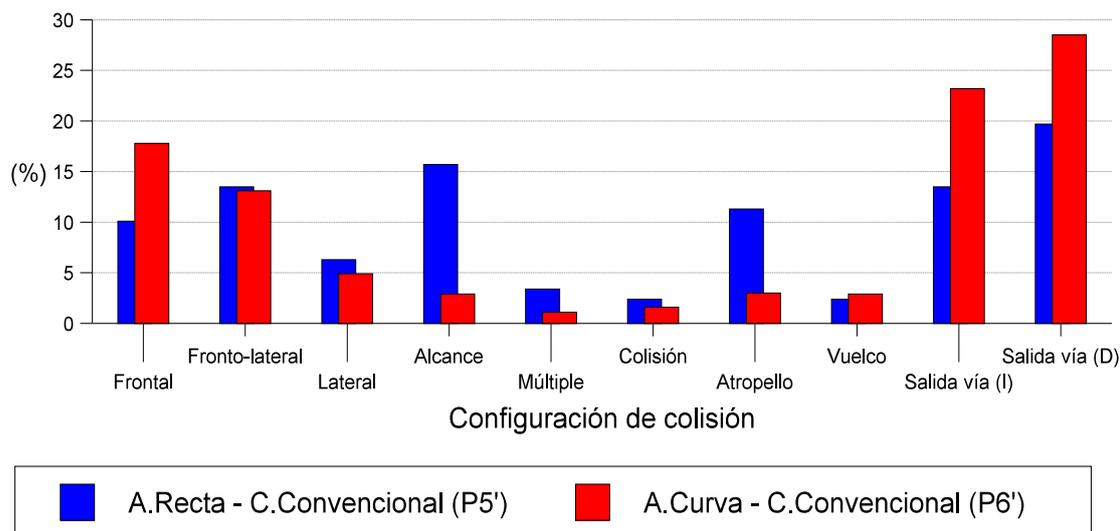


Figura II.14.- Porcentaje de número de accidentes por configuración de la colisión, según el tipo de alineación en carretera convencional (1996).

| Tipo de alineación y vía | Año | 1994 | 1995 | 1996 |
|--|-----|------|-------|-------|
| Alineación recta en autopista (P1) | | 1383 | 1359 | 1367 |
| Alineación curva en autopista (P2) | | 783 | 882 | 995 |
| Alineación recta en autovía (P3) | | 2716 | 3026 | 3074 |
| Alineación curva en autovía (P4) | | 1408 | 1578 | 1702 |
| Alineación recta en c. convencional (P5) | | 9901 | 11112 | 10668 |
| Alineación curva en c. convencional (P6) | | 9107 | 9849 | 10039 |

Tabla II.13.- Número total de accidentes para cada tipo de alineación y vía considerados.

| Alineación (año) Configuración | P1' (%) | | | P2' (%) | | | d | | |
|--------------------------------------|---------|------|------|---------|------|------|-----|-----|-----|
| | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 |
| Frontal | 1.5 | 1.8 | 1.3 | 1.1 | 1.6 | 0.7 | 0.7 | 0.3 | 1.4 |
| Frontolateral | 4.0 | 4.0 | 3.4 | 4.0 | 3.9 | 4.1 | 0.0 | 0.1 | 1.0 |
| Lateral | 5.4 | 4.6 | 5.1 | 4.1 | 4.9 | 4.7 | 1.3 | 0.3 | 0.4 |
| Por alcance | 20.9 | 22.5 | 22.9 | 12.1 | 13.9 | 12.1 | 5.1 | 5.0 | 6.7 |
| Múltiple | 5.9 | 7.1 | 8.1 | 3.3 | 3.6 | 4.7 | 2.6 | 3.5 | 3.3 |
| Con obstáculo | 4.6 | 4.6 | 4.0 | 7.9 | 7.6 | 5.9 | 3.2 | 2.9 | 2.2 |
| Atropello | 3.0 | 2.2 | 2.7 | 2.4 | 1.5 | 2.8 | 0.7 | 1.2 | 0.2 |
| Vuelco | 2.5 | 3.4 | 2.1 | 3.2 | 2.7 | 2.8 | 1.0 | 0.9 | 1.1 |
| Salida izq. | 22.0 | 22.4 | 21.4 | 25.9 | 26.5 | 27.5 | 2.1 | 2.3 | 3.4 |
| Salida dcha. | 29.4 | 26.0 | 27.4 | 34.6 | 32.0 | 33.3 | 2.5 | 3.1 | 3.1 |

Tabla II.14.- Medida de la discrepancia “d” entre P1' y P2' según el atributo “configuración de la colisión”.

| Alineación (año) Configuración | P3' (%) | | | P4' (%) | | | d | | |
|--------------------------------------|---------|------|------|---------|------|------|------|------|------|
| | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 |
| Frontal | 1.1 | 1.3 | 0.9 | 1.8 | 1.1 | 1.2 | 1.9 | 0.5 | 0.9 |
| Frontolateral | 2.8 | 3.5 | 3.0 | 3.1 | 2.5 | 2.8 | 0.4 | 1.9 | 0.5 |
| Lateral | 4.7 | 4.5 | 4.6 | 4.3 | 4.0 | 4.9 | 0.6 | 0.8 | 0.6 |
| Por alcance | 25.7 | 25.7 | 25.2 | 10.6 | 11.9 | 11.2 | 11.4 | 10.9 | 11.6 |
| Múltiple | 5.7 | 6.0 | 7.8 | 2.5 | 3.5 | 3.7 | 4.7 | 3.7 | 5.5 |
| Con obstáculo | 5.0 | 4.4 | 4.3 | 5.0 | 4.4 | 4.3 | 0.0 | 0.1 | 0.0 |
| Atropello | 5.1 | 4.1 | 4.4 | 2.8 | 2.7 | 2.8 | 3.4 | 2.5 | 2.8 |
| Vuelco | 3.0 | 3.4 | 2.3 | 3.1 | 4.1 | 4.1 | 0.1 | 1.3 | 3.5 |
| Salida izq. | 18.2 | 19.1 | 20.1 | 29.6 | 30.2 | 31.9 | 8.4 | 8.5 | 9.1 |
| Salida dcha. | 27.4 | 27.0 | 26.2 | 36.2 | 34.5 | 31.9 | 5.9 | 5.3 | 4.2 |

Tabla II.15.- Medida de la discrepancia “d” entre P3' y P4' según el atributo “configuración de la colisión”.

| Alineación (año) Configuración | P5' (%) | | | P6' (%) | | | d | | |
|--------------------------------------|---------|------|------|---------|------|------|------|------|------|
| | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 |
| Frontal | 10,3 | 10,7 | 10,1 | 17,6 | 17,1 | 17,8 | 14,6 | 13,4 | 16,0 |
| Frontolateral | 13,9 | 13,3 | 13,5 | 13,3 | 12,9 | 13,1 | 1,1 | 0,8 | 0,8 |
| Lateral | 7,3 | 6,8 | 6,3 | 4,7 | 4,8 | 4,9 | 7,6 | 6,3 | 4,2 |
| Por alcance | 15,0 | 15,3 | 15,7 | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 29,3 | 30,9 | 31,5 |
| Múltiple | 3,2 | 3,2 | 3,4 | 1,0 | 1,0 | 1,1 | 10,8 | 11,1 | 10,9 |
| Con obstáculo | 2,9 | 2,7 | 2,4 | 1,9 | 2,0 | 1,6 | 4,4 | 3,6 | 4,6 |
| Atropello | 12,2 | 11,8 | 11,3 | 3,4 | 3,3 | 3,0 | 22,3 | 22,8 | 22,9 |
| Vuelco | 2,1 | 2,4 | 2,4 | 3,1 | 3,0 | 2,9 | 4,0 | 2,6 | 2,2 |
| Salida izq. | 13,3 | 14,2 | 13,5 | 24,6 | 24,0 | 23,2 | 19,9 | 18,1 | 18,1 |
| Salida dcha. | 18,9 | 18,2 | 19,7 | 27,1 | 28,1 | 28,5 | 13,6 | 17,1 | 14,9 |

Tabla II.16.- Medida de la discrepancia “d” entre P5' y P6' según el atributo “configuración de la colisión”.

II.2.2.- COMPARACIÓN DE POBLACIONES SEGÚN GRAVEDAD DE LA COLISIÓN.

| Tipo de alineación y vía | P1' (%) | | | P2' (%) | | | P3' (%) | | | P4' (%) | | | P5' (%) | | | P6' (%) | | |
|-----------------------------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|
| Configuración | 9 4 | 9 5 | 9 6 |
| Gravedad 1 | 4 9 | 4 9 | 5 6 | 5 1 | 5 0 | 5 4 | 5 0 | 5 2 | 5 5 | 4 7 | 4 9 | 5 1 | 4 6 | 4 7 | 5 0 | 4 5 | 4 6 | 4 7 |
| Gravedad 2 | 4 1 | 4 1 | 3 5 | 3 6 | 3 9 | 3 7 | 3 9 | 3 8 | 3 6 | 4 1 | 3 9 | 3 8 | 4 4 | 4 3 | 4 0 | 4 5 | 4 4 | 4 3 |
| Gravedad 3 | 1 1 | 1 0 | 9 | 1 3 | 1 1 | 1 0 | 1 1 | 1 0 | 9 | 1 2 | 1 2 | 1 1 | 1 0 | 1 0 | 9 | 1 1 | 1 1 | 1 0 |

Tabla II.17.- Proporciones de accidentes según el atributo “gravedad de la colisión” para cada tipo de alineación y vía.

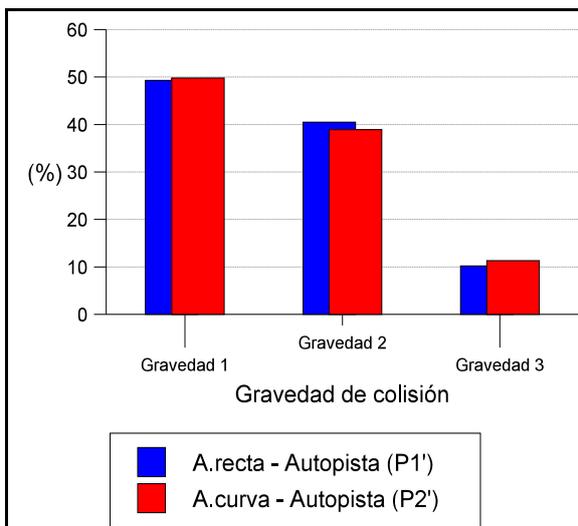


Figura II.15.- Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos de alineación en autopista (1995).

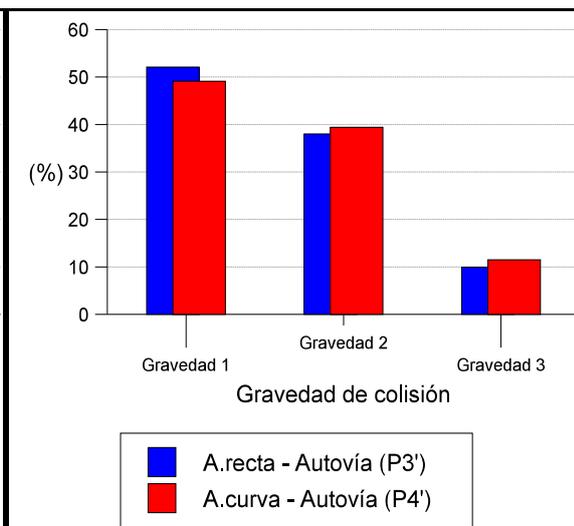


Figura II.16.- Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos de alineación en autovía (1995).

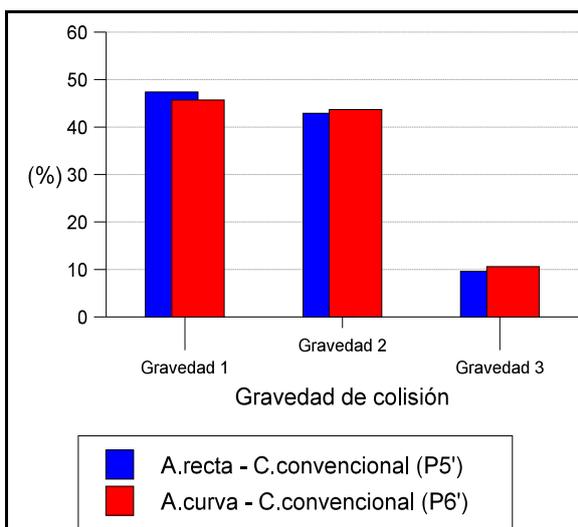


Figura II.17.- Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos de alineación en carretera convencional (1995).

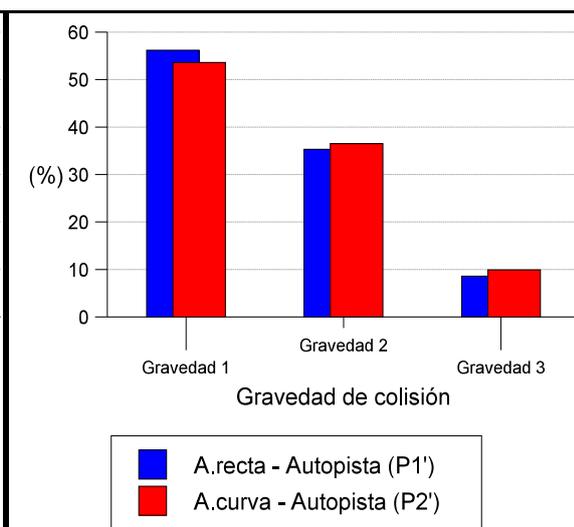


Figura II.18.- Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos de alineación en autopista (1996).

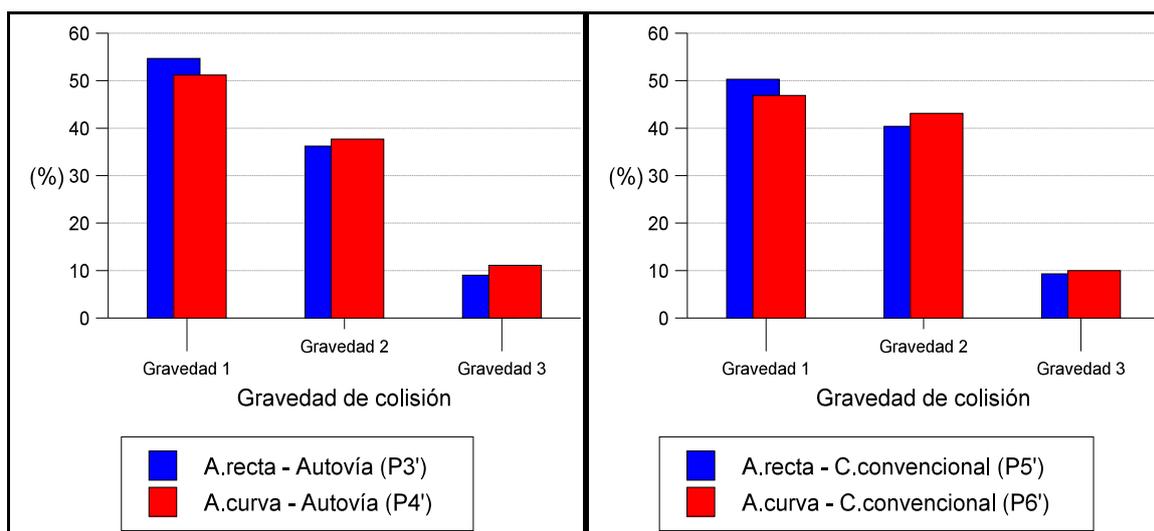


Figura II.19.- Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos de alineación en autovía (1996).

Figura II.20.- Porcentaje de número de accidentes por gravedad de la colisión, según tipos de alineación en carretera convencional (1996).

| Tipo de vía (año) | P1' (%) | | | P2' (%) | | | d | | |
|-------------------|---------|------|------|---------|------|------|-----|-----|-----|
| | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 |
| Gravedad 1 | 48,6 | 49,3 | 56,2 | 50,7 | 49,8 | 53,6 | 0,9 | 0,2 | 1,3 |
| Gravedad 2 | 40,6 | 40,5 | 35,3 | 36,3 | 38,9 | 36,5 | 2,0 | 0,8 | 0,6 |
| Gravedad 3 | 10,8 | 10,2 | 8,6 | 13,0 | 11,3 | 9,9 | 1,6 | 0,9 | 1,2 |

Tabla II.18.- Medida de la discrepancia “d” entre P1' y P2' según el atributo “gravedad de la colisión”.

| Tipo de vía (año) | P3' (%) | | | P4' (%) | | | d | | |
|-------------------|---------|------|------|---------|------|------|-----|-----|-----|
| | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 |
| Gravedad 1 | 50.3 | 52.1 | 54.7 | 46.8 | 49.1 | 51.2 | 2.2 | 1.9 | 2.4 |
| Gravedad 2 | 39.0 | 38.0 | 36.2 | 41.2 | 39.4 | 37.7 | 1.4 | 0.9 | 1.0 |
| Gravedad 3 | 10.6 | 9.9 | 9.0 | 12.0 | 11.5 | 11.1 | 1.3 | 1.7 | 2.3 |

Tabla II.19.- Medida de la discrepancia “d” entre P3' y P4' según el atributo “gravedad de la colisión”.

la colisión”.

| Tipo de vía (año) | P5' (%) | | | P6' (%) | | | d | | |
|----------------------|---------|------|------|---------|------|------|-----|-----|-----|
| | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 |
| Gravedad 1 | 46,1 | 47,4 | 50,3 | 44,6 | 45,7 | 46,9 | 2,1 | 2,6 | 4,9 |
| Gravedad 2 | 43,5 | 42,9 | 40,4 | 44,8 | 43,7 | 43,1 | 1,8 | 1,2 | 3,9 |
| Gravedad 3 | 10,4 | 9,6 | 9,3 | 10,6 | 10,6 | 10,0 | 0,4 | 2,4 | 1,8 |

Tabla II.20.- Medida de la discrepancia “d” entre P5' y P6' según el atributo “gravedad de la colisión”.

***ANEXO III.- CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS
DEL VEHÍCULO TIPO CONSIDERADO
EN EL MODELO DE PREDICCIÓN***

ANEXO III.- CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL VEHÍCULO TIPO CONSIDERADO EN EL MODELO DE PREDICCIÓN.

El vehículo tipo considerado es un FIAT TIPO 1.6., de 83 C.V. de potencia y 175 km/h de velocidad máxima en terreno horizontal, según es definido en la *Instrucción de Carreteras 8.1- IC para la señalización de carreteras [32]*. Las características técnicas de este vehículo son mostradas en los apartados siguientes.

III.1.- Motor.

| <i>Generalidades</i> | |
|--|--------------------|
| Denominación | 160A2.000 |
| Número y posición de cilindros | 4 en línea |
| Cilindrada (cm ³) | 1580 |
| Relación de compresión | 9,2 |
| Potencia máxima (kW/CV) - Régimen (r.p.m.) | 60/83 - 6000 |
| Par máximo (m.kg) - Régimen (r.p.m.) | 13.5 - 2900 |
| <i>Distribución</i> | |
| Árbol de levas en cabeza | |
| Avance a la apertura de la admisión | 7° |
| Retraso al cierre de la admisión | 35° |
| Avance a la apertura del escape | 37° |
| Retraso al cierre del escape | 5° |
| <i>Alimentación</i> | |
| Bomba de gasolina | Mecánica |
| Carburador | Weber 32/34 TLDE 5 |
| Régimen a ralentí (r.p.m.) | 850 |
| % CO al ralentí | 1 ± 0,5 |

Tabla III.1.- Características técnicas del motor del vehículo Fiat Tipo 1.6 considerado en el modelo de simulación de la dinámica vehicular.

III.2.- Sistema de dirección.

- Sistema de piñón y cremallera, con engrase permanente.
- Columna de dirección, con dispositivo de absorción de energía, y sistema de regulación angular.

- Diámetro de giro: 10,3 m.
- Número de vueltas de volante (entre topes): 3,75 vueltas.

III.3.- Sistema de suspensión.

- *Anterior*: independiente de tipo McPherson, con barra estabilizadora.
- *Posterior*: independiente, con resortes helicoidales y barra estabilizadora.

III.4.- Transmisión.

- Embrague mecánico.
- Caja de velocidades y diferencial: caja manual, con cinco velocidades sincronizadas y marcha atrás. Las relaciones de dicha caja así como del diferencial son mostradas en la tabla siguiente (*Tabla III.2.*).

| <i>Caja de velocidades</i> | |
|----------------------------|-------|
| 1 ^a relación | 3,909 |
| 2 ^a relación | 2,267 |
| 3 ^a relación | 1,440 |
| 4 ^a relación | 1,029 |
| 5 ^a relación | 0,827 |
| Marcha atrás | 3,909 |
| <i>Diferencial</i> | |
| Relación | 3,563 |

Tabla III.2.- Relaciones de caja de velocidades y diferencial del vehículo Fiat Tipo 1.6.

III.5.- Neumáticos.

| | |
|----------|------------------|
| Cubierta | 165/70 R 13 78 S |
| Llanta | 5,00 Bx13H |

Tabla III.3.- Neumáticos del vehículo Fiat Tipo 1.6.

III.6.- Prestaciones.

| <i>Velocidad máxima (km/h)</i> | |
|--------------------------------|-----|
| 1ª relación | 47 |
| 2ª relación | 82 |
| 3ª relación | 127 |
| 4ª relación | 175 |
| 5ª relación | 170 |
| Marcha atrás | 47 |

Tabla III.4.- Velocidades máximas a plena carga del vehículo Fiat Tipo 1.6, para cada relación de velocidad.

III.7.- Pesos y dimensiones.

- Peso en orden de marcha (con rueda de repuesto, útiles y accesorios): 970 kg.
- Peso a plena carga: 1500 kg.
- Las dimensiones exteriores del vehículo (expresadas en milímetros) son mostradas en la siguiente figura (*Figura III.1.*), donde la variable *A* es igual 1445 mm.

Figura III.1.- Dimensiones exteriores del vehículo Fiat tipo 1.6.

ANEXO IV.- SEÑALIZACIÓN DE CARRETERAS

ANEXO IV.- SEÑALIZACIÓN DE CARRETERAS.

IV.1.- Clasificación de la señalización en función de la información proporcionada.

En función del tipo de información proporcionada, se establece la siguiente clasificación de la señalización:

- a) *Peligro*: Advierten la proximidad de un peligro cierto o posible, por lo que el conductor al verlas debe reaccionar, concentrando su atención y reduciendo la velocidad.

Dichas señales son de forma triangular, constituidas por una orla de color rojo y el fondo blanco, con símbolos o letras en color negro o azul oscuro.

- b) *Preceptivas*: Indican una prescripción que necesariamente ha de ser cumplida. Esta señalización puede ser clasificada en los siguientes grupos:

- De prohibición o restricción: su no observancia generará una situación inmediata de peligro.

- De obligación: anulan la prohibición impuesta por una señal anterior.

- De fin de prescripción: su incumplimiento también generará una situación inmediata de peligro.

- c) *Informativas*: son empleadas para informar a los usuarios de la vía, sin establecer prohibición ni obligación. Las señales informativas se dividen en tres grupos:

- De indicación: informan de un determinado régimen de circulación, permitiendo o autorizando, sin imponer obligación alguna.

- De orientación: su misión consiste en guiar a los conductores, tanto de día como de noche, a lo largo de su itinerario para que puedan seguirlo sin titubeos y sin pérdida de tiempo.

- De localización: tienen por objeto facilitar la información necesaria a los usuarios de la vía, para que puedan determinar su posición o final de la población.

IV.2.- Criterio de señalización de carreteras. Instrucción de carreteras 8.1. IC.

Los criterios objetivos fundamentales adoptados por el Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo para la señalización de las carreteras están contenidos en la *Instrucción de Carreteras 8.1. IC [32]*. Seguidamente, se describen las especificaciones de la citada Instrucción que resultan relevantes en la presente Tesis Doctoral.

IV.2.1.- PRINCIPIOS DE SEÑALIZACIÓN EN CURVAS.

La seguridad de la circulación en curvas requiere no sobrepasar cierta velocidad. Si para ello el conductor precisase reducir demasiado la velocidad de aproximación, deberá valorar la situación con suficiente antelación, para no tener que frenar bruscamente con riesgo de pérdida de control del vehículo.

La utilización de balizamiento, de señales de advertencia de peligro, de señales de indicación de la velocidad máxima aconsejada, o de una combinación de todos estos elementos ayudará al conductor a tomar sus propias decisiones. Sólo se recurrirá a señales de reglamentación de la velocidad máxima donde no se disponga de la visibilidad necesaria para apreciar la conveniencia de reducir la velocidad para hacer frente a otras circunstancias situadas más allá, tales como un paso a nivel o una intersección sin prioridad, en las que pudiera haber vehículos detenidos.

IV.2.2.- VELOCIDAD MÁXIMA EN CURVAS.

Se considerará como máxima velocidad a la que una curva de radio R (m) y peralte p (%) puede ser recorrida con seguridad aquella v_s (km/h) a la que corresponda una aceleración centrífuga no compensada por el peralte, igual a la cuarta parte de la aceleración de la gravedad. La expresión matemática de dicha velocidad se muestra en la siguiente expresión:

$$v_s = \sqrt{1,27 \cdot R \cdot (p + 25)} \quad (\text{IV.1.})$$

IV.2.3.- VELOCIDAD MÁXIMA DE APROXIMACIÓN A UNA CURVA.

La velocidad máxima v_m alcanzable antes de una curva depende de la distancia D que haya entre ella y la anterior, las velocidades máximas en ambas, y las posibilidades de aceleración y deceleración del vehículo.

El cálculo de dicha velocidad v_m se efectúa considerando las siguientes especificaciones:

- El vehículo sale de la curva anterior a la velocidad máxima en curva v_s de dicha curva.
- El vehículo alcanza la curva de estudio también a la velocidad máxima en curva v_s de la misma.

- En el recorrido del tramo entre curvas, de distancia D , el vehículo efectuará maniobras de aceleración y frenado que posibiliten la velocidad máxima, respetando las condiciones de velocidad de salida y llegada anteriormente impuestas.

Las maniobras de aceleración y frenado del vehículo considerado son efectuadas conforme a las siguientes especificaciones:

- 1.- La maniobra de frenado corresponde a una suave aplicación de los frenos, a razón de 7 km/h/s, más el efecto de la inclinación media de la rampa, como se muestra en la siguiente figura (*Figura IV.1.*).
- 2.- La maniobra de aceleración corresponde a la aplicación de la máxima aceleración en un vehículo tipo (FIAT TIPO 1.6.) de 83 C.V. de potencia y 175 km/h de velocidad máxima, combinado con el efecto de la inclinación media de la rampa, como se muestra en la siguiente figura (*Figura IV.2.*). Las características técnicas del vehículo tipo considerado se recogen en el *Anexo III.*

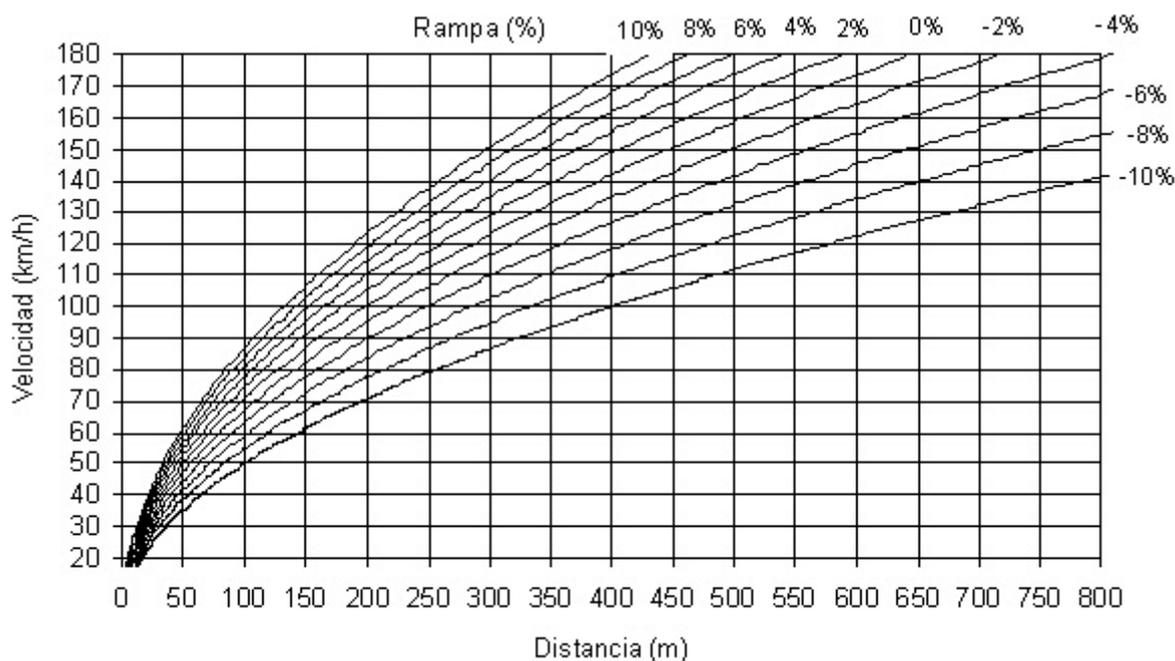


Figura IV.1.- Criterio de frenado en vehículo tipo según la Instrucción de Carreteras 8.1. IC.

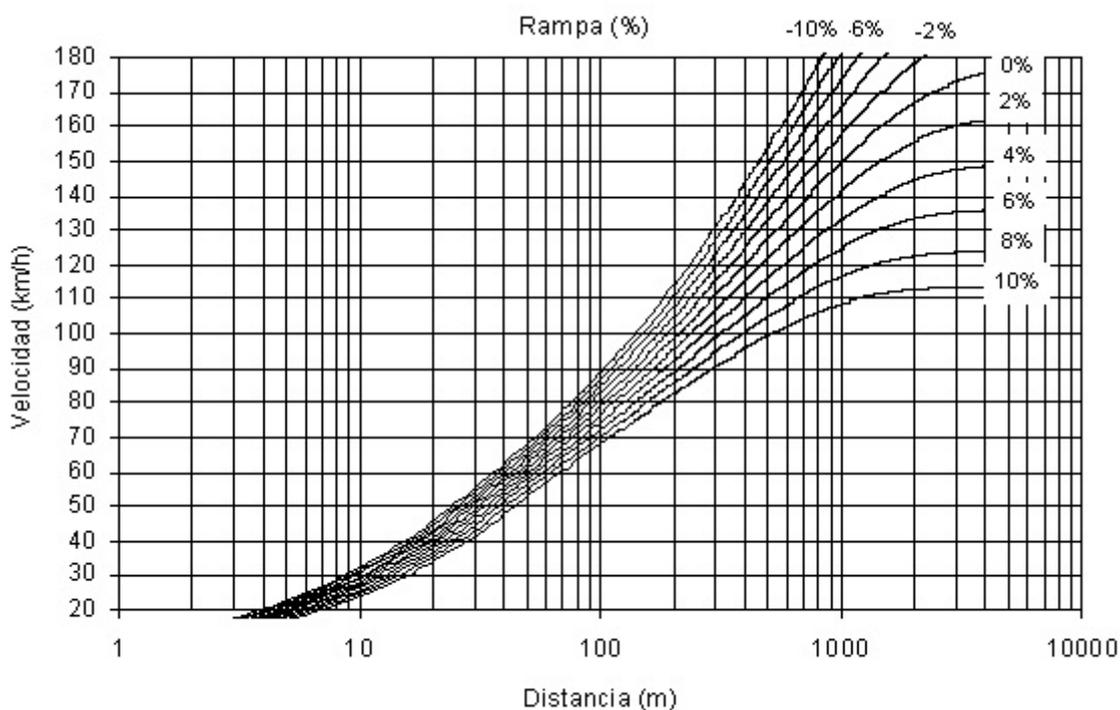


Figura IV.2.- Criterio de aceleración en vehículo tipo según la Instrucción de Carreteras 8.1. IC.

IV.2.4.- GRADO DE LA CURVA. SEÑALIZACIÓN Y BALIZAMIENTO.

Se define el tipo de señalización y balizamiento a emplear en una curva en función del grado de la misma. El *grado de la curva* está definido en función de la diferencia ($v_m - v_s$).

De este modo, si esta diferencia resulta inferior a 15 km/h no será preciso disponer señalización ni balizamiento. Si dicha diferencia es superior, se dispondrá lo indicado en la tabla siguiente (*Tabla IV.1.*).

| $v_m - v_s$ (km/h) | Primer panel direccional | Señales |
|--------------------|--------------------------|---|
| 15 | Sencillo | Señalización de curva peligrosa |
| 30 | | |
| 45 | Doble | Señalización de curva peligrosa y Limitación de velocidad |
| | Triple | |

Tabla IV.1.- Balizamiento y señalización según el grado de la curva.

La instalación de *señalización de limitación de velocidad* se efectuará conforme a los siguientes requisitos:

- La señal de limitación de velocidad indicará la velocidad v_s de la curva, redondeada al múltiplo de 10 km/h más próximo.
- Si la diferencia $v_m - v_s$ fuera superior a 45 km/h, se instalará antes otra señal de limitación de velocidad, con un valor intermedio entre v_m y v_s .
- En ningún caso se instalarán señales de limitación de velocidad que indiquen una velocidad superior a la legalmente establecida para la clase de carretera de que se trate.

Por otro lado, la instalación de *paneles direccionales* deberá estar sometido a los siguientes requerimientos:

- El primer panel direccional (sencillo, doble o triple, según *Tabla IV.1.*), se situará en prolongación de la trayectoria del vehículo, en la sección en que se alcance v_m y perpendicular a la visual.
- A partir del primero, se situarán más paneles (en todo caso, sencillos y perpendiculares a la dirección de la marcha), de forma que en todo punto del recorrido hasta salir de la curva haya al menos tres paneles dentro de un campo de visión que abarque 9° a cada lado de una visual tangente a la trayectoria del vehículo.

Esto último equivale, aproximadamente, a una distancia entre paneles igual al 20% del radio de la curva.

***ANEXO V.- PROGRAMA INFORMÁTICO DISET
DE ANÁLISIS DEL ITINERARIO***

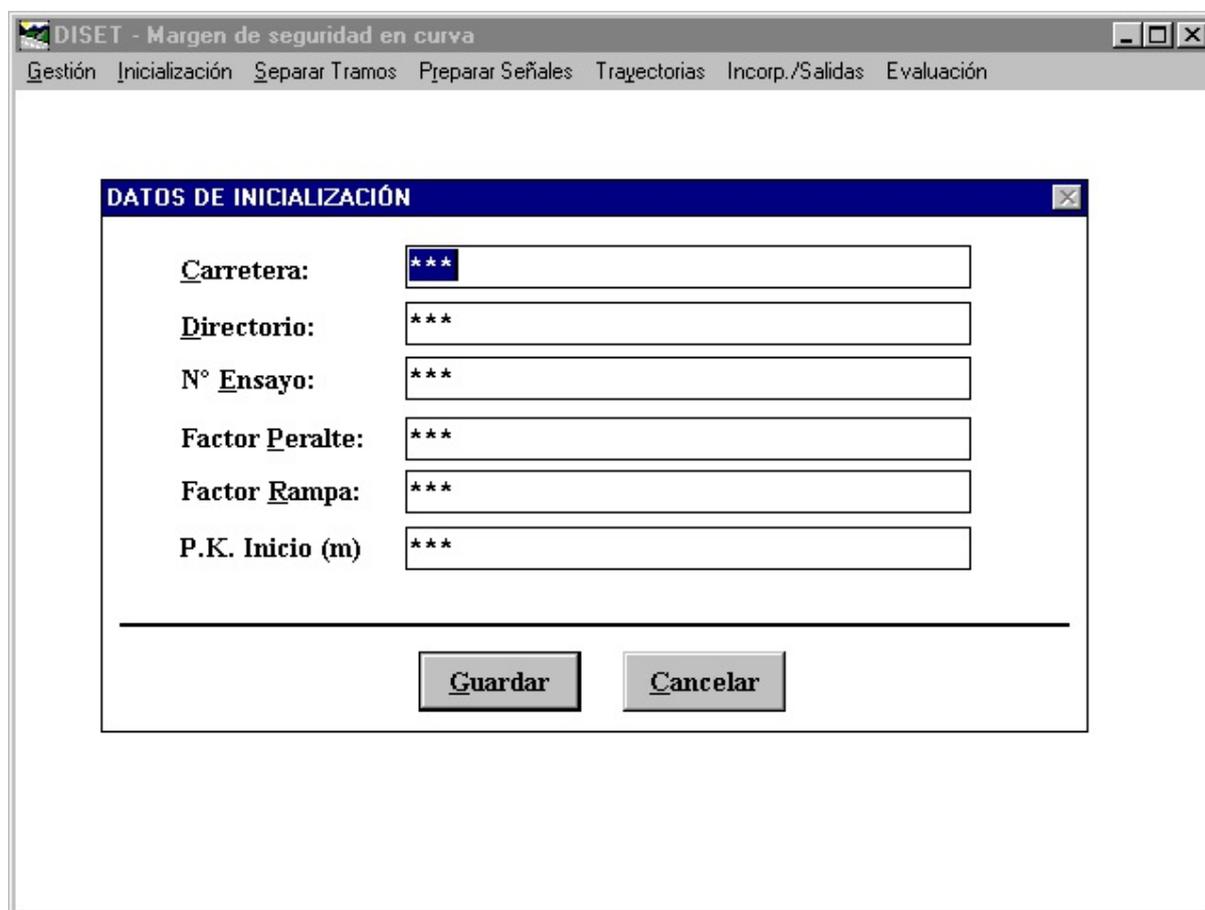
ANEXO V.- PROGRAMA INFORMÁTICO DISET DE ANÁLISIS DEL ITINERARIO.**V.1.- Parámetros y variables de entrada.**

La información que debe ser aportada a la aplicación para la obtención de los perfiles en planta y alzado de la calzada así como de alguna de las variables explicativas consideradas se muestra a continuación.

V.1.1.- DATOS DE INICIALIZACIÓN.

Esta información, la cual se describe seguidamente, es imprescindible para la posterior ejecución de las distintas utilidades de la aplicación. La ventana de introducción de dicha información se presenta en la siguiente figura (*Figura V.1.*), cuya ejecución corresponde a la siguiente acción:

- inicialización ➔ Ejecución.



The screenshot shows the main window of the DISET application titled "DISET - Margen de seguridad en curva". The menu bar includes "Gestión", "Iniciación", "Separar Tramos", "Preparar Señales", "Traectorias", "Incorp./Salidas", and "Evaluación". A dialog box titled "DATOS DE INICIALIZACIÓN" is open, containing the following fields:

| | |
|-----------------|-----|
| Carretera: | *** |
| Directorio: | *** |
| N° Ensayo: | *** |
| Factor Peralte: | *** |
| Factor Rampa: | *** |
| P.K. Inicio (m) | *** |

At the bottom of the dialog box are two buttons: "Guardar" and "Cancelar".

Figura V.1.- Ventana de la aplicación informática DISET para la introducción de los datos de inicialización.

donde:

- *Carretera*: datos de identificación del itinerario medido.
- *Directorio*: ubicación en el disco duro del ordenador de las variables de entrada y salida consideradas durante la ejecución de la aplicación.
- *Nº ensayo*: número de identificación del ensayo realizado.
- *Factor rampa/peralte*:

El servo inclinómetro instalado en el habitáculo de pasajeros está unido al suelo de la carrocería del vehículo mediante un soporte, el cual permite la regulación mecánica del ángulo relativo sensor-carrocería en las direcciones longitudinal y transversal, para el ajuste del cero de dicho sensor al comienzo de la medida del itinerario.

Como ha sido indicado en el *Apartado 5.*, y debido a la precisión requerida en esta medida del ángulo, se lleva a cabo un proceso de ajuste mediante el soporte regulable al comienzo de cada etapa de medición, dado que las variaciones de carga en el vehículo provocan desajustes del ángulo de la carrocería en ambas direcciones.

Finalmente, será medido el ángulo estático exacto en ambas direcciones proporcionado por el sensor en terreno horizontal, antes del inicio de la adquisición. Dichos valores serán introducidos como *Factor rampa* y *Factor peralte*.

- *P.K. inicio (m)*: la generación de modelos de predicción de la ocurrencia de accidentes se basa en los accidentes acaecidos en el itinerario en estudio. Dichos accidentes están referenciados al punto kilométrico y al hectómetro en el que han tenido lugar.

La ubicación de estos accidentes en los tramos analizados requiere la localización de los hitos kilométricos en dicho itinerario. Para ello, se introduce como dato de partida el punto kilométrico, expresado en metros, en el que se inicia la medición. Dicho valor será introducido como *P.K. inicio (m)*.

Si estos datos de inicialización no son introducidos, no será posible la ejecución de ninguna de las utilidades del programa informático DISET. En este caso, el intento de ejecución de las mismas generará el mensaje de error mostrado en la siguiente figura (*Figura V.2.*).



Figura V.2.- Ventana de mensaje de error en la aplicación informática DISET debido a la no introducción de los datos de inicialización.

V.1.2.- CORRECCIÓN DEL ÁNGULO DE GIRO DEL VOLANTE.

El sensor instalado en el volante de la dirección es un potenciómetro circular, de 10 vueltas entre extremos, por lo que presenta un rango de medida entre 0° y 3600°.

Dicho sensor ha sido ajustado de manera que durante la circulación en línea recta del vehículo esté aproximadamente centrado en el rango de medida del mismo, esto es, que proporcione una medida en las proximidades de los 1800°.

No obstante y debido a la precisión requerida en esta medida del ángulo, se lleva a cabo un proceso de ajuste al comienzo de cada etapa de medición, durante el cual se evalúa el ángulo exacto proporcionado por el sensor en línea recta.

De este modo, en una primera fase del presente trabajo de investigación se aplica un factor de corrección común durante todo el itinerario medido al ángulo girado por el volante, para la ubicación de los tramos rectos. No obstante, el análisis de los resultados iniciales obtenidos revela una falta de precisión en la trayectoria simulada a partir de dicha señal de volante. Así, debe considerarse la holgura del dispositivo de dirección lo cual provoca que el volante, tras el trazado de un tramo de curva, no retorne siempre a la misma posición centrada.

Por ello, y como será descrito en el *Apartado 5.*, se introduce un nuevo procedimiento de corrección. Dicho procedimiento es definido como sigue:

- Se considera el trazado del itinerario constituido por tramos rectos y tramos curvos.
- Se introduce una corrección del cero del volante en cada tramo de curva a partir del tramo de recta precedente.
- Para ello y como etapa previa a la generación de la trayectoria, se lleva a cabo un análisis de laboratorio de las imágenes de vídeo registradas, durante la cual se posicionan los tramos de recta referidos a la variable tiempo. Posteriormente, será calculado el factor de corrección para cada uno de dichos tramos de recta.

- Finalmente, los factores de corrección calculados, referidos al instante de comienzo del tramo recto correspondiente, son introducidos en la aplicación informática DISET para la generación de la trayectoria del trazado. La ventana de introducción de dicha información se presenta en la siguiente figura (*Figura V.3.*), cuya ejecución corresponde a la siguiente acción:

- **SEPARAR TRAMOS** ➔ Entrada de tramos rectos.

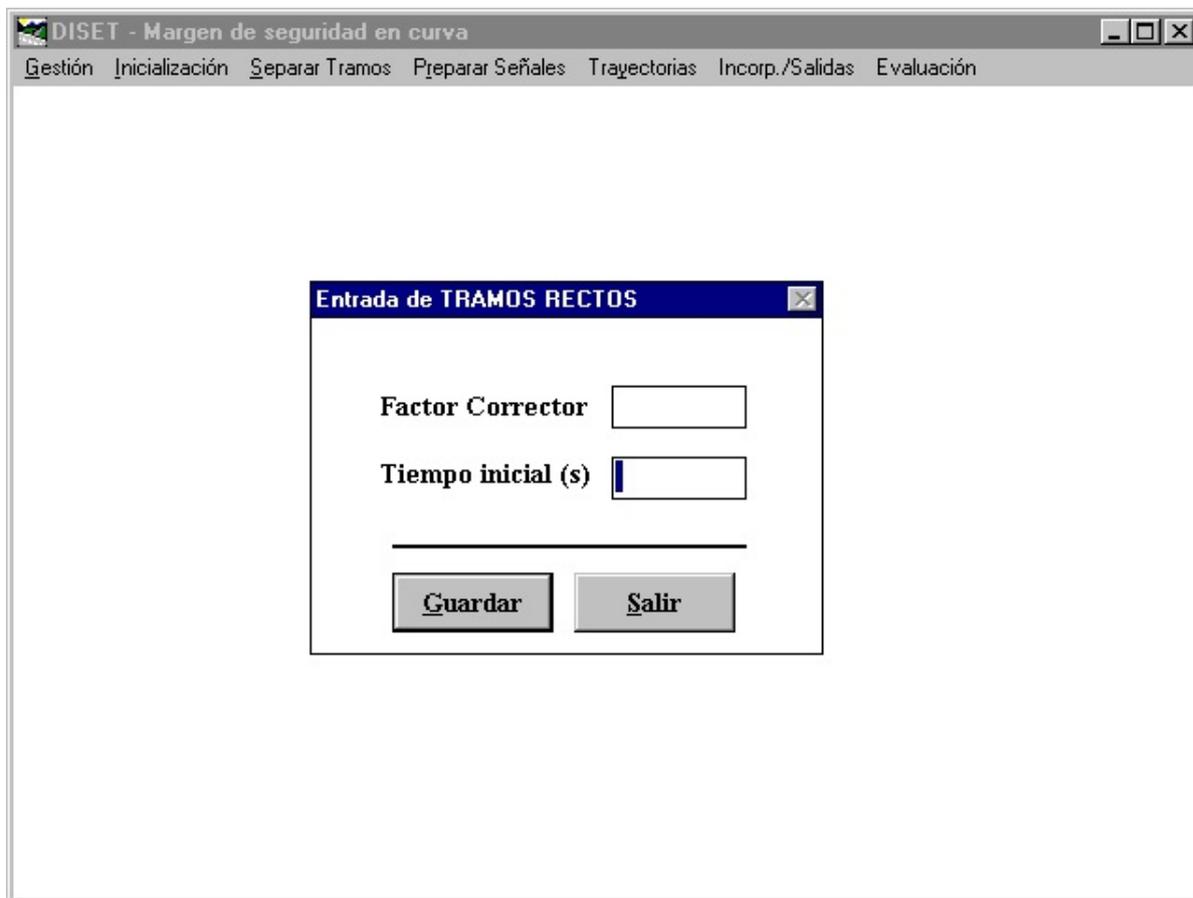


Figura V.3.- Ventana de la aplicación informática DISET para la introducción del factor de corrección del ángulo de volante en cada tramo de recta.

V.1.3.- UBICACIÓN DE INCORPORACIONES/SALIDAS.

Una de las variables explicativas consideradas durante la generación de modelos de predicción de la ocurrencia de accidentes es el *Factor de influencia de la velocidad en el ramal*. Dicho factor es definido como la velocidad probable de circulación de un vehículo tipo por la autovía en el punto de intersección de la misma con el carril del ramal.

El cálculo de dicho factor mediante la aplicación informática DISET requiere la introducción de la ubicación del ramal (incorporación y/o salida) en el itinerario medido, lo cual se lleva a cabo mediante un análisis previo de laboratorio de las imágenes de vídeo registradas.

La ventana de introducción de dicha información se presenta en la siguiente figura (Figura V.4.), cuya ejecución corresponde a la siguiente acción:

- **incorp./salidas** ➔ Entrada de posiciones.

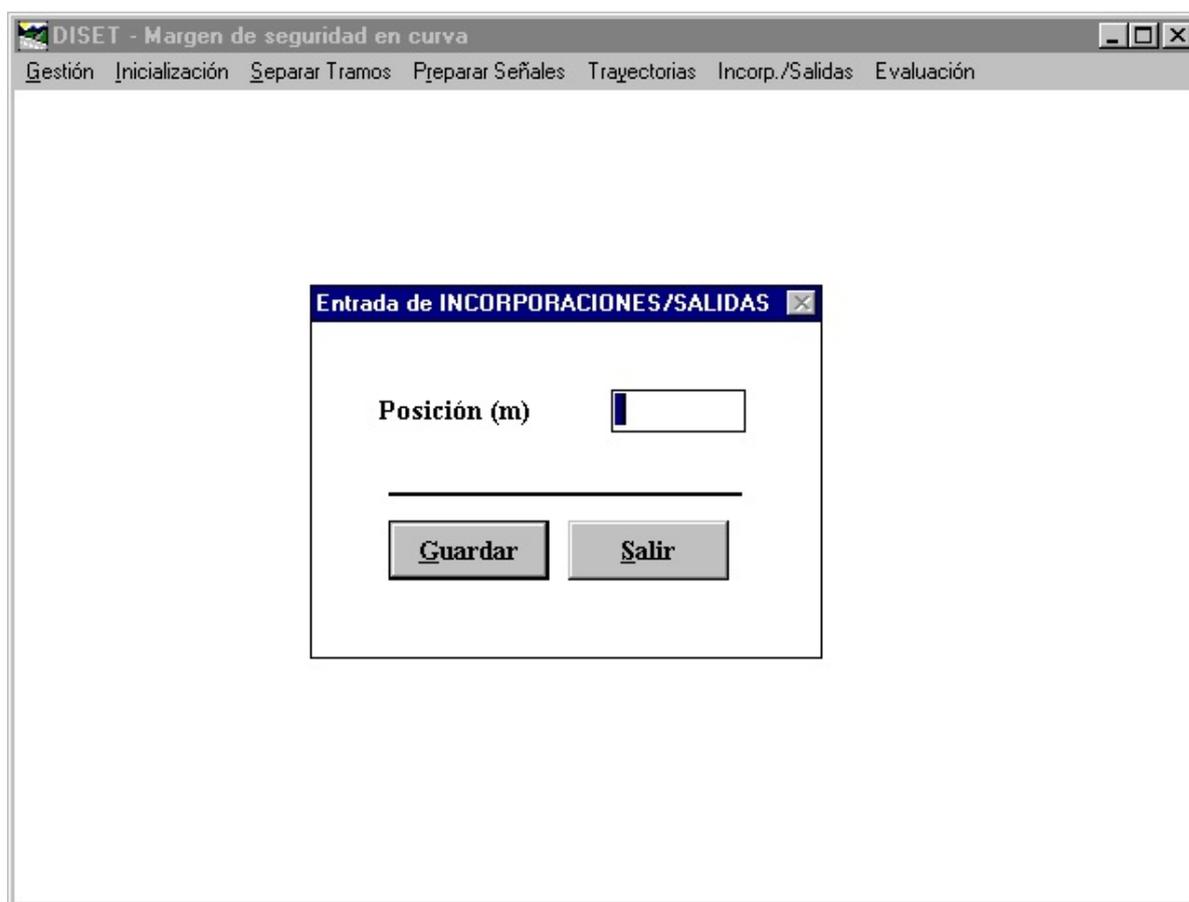


Figura V.4.- Ventana de la aplicación informática DISET para la introducción de la ubicación de las incorporaciones/salidas.

V.1.4.- SEÑALES MEDIDAS MEDIANTE SENSORES EMBARCADOS.

La información básica para el cálculo de las variables explicativas obtenidas mediante la aplicación informática desarrollada proviene de la medida en continuo del itinerario. Así, durante esta fase de medición son registrados en el disco duro del ordenador embarcado cuatro ficheros en formato ASCII, correspondientes a los sensores instalados en el vehículo instrumentado CANE, como son:

- Señal de velocidad longitudinal.
- Señal de ángulo girado por el volante.
- Señales de servo inclinómetros (longitudinal y transversal).

Dicha información será recuperada durante la ejecución de las distintas utilidades del programa DISET.

V.2.- Variables de salida.

El procesamiento de la información introducida, mostrada en el apartado precedente, mediante la aplicación informática DISET permite la obtención de las variables objetivas presentadas a continuación. El orden de ejecución de las utilidades se lista seguidamente:

- 1.- Preparar señales ➡ Ángulo de volante.
- 2.- Preparar señales ➡ Ángulo de rampa.
- 3.- Trayectorias ➡ En planta ➡ Genera.
- 4.- Trayectorias ➡ En alzado ➡ Genera.
- 5.- Preparar señales ➡ Radio de trayectoria.
- 6.- Preparar señales ➡ Ángulo de peralte.
- 7.- Evaluación ➡ Vel. máxima.

La descripción de las distintas utilidades presentadas se muestra a continuación.

V.2.1.- PREPARAR SEÑALES ➡ ÁNGULO DE VOLANTE.

A partir de las señales registradas en continuo procedentes de los sensores de medida de la velocidad longitudinal y del ángulo de giro del volante embarcados en el vehículo instrumentado CANE, así como de la información de corrección de dicha señal de volante, son llevadas a cabo las siguientes etapas:

- Filtrado de las señales adquiridas en continuo.
- Corrección de la señal de giro de volante mediante los factores evaluados en cada uno de los tramos de recta, en función de la variable tiempo.

- Cambio a referencia espacial, a través de la integración de la señal de velocidad registrada.

Los valores del ángulo de giro de volante frente al punto kilométrico calculados son almacenados en el disco duro del ordenador. Al mismo tiempo, la aplicación informática dispone de una utilidad de visualización del resultado, cuya ejecución corresponde a la siguiente acción:

- Preparar señales ➔ Dibujo señales.

La ventana de presentación de dicha información se muestra en la siguiente figura (Figura V.5.). Dicha utilidad dispone de dos opciones de visualización:

- Pantalla: representación en el monitor del ordenador.
- Impresora: representación sobre papel, a través de una impresora.

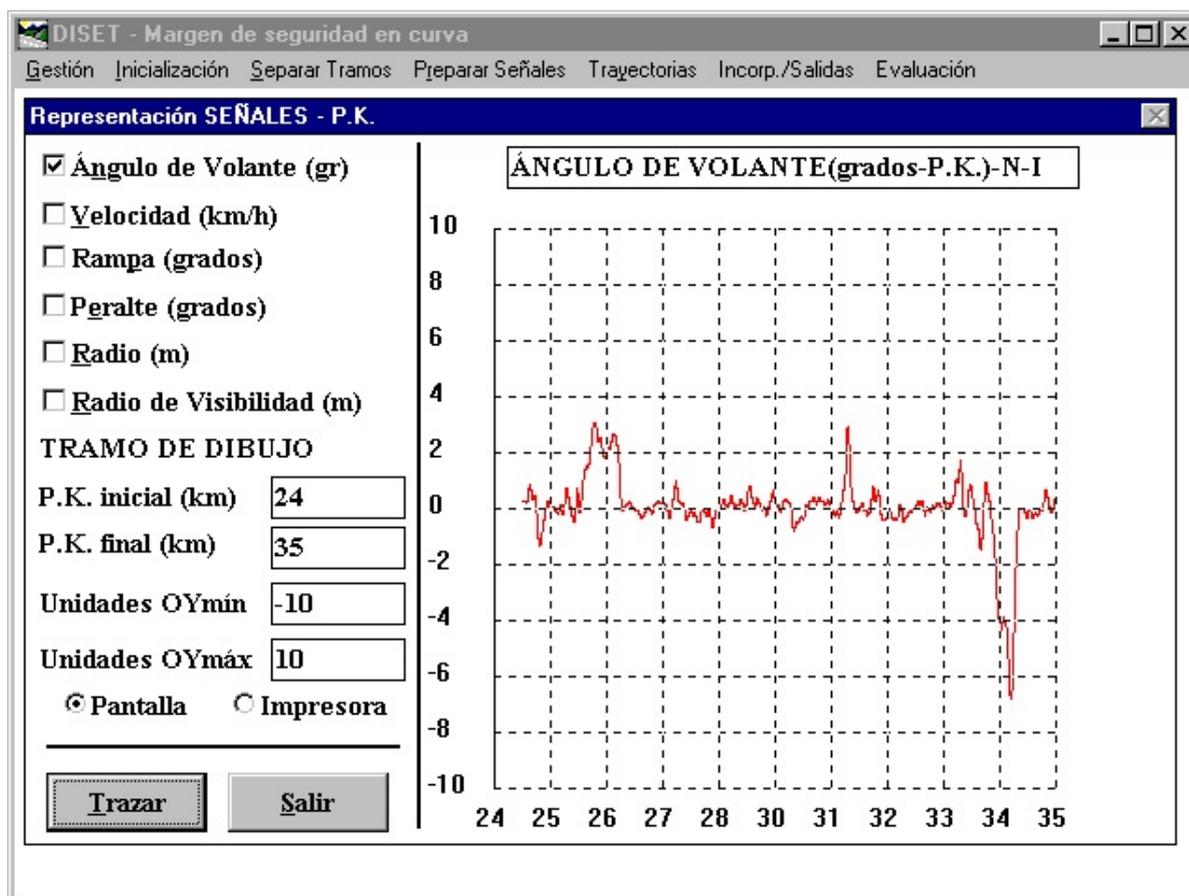


Figura V.5.- Ventana de la aplicación informática DISET para la visualización de los parámetros geométricos calculados (opción: pantalla).

V.2.2.- PREPARAR SEÑALES ➡ ÁNGULO DE RAMPA.

A partir de las señales registradas en continuo procedentes de los sensores de medida de la velocidad longitudinal y del ángulo de inclinación longitudinal de la carrocería embarcados en el vehículo instrumentado CANE, así como de la información de corrección de dicha señal de inclinación, son llevadas a cabo las siguientes etapas:

- Filtrado de las señales adquiridas en continuo.
- Corrección de la señal de inclinación mediante el factor evaluado sobre terreno horizontal, en función de la variable tiempo.
- Cambio a referencia espacial, a través de la integración de la señal de velocidad registrada.
- Corrección de la señal de inclinación longitudinal mediante la aceleración longitudinal evaluada a partir de la señal de velocidad registrada, para el cálculo final de la rampa del itinerario.

Los valores de la rampa frente al punto kilométrico calculados son almacenados en el disco duro del ordenador. Al mismo tiempo, la aplicación informática dispone de una utilidad de visualización del resultado, como ha sido mostrado en la *Figura V.5*.

V.2.3.- TRAYECTORIAS ➡ EN PLANTA ➡ GENERA.

La señal registrada en continuo procedente del sensor de medida de la velocidad longitudinal embarcado en el vehículo instrumentado, el valor del ángulo de giro del volante corregido, así como los valores de la rampa calculados, son introducidos en el modelo de simulación de la dinámica longitudinal. Como resultado final de este proceso son generadas las coordenadas en planta de la trayectoria seguida por el vehículo.

Dichos valores calculados son almacenados en el disco duro del ordenador. Al mismo tiempo, la aplicación informática dispone de una utilidad de visualización de la trayectoria, cuya ejecución corresponde a la siguiente acción:

- **TRAYECTORIAS ➡ En planta ➡ Dibuja.**

Dicha visualización dispone de la posibilidad opcional de dibujo de los hitos kilométricos teóricos. Estos hitos están uniformemente espaciados, con una distancia de 1000 metros entre cada uno de ellos. No obstante, y como ha sido mostrado, los hitos kilométricos reales no están uniformemente dispuestos, por lo que la ubicación representada difiere ligeramente de la realidad.

La ventana de presentación de dicha información se muestra en la siguiente figura (*Figura V.6.*). Dicha utilidad dispone de dos opciones de visualización:

- Pantalla: representación en el monitor del ordenador.
- Impresora: representación sobre papel, a través de una impresora. En esta opción, debe ser seleccionada la escala de dibujo del plano de la trayectoria.

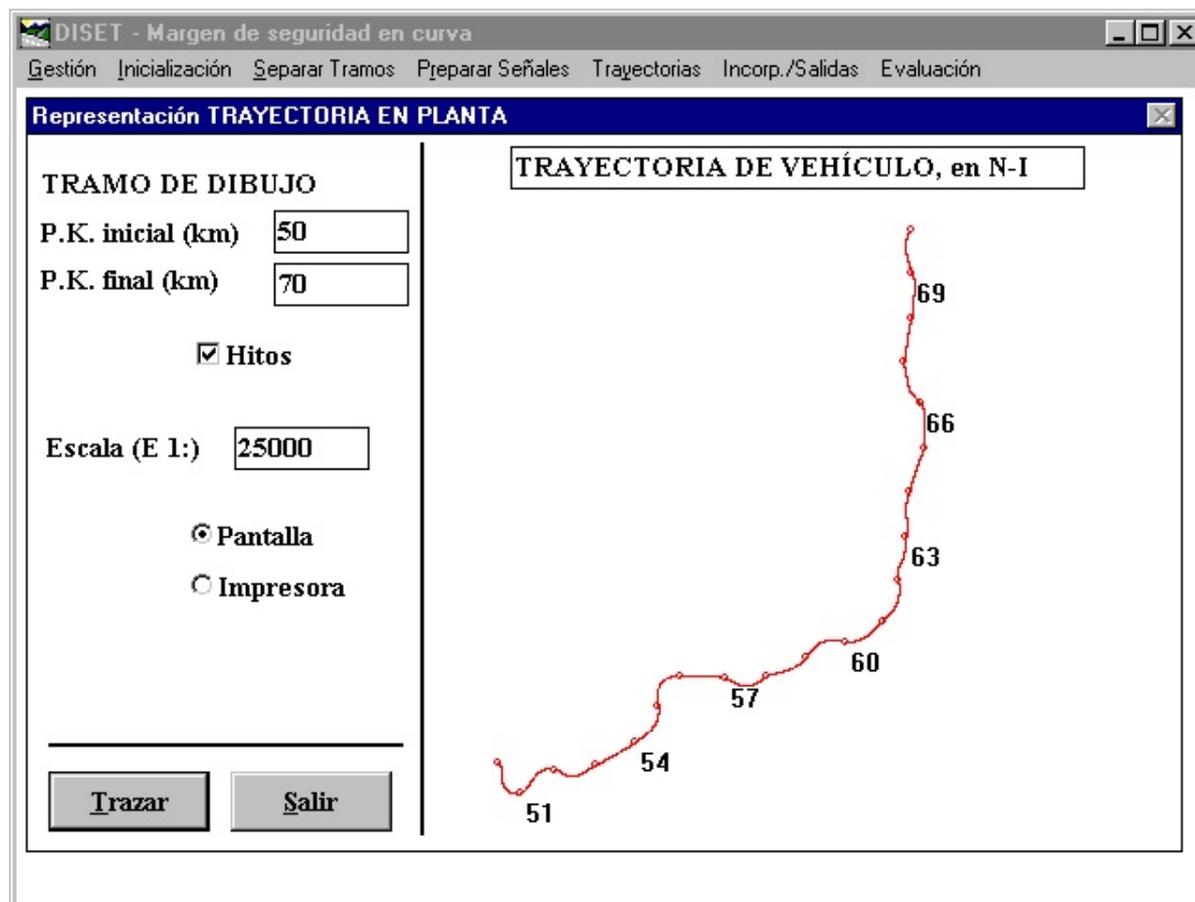


Figura V.6.- Ventana de la aplicación informática DISET para la visualización de la trayectoria en planta seguida por el vehículo (opción: pantalla).

V.2.4.- TRAYECTORIAS ➡ EN ALZADO ➡ GENERA.

A partir de los valores de la rampa calculada, son generadas las coordenadas en alzado de la trayectoria seguida por el vehículo. Dichos valores calculados son almacenados en el disco duro del ordenador. Al mismo tiempo, la aplicación informática dispone de una utilidad de visualización de la trayectoria, cuya ejecución corresponde a la siguiente acción:

- TRAYECTORIAS ➡ En alzado ➡ Dibuja.

Dicha visualización dispone de la posibilidad opcional de dibujo de los hitos kilométricos teóricos. Estos hitos están uniformemente espaciados, con una distancia de 1000 metros entre cada uno de ellos. No obstante, y como ha sido mostrado, los hitos kilométricos reales no están uniformemente dispuestos, por lo que la ubicación representada difiere ligeramente de la realidad.

La ventana de presentación de dicha información se muestra en la siguiente figura (Figura V.7.). Dicha utilidad dispone de dos opciones de visualización:

- Pantalla: representación en el monitor del ordenador.
- Impresora: representación sobre papel, a través de una impresora.

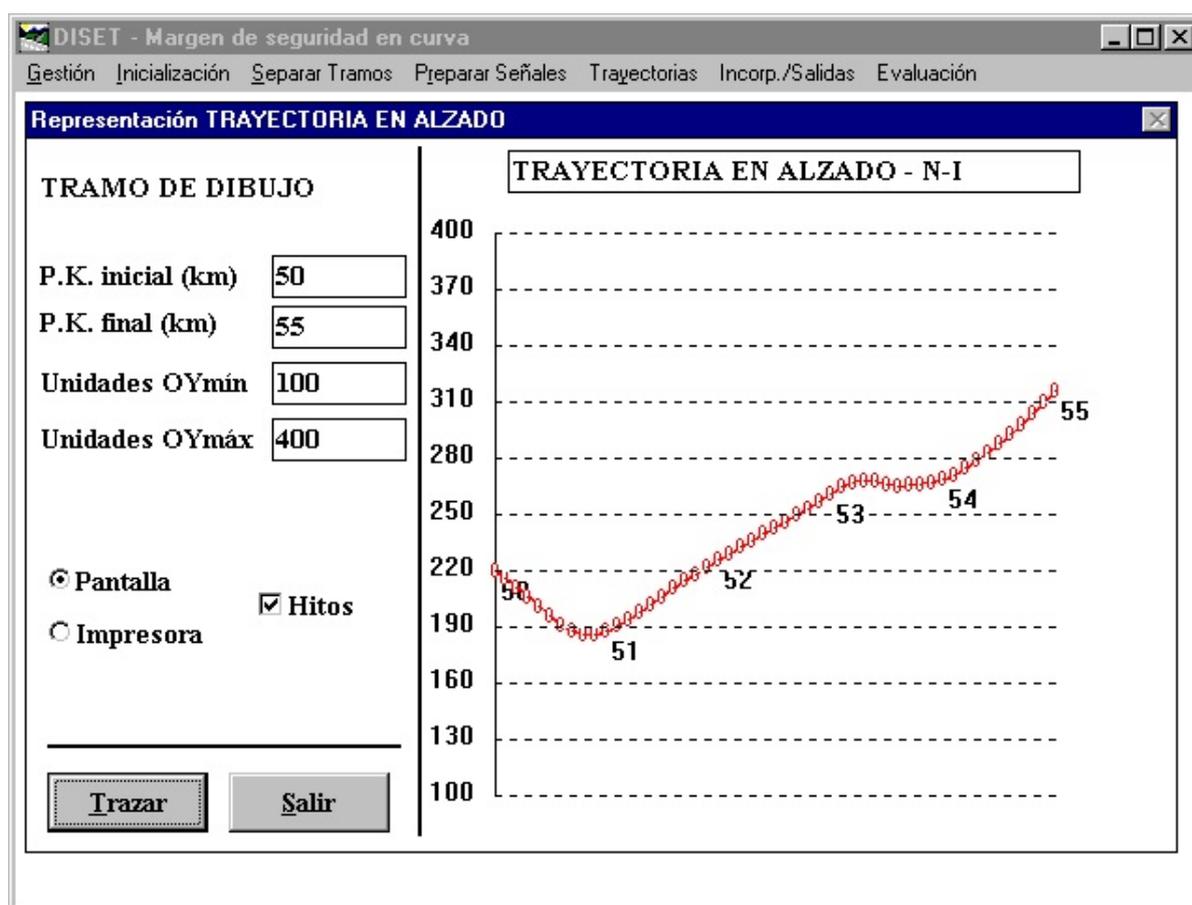


Figura V.7.- Ventana de la aplicación informática DISET para la visualización de la trayectoria en alzado seguida por el vehículo (opción: pantalla).

V.2.5.- PREPARAR SEÑALES ➔ RADIO DE TRAYECTORIA.

A partir de las coordenadas en planta de la trayectoria seguida por el vehículo son calculados los valores del radio de dicha trayectoria.

Los valores del radio frente al punto kilométrico obtenidos son almacenados en el disco duro del ordenador. Al mismo tiempo, la aplicación informática dispone de una utilidad de visualización del resultado, cuya ejecución corresponde a la siguiente acción:

- Preparar señales ➔ Dibujo señales.

La ventana de presentación de dicha información se muestra en la siguiente figura (Figura V.8.). Dicha utilidad dispone de dos opciones de visualización:

- Pantalla: representación en el monitor del ordenador.
- Impresora: representación sobre papel, a través de una impresora.

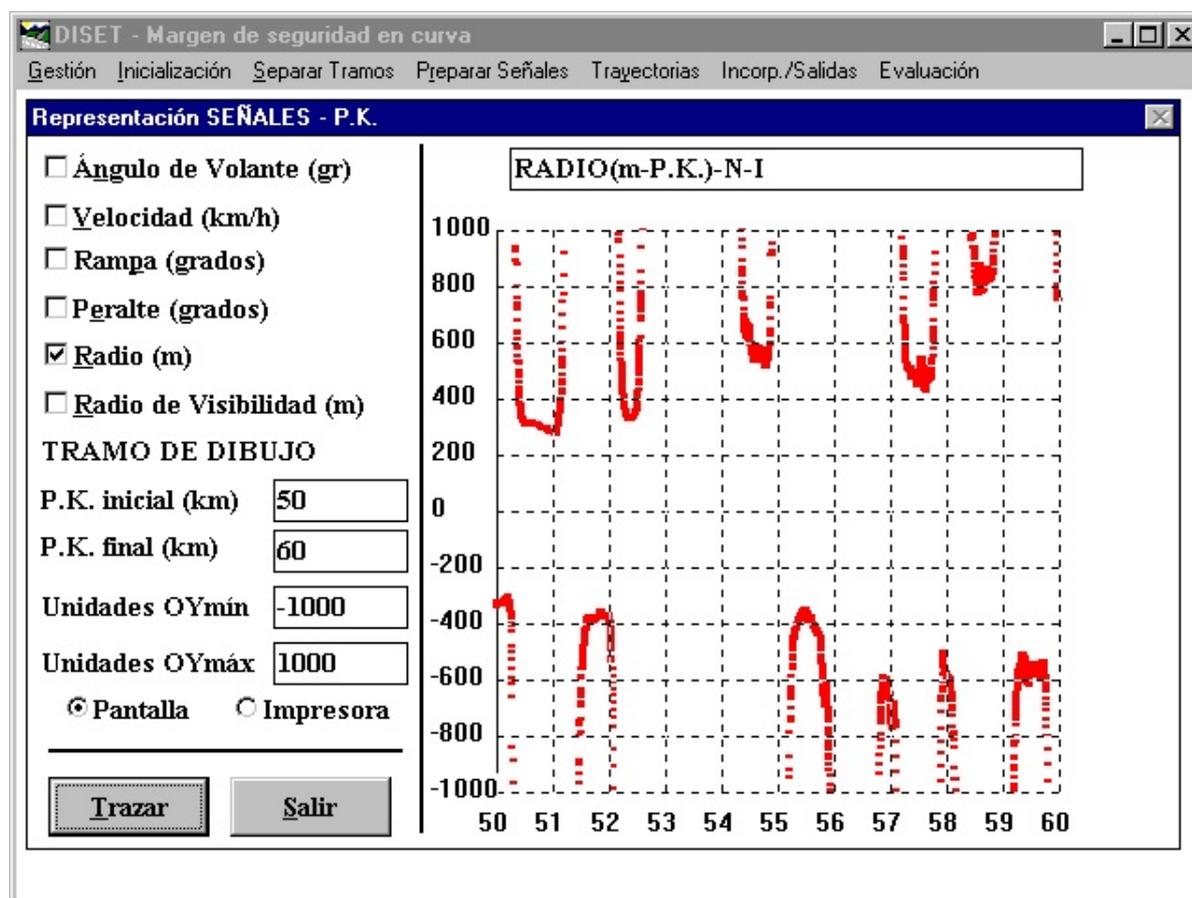


Figura V.8.- Ventana de la aplicación informática DISET para la visualización del radio de la trayectoria en planta (opción: pantalla).

V.2.6.- PREPARAR SEÑALES ➔ ÁNGULO DE PERALTE.

A partir de las señales registradas en continuo procedentes de los sensores de medida de la velocidad longitudinal y del ángulo de inclinación transversal de la carrocería embarcados en el vehículo instrumentado CANE, de la información de corrección de dicha señal de inclinación así como de los valores del radio de la trayectoria en planta calculados previamente, son llevadas a cabo las siguientes etapas:

- Filtrado de las señales adquiridas en continuo.
- Corrección de la señal de inclinación mediante el factor evaluado sobre terreno horizontal, en función de la variable tiempo.
- Cambio a referencia espacial, a través de la integración de la señal de velocidad registrada.
- Corrección de la señal de inclinación transversal mediante la aceleración transversal evaluada a partir de la señal de velocidad registrada y del radio calculado, para la obtención final del peralte del itinerario.

Los valores del peralte frente al punto kilométrico calculados son almacenados en el disco duro del ordenador. Al mismo tiempo, la aplicación informática dispone de una utilidad de visualización del resultado, como ha sido mostrado en la *Figura V.5*.

V.2.7.- EVALUACIÓN ➔ VEL. MÁXIMA.

Algunas de las variables explicativas consideradas en los modelos de predicción de la ocurrencia de accidentes en tramos de curva se basan en el cálculo de la velocidad de circulación de un vehículo tipo. Así, son tenidas en cuenta dos estimaciones de dicha velocidad:

- Velocidad de aproximación a un tramo de curva. Esta velocidad representa una velocidad probable de llegada a dicho tramo, considerando la influencia que sobre el vehículo tipo ejercen los parámetros geométricos de la calzada (trazado en planta y en alzado) medidos mediante el vehículo instrumentado CANE.
- Velocidad de circulación del vehículo tipo por la autovía en el punto de intersección de la misma con el carril de un ramal de acceso y/o salida. El cálculo de dicha velocidad mediante la aplicación informática DISET requiere la introducción de la ubicación de dicho ramal en el itinerario medido.

Los valores de dichas estimaciones de velocidad calculados son almacenados en el disco duro del ordenador.

***ANEXO VI.- CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL EQUIPO DE
MEDIDA VÍDEO-LÁSER RST***

ANEXO VI.- CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL EQUIPO DE MEDIDA VÍDEO-LÁSER RST.

VI.1.- Introducción.

El equipo de medida Road Surface Tester (RST) es un sistema de auscultación de firmes de gran rendimiento, precisión y repetitividad, que permite la obtención de los siguientes parámetros del pavimento de una carretera:

- Regularidad superficial.
- Textura.
- Roderas.
- Fisuración.

Simultáneamente, se adquiere también las siguientes medidas de la geometría de la carretera:

- Perfil transversal (peralte).
- Perfil longitudinal (rampa y pendiente).

Las características más importantes de este sistema de medida se muestran seguidamente.

VI.2.- Descripción del equipo.

El equipo Láser RST dispone de un avanzado principio de medida basado en un sistema de rayos Láser (Light Amplification Stimulated Emission of Radiation) que son proyectados sobre la superficie del pavimento, siendo a continuación captados los rayos reflejados. Dicho equipo consta de 15 cámaras Láser instaladas en un soporte, el cual es montado en la parte delantera de un vehículo automóvil.

El esquema de disposición de las cámaras láser sobre el soporte se presenta en la siguiente figura (*Figura VI.1.*). Las dos cámaras de los extremos del soporte están giradas un ángulo de 45°, de forma que el ancho de ensayo alcance 3,65 metros sin que dicho soporte sobrepase los 2,5 metros de gálibo legal.

El principio de medida consiste en la emisión de señales mediante cámaras de rayos láser de alta frecuencia (16 y 32 kHz), los cuales se reflejan en la superficie de la carretera, registrándose de forma continua la distancia entre el emisor (cámara láser) y el pavimento.

La versatilidad del sistema permite ensayar en cualquier condición de tráfico, desde muy congestionado (baja velocidad) a tráfico rápido (hasta 90 km/h), sin que la medición resulte afectada.

Figura VI.1.- Disposición y frecuencias de las cámaras láser del equipo RST.

El sistema de referencia respecto al cual son almacenadas las señales es definido mediante los siguientes sensores embarcados en el soporte del vehículo de medida:

- Dos acelerómetros.
- Dos inclinómetros.
- Un giróscopo.

Asimismo, se dispone de un odómetro que permite el cambio de referencia temporal a espacial de las señales registradas. Finalmente, los datos son procesados mediante convertidores analógico-digitales y tarjetas SPC que permiten la ejecución de los cálculos en tiempo real.

El cálculo de los distintos parámetros de la calzada requiere la utilización de alguna/s de las cámaras láser embarcadas. Así, en la siguiente figura (*Figura VI.2.*) se muestra las cámaras necesarias para la obtención de cada uno de los parámetros anteriormente citados.

Figura VI.2.- Distribución de las cámaras láser requeridas para la obtención de cada uno de los parámetros de la calzada.

VI.3.- Parámetros medidos.

- **REGULARIDAD SUPERFICIAL:** la regularidad superficial, concepto que engloba el análisis de la geometría del perfil longitudinal dentro del rango de longitudes de onda comprendidas entre 0,5 metros y 50 metros, es uno de los parámetros más significativo para valorar el estado del pavimento, atendiendo a los aspectos de confort del usuario, consumo de carburante, desgaste del vehículo, efectos en las mercancías transportadas y en las cargas dinámicas transmitidas al firme por los vehículos pesados. Asimismo la regularidad superficial influye en el ruido generado por el tráfico.

La regularidad superficial se mide en cada rodada del vehículo por una cámara láser y un acelerómetro. La información o perfil del acelerómetro representa el movimiento del vehículo en la dirección de medida, que se resta del perfil adquirido por la cámara, para obtener finalmente el perfil de la calzada.

Los datos del perfil permiten obtener cualquier indicador que represente la regularidad superficial, entre ellos el IRI (Índice de Regularidad Internacional), que se ha constituido en el standard de mayor difusión y uso. Este índice valora la variación entre la geometría teórica del perfil longitudinal y la realmente existente, diferencia debida a irregularidades y deformaciones en la superficie del pavimento que el usuario percibe a través del vehículo.

La configuración standard proporciona resultados del valor medio del IRI y también de la media cuadrática (RMS) de las amplitudes correspondientes a longitudes de onda cortas (0,5 ÷ 3 metros), medias (3 ÷ 13 metros) y largas (13 ÷ 40 metros) para cada rodada.

- **TEXTURA:** este parámetro influye sobre la adherencia neumático-calzada tanto en superficies secas como mojadas, la capacidad de drenaje de la superficie, la proyección y difusión de agua sobre otros vehículos y la mayor parte del ruido generado en el contacto neumático-calzada. Asimismo, condiciona el consumo de carburante y el desgaste de los neumáticos.

Hasta hace poco tiempo la medida de la textura se realizaba de forma indirecta, al no existir técnicas de medida capaces de apreciar magnitudes del orden de milímetro o fracción del mismo. Con el equipo RST la medida de la textura puede realizarse a elevadas velocidades de circulación (90 km/h) sin pérdida de precisión.

Este parámetro es obtenido mediante dos cámaras láser. El equipo proporciona la macrotextura y la megatextura, de acuerdo a la clasificación que demanda el usuario. Las escalas consideradas por defecto son mostradas en la tabla siguiente (*Tabla VI.1.*).

| <i>Parámetro</i> | <i>Rangos de longitud de onda</i> |
|---------------------|-----------------------------------|
| Macrotextura fina | $1 < \lambda < 10 \text{ mm}$ |
| Macrotextura gruesa | $10 < \lambda < 100 \text{ mm}$ |
| Megatextura | $100 < \lambda < 500 \text{ mm}$ |

Tabla VI.1.- Escalas de medida de la textura de la calzada en el equipo RST.

- **RODERAS Y PERFIL TRANSVERSAL:** las irregularidades del perfil transversal, fundamentalmente las roderas, afectan a la seguridad del tráfico debido a que pueden incidir en la trayectoria de los vehículos. Además, la acumulación de agua o hielo en los valles de estas irregularidades pueden provocar efectos no deseados como "aquaplaning", contacto defectuoso y un drenaje superficial insuficiente, posibilitando asimismo la afección a la capacidad portante del firme si el agua penetra a través de sus distintas capas.

El equipo de medida RST calcula una sección transversal cada 10 cm empleando 15 cámaras láser. El sistema elimina automáticamente la influencia de la textura, baches y fisuras obteniendo un perfil transformado de referencia, definido por las cámaras exteriores y fijando la posición relativa de las señales obtenidas por el resto de las cámaras. Este perfil transformado permite obtener la profundidad de roderas en todo su ancho.

El sistema registra la profundidad de rodera en cada una de las rodadas, la máxima profundidad de rodera, así como la media y la desviación típica del perfil transversal.

- **FISURACIÓN:** el estado de fisuración de la capa de rodadura indica tanto una superficie en mal estado como una capacidad estructural disminuida. El equipo RST efectúa un tratamiento estadístico de las fisuras del pavimento a partir de las señales de las cámaras 4, 6, 8 y 10, suministrando información sobre el número, dimensiones, orientación y densidad de fisuras.

Debido a la influencia de la megatextura y de la macrotextura gruesa en esta medición, el sistema realiza un proceso de filtrado en tiempo real.

- **PERALTE:** dicho parámetro es evaluado en tanto por ciento a partir de las señales de un inclinómetro y un giróscopo. Dicho valor es obtenido cada 20 metros.

- **PERFIL LONGITUDINAL:** el sistema RST evalúa dicho perfil mediante la información procedente de un inclinómetro dispuesto en la dirección longitudinal de medida, así como a partir de la señal obtenida del transductor de distancia.

***ANEXO VII.- DEFINICIÓN DE LA MUESTRA.
TABLAS Y FIGURAS DE RESULTADOS***

ANEXO VII.- DEFINICIÓN DE LA MUESTRA. TABLAS Y FIGURAS DE RESULTADOS.

VII.1.- Ubicación de los tramos de curva en los itinerarios de autovía de la muestra analizada.

| TRAMO | N-I | | N-401 | | N-IV | | N-V | |
|-------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|
| | P.K. Inicio | P.K. Fin |
| 1 | 35.155 | 35.963 | 12.620 | 13.056 | 26.152 | 26.556 | 32.822 | 33.200 |
| 2 | 37.253 | 37.435 | 19.076 | 19.352 | 26.838 | 27.058 | 40.242 | 40.702 |
| 3 | 37.429 | 37.933 | 19.618 | 20.164 | 27.186 | 27.53 | 46.496 | 47.016 |
| 4 | 37.903 | 38.445 | 20.568 | 21.388 | 36.966 | 37.158 | 53.622 | 54.080 |
| 5 | 39.433 | 39.679 | 23.944 | 24.682 | 37.200 | 37.374 | 63.652 | 64.240 |
| 6 | 39.891 | 40.525 | 25.268 | 25.880 | 38.740 | 39.008 | x | x |
| 7 | 41.509 | 41.727 | 26.816 | 27.456 | 39.160 | 39.472 | x | x |
| 8 | 41.783 | 42.037 | 28.316 | 28.972 | 39.810 | 40.116 | x | x |
| 9 | 42.161 | 42.667 | 31.702 | 31.966 | 41.376 | 41.540 | x | x |
| 10 | 43.363 | 43.899 | 34.082 | 34.276 | 42.044 | 42.198 | x | x |
| 11 | 43.989 | 44.449 | 34.306 | 35.112 | 42.540 | 42.788 | x | x |
| 12 | 48.595 | 48.797 | 39.044 | 39.830 | 42.798 | 43.062 | x | x |
| 13 | 48.863 | 49.337 | 44.884 | 45.374 | 43.014 | 43.302 | x | x |
| 14 | 49.425 | 49.795 | 46.452 | 47.244 | 44.628 | 44.910 | x | x |
| 15 | 49.765 | 51.309 | 47.352 | 47.742 | 45.432 | 45.802 | x | x |
| 16 | 51.479 | 52.193 | 53.460 | 54.920 | 46.144 | 46.414 | x | x |
| 17 | 52.191 | 52.701 | 55.416 | 55.644 | 47.190 | 47.666 | x | x |
| 18 | 54.371 | 55.013 | 55.706 | 56.036 | 48.170 | 48.516 | x | x |
| 19 | 55.227 | 56.043 | 60.926 | 61.120 | 49.840 | 50.426 | x | x |
| 20 | 56.829 | 57.221 | 61.130 | 61.374 | 52.334 | 52.576 | x | x |
| 21 | 57.233 | 57.907 | 61.812 | 62.100 | 53.210 | 53.528 | x | x |
| 22 | 57.919 | 58.271 | 62.166 | 62.624 | 61.984 | 62.596 | x | x |
| 23 | 58.523 | 59.031 | 62.764 | 62.946 | 70.714 | 71.064 | x | x |
| 24 | 59.205 | 59.909 | 62.914 | 63.134 | 71.180 | 71.858 | x | x |
| 25 | 59.977 | 60.711 | 63.292 | 63.664 | 72.758 | 73.068 | x | x |
| 26 | 61.243 | 61.995 | 63.678 | 63.932 | 74.880 | 75.088 | x | x |
| 27 | 62.073 | 62.387 | 67.214 | 68.002 | 77.658 | 78.194 | x | x |
| 28 | 62.495 | 62.741 | x | x | 78.816 | 79.290 | x | x |
| 29 | 62.935 | 63.331 | x | x | 83.150 | 83.934 | x | x |

Tabla VII.1.- Ubicación de los tramos de curva en los itinerarios de la muestra.

| TRAMO | N-I | | N-401 | | N-IV | | N-V | |
|-------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|
| | P.K. Inicio | P.K. Fin |
| 30 | 63.467 | 63.761 | x | x | x | x | x | x |
| 31 | 64.951 | 65.193 | x | x | x | x | x | x |
| 32 | 65.643 | 66.115 | x | x | x | x | x | x |
| 33 | 66.273 | 66.597 | x | x | x | x | x | x |
| 34 | 66.889 | 67.151 | x | x | x | x | x | x |
| 35 | 68.719 | 68.997 | x | x | x | x | x | x |
| 36 | 69.317 | 69.521 | x | x | x | x | x | x |
| 37 | 69.577 | 69.893 | x | x | x | x | x | x |
| 38 | 70.171 | 70.505 | x | x | x | x | x | x |
| 39 | 70.739 | 70.987 | x | x | x | x | x | x |
| 40 | 71.781 | 71.989 | x | x | x | x | x | x |
| 41 | 72.551 | 72.931 | x | x | x | x | x | x |
| 42 | 72.937 | 74.043 | x | x | x | x | x | x |
| 43 | 75.315 | 75.833 | x | x | x | x | x | x |
| 44 | 75.835 | 76.437 | x | x | x | x | x | x |
| 45 | 76.421 | 77.243 | x | x | x | x | x | x |
| 46 | 77.271 | 77.819 | x | x | x | x | x | x |
| 47 | 80.381 | 80.853 | x | x | x | x | x | x |
| 48 | 83.973 | 84.181 | x | x | x | x | x | x |
| 49 | 85.195 | 85.593 | x | x | x | x | x | x |
| 50 | 85.617 | 85.933 | x | x | x | x | x | x |
| 51 | 86.269 | 86.629 | x | x | x | x | x | x |
| 52 | 86.861 | 87.087 | x | x | x | x | x | x |
| 53 | 87.379 | 87.805 | x | x | x | x | x | x |
| 54 | 87.783 | 88.437 | x | x | x | x | x | x |
| 55 | 88.391 | 89.100 | x | x | x | x | x | x |

Tabla VII.1.- Ubicación de los tramos de curva en los itinerarios de la muestra (cont.).

VII.2.- Comparación de los itinerarios de la muestra con el resto de itinerarios de autovía de España.

VII.2.1.- COMPARACIÓN SEGÚN GEOMETRÍA DEL TRAZADO.

| Itinerarios (año) | % | Muestra | | | Resto de España | | |
|---|---|---------|----|----|-----------------|----|----|
| | | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 |
| Geometría | | | | | | | |
| Recta | | 64 | 59 | 62 | 61 | 61 | 60 |
| Curva suave | | 20 | 21 | 22 | 23 | 23 | 25 |
| Curva fuerte sin señalar | | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| Curva fuerte con señal y sin velocidad señalizada | | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| Curva fuerte con señal y velocidad señalizada | | 4 | 7 | 5 | 6 | 5 | 5 |
| En intersección. | | 10 | 10 | 10 | 7 | 7 | 7 |

Tabla VII.2.- Proporciones de accidentes según el atributo “geometría del trazado” para la muestra y el resto de itinerarios de autovía de España (años 1994, 1995 y 1996).

| Itinerarios | Muestra | | | Resto de España | | |
|----------------------|---------|-----|-----|-----------------|------|------|
| | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 |
| Año | | | | | | |
| Número de accidentes | 167 | 172 | 157 | 4280 | 4775 | 4959 |

Tabla VII.3.- Número de accidentes en la muestra y en el resto de itinerarios de autovía de España (años 1994, 1995 y 1996).

| Discrepancia (año) | d | | |
|---|-----|-----|-----|
| | 94 | 95 | 96 |
| Geometría | | | |
| Recta | 0,7 | 0,5 | 0,5 |
| Curva suave | 0,9 | 0,7 | 0,9 |
| Curva fuerte sin señalar | 0,2 | 0,3 | 1,1 |
| Curva fuerte con señal y sin velocidad señalizada | 1,1 | 0,2 | 1,0 |
| Curva fuerte con señal y velocidad señalizada | 0,9 | 0,9 | 0,0 |
| En intersección. | 1,5 | 1,6 | 1,8 |

Tabla VII.4.- Medida de la discrepancia según el atributo “geometría del trazado” entre la muestra y el resto de itinerarios de autovía de España (años 1994, 1995 y 1996).

| Itinerarios (año) | Configuración de colisión | % | Muestra | | | Resto de España | | |
|-------------------|--------------------------------------|---|---------|----|----|-----------------|----|----|
| | | | 94 | 95 | 96 | 94 | 95 | 96 |
| | Colisión frontal | | 2 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| | Colisión frontolateral | | 7 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 |
| | Colisión lateral | | 7 | 6 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | Colisión por alcance | | 18 | 24 | 24 | 21 | 21 | 20 |
| | Colisión múltiple o en caravana | | 7 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 |
| | Colisión con obstáculo en la calzada | | 5 | 4 | 6 | 5 | 4 | 4 |
| | Atropello | | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 |
| | Vuelco en la calzada | | 2 | 4 | 1 | 3 | 4 | 3 |
| | Salidas por la izquierda | | 20 | 17 | 23 | 21 | 22 | 23 |
| | Salidas por la derecha | | 25 | 30 | 22 | 29 | 29 | 28 |

Tabla VII.5.- *Proporciones de accidentes según el atributo “configuración de colisión” para la muestra y el resto de itinerarios de autovía de España (años 1994, 1995 y 1996).*

| Discrepancia (año) | d | | |
|--------------------------------------|-----|-----|-----|
| | 94 | 95 | 96 |
| Configuración de colisión | | | |
| Colisión frontal | 1,4 | 0,7 | 1,7 |
| Colisión frontolateral | 1,1 | 0,3 | 0,7 |
| Colisión lateral | 1,5 | 1,2 | 0,3 |
| Colisión por alcance | 0,8 | 0,9 | 1,0 |
| Colisión múltiple o en caravana | 1,6 | 0,2 | 0,7 |
| Colisión con obstáculo en la calzada | 0,1 | 0,6 | 1,4 |
| Atropello | 0,1 | 0,7 | 0,4 |
| Vuelco en la calzada | 0,5 | 0,0 | 1,2 |
| Salidas por la izquierda | 0,5 | 1,6 | 0,1 |
| Salidas por la derecha | 1,3 | 0,4 | 1,5 |

Tabla VII.6.- *Medida de la discrepancia según el atributo “configuración de la colisión” entre la muestra y el resto de itinerarios de autovía de España (años 1994, 1995 y 1996).*

***ANEXO VIII.- VALORES MEDIDOS DE LAS VARIABLES
INVOLUCRADAS EN EL MODELO DE PREDICCIÓN
(AUTOVÍAS N-I, N-401, N-IV Y N-V)***

ANEXO VIII.- VALORES MEDIDOS DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN EL MODELO DE PREDICCIÓN (AUTOVÍAS N-I, N-401, N-IV Y N-V).

VIII.1.- Número de accidentes en los tramos de curva en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).

| TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V | TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V |
|-------|-----|-------|------|-----|-------|-----|-------|------|-----|
| 1 | 1 | 3 | 1 | 0 | 30 | 2 | x | x | x |
| 2 | 1 | 3 | 0 | 0 | 31 | 4 | x | x | x |
| 3 | 2 | 2 | 1 | 0 | 32 | 0 | x | x | x |
| 4 | 2 | 2 | 2 | 0 | 33 | 0 | x | x | x |
| 5 | 0 | 3 | 1 | 1 | 34 | 0 | x | x | x |
| 6 | 2 | 3 | 0 | x | 35 | 0 | x | x | x |
| 7 | 0 | 2 | 0 | x | 36 | 0 | x | x | x |
| 8 | 1 | 1 | 0 | x | 37 | 0 | x | x | x |
| 9 | 0 | 0 | 0 | x | 38 | 0 | x | x | x |
| 10 | 0 | 0 | 0 | x | 39 | 1 | x | x | x |
| 11 | 1 | 0 | 1 | x | 40 | 0 | x | x | x |
| 12 | 0 | 1 | 1 | x | 41 | 1 | x | x | x |
| 13 | 1 | 1 | 1 | x | 42 | 0 | x | x | x |
| 14 | 1 | 1 | 1 | x | 43 | 0 | x | x | x |
| 15 | 2 | 1 | 3 | x | 44 | 0 | x | x | x |
| 16 | 0 | 6 | 0 | x | 45 | 0 | x | x | x |
| 17 | 0 | 1 | 2 | x | 46 | 0 | x | x | x |
| 18 | 0 | 0 | 0 | x | 47 | 0 | x | x | x |
| 19 | 0 | 0 | 0 | x | 48 | 3 | x | x | x |
| 20 | 0 | 0 | 0 | x | 49 | 0 | x | x | x |
| 21 | 0 | 0 | 2 | x | 50 | 0 | x | x | x |
| 22 | 0 | 1 | 1 | x | 51 | 1 | x | x | x |
| 23 | 0 | 0 | 6 | x | 52 | 0 | x | x | x |
| 24 | 3 | 0 | 0 | x | 53 | 0 | x | x | x |
| 25 | 1 | 0 | 0 | x | 54 | 0 | x | x | x |
| 26 | 1 | 1 | 0 | x | 55 | 1 | x | x | x |
| 27 | 5 | 1 | 1 | x | | | | | |
| 28 | 2 | x | 0 | x | | | | | |
| 29 | 1 | x | 0 | x | | | | | |

Tabla VIII.1.- Número de accidentes en los tramos de curva en las autovías analizadas.

VIII.2.- Estado de la variable “tramo de concentración de accidentes” en los tramos de curva en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).

| TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V | TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V |
|-------|-----|-------|------|-----|-------|-----|-------|------|-----|
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 30 | 1 | x | x | x |
| 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 31 | 1 | x | x | x |
| 3 | 1 | 1 | 0 | 0 | 32 | 0 | x | x | x |
| 4 | 1 | 1 | 1 | 0 | 33 | 0 | x | x | x |
| 5 | 0 | 1 | 0 | 0 | 34 | 0 | x | x | x |
| 6 | 1 | 1 | 0 | x | 35 | 0 | x | x | x |
| 7 | 0 | 1 | 0 | x | 36 | 0 | x | x | x |
| 8 | 0 | 0 | 0 | x | 37 | 0 | x | x | x |
| 9 | 0 | 0 | 0 | x | 38 | 0 | x | x | x |
| 10 | 0 | 0 | 0 | x | 39 | 0 | x | x | x |
| 11 | 0 | 0 | 0 | x | 40 | 0 | x | x | x |
| 12 | 0 | 0 | 0 | x | 41 | 0 | x | x | x |
| 13 | 0 | 0 | 0 | x | 42 | 0 | x | x | x |
| 14 | 0 | 0 | 0 | x | 43 | 0 | x | x | x |
| 15 | 1 | 0 | 1 | x | 44 | 0 | x | x | x |
| 16 | 0 | 1 | 0 | x | 45 | 0 | x | x | x |
| 17 | 0 | 0 | 1 | x | 46 | 0 | x | x | x |
| 18 | 0 | 0 | 0 | x | 47 | 0 | x | x | x |
| 19 | 0 | 0 | 0 | x | 48 | 1 | x | x | x |
| 20 | 0 | 0 | 0 | x | 49 | 0 | x | x | x |
| 21 | 0 | 0 | 1 | x | 50 | 0 | x | x | x |
| 22 | 0 | 0 | 0 | x | 51 | 0 | x | x | x |
| 23 | 0 | 0 | 1 | x | 52 | 0 | x | x | x |
| 24 | 1 | 0 | 0 | x | 53 | 0 | x | x | x |
| 25 | 0 | 0 | 0 | x | 54 | 0 | x | x | x |
| 26 | 0 | 0 | 0 | x | 55 | 0 | x | x | x |
| 27 | 1 | 0 | 0 | x | | | | | |
| 28 | 1 | x | 0 | x | | | | | |
| 29 | 0 | x | 0 | x | | | | | |

Tabla VIII.2.- Estado de la variable “tramo de concentración de accidentes” en los tramos de curva en las autovías analizadas.

VIII.3.- Estado de la variable “longitud de tramo de curva” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).

| TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V | TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V |
|-------|-------|-------|------|-----|-------|-------|-------|------|-----|
| 1 | 808 | 436 | 404 | 378 | 30 | 294 | x | x | x |
| 2 | 182 | 276 | 220 | 460 | 31 | 242 | x | x | x |
| 3 | 504 | 546 | 344 | 520 | 32 | 472 | x | x | x |
| 4 | 542 | 820 | 192 | 458 | 33 | 324 | x | x | x |
| 5 | 246 | 738 | 174 | 588 | 34 | 262 | x | x | x |
| 6 | 634 | 612 | 268 | x | 35 | 278 | x | x | x |
| 7 | 218 | 640 | 312 | x | 36 | 204 | x | x | x |
| 8 | 254 | 656 | 306 | x | 37 | 316 | x | x | x |
| 9 | 506 | 264 | 164 | x | 38 | 334 | x | x | x |
| 10 | 536 | 194 | 154 | x | 39 | 248 | x | x | x |
| 11 | 460 | 806 | 248 | x | 40 | 208 | x | x | x |
| 12 | 202 | 786 | 264 | x | 41 | 380 | x | x | x |
| 13 | 474 | 490 | 288 | x | 42 | 1.106 | x | x | x |
| 14 | 370 | 792 | 282 | x | 43 | 518 | x | x | x |
| 15 | 1.544 | 390 | 370 | x | 44 | 602 | x | x | x |
| 16 | 714 | 1.460 | 270 | x | 45 | 822 | x | x | x |
| 17 | 510 | 228 | 476 | x | 46 | 548 | x | x | x |
| 18 | 642 | 330 | 346 | x | 47 | 472 | x | x | x |
| 19 | 816 | 194 | 586 | x | 48 | 208 | x | x | x |
| 20 | 392 | 244 | 242 | x | 49 | 398 | x | x | x |
| 21 | 674 | 288 | 318 | x | 50 | 316 | x | x | x |
| 22 | 352 | 458 | 612 | x | 51 | 360 | x | x | x |
| 23 | 508 | 182 | 350 | x | 52 | 226 | x | x | x |
| 24 | 704 | 220 | 678 | x | 53 | 426 | x | x | x |
| 25 | 734 | 372 | 310 | x | 54 | 654 | x | x | x |
| 26 | 752 | 254 | 208 | x | 55 | 709 | x | x | x |
| 27 | 314 | 788 | 536 | x | | | | | |
| 28 | 246 | x | 474 | x | | | | | |
| 29 | 396 | x | 784 | x | | | | | |

Tabla VIII.3.- Estado de la variable “longitud de tramo de curva (metros)” en las autovías analizadas.

VIII.4.- Estado de la variable “longitud de tramo de recta” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).

| TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V | TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-----|
| 1 | 930 | 2.298 | 3.770 | 2.822 | 30 | 236 | x | x | x |
| 2 | 1.390 | 6.120 | 382 | 7.142 | 31 | 1.290 | x | x | x |
| 3 | 94 | 366 | 228 | 5.894 | 32 | 550 | x | x | x |
| 4 | 70 | 504 | 9.536 | 6.706 | 33 | 258 | x | x | x |
| 5 | 1.088 | 2.656 | 142 | 9.672 | 34 | 392 | x | x | x |
| 6 | 312 | 686 | 1.466 | x | 35 | 1.668 | x | x | x |
| 7 | 1.084 | 1.036 | 252 | x | 36 | 420 | x | x | x |
| 8 | 156 | 960 | 438 | x | 37 | 156 | x | x | x |
| 9 | 224 | 2.830 | 1.360 | x | 38 | 378 | x | x | x |
| 10 | 796 | 2.216 | 604 | x | 39 | 334 | x | x | x |
| 11 | 190 | 130 | 442 | x | 40 | 894 | x | x | x |
| 12 | 4.246 | 4.032 | 110 | x | 41 | 662 | x | x | x |
| 13 | 166 | 5.154 | 52 | x | 42 | 106 | x | x | x |
| 14 | 188 | 1.178 | 1.426 | x | 43 | 1.372 | x | x | x |
| 15 | 70 | 208 | 622 | x | 44 | 102 | x | x | x |
| 16 | 270 | 5.818 | 442 | x | 45 | 84 | x | x | x |
| 17 | 98 | 596 | 876 | x | 46 | 128 | x | x | x |
| 18 | 1.770 | 162 | 604 | x | 47 | 2.662 | x | x | x |
| 19 | 314 | 4.990 | 1.424 | x | 48 | 3.220 | x | x | x |
| 20 | 886 | 110 | 2.008 | x | 49 | 1.114 | x | x | x |
| 21 | 112 | 538 | 734 | x | 50 | 124 | x | x | x |
| 22 | 112 | 166 | 8.556 | x | 51 | 436 | x | x | x |
| 23 | 352 | 240 | 8.218 | x | 52 | 332 | x | x | x |
| 24 | 274 | 68 | 216 | x | 53 | 392 | x | x | x |
| 25 | 168 | 258 | 1.000 | x | 54 | 78 | x | x | x |
| 26 | 632 | 114 | 1.912 | x | 55 | 54 | x | x | x |
| 27 | 178 | 3.382 | 2.670 | x | | | | | |
| 28 | 208 | x | 722 | x | | | | | |
| 29 | 294 | x | 3.960 | x | | | | | |

Tabla VIII.4.- Estado de la variable “longitud de tramo de recta (metros)” en las autovías analizadas.

VIII.5.- Estado de la variable “radio mínimo de tramo de curva” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).

| TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V | TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V |
|-------|-----|-------|------|-----|-------|-----|-------|------|-----|
| 1 | 566 | 561 | 757 | 772 | 30 | 315 | x | x | x |
| 2 | 764 | 511 | 810 | 690 | 31 | 401 | x | x | x |
| 3 | 473 | 779 | 672 | 667 | 32 | 492 | x | x | x |
| 4 | 335 | 663 | 794 | 747 | 33 | 422 | x | x | x |
| 5 | 429 | 457 | 776 | 701 | 34 | 685 | x | x | x |
| 6 | 575 | 454 | 620 | x | 35 | 441 | x | x | x |
| 7 | 437 | 503 | 624 | x | 36 | 506 | x | x | x |
| 8 | 595 | 481 | 568 | x | 37 | 313 | x | x | x |
| 9 | 375 | 710 | 910 | x | 38 | 521 | x | x | x |
| 10 | 368 | 863 | 763 | x | 39 | 437 | x | x | x |
| 11 | 380 | 542 | 663 | x | 40 | 673 | x | x | x |
| 12 | 678 | 500 | 573 | x | 41 | 645 | x | x | x |
| 13 | 423 | 424 | 464 | x | 42 | 636 | x | x | x |
| 14 | 526 | 436 | 595 | x | 43 | 593 | x | x | x |
| 15 | 281 | 659 | 598 | x | 44 | 393 | x | x | x |
| 16 | 359 | 463 | 749 | x | 45 | 450 | x | x | x |
| 17 | 328 | 811 | 581 | x | 46 | 728 | x | x | x |
| 18 | 514 | 794 | 552 | x | 47 | 611 | x | x | x |
| 19 | 353 | 729 | 453 | x | 48 | 209 | x | x | x |
| 20 | 595 | 602 | 678 | x | 49 | 521 | x | x | x |
| 21 | 436 | 755 | 611 | x | 50 | 481 | x | x | x |
| 22 | 502 | 575 | 406 | x | 51 | 621 | x | x | x |
| 23 | 778 | 625 | 537 | x | 52 | 649 | x | x | x |
| 24 | 515 | 544 | 562 | x | 53 | 531 | x | x | x |
| 25 | 583 | 647 | 627 | x | 54 | 337 | x | x | x |
| 26 | 713 | 654 | 746 | x | 55 | 242 | x | x | x |
| 27 | 314 | 585 | 574 | x | | | | | |
| 28 | 438 | x | 621 | x | | | | | |
| 29 | 252 | x | 532 | x | | | | | |

Tabla VIII.5.- Estado de la variable “radio mínimo de tramo de curva (metros)” en las autovías analizadas.

VIII.6.- Estado de la variable “peralte máximo de tramo de curva” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).

| TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V | TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V |
|-------|------|-------|------|-----|-------|------|-------|------|-----|
| 1 | 5,8 | 1,8 | 4,5 | 4 | 30 | 4,8 | x | x | x |
| 2 | 3,8 | 7,2 | 0 | 5,9 | 31 | 3,4 | x | x | x |
| 3 | 7,3 | 5,1 | 5,3 | 5,4 | 32 | 6,2 | x | x | x |
| 4 | 9,9 | 4,5 | 2,7 | 6,4 | 33 | 7,2 | x | x | x |
| 5 | 6,7 | 8,8 | 4 | 6 | 34 | 5,5 | x | x | x |
| 6 | 6 | 7 | 3,6 | x | 35 | 2,8 | x | x | x |
| 7 | 4,6 | 6,4 | 2,8 | x | 36 | 5,7 | x | x | x |
| 8 | 4,4 | 5,6 | 3,7 | x | 37 | 3,6 | x | x | x |
| 9 | 9,7 | 4,7 | 2,2 | x | 38 | 7,6 | x | x | x |
| 10 | 7,9 | 5,2 | 2,6 | x | 39 | 6,8 | x | x | x |
| 11 | 6,8 | 8,1 | 1,3 | x | 40 | 6 | x | x | x |
| 12 | 4,4 | 7,7 | 1,8 | x | 41 | 7,1 | x | x | x |
| 13 | 7,9 | 7,4 | 3,8 | x | 42 | 7,1 | x | x | x |
| 14 | 6,2 | 5,9 | 4,5 | x | 43 | 6,1 | x | x | x |
| 15 | 15,2 | 4,8 | 4,5 | x | 44 | 10,2 | x | x | x |
| 16 | 8,9 | 8,7 | 2,6 | x | 45 | 8,3 | x | x | x |
| 17 | 11,8 | 6,3 | 5,5 | x | 46 | 3,8 | x | x | x |
| 18 | 7,6 | 6,9 | 4,2 | x | 47 | 6,8 | x | x | x |
| 19 | 9,7 | 3,6 | 4,7 | x | 48 | 19,8 | x | x | x |
| 20 | 5,2 | 5,7 | 5,5 | x | 49 | 6,6 | x | x | x |
| 21 | 8,3 | 3,5 | 3,1 | x | 50 | 7,7 | x | x | x |
| 22 | 7,4 | 5,4 | 8,8 | x | 51 | 3,7 | x | x | x |
| 23 | 7,8 | 3,8 | 6,7 | x | 52 | 4,7 | x | x | x |
| 24 | 8,5 | 6,6 | 7,5 | x | 53 | 6,5 | x | x | x |
| 25 | 7,5 | 4,2 | 8,4 | x | 54 | 10,2 | x | x | x |
| 26 | 6,3 | 5 | 4,3 | x | 55 | 13,9 | x | x | x |
| 27 | 8,3 | 7,3 | 4,5 | x | | | | | |
| 28 | 2 | x | 4,2 | x | | | | | |
| 29 | 11,1 | x | 7,2 | x | | | | | |

Tabla VIII.6.- Estado de la variable “peralte máximo de tramo de curva (%)” en las autovías analizadas.

VIII.7.- Estado de la variable “rampa/pendiente promedio de tramo de recta precedente” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).

| TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V | TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V |
|-------|------|-------|------|------|-------|------|-------|------|-----|
| 1 | 0,3 | 1,1 | -0,8 | 0,4 | 30 | -2,6 | x | x | x |
| 2 | 1,8 | -0,2 | 2,8 | -0,1 | 31 | 1,5 | x | x | x |
| 3 | 0,5 | -1,1 | -1,1 | -0,3 | 32 | 2,7 | x | x | x |
| 4 | 0,6 | 0,4 | -0,1 | -0,4 | 33 | 0,7 | x | x | x |
| 5 | 4,4 | -1,2 | -2,1 | -0,8 | 34 | 2,6 | x | x | x |
| 6 | 3,3 | -0,2 | -6,3 | x | 35 | 4,4 | x | x | x |
| 7 | 3,3 | -0,7 | -2,7 | x | 36 | -0,7 | x | x | x |
| 8 | 5,5 | -2 | -0,3 | x | 37 | -0,3 | x | x | x |
| 9 | 3 | -0,8 | -0,4 | x | 38 | 3,8 | x | x | x |
| 10 | 4,2 | -0,7 | -0,4 | x | 39 | 0,4 | x | x | x |
| 11 | -0,6 | -4,3 | -0,3 | x | 40 | -6,3 | x | x | x |
| 12 | 0,2 | -0,8 | -0,3 | x | 41 | -4,6 | x | x | x |
| 13 | 1,8 | -0,4 | 0,5 | x | 42 | -5,6 | x | x | x |
| 14 | -7,2 | 0,9 | 0,1 | x | 43 | -3,1 | x | x | x |
| 15 | -6,7 | -4,7 | -1,5 | x | 44 | 0,6 | x | x | x |
| 16 | 4,1 | 0 | -0,8 | x | 45 | 3,3 | x | x | x |
| 17 | 3,5 | -2,2 | 0 | x | 46 | 1,9 | x | x | x |
| 18 | 2 | -4,4 | -0,1 | x | 47 | 4,1 | x | x | x |
| 19 | 6 | 0,2 | 1,8 | x | 48 | -0,3 | x | x | x |
| 20 | 0,1 | 2,3 | 3,4 | x | 49 | -1,4 | x | x | x |
| 21 | 3,2 | 2,4 | 0,8 | x | 50 | 3,4 | x | x | x |
| 22 | -0,9 | 3,3 | 1,2 | x | 51 | 5,6 | x | x | x |
| 23 | 0 | 4,3 | -0,2 | x | 52 | 6 | x | x | x |
| 24 | 3,4 | 2,1 | -2,1 | x | 53 | 5,7 | x | x | x |
| 25 | 4,8 | 1,8 | 0,7 | x | 54 | 5,6 | x | x | x |
| 26 | -7 | -0,7 | -0,7 | x | 55 | 0,9 | x | x | x |
| 27 | -3,2 | -2,1 | -1,4 | x | | | | | |
| 28 | -6,2 | x | -2,7 | x | | | | | |
| 29 | -4,2 | x | 0,7 | x | | | | | |

Tabla VIII.7.- Estado de la variable “rampa/pendiente promedio de tramo de recta precedente (%)” en las autovías analizadas.

VIII.8.- Estado de la variable “rampa/pendiente promedio de tramo de curva” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).

| TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V | TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V |
|-------|------|-------|------|------|-------|------|-------|------|-----|
| 1 | -1,0 | -1,5 | -1,6 | 0 | 30 | -4,2 | x | x | x |
| 2 | 0,7 | -0,3 | -2,3 | -0,6 | 31 | 1,2 | x | x | x |
| 3 | 1,7 | -0,7 | 3,3 | -0,2 | 32 | 2,2 | x | x | x |
| 4 | 2,4 | -0,1 | -1,6 | -1,4 | 33 | 1,8 | x | x | x |
| 5 | 4,5 | 0,4 | -3,3 | -1,3 | 34 | 3,1 | x | x | x |
| 6 | 0,9 | -1,6 | -3,1 | x | 35 | 1,3 | x | x | x |
| 7 | 5,9 | 0,2 | -0,9 | x | 36 | -1,6 | x | x | x |
| 8 | 2,7 | 0,8 | -1,6 | x | 37 | 3,7 | x | x | x |
| 9 | 5,2 | 0,1 | -0,6 | x | 38 | 5 | x | x | x |
| 10 | 3,5 | -4,3 | -0,1 | x | 39 | -6,4 | x | x | x |
| 11 | -2,5 | -1 | -0,3 | x | 40 | -3,1 | x | x | x |
| 12 | 1,6 | -2,3 | 0,2 | x | 41 | -5,6 | x | x | x |
| 13 | -2,1 | 1,4 | 0,6 | x | 42 | -2 | x | x | x |
| 14 | -7 | -1,1 | -0,2 | x | 43 | 0,3 | x | x | x |
| 15 | -2,1 | -3,1 | -2,2 | x | 44 | 2,6 | x | x | x |
| 16 | 3,7 | -0,8 | -0,7 | x | 45 | 2,3 | x | x | x |
| 17 | 3,5 | -4,3 | 0 | x | 46 | 1,7 | x | x | x |
| 18 | 5,4 | -3,6 | 3 | x | 47 | 2,7 | x | x | x |
| 19 | 3,6 | 2,1 | 1,6 | x | 48 | -1,1 | x | x | x |
| 20 | 2,5 | 2,2 | 1,1 | x | 49 | 1,8 | x | x | x |
| 21 | 2,7 | 3,5 | 0,4 | x | 50 | 5,1 | x | x | x |
| 22 | -1,3 | 3,6 | 4,1 | x | 51 | 5,1 | x | x | x |
| 23 | 2,8 | 2,5 | -2,3 | x | 52 | 5,3 | x | x | x |
| 24 | 4,6 | 1,3 | -0,9 | x | 53 | 5,8 | x | x | x |
| 25 | 0,8 | 0,8 | 1,7 | x | 54 | 2,9 | x | x | x |
| 26 | -2,1 | -1,8 | 0,3 | x | 55 | 3,7 | x | x | x |
| 27 | -6 | -1,9 | -4,1 | x | | | | | |
| 28 | -5,1 | x | -2,4 | x | | | | | |
| 29 | -2,2 | x | 4,2 | x | | | | | |

Tabla VIII.8.- Estado de la variable “rampa/pendiente promedio de tramo de curva (%)” en las autovías analizadas.

VIII.9.- Estado de la variable “rampa/pendiente máxima de tramo de curva” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).

| TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V | TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V |
|-------|------|-------|------|------|-------|------|-------|------|-----|
| 1 | -4,4 | -2,7 | -3 | -0,5 | 30 | -6 | x | x | x |
| 2 | 1,2 | -1,1 | -2,8 | -2,3 | 31 | 2,2 | x | x | x |
| 3 | 3,2 | -2,1 | 5,1 | -0,9 | 32 | 4,6 | x | x | x |
| 4 | 3 | -1,4 | -2,2 | -2,1 | 33 | 2,7 | x | x | x |
| 5 | 4,9 | 1,1 | -3,8 | -2,9 | 34 | 3,9 | x | x | x |
| 6 | 2,7 | -2,4 | -3,8 | x | 35 | 2,6 | x | x | x |
| 7 | 6,1 | -2,3 | -2 | x | 36 | -2,9 | x | x | x |
| 8 | 4,9 | 1 | -2 | x | 37 | 4,8 | x | x | x |
| 9 | 5,6 | 1 | -0,7 | x | 38 | 5,8 | x | x | x |
| 10 | 5 | -4,5 | -0,2 | x | 39 | -7 | x | x | x |
| 11 | -2,7 | -4 | -0,4 | x | 40 | -3,8 | x | x | x |
| 12 | 1,9 | -2,5 | 0,6 | x | 41 | -5,8 | x | x | x |
| 13 | -7,3 | 2,4 | 0,8 | x | 42 | -5,7 | x | x | x |
| 14 | -7,3 | -5,1 | -1,2 | x | 43 | 0,7 | x | x | x |
| 15 | -6,1 | -4,1 | -3,3 | x | 44 | 3,7 | x | x | x |
| 16 | 4,3 | -1,6 | -1 | x | 45 | 3,5 | x | x | x |
| 17 | 3,8 | -4,4 | -0,2 | x | 46 | 2,1 | x | x | x |
| 18 | 6,2 | -4,5 | 4,6 | x | 47 | 4,8 | x | x | x |
| 19 | 6,2 | 2,5 | 4,4 | x | 48 | -1,2 | x | x | x |
| 20 | 3,7 | 2,5 | 1,4 | x | 49 | 3,5 | x | x | x |
| 21 | 4,4 | 3,7 | 0,8 | x | 50 | 6,7 | x | x | x |
| 22 | -1,9 | 4,4 | 5,9 | x | 51 | 6 | x | x | x |
| 23 | 4,2 | 4 | -3,2 | x | 52 | 5,7 | x | x | x |
| 24 | 5 | 1,7 | -1,3 | x | 53 | 6,2 | x | x | x |
| 25 | -6,3 | 2,1 | 2,8 | x | 54 | 5,4 | x | x | x |
| 26 | -6,9 | -2,1 | 0,7 | x | 55 | 5,6 | x | x | x |
| 27 | -6,5 | -2,8 | -4,7 | x | | | | | |
| 28 | -6,9 | x | -2,8 | x | | | | | |
| 29 | -5 | x | 5,3 | x | | | | | |

Tabla VIII.9.- Estado de la variable “rampa/pendiente máxima de tramo de curva (%)” en las autovías analizadas.

VIII.10.- Estado de la variable “Inclinación de línea de máxima pendiente de tramo de curva” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).

| TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V | TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V |
|-------|------|-------|------|-----|-------|------|-------|------|-----|
| 1 | 7,0 | 3,3 | 4,5 | 4 | 30 | 6,5 | x | x | x |
| 2 | 3,9 | 7,2 | 3,1 | 5,9 | 31 | 3,4 | x | x | x |
| 3 | 7,9 | 5,1 | 5,5 | 5,4 | 32 | 6,8 | x | x | x |
| 4 | 10,8 | 4,5 | 2,9 | 6,4 | 33 | 7,3 | x | x | x |
| 5 | 8,1 | 8,8 | 5,1 | 6,3 | 34 | 6,3 | x | x | x |
| 6 | 6,6 | 7,3 | 4,7 | x | 35 | 3,4 | x | x | x |
| 7 | 7,6 | 6,4 | 2,9 | x | 36 | 6,3 | x | x | x |
| 8 | 5,5 | 5,6 | 3,9 | x | 37 | 5,5 | x | x | x |
| 9 | 11,1 | 4,7 | 2,2 | x | 38 | 9,4 | x | x | x |
| 10 | 9,1 | 6,7 | 2,6 | x | 39 | 9,2 | x | x | x |
| 11 | 7,1 | 8,1 | 3,1 | x | 40 | 6,6 | x | x | x |
| 12 | 4,7 | 8 | 3,6 | x | 41 | 9 | x | x | x |
| 13 | 7,9 | 7,7 | 3,9 | x | 42 | 8,7 | x | x | x |
| 14 | 11,3 | 6,4 | 4,6 | x | 43 | 6,1 | x | x | x |
| 15 | 15,4 | 6,2 | 4,9 | x | 44 | 10,8 | x | x | x |
| 16 | 9,6 | 8,7 | 2,6 | x | 45 | 8,5 | x | x | x |
| 17 | 12,3 | 7,5 | 5,5 | x | 46 | 4,3 | x | x | x |
| 18 | 9,6 | 8,2 | 4,9 | x | 47 | 7,9 | x | x | x |
| 19 | 11,4 | 4 | 4,9 | x | 48 | 19,8 | x | x | x |
| 20 | 5,6 | 6,3 | 5,7 | x | 49 | 7 | x | x | x |
| 21 | 9,4 | 4,9 | 3,1 | x | 50 | 8,8 | x | x | x |
| 22 | 7,6 | 6,2 | 9,3 | x | 51 | 6,2 | x | x | x |
| 23 | 8,6 | 6 | 7,3 | x | 52 | 7,1 | x | x | x |
| 24 | 9,9 | 6,8 | 7,5 | x | 53 | 8,7 | x | x | x |
| 25 | 8,8 | 4,5 | 8,6 | x | 54 | 10,7 | x | x | x |
| 26 | 8,1 | 5,3 | 4,3 | x | 55 | 14,8 | x | x | x |
| 27 | 10,3 | 7,5 | 5,8 | x | | | | | |
| 28 | 6,9 | x | 5 | x | | | | | |
| 29 | 11,2 | x | 8,8 | x | | | | | |

Tabla VIII.10.- Estado de la variable “Inclinación de línea de máxima pendiente de tramo de curva (%)” en las autovías analizadas.

VIII.11.- Estado de la variable “Velocidad máxima en curva de tramo de curva” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).

| TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V | TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V |
|-------|-----|-------|------|-----|-------|-----|-------|------|-----|
| 1 | 148 | 138 | 165 | 168 | 30 | 105 | x | x | x |
| 2 | 165 | 142 | 160 | 163 | 31 | 114 | x | x | x |
| 3 | 138 | 170 | 160 | 160 | 32 | 137 | x | x | x |
| 4 | 119 | 156 | 166 | 165 | 33 | 129 | x | x | x |
| 5 | 129 | 139 | 166 | 163 | 34 | 158 | x | x | x |
| 6 | 148 | 135 | 149 | x | 35 | 124 | x | x | x |
| 7 | 124 | 140 | 145 | x | 36 | 137 | x | x | x |
| 8 | 149 | 136 | 143 | x | 37 | 106 | x | x | x |
| 9 | 128 | 161 | 175 | x | 38 | 146 | x | x | x |
| 10 | 122 | 180 | 163 | x | 39 | 130 | x | x | x |
| 11 | 120 | 150 | 147 | x | 40 | 160 | x | x | x |
| 12 | 159 | 141 | 138 | x | 41 | 159 | x | x | x |
| 13 | 132 | 131 | 128 | x | 42 | 159 | x | x | x |
| 14 | 143 | 127 | 148 | x | 43 | 151 | x | x | x |
| 15 | 118 | 154 | 147 | x | 44 | 130 | x | x | x |
| 16 | 124 | 138 | 159 | x | 45 | 136 | x | x | x |
| 17 | 123 | 178 | 149 | x | 46 | 161 | x | x | x |
| 18 | 145 | 177 | 143 | x | 47 | 156 | x | x | x |
| 19 | 123 | 161 | 129 | x | 48 | 108 | x | x | x |
| 20 | 149 | 152 | 161 | x | 49 | 143 | x | x | x |
| 21 | 133 | 159 | 147 | x | 50 | 141 | x | x | x |
| 22 | 140 | 146 | 128 | x | 51 | 148 | x | x | x |
| 23 | 177 | 150 | 139 | x | 52 | 145 | x | x | x |
| 24 | 147 | 147 | 150 | x | 53 | 145 | x | x | x |
| 25 | 154 | 154 | 151 | x | 54 | 118 | x | x | x |
| 26 | 165 | 155 | 165 | x | 55 | 107 | x | x | x |
| 27 | 109 | 153 | 145 | x | | | | | |
| 28 | 119 | x | 150 | x | | | | | |
| 29 | 104 | x | 147 | x | | | | | |

Tabla VIII.11.- Estado de la variable “Velocidad máxima en curva de tramo de curva (km/h)” en las autovías analizadas.

VIII.12.- Estado de la variable “Velocidad de aproximación de tramo de curva” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).

| TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V | TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V |
|-------|-----|-------|------|-----|-------|-----|-------|------|-----|
| 1 | 152 | 104 | 143 | 167 | 30 | 188 | x | x | x |
| 2 | 105 | 97 | 156 | 133 | 31 | 108 | x | x | x |
| 3 | 107 | 121 | 157 | 121 | 32 | 88 | x | x | x |
| 4 | 102 | 125 | 130 | 128 | 33 | 100 | x | x | x |
| 5 | 76 | 151 | 137 | 135 | 34 | 93 | x | x | x |
| 6 | 82 | 132 | 210 | x | 35 | 77 | x | x | x |
| 7 | 65 | 138 | 210 | x | 36 | 115 | x | x | x |
| 8 | 65 | 149 | 184 | x | 37 | 124 | x | x | x |
| 9 | 79 | 137 | 147 | x | 38 | 87 | x | x | x |
| 10 | 75 | 148 | 141 | x | 39 | 103 | x | x | x |
| 11 | 98 | 160 | 137 | x | 40 | 192 | x | x | x |
| 12 | 107 | 154 | 136 | x | 41 | 204 | x | x | x |
| 13 | 103 | 118 | 133 | x | 42 | 210 | x | x | x |
| 14 | 148 | 101 | 123 | x | 43 | 194 | x | x | x |
| 15 | 179 | 149 | 140 | x | 44 | 170 | x | x | x |
| 16 | 135 | 123 | 146 | x | 45 | 127 | x | x | x |
| 17 | 89 | 153 | 134 | x | 46 | 100 | x | x | x |
| 18 | 89 | 167 | 129 | x | 47 | 69 | x | x | x |
| 19 | 62 | 96 | 95 | x | 48 | 124 | x | x | x |
| 20 | 110 | 95 | 108 | x | 49 | 146 | x | x | x |
| 21 | 97 | 89 | 111 | x | 50 | 124 | x | x | x |
| 22 | 99 | 83 | 65 | x | 51 | 72 | x | x | x |
| 23 | 119 | 75 | 128 | x | 52 | 63 | x | x | x |
| 24 | 90 | 81 | 144 | x | 53 | 64 | x | x | x |
| 25 | 71 | 92 | 119 | x | 54 | 64 | x | x | x |
| 26 | 181 | 105 | 135 | x | 55 | 90 | x | x | x |
| 27 | 176 | 166 | 165 | x | | | | | |
| 28 | 197 | x | 179 | x | | | | | |
| 29 | 203 | x | 81 | x | | | | | |

Tabla VIII.12.- Estado de la variable “Velocidad de aproximación de tramo de curva (km/h)” en las autovías analizadas.

VIII.13.- Estado de la variable “Factor de influencia de velocidad de tramo de curva” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).

| TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V | TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V |
|-------|------|-------|------|------|-------|------|-------|------|-----|
| 1 | 1,03 | 0,76 | 0,86 | 0,99 | 30 | 1,77 | x | x | x |
| 2 | 0,63 | 0,68 | 0,98 | 0,81 | 31 | 0,95 | x | x | x |
| 3 | 0,77 | 0,71 | 0,98 | 0,76 | 32 | 0,64 | x | x | x |
| 4 | 0,86 | 0,8 | 0,78 | 0,78 | 33 | 0,77 | x | x | x |
| 5 | 0,59 | 1,08 | 0,82 | 0,83 | 34 | 0,58 | x | x | x |
| 6 | 0,55 | 0,98 | 1,41 | x | 35 | 0,62 | x | x | x |
| 7 | 0,52 | 0,98 | 1,44 | x | 36 | 0,84 | x | x | x |
| 8 | 0,44 | 1,09 | 1,28 | x | 37 | 1,17 | x | x | x |
| 9 | 0,61 | 0,85 | 0,84 | x | 38 | 0,59 | x | x | x |
| 10 | 0,62 | 0,82 | 0,86 | x | 39 | 0,79 | x | x | x |
| 11 | 0,81 | 1,06 | 0,93 | x | 40 | 1,20 | x | x | x |
| 12 | 0,67 | 1,09 | 0,98 | x | 41 | 1,27 | x | x | x |
| 13 | 0,78 | 0,89 | 1,03 | x | 42 | 1,32 | x | x | x |
| 14 | 1,03 | 0,79 | 0,83 | x | 43 | 1,28 | x | x | x |
| 15 | 1,52 | 0,96 | 0,95 | x | 44 | 1,30 | x | x | x |
| 16 | 1,09 | 0,89 | 0,91 | x | 45 | 0,93 | x | x | x |
| 17 | 0,72 | 0,86 | 0,89 | x | 46 | 0,62 | x | x | x |
| 18 | 0,61 | 0,94 | 0,9 | x | 47 | 0,44 | x | x | x |
| 19 | 0,50 | 0,6 | 0,73 | x | 48 | 1,15 | x | x | x |
| 20 | 0,73 | 0,62 | 0,67 | x | 49 | 1,02 | x | x | x |
| 21 | 0,72 | 0,56 | 0,75 | x | 50 | 0,88 | x | x | x |
| 22 | 0,70 | 0,57 | 0,51 | x | 51 | 0,49 | x | x | x |
| 23 | 0,67 | 0,5 | 0,92 | x | 52 | 0,43 | x | x | x |
| 24 | 0,61 | 0,55 | 0,95 | x | 53 | 0,44 | x | x | x |
| 25 | 0,46 | 0,6 | 0,78 | x | 54 | 0,54 | x | x | x |
| 26 | 1,10 | 0,68 | 0,81 | x | 55 | 0,83 | x | x | x |
| 27 | 1,61 | 1,08 | 1,13 | x | | | | | |
| 28 | 1,64 | x | 1,19 | x | | | | | |
| 29 | 1,94 | x | 0,55 | x | | | | | |

Tabla VIII.13.- Estado de la variable “Factor de influencia de velocidad de tramo de curva” en las autovías analizadas.

VIII.14.- Estado de la variable “Factor de influencia de las curvas precedentes” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).

| TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V | TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V |
|-------|------|-------|------|------|-------|------|-------|------|-----|
| 1 | 1.15 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 30 | 0.76 | x | x | x |
| 2 | 1.19 | 1.03 | 1.07 | 1.00 | 31 | 0.90 | x | x | x |
| 3 | 0.94 | 1.20 | 1.00 | 1.00 | 32 | 1.14 | x | x | x |
| 4 | 0.82 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 33 | 1.06 | x | x | x |
| 5 | 0.90 | 0.85 | 1.03 | 1.00 | 34 | 1.35 | x | x | x |
| 6 | 1.06 | 0.91 | 1.00 | x | 35 | 0.92 | x | x | x |
| 7 | 0.89 | 1.02 | 0.90 | x | 36 | 1.04 | x | x | x |
| 8 | 1.08 | 0.98 | 0.91 | x | 37 | 0.79 | x | x | x |
| 9 | 0.95 | 1.17 | 0.92 | x | 38 | 1.11 | x | x | x |
| 10 | 0.90 | 1.12 | 1.14 | x | 39 | 0.97 | x | x | x |
| 11 | 0.90 | 0.88 | 1.04 | x | 40 | 1.20 | x | x | x |
| 12 | 1.31 | 0.94 | 0.95 | x | 41 | 1.19 | x | x | x |
| 13 | 0.95 | 0.93 | 0.90 | x | 42 | 1.14 | x | x | x |
| 14 | 1.05 | 0.97 | 0.85 | x | 43 | 0.99 | x | x | x |
| 15 | 0.81 | 1.18 | 1.00 | x | 44 | 0.82 | x | x | x |
| 16 | 0.90 | 0.89 | 0.98 | x | 45 | 0.89 | x | x | x |
| 17 | 0.91 | 1.29 | 1.07 | x | 46 | 1.10 | x | x | x |
| 18 | 1.14 | 1.12 | 1.03 | x | 47 | 1.08 | x | x | x |
| 19 | 0.97 | 0.91 | 0.95 | x | 48 | 0.69 | x | x | x |
| 20 | 1.16 | 0.95 | 0.86 | x | 49 | 1.08 | x | x | x |
| 21 | 0.98 | 1.01 | 1.14 | x | 50 | 1.04 | x | x | x |
| 22 | 1.04 | 0.93 | 1.02 | x | 51 | 1.13 | x | x | x |
| 23 | 1.27 | 0.97 | 0.87 | x | 52 | 1.08 | x | x | x |
| 24 | 1.02 | 0.96 | 1.10 | x | 53 | 1.06 | x | x | x |
| 25 | 1.06 | 1.01 | 1.08 | x | 54 | 0.86 | x | x | x |
| 26 | 1.10 | 1.01 | 1.04 | x | 55 | 0.79 | x | x | x |
| 27 | 0.72 | 1.00 | 1.12 | x | | | | | |
| 28 | 0.82 | x | 0.92 | x | | | | | |
| 29 | 0.72 | x | 0.96 | x | | | | | |

Tabla VIII.14.- Estado de la variable “Factor de influencia de las curvas precedentes” en las autovías analizadas.

VIII.15.- Estado de la variable “Factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).

| TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V | TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-----|
| 1 | 5.46 | 4.76 | 4.05 | 11.24 | 30 | 5.00 | x | x | x |
| 2 | 2.53 | 13.89 | 4.17 | 17.54 | 31 | 3.33 | x | x | x |
| 3 | 11.63 | 20.83 | 11.90 | 27.78 | 32 | 33.33 | x | x | x |
| 4 | 11.76 | 21.74 | 9.80 | 4.65 | 33 | 27.03 | x | x | x |
| 5 | 25.00 | 8.26 | 19.61 | 3.65 | 34 | 28.57 | x | x | x |
| 6 | 18.52 | 4.20 | 7.41 | x | 35 | 19.23 | x | x | x |
| 7 | 17.24 | 35.71 | 10.10 | x | 36 | 14.71 | x | x | x |
| 8 | 14.93 | 27.03 | 8.40 | x | 37 | 15.87 | x | x | x |
| 9 | 23.26 | 8.55 | 14.29 | x | 38 | 20.41 | x | x | x |
| 10 | 45.45 | 7.58 | 10.53 | x | 39 | 2.97 | x | x | x |
| 11 | 11.24 | 12.50 | 14.29 | x | 40 | 34.48 | x | x | x |
| 12 | 23.26 | 10.00 | 7.69 | x | 41 | 6.37 | x | x | x |
| 13 | 12.05 | 31.25 | 5.71 | x | 42 | 10.00 | x | x | x |
| 14 | 12.50 | 12.50 | 15.38 | x | 43 | 10.42 | x | x | x |
| 15 | 11.11 | 17.24 | 5.65 | x | 44 | 10.00 | x | x | x |
| 16 | 15.15 | 5.78 | 18.87 | x | 45 | 10.64 | x | x | x |
| 17 | 15.63 | 5.00 | 14.08 | x | 46 | 15.15 | x | x | x |
| 18 | 76.92 | 9.26 | 12.50 | x | 47 | 21.28 | x | x | x |
| 19 | 47.62 | 23.26 | 12.05 | x | 48 | 8.33 | x | x | x |
| 20 | 71.43 | 15.87 | 27.03 | x | 49 | 27.03 | x | x | x |
| 21 | 16.39 | 33.33 | 27.03 | x | 50 | 13.70 | x | x | x |
| 22 | 19.23 | 9.52 | 52.63 | x | 51 | 18.18 | x | x | x |
| 23 | 58.82 | 5.43 | 3.44 | x | 52 | 45.45 | x | x | x |
| 24 | 21.28 | 5.81 | 13.70 | x | 53 | 52.63 | x | x | x |
| 25 | 26.32 | 26.32 | 38.46 | x | 54 | 13.51 | x | x | x |
| 26 | 27.03 | 4.59 | 35.71 | x | 55 | 16.13 | x | x | x |
| 27 | 3.33 | 27.03 | 11.76 | x | | | | | |
| 28 | 5.00 | x | 21.28 | x | | | | | |
| 29 | 5.88 | x | 20.83 | x | | | | | |

Tabla VIII.15.- Estado de la variable “Factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (s)” en las autovías analizadas.

VIII.16.- Estado de la variable “Factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).

| TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V | TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V |
|-------|-----|-------|------|-----|-------|-----|-------|------|-----|
| 1 | 52 | 100 | 50 | 100 | 30 | 30 | x | x | x |
| 2 | 100 | 65 | 88 | 100 | 31 | 100 | x | x | x |
| 3 | 69 | 41 | 100 | 100 | 32 | 27 | x | x | x |
| 4 | 52 | 22 | 83 | 100 | 33 | 96 | x | x | x |
| 5 | 100 | 38 | 73 | 100 | 34 | 100 | x | x | x |
| 6 | 40 | 21 | 80 | x | 35 | 83 | x | x | x |
| 7 | 100 | 17 | 75 | x | 36 | 100 | x | x | x |
| 8 | 45 | 27 | 56 | x | 37 | 81 | x | x | x |
| 9 | 40 | 100 | 100 | x | 38 | 72 | x | x | x |
| 10 | 45 | 100 | 100 | x | 39 | 39 | x | x | x |
| 11 | 48 | 100 | 69 | x | 40 | 100 | x | x | x |
| 12 | 100 | 16 | 57 | x | 41 | 88 | x | x | x |
| 13 | 29 | 37 | 35 | x | 42 | 69 | x | x | x |
| 14 | 65 | 10 | 55 | x | 43 | 50 | x | x | x |
| 15 | 13 | 100 | 42 | x | 44 | 47 | x | x | x |
| 16 | 49 | 11 | 86 | x | 45 | 30 | x | x | x |
| 17 | 47 | 100 | 35 | x | 46 | 71 | x | x | x |
| 18 | 59 | 100 | 49 | x | 47 | 27 | x | x | x |
| 19 | 35 | 100 | 27 | x | 48 | 100 | x | x | x |
| 20 | 82 | 60 | 100 | x | 49 | 72 | x | x | x |
| 21 | 67 | 80 | 60 | x | 50 | 100 | x | x | x |
| 22 | 100 | 50 | 38 | x | 51 | 100 | x | x | x |
| 23 | 100 | 62 | 27 | x | 52 | 100 | x | x | x |
| 24 | 40 | 100 | 100 | x | 53 | 82 | x | x | x |
| 25 | 45 | 35 | 65 | x | 54 | 30 | x | x | x |
| 26 | 100 | 100 | 100 | x | 55 | 14 | x | x | x |
| 27 | 25 | 22 | 36 | x | | | | | |
| 28 | 100 | x | 39 | x | | | | | |
| 29 | 14 | x | 41 | x | | | | | |

Tabla VIII.16.- Estado de la variable “Factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (%)” en las autovías analizadas.

VIII.17.- Estado de la variable “Factor de influencia de la señalización de la curva” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).

| TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V | TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V |
|-------|-----|-------|------|-----|-------|-----|-------|------|-----|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30 | 0 | x | x | x |
| 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 31 | 1 | x | x | x |
| 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 32 | 0 | x | x | x |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 33 | 1 | x | x | x |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 34 | 0 | x | x | x |
| 6 | 0 | 1 | 0 | x | 35 | 0 | x | x | x |
| 7 | 1 | 0 | 0 | x | 36 | 0 | x | x | x |
| 8 | 0 | 0 | 1 | x | 37 | 0 | x | x | x |
| 9 | 0 | 0 | 0 | x | 38 | 0 | x | x | x |
| 10 | 1 | 0 | 0 | x | 39 | 0 | x | x | x |
| 11 | 0 | 0 | 1 | x | 40 | 0 | x | x | x |
| 12 | 1 | 0 | 0 | x | 41 | 0 | x | x | x |
| 13 | 0 | 1 | 0 | x | 42 | 0 | x | x | x |
| 14 | 0 | 0 | 0 | x | 43 | 0 | x | x | x |
| 15 | 0 | 0 | 1 | x | 44 | 0 | x | x | x |
| 16 | 0 | 0 | 0 | x | 45 | 0 | x | x | x |
| 17 | 0 | 0 | 0 | x | 46 | 0 | x | x | x |
| 18 | 0 | 0 | 1 | x | 47 | 0 | x | x | x |
| 19 | 0 | 0 | 1 | x | 48 | 0 | x | x | x |
| 20 | 0 | 0 | 0 | x | 49 | 0 | x | x | x |
| 21 | 0 | 0 | 0 | x | 50 | 0 | x | x | x |
| 22 | 0 | 0 | 0 | x | 51 | 0 | x | x | x |
| 23 | 0 | 0 | 0 | x | 52 | 0 | x | x | x |
| 24 | 0 | 0 | 0 | x | 53 | 0 | x | x | x |
| 25 | 0 | 0 | 0 | x | 54 | 0 | x | x | x |
| 26 | 0 | 0 | 0 | x | 55 | 0 | x | x | x |
| 27 | 1 | 0 | 0 | x | | | | | |
| 28 | 1 | x | 0 | x | | | | | |
| 29 | 0 | x | 0 | x | | | | | |

Tabla VIII.17.- Estado de la variable “Factor de influencia de la señalización de la curva” en las autovías analizadas.

VIII.18.- Estado de la variable “Factor de influencia de la configuración del ramal de acceso” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).

| TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V | TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V |
|-------|-----|-------|------|-----|-------|-----|-------|------|-----|
| 1 | 1 | 3 | 1 | 2 | 30 | 1 | x | x | x |
| 2 | 1 | 4 | 1 | 1 | 31 | 2 | x | x | x |
| 3 | 4 | 1 | 3 | 1 | 32 | 2 | x | x | x |
| 4 | 4 | 1 | 2 | 1 | 33 | 1 | x | x | x |
| 5 | 1 | 2 | 1 | 1 | 34 | 1 | x | x | x |
| 6 | 4 | 1 | 1 | x | 35 | 2 | x | x | x |
| 7 | 1 | 2 | 2 | x | 36 | 1 | x | x | x |
| 8 | 4 | 2 | 1 | x | 37 | 1 | x | x | x |
| 9 | 1 | 1 | 1 | x | 38 | 1 | x | x | x |
| 10 | 1 | 1 | 1 | x | 39 | 2 | x | x | x |
| 11 | 2 | 2 | 1 | x | 40 | 1 | x | x | x |
| 12 | 1 | 1 | 1 | x | 41 | 1 | x | x | x |
| 13 | 2 | 2 | 1 | x | 42 | 2 | x | x | x |
| 14 | 1 | 1 | 1 | x | 43 | 1 | x | x | x |
| 15 | 2 | 3 | 3 | x | 44 | 1 | x | x | x |
| 16 | 1 | 1 | 1 | x | 45 | 1 | x | x | x |
| 17 | 1 | 1 | 1 | x | 46 | 2 | x | x | x |
| 18 | 1 | 1 | 2 | x | 47 | 2 | x | x | x |
| 19 | 1 | 2 | 1 | x | 48 | 3 | x | x | x |
| 20 | 1 | 1 | 1 | x | 49 | 1 | x | x | x |
| 21 | 2 | 1 | 2 | x | 50 | 1 | x | x | x |
| 22 | 1 | 2 | 1 | x | 51 | 3 | x | x | x |
| 23 | 1 | 1 | 1 | x | 52 | 1 | x | x | x |
| 24 | 1 | 1 | 2 | x | 53 | 1 | x | x | x |
| 25 | 2 | 1 | 2 | x | 54 | 2 | x | x | x |
| 26 | 1 | 1 | 1 | x | 55 | 1 | x | x | x |
| 27 | 1 | 1 | 3 | x | | | | | |
| 28 | 1 | x | 1 | x | | | | | |
| 29 | 1 | x | 1 | x | | | | | |

Tabla VIII.18.- Estado de la variable “Factor de influencia de la configuración del ramal de acceso” en las autovías analizadas.

VIII.19.- Estado de la variable “Factor de influencia de la configuración del ramal de salida” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).

| TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V | TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V |
|-------|-----|-------|------|-----|-------|-----|-------|------|-----|
| 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 30 | 2 | x | x | x |
| 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 31 | 1 | x | x | x |
| 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 32 | 1 | x | x | x |
| 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 33 | 1 | x | x | x |
| 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 34 | 1 | x | x | x |
| 6 | 1 | 1 | 1 | x | 35 | 1 | x | x | x |
| 7 | 1 | 2 | 1 | x | 36 | 1 | x | x | x |
| 8 | 1 | 2 | 1 | x | 37 | 1 | x | x | x |
| 9 | 1 | 1 | 1 | x | 38 | 1 | x | x | x |
| 10 | 2 | 2 | 1 | x | 39 | 1 | x | x | x |
| 11 | 1 | 1 | 1 | x | 40 | 1 | x | x | x |
| 12 | 2 | 1 | 1 | x | 41 | 1 | x | x | x |
| 13 | 1 | 1 | 1 | x | 42 | 2 | x | x | x |
| 14 | 2 | 2 | 1 | x | 43 | 1 | x | x | x |
| 15 | 1 | 1 | 1 | x | 44 | 2 | x | x | x |
| 16 | 1 | 1 | 1 | x | 45 | 1 | x | x | x |
| 17 | 1 | 1 | 1 | x | 46 | 1 | x | x | x |
| 18 | 1 | 1 | 1 | x | 47 | 1 | x | x | x |
| 19 | 1 | 1 | 1 | x | 48 | 1 | x | x | x |
| 20 | 2 | 1 | 1 | x | 49 | 2 | x | x | x |
| 21 | 1 | 1 | 3 | x | 50 | 1 | x | x | x |
| 22 | 1 | 2 | 1 | x | 51 | 1 | x | x | x |
| 23 | 1 | 1 | 3 | x | 52 | 1 | x | x | x |
| 24 | 3 | 1 | 1 | x | 53 | 2 | x | x | x |
| 25 | 1 | 1 | 1 | x | 54 | 1 | x | x | x |
| 26 | 1 | 2 | 1 | x | 55 | 1 | x | x | x |
| 27 | 1 | 2 | 1 | x | | | | | |
| 28 | 1 | x | 1 | x | | | | | |
| 29 | 1 | x | 1 | x | | | | | |

Tabla VIII.19.- Estado de la variable “Factor de influencia de la configuración del ramal de salida” en las autovías analizadas.

VIII.20.- Estado de la variable “Factor de influencia de la velocidad en el ramal de acceso” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).

| TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V | TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V |
|-------|-----|-------|------|-----|-------|-----|-------|------|-----|
| 1 | 0 | 119 | 0 | 167 | 30 | 0 | x | x | x |
| 2 | 0 | 105 | 0 | 0 | 31 | 108 | x | x | x |
| 3 | 99 | 0 | 154 | 0 | 32 | 99 | x | x | x |
| 4 | 99 | 0 | 130 | 0 | 33 | 0 | x | x | x |
| 5 | 0 | 144 | 0 | 0 | 34 | 0 | x | x | x |
| 6 | 91 | 0 | 0 | x | 35 | 90 | x | x | x |
| 7 | 0 | 125 | 203 | x | 36 | 0 | x | x | x |
| 8 | 80 | 134 | 0 | x | 37 | 0 | x | x | x |
| 9 | 0 | 0 | 0 | x | 38 | 0 | x | x | x |
| 10 | 0 | 0 | 0 | x | 39 | 114 | x | x | x |
| 11 | 99 | 161 | 0 | x | 40 | 0 | x | x | x |
| 12 | 0 | 0 | 0 | x | 41 | 0 | x | x | x |
| 13 | 100 | 112 | 0 | x | 42 | 185 | x | x | x |
| 14 | 0 | 0 | 0 | x | 43 | 0 | x | x | x |
| 15 | 194 | 149 | 143 | x | 44 | 0 | x | x | x |
| 16 | 0 | 0 | 0 | x | 45 | 0 | x | x | x |
| 17 | 0 | 0 | 0 | x | 46 | 99 | x | x | x |
| 18 | 0 | 0 | 107 | x | 47 | 75 | x | x | x |
| 19 | 0 | 96 | 0 | x | 48 | 125 | x | x | x |
| 20 | 0 | 0 | 0 | x | 49 | 0 | x | x | x |
| 21 | 97 | 0 | 107 | x | 50 | 0 | x | x | x |
| 22 | 0 | 79 | 0 | x | 51 | 71 | x | x | x |
| 23 | 0 | 0 | 0 | x | 52 | 0 | x | x | x |
| 24 | 0 | 0 | 144 | x | 53 | 0 | x | x | x |
| 25 | 94 | 0 | 116 | x | 54 | 64 | x | x | x |
| 26 | 0 | 0 | 0 | x | 55 | 0 | x | x | x |
| 27 | 0 | 0 | 165 | x | | | | | |
| 28 | 0 | x | 0 | x | | | | | |
| 29 | 0 | x | 0 | x | | | | | |

Tabla VIII.20.- Estado de la variable “Factor de influencia de la velocidad en el ramal de acceso (km/h)” en las autovías analizadas.

VIII.21.- Estado de la variable “Factor de influencia de la velocidad en el ramal de salida” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).

| TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V | TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V |
|-------|-----|-------|------|-----|-------|-----|-------|------|-----|
| 1 | 0 | 0 | 143 | 0 | 30 | 188 | x | x | x |
| 2 | 0 | 105 | 0 | 0 | 31 | 0 | x | x | x |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 32 | 0 | x | x | x |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 33 | 0 | x | x | x |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 34 | 0 | x | x | x |
| 6 | 0 | 0 | 0 | x | 35 | 0 | x | x | x |
| 7 | 0 | 136 | 0 | x | 36 | 0 | x | x | x |
| 8 | 0 | 150 | 0 | x | 37 | 0 | x | x | x |
| 9 | 0 | 0 | 0 | x | 38 | 0 | x | x | x |
| 10 | 73 | 149 | 0 | x | 39 | 0 | x | x | x |
| 11 | 0 | 0 | 0 | x | 40 | 0 | x | x | x |
| 12 | 107 | 0 | 0 | x | 41 | 0 | x | x | x |
| 13 | 0 | 0 | 0 | x | 42 | 210 | x | x | x |
| 14 | 166 | 94 | 0 | x | 43 | 0 | x | x | x |
| 15 | 0 | 0 | 0 | x | 44 | 167 | x | x | x |
| 16 | 0 | 0 | 0 | x | 45 | 0 | x | x | x |
| 17 | 0 | 0 | 0 | x | 46 | 0 | x | x | x |
| 18 | 0 | 0 | 0 | x | 47 | 0 | x | x | x |
| 19 | 0 | 0 | 0 | x | 48 | 0 | x | x | x |
| 20 | 111 | 0 | 0 | x | 49 | 133 | x | x | x |
| 21 | 0 | 0 | 107 | x | 50 | 0 | x | x | x |
| 22 | 0 | 83 | 0 | x | 51 | 0 | x | x | x |
| 23 | 0 | 0 | 135 | x | 52 | 0 | x | x | x |
| 24 | 74 | 0 | 0 | x | 53 | 63 | x | x | x |
| 25 | 0 | 0 | 0 | x | 54 | 0 | x | x | x |
| 26 | 0 | 105 | 0 | x | 55 | 0 | x | x | x |
| 27 | 0 | 164 | 0 | x | | | | | |
| 28 | 0 | x | 0 | x | | | | | |
| 29 | 0 | x | 0 | x | | | | | |

Tabla VIII.21.- Estado de la variable “Factor de influencia de la velocidad en el ramal de salida (km/h)” en las autovías analizadas.

VIII.22.- Estado de la variable “Factor de influencia de la visibilidad en el ramal de acceso” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).

| TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V | TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-----|
| 1 | 0,00 | 16,67 | 0,00 | 10,87 | 30 | 0,00 | x | x | x |
| 2 | 0,00 | 11,36 | 0,00 | 0,00 | 31 | 4,69 | x | x | x |
| 3 | 12,66 | 0,00 | 9,17 | 0,00 | 32 | 33,33 | x | x | x |
| 4 | 12,99 | 0,00 | 6,13 | 0,00 | 33 | 0,00 | x | x | x |
| 5 | 0,00 | 21,28 | 0,00 | 0,00 | 34 | 0,00 | x | x | x |
| 6 | 10,99 | 0,00 | 0,00 | x | 35 | 35,71 | x | x | x |
| 7 | 0,00 | 6,25 | 3,89 | x | 36 | 0,00 | x | x | x |
| 8 | 10,75 | 12,82 | 0,00 | x | 37 | 0,00 | x | x | x |
| 9 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | x | 38 | 0,00 | x | x | x |
| 10 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | x | 39 | 28,57 | x | x | x |
| 11 | 12,05 | 12,50 | 0,00 | x | 40 | 0,00 | x | x | x |
| 12 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | x | 41 | 0,00 | x | x | x |
| 13 | 11,63 | 20,41 | 0,00 | x | 42 | 11,49 | x | x | x |
| 14 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | x | 43 | 0,00 | x | x | x |
| 15 | 10,75 | 16,95 | 8,40 | x | 44 | 0,00 | x | x | x |
| 16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | x | 45 | 0,00 | x | x | x |
| 17 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | x | 46 | 27,78 | x | x | x |
| 18 | 0,00 | 0,00 | 14,08 | x | 47 | 40,00 | x | x | x |
| 19 | 0,00 | 12,35 | 0,00 | x | 48 | 10,53 | x | x | x |
| 20 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | x | 49 | 0,00 | x | x | x |
| 21 | 17,86 | 0,00 | 32,26 | x | 50 | 0,00 | x | x | x |
| 22 | 0,00 | 14,29 | 0,00 | x | 51 | 20,41 | x | x | x |
| 23 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | x | 52 | 0,00 | x | x | x |
| 24 | 0,00 | 0,00 | 12,35 | x | 53 | 0,00 | x | x | x |
| 25 | 55,56 | 0,00 | 8,40 | x | 54 | 15,15 | x | x | x |
| 26 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | x | 55 | 0,00 | x | x | x |
| 27 | 0,00 | 0,00 | 11,49 | x | | | | | |
| 28 | 0,00 | x | 0,00 | x | | | | | |
| 29 | 0,00 | x | 0,00 | x | | | | | |

Tabla VIII.22.- Estado de la variable “Factor de influencia de la visibilidad en el ramal de acceso (s)” en las autovías analizadas.

VIII.23.- Estado de la variable “Factor de influencia de la visibilidad en el ramal de salida” en las autovías analizadas (N-I, N-401, N-IV Y N-V).

| TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V | TRAMO | N-I | N-401 | N-IV | N-V |
|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|-----|
| 1 | 0,00 | 0,00 | 12,82 | 0,00 | 30 | 6,41 | x | x | x |
| 2 | 0,00 | 8,70 | 0,00 | 0,00 | 31 | 0,00 | x | x | x |
| 3 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 32 | 0,00 | x | x | x |
| 4 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 33 | 0,00 | x | x | x |
| 5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 34 | 0,00 | x | x | x |
| 6 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | x | 35 | 0,00 | x | x | x |
| 7 | 0,00 | 7,19 | 0,00 | x | 36 | 0,00 | x | x | x |
| 8 | 0,00 | 26,32 | 0,00 | x | 37 | 0,00 | x | x | x |
| 9 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | x | 38 | 0,00 | x | x | x |
| 10 | 14,29 | 8,26 | 0,00 | x | 39 | 0,00 | x | x | x |
| 11 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | x | 40 | 0,00 | x | x | x |
| 12 | 23,81 | 0,00 | 0,00 | x | 41 | 0,00 | x | x | x |
| 13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | x | 42 | 10,87 | x | x | x |
| 14 | 7,14 | 10,10 | 0,00 | x | 43 | 0,00 | x | x | x |
| 15 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | x | 44 | 11,11 | x | x | x |
| 16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | x | 45 | 0,00 | x | x | x |
| 17 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | x | 46 | 0,00 | x | x | x |
| 18 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | x | 47 | 0,00 | x | x | x |
| 19 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | x | 48 | 0,00 | x | x | x |
| 20 | 66,67 | 0,00 | 0,00 | x | 49 | 7,69 | x | x | x |
| 21 | 0,00 | 0,00 | 32,26 | x | 50 | 0,00 | x | x | x |
| 22 | 0,00 | 6,80 | 0,00 | x | 51 | 0,00 | x | x | x |
| 23 | 0,00 | 0,00 | 11,36 | x | 52 | 0,00 | x | x | x |
| 24 | 17,24 | 0,00 | 0,00 | x | 53 | 18,18 | x | x | x |
| 25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | x | 54 | 0,00 | x | x | x |
| 26 | 0,00 | 2,56 | 0,00 | x | 55 | 0,00 | x | x | x |
| 27 | 0,00 | 19,23 | 0,00 | x | | | | | |
| 28 | 0,00 | x | 0,00 | x | | | | | |
| 29 | 0,00 | x | 0,00 | x | | | | | |

Tabla VIII.23.- Estado de la variable “Factor de influencia de la visibilidad en el ramal de salida (s)” en las autovías analizadas.

***ANEXO IX.- APLICACIÓN DEL MODELO DE PREDICCIÓN.
VALORES MEDIDOS DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS***

ANEXO IX.- APLICACIÓN DEL MODELO DE PREDICCIÓN. VALORES MEDIDOS DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS.

IX.1.- Estado de la variable “longitud de tramo de curva”.

| TRAMO | N-I | TRAMO | N-I |
|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 284 | 11 | 432 |
| 2 | 398 | 12 | 1.052 |
| 3 | 264 | 13 | 312 |
| 4 | 264 | 14 | 210 |
| 5 | 244 | 15 | 954 |
| 6 | 202 | 16 | 228 |
| 7 | 160 | 17 | 260 |
| 8 | 1.156 | 18 | 276 |
| 9 | 794 | 19 | 238 |
| 10 | 386 | | |

Tabla IX.1.- Estado de la variable “longitud de tramo de curva (metros)”.

IX.2.- Estado de la variable “longitud de tramo de recta”.

| TRAMO | N-I | TRAMO | N-I |
|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 104 | 11 | 1.222 |
| 2 | 558 | 12 | 110 |
| 3 | 174 | 13 | 466 |
| 4 | 366 | 14 | 2.784 |
| 5 | 416 | 15 | 1.272 |
| 6 | 1.198 | 16 | 2.684 |
| 7 | 1.350 | 17 | 184 |
| 8 | 332 | 18 | 1.354 |
| 9 | 92 | 19 | 2.326 |
| 10 | 4.670 | | |

Tabla IX.2.- Estado de la variable “longitud de tramo de recta (metros)”.

IX.3.- Estado de la variable “radio mínimo de tramo de curva”.

| TRAMO | N-I | TRAMO | N-I |
|-------|-----|-------|-----|
| 1 | 398 | 11 | 400 |
| 2 | 693 | 12 | 492 |
| 3 | 888 | 13 | 704 |
| 4 | 722 | 14 | 324 |
| 5 | 745 | 15 | 595 |
| 6 | 935 | 16 | 571 |
| 7 | 977 | 17 | 557 |
| 8 | 484 | 18 | 772 |
| 9 | 392 | 19 | 535 |
| 10 | 602 | | |

Tabla IX.3.- Estado de la variable “radio mínimo de tramo de curva (metros)”.

IX.4.- Estado de la variable “peralte máximo de tramo de curva”.

| TRAMO | N-I | TRAMO | N-I |
|-------|-----|-------|------|
| 1 | 7,5 | 11 | 8,1 |
| 2 | 5,5 | 12 | 9,3 |
| 3 | 7 | 13 | 3,7 |
| 4 | 7,1 | 14 | 13,1 |
| 5 | 8 | 15 | 7 |
| 6 | 3,8 | 16 | 4,8 |
| 7 | 3,5 | 17 | 5 |
| 8 | 7,4 | 18 | 6 |
| 9 | 10 | 19 | 5,8 |
| 10 | 5,8 | | |

Tabla IX.4.- Estado de la variable “peralte máximo de tramo de curva (%)”.

IX.5.- Estado de la variable “rampa/pendiente promedio de tramo de recta precedente”.

| TRAMO | N-I | TRAMO | N-I |
|-------|------|-------|------|
| 1 | -4,5 | 11 | 0,9 |
| 2 | -5,9 | 12 | 5 |
| 3 | -2,5 | 13 | -1,8 |
| 4 | -3,6 | 14 | -2,3 |
| 5 | -2,2 | 15 | -3,7 |
| 6 | -2,3 | 16 | 1,2 |
| 7 | -3,3 | 17 | 4 |
| 8 | -2,4 | 18 | 1,5 |
| 9 | 3,1 | 19 | 1,4 |
| 10 | -1,4 | | |

Tabla IX.5.- Estado de la variable “rampa/pendiente promedio de tramo de recta precedente (%)”.

IX.6.- Estado de la variable “rampa/pendiente promedio de tramo de curva”.

| TRAMO | N-I | TRAMO | N-I |
|-------|------|-------|------|
| 1 | -5,8 | 11 | 5 |
| 2 | -3,9 | 12 | 1,2 |
| 3 | -3,2 | 13 | -2,7 |
| 4 | -2,8 | 14 | -3 |
| 5 | -2,1 | 15 | -0,3 |
| 6 | -4,1 | 16 | 5,2 |
| 7 | -3 | 17 | -1,9 |
| 8 | 4,2 | 18 | 5,7 |
| 9 | -1,8 | 19 | 4,7 |
| 10 | -3 | | |

Tabla IX.6.- Estado de la variable “rampa/pendiente promedio de tramo de curva (%)”.

IX.7.- Estado de la variable “rampa/pendiente máxima de tramo de curva”.

| TRAMO | N-I | TRAMO | N-I |
|-------|-----|-------|-----|
| 1 | -7 | 11 | 5 |
| 2 | -5 | 12 | 5 |
| 3 | -4 | 13 | -3 |
| 4 | -3 | 14 | -3 |
| 5 | -3 | 15 | -4 |
| 6 | -5 | 16 | 6 |
| 7 | -3 | 17 | -3 |
| 8 | 5 | 18 | 6 |
| 9 | -6 | 19 | 5 |
| 10 | -3 | | |

Tabla IX.7.- Estado de la variable “rampa/pendiente máxima de tramo de curva (%)”.

IX.8.- Estado de la variable “inclinación de línea de máxima pendiente de tramo de curva”.

| TRAMO | N-I | TRAMO | N-I |
|-------|------|-------|------|
| 1 | 10,3 | 11 | 9,5 |
| 2 | 7,4 | 12 | 10,6 |
| 3 | 8,1 | 13 | 4,8 |
| 4 | 7,7 | 14 | 13,4 |
| 5 | 8,5 | 15 | 8,1 |
| 6 | 6,3 | 16 | 7,7 |
| 7 | 4,6 | 17 | 5,8 |
| 8 | 8,9 | 18 | 8,5 |
| 9 | 11,7 | 19 | 7,7 |
| 10 | 6,5 | | |

Tabla IX.8.- Estado de la variable “inclinación de línea de máxima pendiente de tramo de curva (%)”.

IX.9.- Estado de la variable “velocidad máxima en curva en tramo de curva”.

| TRAMO | N-I | TRAMO | N-I |
|-------|-----|-------|-----|
| 1 | 126 | 11 | 128 |
| 2 | 156 | 12 | 142 |
| 3 | 186 | 13 | 154 |
| 4 | 171 | 14 | 122 |
| 5 | 174 | 15 | 153 |
| 6 | 184 | 16 | 144 |
| 7 | 188 | 17 | 144 |
| 8 | 140 | 18 | 173 |
| 9 | 131 | 19 | 141 |
| 10 | 149 | | |

Tabla IX.9.- Estado de la variable “velocidad máxima en curva en tramo de curva (km/h)”.

IX.10.- Estado de la variable “velocidad de aproximación”.

| TRAMO | N-I | TRAMO | N-I |
|-------|-----|-------|-----|
| 1 | 189 | 11 | 78 |
| 2 | 209 | 12 | 115 |
| 3 | 204 | 13 | 141 |
| 4 | 202 | 14 | 175 |
| 5 | 193 | 15 | 160 |
| 6 | 187 | 16 | 81 |
| 7 | 190 | 17 | 100 |
| 8 | 84 | 18 | 69 |
| 9 | 133 | 19 | 75 |
| 10 | 160 | | |

Tabla IX.10.- Estado de la variable “velocidad de aproximación (km/h)”.

IX.11.- Estado de la variable “factor de influencia de la velocidad en la curva”.

| TRAMO | N-I | TRAMO | N-I |
|-------|------|-------|------|
| 1 | 1,51 | 11 | 0,61 |
| 2 | 1,34 | 12 | 0,81 |
| 3 | 1,10 | 13 | 0,92 |
| 4 | 1,18 | 14 | 1,43 |
| 5 | 1,11 | 15 | 1,05 |
| 6 | 1,02 | 16 | 0,57 |
| 7 | 1,01 | 17 | 0,69 |
| 8 | 0,60 | 18 | 0,40 |
| 9 | 1,02 | 19 | 0,53 |
| 10 | 1,07 | | |

Tabla IX.11.- Estado de la variable “factor de influencia de la velocidad en la curva”.

IX.12.- Estado de la variable “factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva”.

| TRAMO | N-I | TRAMO | N-I |
|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 2,51 | 11 | 22,84 |
| 2 | 6,15 | 12 | 11,58 |
| 3 | 4,51 | 13 | 10,56 |
| 4 | 8,57 | 14 | 9,01 |
| 5 | 4,51 | 15 | 6,00 |
| 6 | 10,60 | 16 | 61,26 |
| 7 | 10,25 | 17 | 2,50 |
| 8 | 22,43 | 18 | 74,84 |
| 9 | 2,22 | 19 | 11,81 |
| 10 | 9,42 | | |

Tabla IX.12.- Estado de la variable “factor de influencia de la visibilidad del punto de inicio de la curva (s)”.

IX.13.- Estado de la variable “factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva”.

| TRAMO | N-I | TRAMO | N-I |
|-------|-----|-------|-----|
| 1 | 45 | 11 | 68 |
| 2 | 100 | 12 | 27 |
| 3 | 100 | 13 | 40 |
| 4 | 95 | 14 | 100 |
| 5 | 100 | 15 | 35 |
| 6 | 100 | 16 | 100 |
| 7 | 100 | 17 | 60 |
| 8 | 25 | 18 | 100 |
| 9 | 25 | 19 | 100 |
| 10 | 64 | | |

Tabla IX.13.- Estado de la variable “factor de influencia de la visibilidad del trazado de la curva (%)”.

IX.14.- Estado de la variable X_1 .

| TRAMO | N-I | TRAMO | N-I |
|-------|------|-------|------|
| 1 | 1,39 | 11 | 2,55 |
| 2 | 2,31 | 12 | 7,22 |
| 3 | 1,27 | 13 | 1,64 |
| 4 | 1,32 | 14 | 0,86 |
| 5 | 1,84 | 15 | 6,56 |
| 6 | 0,80 | 16 | 0,99 |
| 7 | 0,49 | 17 | 1,24 |
| 8 | 8,09 | 18 | 1,41 |
| 9 | 5,32 | 19 | 1,07 |
| 10 | 2,20 | | |

Tabla IX.14.-Estado de la variable X_1 .

IX.15.- Estado de la variable X_2 .

| TRAMO | N-I | TRAMO | N-I |
|-------|------|-------|------|
| 1 | 0,00 | 11 | 0,00 |
| 2 | 0,00 | 12 | 0,00 |
| 3 | 0,00 | 13 | 0,00 |
| 4 | 0,28 | 14 | 0,00 |
| 5 | 0,25 | 15 | 0,00 |
| 6 | 0,00 | 16 | 0,00 |
| 7 | 0,00 | 17 | 0,00 |
| 8 | 0,00 | 18 | 0,00 |
| 9 | 0,00 | 19 | 0,00 |
| 10 | 0,00 | | |

*Tabla IX.15.-Estado de la variable X_2 .***IX.16.- Estado de la variable X_3 .**

| TRAMO | N-I | TRAMO | N-I |
|-------|-----|-------|-----|
| 1 | 0 | 11 | 0 |
| 2 | 0 | 12 | 0 |
| 3 | 0 | 13 | 0 |
| 4 | 0 | 14 | 0 |
| 5 | 0 | 15 | 0 |
| 6 | 0 | 16 | 0 |
| 7 | 0 | 17 | 0 |
| 8 | 1 | 18 | 0 |
| 9 | 0 | 19 | 0 |
| 10 | 0 | | |

Tabla IX.16.-Estado de la variable X_3 .

IX.17.- Estado de la variable X_4 .

| TRAMO | N-I | TRAMO | N-I |
|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 0,398 | 11 | 0,044 |
| 2 | 0,163 | 12 | 0,086 |
| 3 | 0,222 | 13 | 0,095 |
| 4 | 0,117 | 14 | 0,111 |
| 5 | 0,222 | 15 | 0,167 |
| 6 | 0,094 | 16 | 0,016 |
| 7 | 0,098 | 17 | 0,400 |
| 8 | 0,045 | 18 | 0,013 |
| 9 | 0,450 | 19 | 0,085 |
| 10 | 0,106 | | |

*Tabla IX.17.-Estado de la variable X_4 .***IX.18.- Estado de la variable X_5 .**

| TRAMO | N-I | TRAMO | N-I |
|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 82,89 | 11 | 19,39 |
| 2 | 0,00 | 12 | 59,33 |
| 3 | 0,00 | 13 | 55,29 |
| 4 | 5,90 | 14 | 0,00 |
| 5 | 0,00 | 15 | 68,38 |
| 6 | 0,00 | 16 | 0,00 |
| 7 | 0,00 | 17 | 27,79 |
| 8 | 44,96 | 18 | 0,00 |
| 9 | 76,29 | 19 | 0,00 |
| 10 | 37,96 | | |

Tabla IX.18.-Estado de la variable X_5 .