



# X ED ICIÓN 202<sup>3</sup><sub>4</sub>

Trabajo finalista - Texto completo

**Señalización inteligente basada en modelos  
espaciotemporales para reducir el número de  
accidentes de tráfico con fauna**

**Autores**

**Jesús Félix Puerta**

**JUNTA DE CASTILLA Y LEÓN / UNIVERSIDAD DE SALAMANCA**

**ESPAÑA**

## Contenido

Resumen .....	2
1. INTRODUCCIÓN .....	2
1.1. Los accidentes de tráfico con fauna, un problema mundial.....	2
1.3. Los accidentes de tráfico con fauna como función del espacio y del tiempo.	3
1.4. Soluciones de mitigación propuestas hasta la fecha .....	4
2. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	6
3. ANÁLISIS DE TRAMOS DE ESPECIAL CONCENTRACIÓN DE ACCIDENTES	8
3.1. Ámbito de la aplicación y origen de los datos.....	8
3.2. Identificación de tramos de especial concentración de accidentes con fauna. .....	9
3.3. Caracterización y selección de candidatos a tramos piloto .....	11
4. MODELOS PREDICTIVOS Y UMBRALES DE RIESGO .....	15
4.1. Modelización temporal de los accidentes en cada TEC .....	15
4.2. Umbrales de riesgo .....	17
5. PROTOTIPO DE SEÑALIZACIÓN VARIABLE .....	17
5.1. Paneles instalados en los tramos piloto.....	17
5.2. Comunicación de los modelos con la señal.....	19
6. EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DEL PROTOTIPO.....	20
6.1. Metodología seguida para cuantificar la efectividad de la señal .....	20
6.2. Resultados obtenidos tras un año de funcionamiento.....	20
7. MATERIALES PARA LA COMUNICACIÓN HACIA LA CIUDADANÍA .....	21
8. REFLEXIONES FINALES .....	21

## Resumen

Se presenta un nuevo prototipo de señalización inteligente para minimizar los accidentes de tráfico con fauna que ha sido ya instalado con éxito en varios tramos de carretera con notable siniestralidad. Esta nueva generación de señalizaciones verticales se apoya en las nuevas tecnologías para informar en tiempo real sobre la probabilidad de irrupción de un animal en la calzada. Para ello, hace buen uso de todo el conocimiento científico generado en esta materia y se basa en el desarrollo de modelos espaciotemporales que cuantifican el efecto que en la ocurrencia de accidentes con fauna tienen los patrones estacionales y diarios, las fases lunares, las condiciones meteorológicas o la actividad cinegética. Una aplicación instalada en un servidor emplea estos modelos para calcular la probabilidad de accidente para cada tramo en cada momento y, en función de los umbrales de riesgo establecidos, envía una señal a los paneles LED que mantienen informados a los usuarios de la vía. Hay tres posibles niveles de alerta: apagado, naranja-riesgo alto, rojo-riesgo muy alto. Al concentrar los avisos solo en ciertos momentos, disminuye la habituación por parte de los conductores, que es la que minimiza la eficacia de las señales convencionales. Después de un año en funcionamiento, en los tramos señalizados los accidentes se han reducido en un 22% respecto a lo esperado, y no ha habido que lamentar daños personales. Estos resultados están siendo analizados actualmente, con objeto de valorar la efectividad de la medida en un proceso de mejora continua. Este prototipo de señalización inteligente puede considerarse una innovación a nivel mundial y un ejemplo de cooperación entre distintos entes implicados en la materia.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Los accidentes de tráfico con fauna, un problema mundial

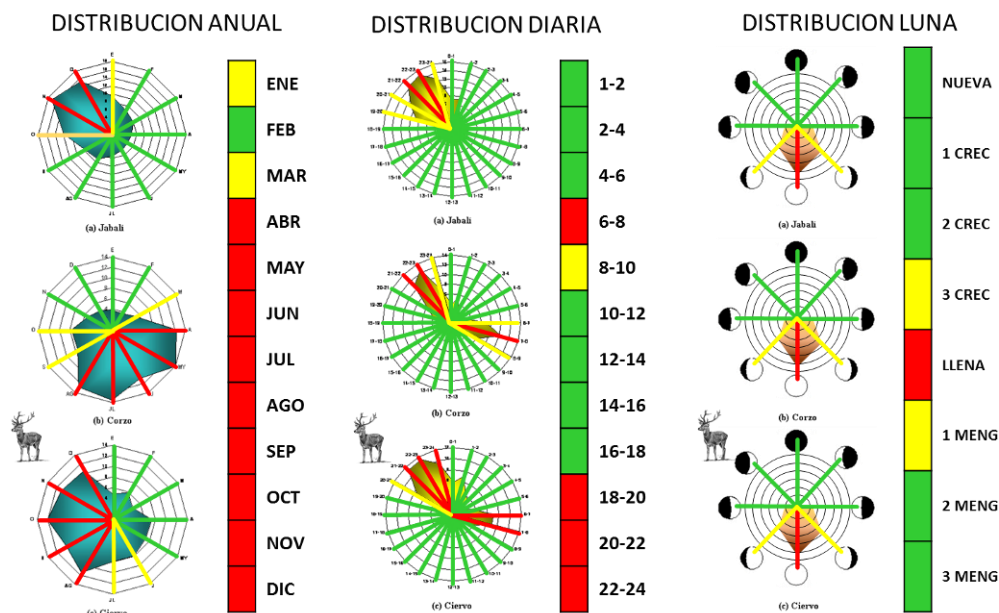
Los accidentes de tráfico causados por la irrupción de animales en la calzada constituyen un serio problema para la seguridad vial en muchas partes del mundo. Ocasionan anualmente notables daños económicos y, en menor proporción, también lesiones y pérdidas humanas. Además, el número de colisiones tiende a incrementarse debido a la mejora de la infraestructura viaria, el aumento de los desplazamientos y del parque de vehículos, y, sobre todo, al incremento de las poblaciones de fauna ligado al abandono del medio rural. En Estados Unidos se reportan todos los años más de 1 millón de colisiones, que suponen unas pérdidas económicas de 2.000 millones de €, 20.000 heridos y unos 100 fallecidos. En Europa la cifra alcanza el medio millón y 1.000 millones de €. También es un problema serio en Canadá, Japón o Australia y comienza a serlo en países emergentes de América Latina, Asia y África. Los ungulados silvestres son los principales responsables: ciervo de cola blanca, ciervo mulo y alce en Norteamérica; corzo, jabalí, ciervo, reno o alce en Europa; ciervo sika en Japón; pero también camélidos en Oriente Medio, canguros en Australia, etc. No deben olvidarse tampoco los animales domésticos.

En España solo en 2023 se registraron unos 35.000 accidentes con fauna. Estas colisiones representan el 9% de todos los accidentes de tráfico registrados en el país, aunque pueden llegar al 50-70% del total en algunas provincias del centro-norte peninsular. Jabalí y corzo fueron responsables del 79% de las colisiones. El coste económico se ha estimado en unos 105 millones de € al año. Además, hubo dos fallecidos y unas 600 personas sufrieron heridas de diversa consideración.

### 1.3. Los accidentes de tráfico con fauna como función del espacio y del tiempo.

Las investigaciones han demostrado que **las colisiones con fauna** de gran porte no tienen lugar al azar, sino que **se concentran en el tiempo y en el espacio**.

Los accidentes de tráfico **muestran importantes variaciones temporales ligadas a los patrones de actividad de la fauna: a lo largo del año, en el día, o incluso las fases de la luna**. Así, por ejemplo, los accidentes con jabalí y ciervo se concentran en los meses de otoño, coincidiendo con el período de celo y la caza. Sin embargo, con corzo los accidentes tienen lugar especialmente en los meses de primavera y verano, también coincidiendo con la ladra, el periodo de dispersión de juveniles, y también el tiempo de caza para la especie. En cuanto a los patrones diarios, la mayor parte de accidentes en las tres especies tienden a concentrarse al atardecer y durante las primeras horas de la noche (Figura 1). Hay también efectos relacionados con los ciclos lunares que se relacionan con la ecología del miedo: en noches de luna llena los ungulados tienden a desplazarse más y por tanto se incrementa el riesgo de accidente.



**Figura 1.** Patrones temporales ligados a la actividad de las especies y sus ciclos ecológicos

Por otra parte, también se ha demostrado que **se concentran espacialmente en determinados tramos de la red viaria ligados a ciertos hábitats y elementos paisajísticos**. Las variables que explican la distribución de los puntos de espacial concentración difieren de unas especies a otras. En general, los **factores relacionados con el tráfico como la densidad o la velocidad media** de los vehículos son importantes factores explicativos. Los factores relacionados con el medio ambiente circundante resultan también decisivos, con la proximidad a los bosques, los ecotonos, o la cercanía a puntos de agua como más importantes. Con frecuencia, los accidentes se concentran en aquellos tramos donde la fauna tiene a un lado de la carretera el refugio y al otro la zona de alimentación, por lo que se ve obligada a cruzar casi diariamente.

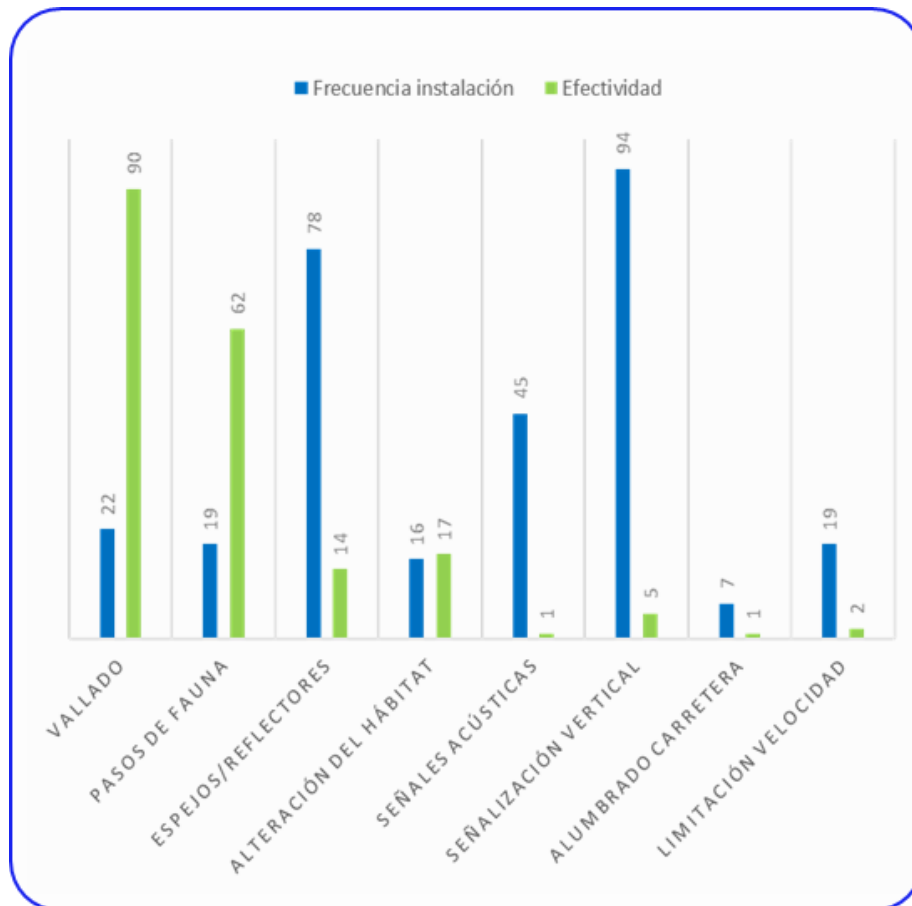
Hay una interrelación entre el tiempo y el espacio, esto es, el dónde depende del cuándo, dándose un conjunto de patrones espaciotemporal cuya comprensión es de utilidad para el diseño de medidas de mitigación adecuadas.

Tal y como prácticamente todos los estudios han demostrado, es importante recalcar la importancia de la velocidad media como variable explicativa tanto en la ocurrencia de colisiones como en la gravedad de las mismas. **Si se consigue que el conductor reduzca la velocidad, la probabilidad de accidente disminuye y en caso de que éste ocurra, los daños humanos y materiales son menos cuantiosos.**

La modelización espaciotemporal de estos patrones permite hacer predicciones hacia futuro sobre la probabilidad de ocurrencia de accidentes para el conjunto de una red viaria.

#### 1.4. Soluciones de mitigación propuestas hasta la fecha

Para reducir el número de accidentes con fauna se ha propuesto una amplia gama de medidas de mitigación, con diferentes enfoques y objetivos. Así, algunas pretenden **modificar el comportamiento del conductor** (señalización, limitación de velocidad, etc.), otras **modificar el comportamiento de los animales** (vallados, pasos de fauna, catadióptricos, espejos, etc.), y otras ambas cosas. Los costes y la efectividad de estas varían enormemente (Figura 2). En general, **las medidas orientadas al conductor son las de más amplia implementación por su bajo coste, pero también resultan mucho menos eficaces. Las medidas que focalizan en los animales son más efectivas, pero también más caras.**



**Figura 2.** Relación entre la frecuencia de instalación y la efectividad de las medidas de mitigación comúnmente propuestas

Un aspecto importante a tener en cuenta en el análisis de la efectividad de las medidas de mitigación es la habituación, que conduce a una pérdida de su efectividad a medio y largo plazo. Si los conductores ven todos los días una señalización vertical de peligro y no perciben tal riesgo, en el plazo de pocos meses relajarán su comportamiento y la señalización dejará de tener el efecto deseado. Así mismo, la propia fauna se habitúa a las luces reflejadas en espejos o catadióptricos, o incluso a la orina de depredadores, haciendo que estas medidas pierdan también eficacia.

Además, hay que considerar el impacto de las propias medidas sobre la biodiversidad. Los vallados resultan efectivos, pero sin costosas estructuras transversales a la vía (pasos de fauna, pasos multiespecíficos, drenajes acondicionados, etc.) se aumenta el efecto-barrera y la fragmentación. En este sentido, las medidas que inciden en los conductores (señalizaciones, clareo vegetación, etc.) o que sólo están operativas cuando el animal está cerca de la calzada (catadióptricos, espejos, etc.) resultarían más idóneas para minimizar tal efecto barrera.

Las medidas centradas en el conductor señalan a éste como el principal responsable para poder evitar la colisión. Por ejemplo, las señalizaciones verticales típicas de peligro (P-24) pretenden llamar la atención del conductor y que éste, consciente del riesgo, reduzca la velocidad del vehículo, una de las variables decisivas en la ocurrencia y en la gravedad de los accidentes. Sin embargo, este tipo de

medidas ha demostrado una eficacia limitada a largo plazo, ya que, después de un cierto período de tiempo, la respuesta del conductor disminuye. Esta relajación puede explicarse por la ausencia de una correspondencia temporal entre alerta y riesgo real. La eficacia podría aumentar si esta alerta se focalizase sólo en los periodos y tramos viarios de alto riesgo. **Esto es, la eficacia aumentaría mediante la implementación de señalización variable.**

## 2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo del proyecto que aquí se presenta es el desarrollo de una nueva señalización inteligente que busca informar en tiempo real a los conductores sobre la probabilidad de irrupción de un animal en la calzada y que, solo si esta supera un cierto umbral de riesgo, se emite una señal de alerta. Al concentrar el aviso solo en momentos específicos, es probable que se logre reducir la habituación por parte de los conductores.

Para ello, se ha trabajado en el desarrollo y validación de modelos matemáticos y algoritmos espaciotemporales sobre la probabilidad de colisión con fauna de gran porte en la red de carreteras de la zona de estudio

Los objetivos específicos en orden cronológico fueron:

- Recopilación y homogenización de todos los partes de accidente desde 1998 para tener una serie temporal amplia. Implementación en un sistema de información geográfica.
- Identificación de tramos de especial concentración de accidentes. Caracterización de los mismos para identificar los candidatos idóneos para probar el prototipo de señalización.
- Análisis de variables involucradas en los patrones temporales de siniestralidad.
- Desarrollo de un modelo matemático sobre probabilidad de accidente en cada momento ajustado a las características de cada tramo.
- Definición de umbrales de riesgo y niveles de alerta.
- Diseño de la señalización variable.
- Diseño de software y sistema de comunicación entre los modelos y la señalización variable.
- Selección de tramos piloto e instalación de la señal.
- Valoración de la efectividad de la señalización vertical variable.
- Comunicación de los resultados.
- Actualización anual de los modelos matemáticos para ajustarse a los cambios en la ocurrencia de colisiones.

Todo ello se enmarca en una nueva forma de aproximación al problema de los accidentes de tráfico con fauna basada en lo que hemos llamado “medicina personalizada”. Los accidentes de tráfico con fauna son contexto-dependientes, esto es, cada tramo de especial concentración tiene unas características específicas en función de las especies involucradas, las características de la carretera y del entorno. Así, no todas las medidas de mitigación son igualmente válidas para ese tramo, sino que es posible identificar aquellas que mejor se ajusten en términos de coste-efectividad.

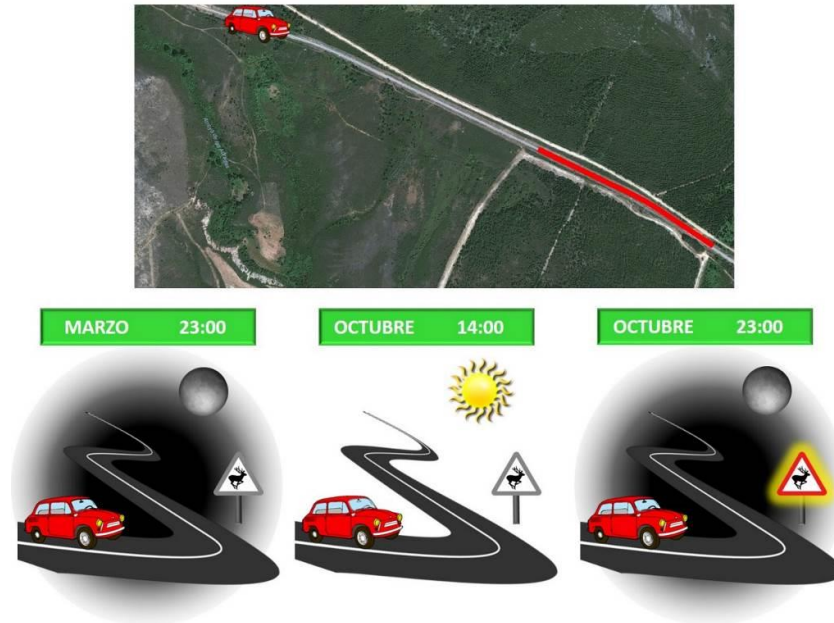


**Figura 3.** La “medicina personalizada” como propuesta para minimizar los accidentes de tráfico con fauna

Decimos que este nuevo prototipo de señalización variable responde a esa medicina personalizada porque:

1. El prototipo se ha instalado solo en tramos con unas características específicas
2. Cada tramo señalizado tiene un modelo adaptado a su patrón temporal

Se trata de una innovación a nivel mundial en la lucha por disminuir los accidentes de tráfico con fauna. Además, presenta notables ventajas respecto a las medidas que se toman actualmente para minimizar la problemática. En términos económicos es mucho más barata que otras medidas de tipo estructural (vallados, clareo de vegetación, catadióptricos, espejos, etc) y, al focalizar sólo en aquellos momentos de riesgo real (máxima actividad de la fauna), evita la habituación de los conductores ante señales de alerta que están de forma continua en la calzada (ej. señalización vertical). Al alertar a los conductores, éstos reducirán velocidad por lo que se espera que el número de siniestros disminuya y la gravedad de los mismos también. Y no sólo en términos económicos, sino que también es útil desde punto de vista ambiental puesto que, a parte de reducir la mortalidad, no incrementa el efecto barrera.



**Figura 4.** Esquema del funcionamiento conceptual de la señalización variable

### 3. ANÁLISIS DE TRAMOS DE ESPECIAL CONCENTRACIÓN DE ACCIDENTES

#### 3.1. Ámbito de la aplicación y origen de los datos

Los modelos espaciotemporales de accidentes de tráfico con fauna se han desarrollado para toda la red viaria de la zona de estudio. Los datos empleados en el estudio se han obtenido a partir de las bases que se obtienen de la compilación de los partes de accidente realizados por la Guardia Civil. Desde 2005 todos los partes de accidente se centralizan en la Dirección General de Tráfico por medio del programa Arena y su sucesor, Arena 2. Así, para cada informe de accidente se tiene información tabulada en relación con:

- Denominación de la carretera
- Punto Kilométrico
- Fecha
- Hora
- Causas del accidente
- Existencia de heridos o daños materiales
- Especie
- Características del trazado
- Luminosidad
- Condiciones meteorológicas
- Características del conductor

Todos los datos recopilados se han almacenado en una EXCEL que cuenta actualmente con 35281 registros. Todo ello se ha implementado en un Sistema de Información Geográfica en ArcGIS 10.8. Esta enorme base de datos constituye una inmejorable fuente de información para la realización de los modelos espaciotemporales.

### 3.2. Identificación de tramos de especial concentración de accidentes con fauna.

Teniendo en cuenta la necesidad de identificar tramos con especial concentración de accidentes con fauna, tanto en el espacio como en el tiempo, se empleó la base de datos de 20 años de registros de accidentes de tráfico con fauna en la zona de estudio, para, primero, ubicar espacialmente esos tramos de especial concentración (en adelante TEC), y una vez identificados, proceder a estudiar el nivel de concentración temporal de los accidentes en cada uno de ellos. En base a este estudio se pretenden proponer una serie de tramos piloto candidatos a instalar la señalización en esta primera fase de pruebas.

#### **Análisis de la concentración espacial**

Se empleó el software KDE para identificar aquellos con una mayor concentración de accidentes con fauna. KDE es un software desarrollado por el equipo del profesor Michal Bil, del Centro Checo de Investigación en Transportes que calcula densidades de kernel en una dimensión. En estadística, la estimación de la densidad del kernel es una forma no paramétrica de estimar la función de densidad de probabilidad de una variable aleatoria. Se trata de un problema fundamental de suavización de datos en el que se hacen inferencias sobre la población, basadas en una muestra de datos finitos. En KDE cada carretera de la zona de estudio es tratada de forma independiente. A partir del GIS y la base de datos de 35.000 atropellos para el periodo 2000-2018 se elaboró la matriz de entrada en el software del KDE. La matriz incluía el pk y la carretera donde se localizó cada uno de esos 35.000 registros.

Puesto que dependiendo del radio de búsqueda que se seleccione para el análisis de kernel tenemos TEC de mayor o menor longitud, se hicieron pruebas con diferentes distancias (100, 500, 1000, 2500, 5000, 10000 metros) y posteriormente se seleccionó aquella distancia para la cual se obtenían TECs de una longitud apropiada de acuerdo con las características de la señalización variable (por encima de 5 km se considera que el tramo es demasiado largo sólo para dos señales al principio del tramo).

El KDE encuentra puntos relativos de concentración de accidentes en cada carretera. Pero muchos de estos no son válidos. Así, por ejemplo, en una vía con un único accidente con fauna, éste será identificado como una zona con incremento de concentración, pero lógicamente, no puede calificarse como TEC. Así, tras correr los modelos en el KDE, el software encuentra hasta 900 puntos con un incremento relativo de la densidad de accidentes en relación con la carretera donde han tenido lugar. De estos 900, primero se realizó un filtrado previo en el que permanecieron solo 220 candidatos.

De aquellos, se seleccionaron los que cumplían unos criterios (más de 75 atropellos en la serie temporal y una concentración mínima de 1 atropello por km y año). **Esto redujo los TEC a 59.**

### 3.3. Caracterización y selección de candidatos a tramos piloto

#### **Análisis de la concentración temporal**

Si los accidentes dentro de un TEC no están también concentrados en el tiempo, la señalización variable debería estar encendida durante mucho tiempo, aumentando así la habituación por parte de los conductores. Para esos TEC con escasa concentración temporal quizás sean más útiles otro tipo de medidas. Por ello, para cada uno de esos **59 TEC** se hizo un primer análisis de estacionalidad para estudiar cuáles eran sus patrones temporales. Con este fin se realizó también un análisis de densidad, en este caso temporal, teniendo en cuenta la fecha (el día del año) de todos los accidentes de tráfico que han ocurrido en cada uno de esos 59 TEC.

Una vez calculadas las distribuciones temporales, los 59 TEC fueron clasificados en diferentes patrones de respuesta (unimodal, bimodal... o falta de patrón temporal). Cada uno de ellos constituye una tipología específica de TEC en cuanto a la concentración temporal que es de utilidad para seleccionar los TEC piloto para la instalación de la señalización y para su posible posterior escalado. Las principales tipologías identificadas son las siguientes:

- *Unimodal*: los accidentes se concentran en solo un pico temporal que puede ser en primavera, verano u otoño
- *Bimodal*: hay dos periodos de concentración de accidentes a lo largo del año: primavera-verano; verano-otoño; o primavera-otoño
- *Trimodal*: con tres picos en primavera-verano-otoño
- *Continuo*
- *Indefinido*

#### **Selección de los TECs candidatos a piloto**

A parte de la estacionalidad del punto anterior, para cada uno de los 59 TECs se analizaron otros aspectos también relevantes para su caracterización:

- Análisis de tendencia: analizar la evolución temporal en los últimos años, evitando aquellos TEC que presentan una variación interanual notable (gráfica en dientes de sierra) que dificultaría evaluar la efectividad de la señalización; y aquellos TEC que presentan una tendencia descendente.
- Índice de accidentes por kilómetro y año, priorizando aquellos que presentan una tasa más alta.
- Longitud de tramo.

En base a estos análisis se seleccionaron finalmente con una muestra de 15-20 candidatos que se analizaron de forma pormenorizada mediante unas fichas que se explican en el siguiente apartado.

**Fichas de los TEC candidatos a TEC piloto**

Para caracterizar cada TEC candidato, se desarrolló la siguiente ficha:

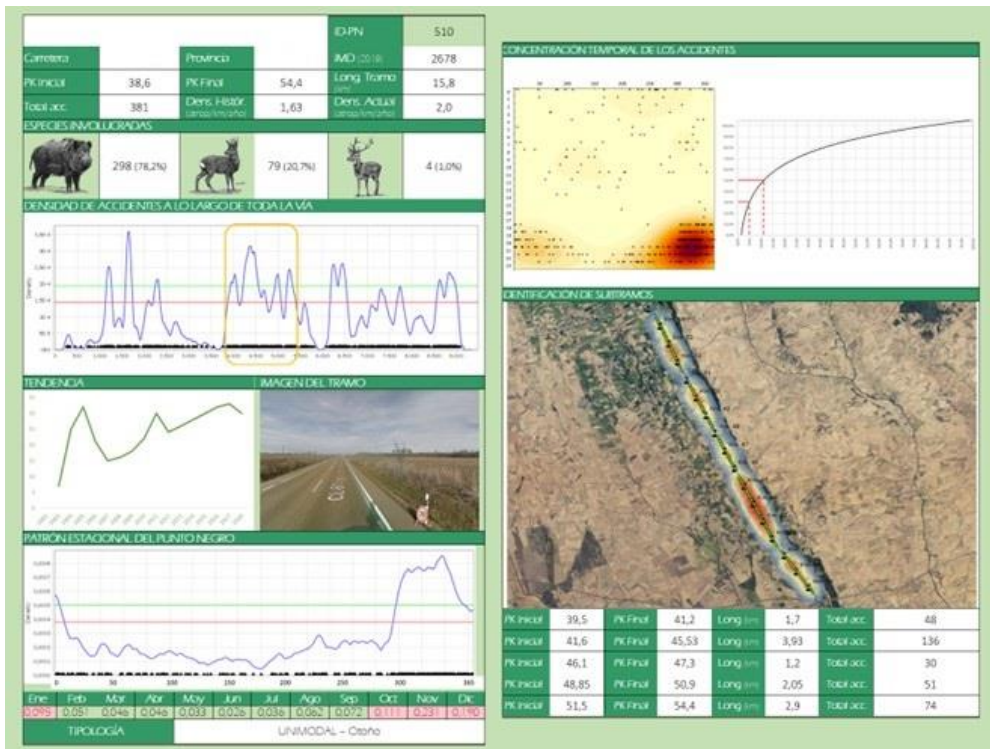


Figura 5. Ejemplo de ficha para cada uno de los tramos de especial concentración de accidentes

Incluye las siguientes partes:

**Caracterización del TEC:** Datos básicos sobre el punto de especial concentración de accidentes: carretera, provincia, intensidad media diaria de tráfico para 2021, el Pk inicial y final, longitud del tramo, el total de accidentes (2001-2021), la densidad de accidentes a lo largo de toda la serie (Dens Histor) y la densidad de accidentes durante los últimos 3 años (Dens Actual)

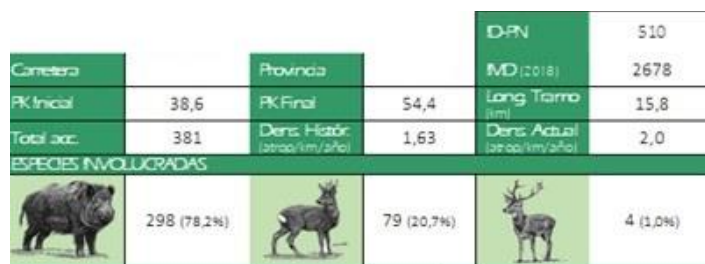
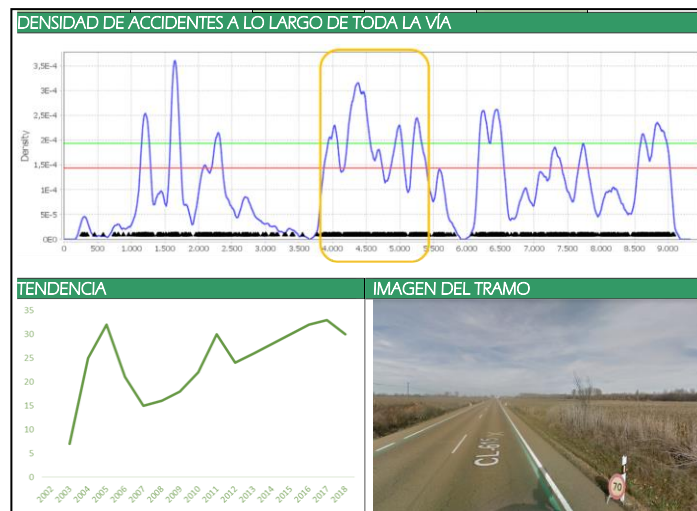


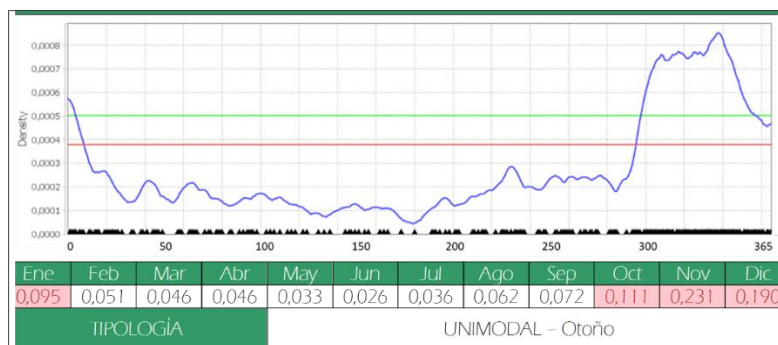
Figura 5.1. Caracterización del TEC

**Densidad de accidentes en toda la vía y tendencia temporal:** Densidad de accidentes de tráfico con fauna a lo largo de toda la vía. El rectángulo amarillo indica la ubicación del punto de concentración de accidentes del que se ocupa la ficha en cuestión



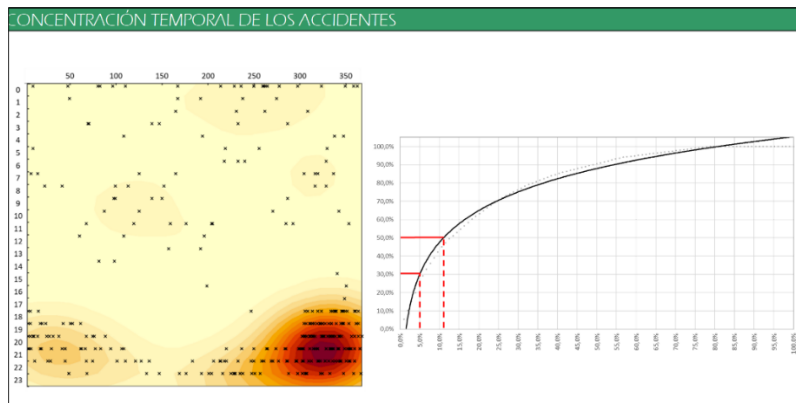
**Figura 5.2.** Densidad de accidentes a lo largo de toda la vía

**Patrón estacional:** concentración de atropellos a lo largo del año, desde el 1 de enero (día 1) al 31 de diciembre (día 365); **Índice de estacionalidad por mes:** Si los accidentes se distribuyesen de forma homogénea a lo largo del año, en cada mes tendría que haber el 8,3% de los accidentes. Si está por encima (en rojo) es que en ese mes hay una especial concentración de accidentes, tanto mayor cuanto mayor sea el % de accidentes; **Tipología:** caracterización de los tramos de concentración de accidentes en función de cuándo se observaban picos: por ejemplo, verano y otoño, primavera y otoño, etc. En este caso es unimodal (solo un pico) y en otoño.



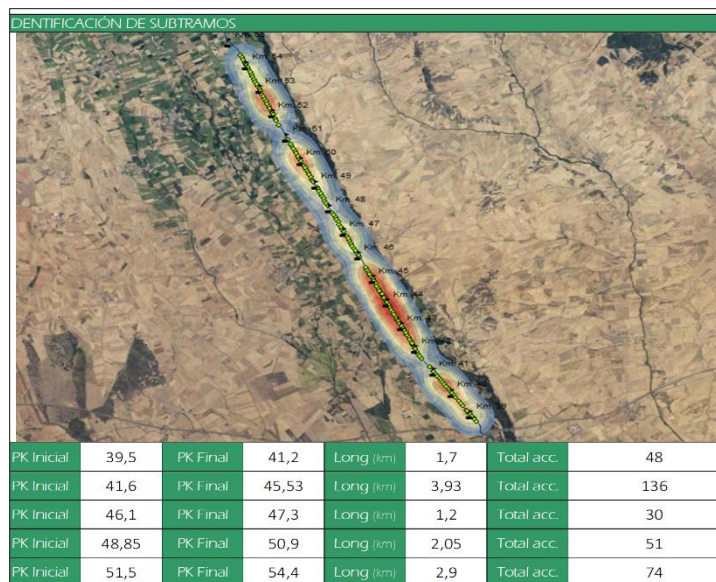
**Figura 5.3.** Patrón estacional

**Gráfica de concentración de los accidentes a lo largo del año y del día:** En el eje de las X los 365 días del año, en el eje de las Y las 24 horas del día. Cuanto más marrón más concentración. En este tramo, los atropellos se concentran durante los dos meses finales del año y al atardecer y primeras horas de la noche; **Curvas de acumulación:** Para ver en qué % de tiempo (eje de las X) se concentra un determinado % de accidentes (eje de las Y): en este caso, por ejemplo, el 50% de los accidentes se concentra en el 10% de los tramos horarios.



**Figura 5.4.** Concentración temporal de los accidentes

**Cartografía del TEC con mapas de calor obtenido por densidades de kernel:** Se identificaron también subtramos de especial concentración dentro del propio tramo considerado.



**Figura 5.5.** Mapa de calor

**Primera selección de tramos piloto**

Así, se obtuvo una primera caracterización de los TEC en base a la cual establecer una jerarquización en cuanto a su idoneidad para implementar en ellos la señalización variable dado sus patrones temporales.

Carretera	PK inicial	PK final	Long tramo	Sub división	Total accidentes	Densidad actual	Especies			Tipología
							Jab	Cor	Cier	
1	3,000	6,000	3,00		105	5,0	32	56	18	Bimodal (ver-otoño)
2	6,960	11,000	4,05		80	2,3	27	36	17	Otoño
3	0,500	5,300	4,80		108	3,6	54	54		Bimodal (ver-otoño)
4	10,500	13,500	3,00		76	2,3	24	52		Bimodal (ver-otoño)
5	1,000	6,400	5,40	si	97	3,1	42	52		Trimodal
6	1,800	13,700	11,90	si	236	2,4	33	194	2	Bimodal (ver-otoño)
7	168,800	172,500	3,70		79	2,4	9	59	11	Bimodal (prim-ver)
8	38,600	54,400	15,80	si	381	2,0	298	79	4	Otoño
9	5,200	10,000	4,80		80	3,5	53	24	3	Otoño
10	40,600	52,000	11,40	si	175	2,4	51	124		Bimodal (ver-otoño)
11	51,500	60,000	8,50	si	184	2,0	17	139	28	Bimodal (prim-otoño)
12	84,650	90,200	5,55	si	133	2,9	15	101	17	Bimodal (prim-ver)
13	16,000	29,000	13,00	si	318	2,5	101	178	36	Bimodal (ver-otoño)
14	27,000	30,700	3,70		77	1,6	12	65		Trimodal
15	15,000	19,100	4,10	si	108	3,6	19	89		Bimodal (ver-otoño)
16	2,100	5,200	3,10		94	2,9	16	76		trimodal
17	4,100	8,800	4,70		109	3,0	33	76		Bimodal (ver-otoño)

**Figura 6.** Selección de tramos candidatos a tramos piloto



**Figura 7.** Mosaico de fichas de los diferentes tramos

## 4. MODELOS PREDICTIVOS Y UMBRALES DE RIESGO

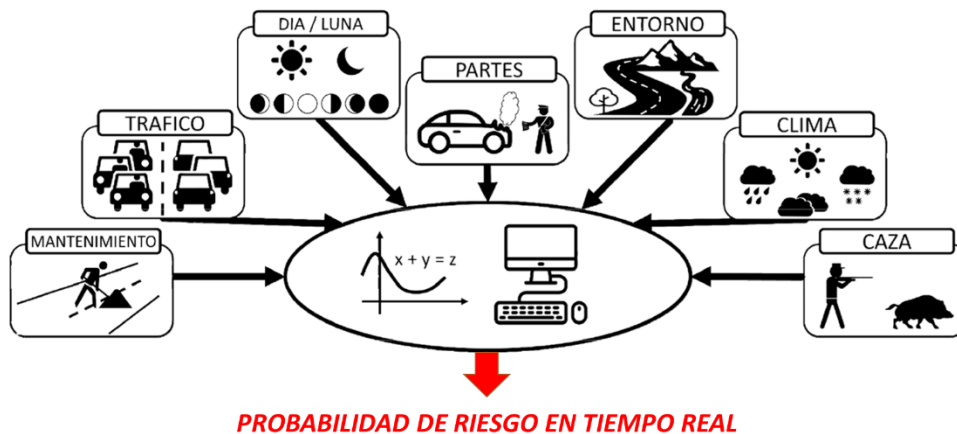
### 4.1. Modelización temporal de los accidentes en cada TEC

A partir de la base de datos del programa Arena 2 y el trabajo con la caracterización de variables involucradas en la ocurrencia de accidentes de tráfico con fauna, se han estimado a lo largo del

proyecto los factores moduladores para cada una de las variables (el momento del año, el momento del día en relación con la luz solar, la fase lunar, la meteorología, o la actividad cinegética).

$$Prob = \begin{matrix} (\text{momento del año,} \\ \text{momento del día, fase} \\ \text{lunar, meteorología, caza}) \end{matrix}$$

Estos moduladores se han implementado en un algoritmo que permite calcular la probabilidad de ocurrencia de un accidente con fauna para todas las combinaciones posibles de los diferentes factores explicativos. Con ello se puede obtener en cada momento (tiempo real) el riesgo de accidente y, en función de los umbrales de riesgo escogidos, poner en funcionamiento (o cambiar el nivel de alerta) la señalización cuando se supere un cierto umbral.



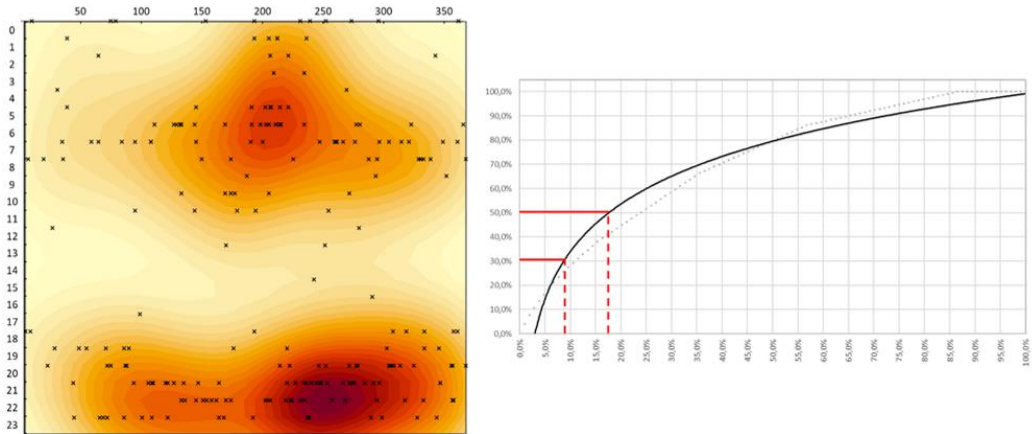
**Figura 8.** Esquema conceptual de los modelos de probabilidad

Estos modelos son específicos para cada TEC puesto que los accidentes de tráfico con fauna son contexto-dependientes y esto hace que los patrones temporales varíen de un tramo a otro dependiendo de la composición de especies que se ven involucradas, el hábitat circundante o las características de los flujos de tráfico. No obstante, hay patrones más o menos constantes: los accidentes a lo largo del año están muy marcados por los ciclos biológicos de las especies y sus periodos de celo y cría; a lo largo del día los accidentes tienen lugar cuando coincide una elevada actividad faunística con las horas donde las densidades de tráfico son más altas; las fases lunares inciden en la propia movilidad de la fauna a través de la ecología del miedo y esto condiciona la probabilidad de accidente; la actividad cinegética genera un incremento del riesgo en los días de cacería pero con diferencias muy notables entre cotos por la propia gestión de los mismos y por los usos de suelo donde tienen lugar; la meteorología condiciona la siniestralidad con diferencias en cuanto a especies, pero en general los días de lluvia esta suele bajar (también por una disminución de la velocidad por parte de los

conductores), etc. Todos estos parámetros se han ido estudiando e introduciendo en el algoritmo específico para cada tramo TEC.

### 4.2. Umbrales de riesgo

Las probabilidades de accidente deben traducirse en diferentes niveles de alerta en la señalización, tratando así de disminuir la habituación por parte de los conductores. En el prototipo de señalización se optó por buscar discontinuidades en la distribución temporal de la probabilidad de accidente para caracterizar estos escalones de riesgo. No obstante, conviene recordar que la definición de los niveles de alerta es una decisión humana, pudiendo ir, desde un modelo conservador en el que la señal está encendida durante muchas horas para cubrir la mayor parte de los periodos con alta siniestralidad con fauna a sabiendas de un incremento de la habituación, a otro modelo muy restrictivo en el que la señal se enciende solo en los periodos de máximo riesgo (pocas horas y días, por lo que la habituación será menor).



**Figura 9.** Mapas de calor de concentración de ATF a lo largo del día y del año y curva de acumulación a partir de los cuales se definen los umbrales de riesgo

## 5. PROTOTIPO DE SEÑALIZACIÓN VARIABLE

### 5.1. Paneles instalados en los tramos piloto

La señalización variable propuesta incluye la señal de código (P-24) junto a un panel led donde se indica en cada momento a los usuarios de la vía sobre el riesgo real de irrupción de un animal en la calzada, así como la longitud del tramo. El panel se alimenta con energía solar.



**Figura 10.** Modelo de señal instalado en un tramo de alta concentración de accidentes

Estos paneles muestran **tres niveles de alerta** en función del riesgo que predicen los modelos:

- ✓ Apagado - advertencia de que se está entrando en un tramo de especial concentración de accidentes con fauna.
- ✓ Amarillo - advertencia de que se está entrando en un tramo de especial concentración de accidentes con fauna en un momento en el que el riesgo de irrupción de un animal en la calzada es mayor de lo habitual.
- ✓ Rojo - advertencia de que se está entrando en un tramo de especial concentración de accidentes con fauna en un momento en el que el riesgo es mucho mayor de lo habitual.



Comunicación mediante datos móviles integrados en una VPN

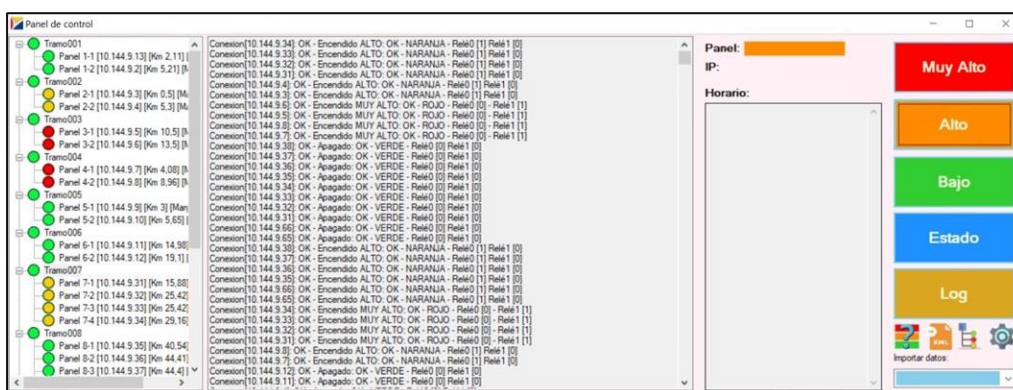
**Figura 11.** Posiciones que puede mostrar el panel instalado en el TEC en función de la probabilidad de accidente dada por los modelos.

## 5.2. Comunicación de los modelos con la señal

La comunicación se hace con una conexión VPN entre los paneles diseñados como prototipos de proyecto y un servidor donde se encuentra instalada la aplicación desde donde se emiten las instrucciones a los paneles. Para ello, se emplean tarjetas SIM, para lo cual el único requisito es que los puntos donde se vayan a instalar las señalizaciones tengan buena cobertura telefónica.

La aplicación, partiendo de un horario (se carga mediante un archivo XML) en el que se especifica una serie de estados por tramos y se va cambiando el nivel de alerta en los paneles según las instrucciones dadas. Este cambio de estado en los paneles se refleja en el encendido o apagado de dos grupos de leds a través de un relé instalado en el mismo, al que se accede por un router inalámbrico instalado en dicho panel a través de la IP pública de la SIM de éste. El programa tiene que estar abierto permanentemente para que los cambios se hagan efectivos a las horas indicadas.

Además, se puede verificar en todo momento que un tramo está en el estado que aparece en la aplicación y se puede cambiar este estado.



**Figura 12.** Cuadro de mandos para la gestión de la señalización en cada tramo

## 6. EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DEL PROTOTIPO

### 6.1. Metodología seguida para cuantificar la efectividad de la señal

Para comprobar la eficacia de la señalización en términos de reducción en el número de accidentes se ha propuesto un diseño experimental basado en la metodología BACI (Before-After-Control-Impact // Antes-Después-Control-Impacto). Muchos estudios analizan la efectividad de una determinada medida comprobando solo el antes y el después en el número de accidentes a lo largo del tramo de carretera donde ésta se implementa. Si, por ejemplo, antes había 6 accidentes y ahora hay solo 3, entonces se dice que la medida ha reducido en un 50% los siniestros. El problema es que no se puede afirmar con rotundidad que ese cambio se deba exclusivamente a la implementación de la medida; por ejemplo, puede haber un descenso de las poblaciones de fauna que explique esa reducción en los accidentes. Por eso, es necesario analizar también otros tramos próximos que actúen como puntos de control. Si en el tramo con señalización ha habido una reducción del 50% en el número de accidentes y en los tramos de control próximos no se ha experimentado esa disminución, la probabilidad de que esa reducción constatada se atribuya a la propia medida de mitigación es muy alta.

Así, en el proyecto se comparó la tendencia en el número de accidentes para el tramo señalizado con las tendencias de las carreteras (incluida la señalizada excepto el tramo señalizado) en 10 kilómetros a la redonda que actúan como control.

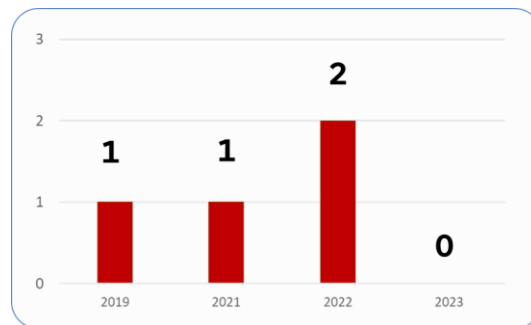
No obstante, también hay otros indicadores de efectividad en los que se está trabajando y que también puede mostrar un buen desempeño de la señal, como por ejemplo, lograr una reducción de la velocidad por parte de los conductores. Esta reducción podría explicar un descenso en el número de accidentes, pero también en la cuantía y gravedad de los daños en caso de que la colisión no pudiera evitarse.

### 6.2. Resultados obtenidos tras un año de funcionamiento

Las señales se instalaron en 11 tramos piloto entre finales de 2022 e inicios de 2023. En total se instalaron 30 paneles (Figura 15) ya que había tramos que, por su notable longitud, se decidió dividir en dos subtramos por lo que al final contaban con 4 paneles. El total de la inversión es de 369.639,00 euros.

Siguiendo la metodología BACI propuesta, tras un año de funcionamiento, los accidentes de tráfico con fauna en los tramos señalizados disminuyeron en un **22%** en relación con los esperados de acuerdo con las zonas control. Esta reducción supone que se han evitado aproximadamente unos 50 accidentes en este primer año, lo que hubiera supuesto unas pérdidas de unos 150.000 euros en daños materiales.

En cuanto a los daños a las personas, aunque no se pueden obtener resultados concluyentes dado el bajo tamaño muestral, en los tramos señalizados no se registró ningún herido en este 2023, hecho que no había sucedido en los 3 años anteriores.



**Figura 13.** Evolución en el número de heridos en los tramos señalizados.

También es importante analizar cómo estaba la señal en aquellos accidentes que no pudieron evitarse. En este sentido, el 43,4% de los accidentes tuvieron lugar con la señalización en rojo (peligro muy alto), 21,1% en amarillo (peligro alto) y 35,5% apagado. El alto porcentaje de accidentes con la señal en riesgo alto o muy alto (64,5% de las ocasiones) indica que el funcionamiento de los modelos temporales es relativamente bueno, pero que, o bien una parte de los conductores no responde adaptando su conducción al nivel riesgo en cada momento, o, si lo hacen, la reducción de la velocidad no es lo suficiente como para evitar la colisión.

## 7. MATERIALES PARA LA COMUNICACIÓN HACIA LA CIUDADANÍA

Comunicar bien el funcionamiento del prototipo es esencial. Se pretende llegar a todos los conductores para que interioricen el funcionamiento de este nuevo tipo de señalización para prevenir accidentes con fauna. Hay que tener presente que la efectividad de la medida depende de que los conductores tomen conciencia del riesgo mostrado en la señal y sean consecuentes con ello cuando transiten por alguno de estos tramos señalizados.

Se han desarrollado contenidos para una campaña de comunicación: información y textos en formato dossier para los medios; cartelería, flyers, etc. para la ciudadanía con información sobre el funcionamiento del nuevo prototipo.

## 8. REFLEXIONES FINALES

El prototipo de señalización variable aquí presentado supone una innovación mundial ya que hasta la fecha no se había integrado el conocimiento científico en materia de patrones de accidentabilidad con fauna en carreteras con las nuevas tecnologías que permiten el flujo de información en tiempo real.

Además, y muy importante, supone un claro ejemplo de lo que puede surgir cuando distintos entes implicados en la materia trabajan en conjunto.

Esta señalización inteligente constituye una propuesta prometedora porque supone un salto desde la señalización vertical más tradicional a otro modelo tecnológico (pero simple) basado en la transmisión de un mensaje adaptado a las condiciones de peligrosidad en cada momento. Con ello, las administraciones públicas relacionadas con la seguridad vial mejoran de forma notable su desempeño como responsables de transmitir la mejor información posible a la ciudadanía para que esta actúe en consecuencia. Además, al focalizar la alerta solo en determinados tramos, se minimiza la habituación por parte de los conductores que es la responsable de que las señales más tradicionales pierdan su eficacia a medio y largo plazo. La presencia de diferentes niveles de alerta en función de los umbrales de riesgo también contribuye a reducir esa habituación.

Se trata de una medida relativamente barata basada en el conocimiento y no tanto en la instalación de dispositivos o en la implementación de costosas estructuras. Esto facilita su fácil implementación en escalas territoriales amplias y para redes viarias extensas. Es cierto que la efectividad mostrada es menor, pero los costos de otras soluciones como los sistemas de detección de fauna (por ejemplo, con infrarrojos) los hacen prohibitivos para su implementación a gran escala y solo pueden llevarse a cabo en tramos muy concretos. Además, otras medidas no son útiles para alguna de las tipologías más frecuentes de accidentes, dado el comportamiento de la fauna en el momento del cruce.

Por otro parte, los modelos temporales y los umbrales de riesgo para establecer los niveles de alerta han funcionado razonablemente bien, pero este tipo de medidas centradas en el comportamiento de los conductores solo pueden ser efectivas si se logra que haya una adaptación de las características de la conducción al riesgo real de accidente en cada momento. Conseguir que los conductores entiendan el funcionamiento de una nueva señal es complejo, pero completamente necesario para que la efectividad de la medida aumente.

Se pretende realizar campañas para que cada vez más usuarios de la vía sean conscientes de que muchos accidentes tienen lugar cuando las señales muestran algún tipo de alerta y que así, cuando vuelvan a pasar por esos tramos, actúen en consecuencia. Es decir, esta prototipo es posible que vaya incrementando su efectividad, a medida que se logre una mayor implantación de la señal y del conocimiento por los usuarios de cómo funciona ésta.

Por último señalar que la señalización está en continuo proceso de mejora, con nuevos ajustes en los algoritmos y los umbrales de riesgo que optimizarán el mensaje que recibe el usuario de la vía en cada tramo.