



DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA DE COMPUTADORES Y AUTOMÁTICA  
PROYECTO FIN DE MÁSTER EN INGENIERÍA INFORMÁTICA PARA LA INDUSTRIA  
MÁSTER EN INVESTIGACIÓN EN INFORMÁTICA

CURSO 2009/2010

# **CÁLCULO DE LA DEMORA EN CARRETERAS CONVENCIONALES MEDIANTE LÓGICA FUZZY**

**Autor: Sergio Martín Moreno**

**Directora: Matilde Santos Peñas**



El abajo firmante, matriculado en el Máster en Investigación en Informática de la Facultad de Informática, autoriza a la Universidad Complutense de Madrid (UCM) a difundir y utilizar con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a su autor el presente Trabajo de Fin de Máster: "CÁLCULO DE LA DEMORA EN CARRETERAS CONVENCIONALES MEDIANTE LÓGICA FUZZY", realizado durante el curso académico 2009-2010 bajo la dirección de Matilde Santos Peña en el Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática, y a la Biblioteca de la UCM a depositarlo en el Archivo Institucional E-Prints Complutense con el objeto de incrementar la difusión, uso e impacto del trabajo en Internet y garantizar su preservación y acceso a largo plazo.

Sergio Martín Moreno



# ÍNDICE GENERAL

	Página
Resumen .....	v
Palabras Clave .....	v
Abstract .....	vi
Keywords .....	vi
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación y objetivos .....	1
1.2. Descripción del problema .....	2
<b>2. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>7</b>
2.1. Cálculo de la demora .....	7
2.2. Conjunto fuzzy .....	9
2.3. Razonamiento aproximado y lógica fuzzy .....	10
2.4. Lógica fuzzy aplicada al control de flujos de tráfico .....	13
2.5. Xfuzzy .....	14
<b>3. DESARROLLO DEL SISTEMA .....</b>	<b>17</b>
3.1. Toma de datos .....	18
3.2. Definición del sistema .....	19
3.2.1. Subsistema Entorno .....	22
3.2.2. Subsistema EstadoCoche .....	25
3.2.3. Subsistema Conductor .....	29
3.2.4. Subsistema Seguridad .....	33
3.2.5. Subsistema Gap .....	34
3.2.6. Subsistema DeseoAd .....	38
3.2.7. Subsistema PosibilidadAd .....	42
3.2.8. Subsistema EstadoDemora .....	44
3.3. Interfaz gráfica .....	44
<b>4. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS .....</b>	<b>47</b>
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>49</b>
<b>6. TRABAJO FUTURO .....</b>	<b>51</b>
<b>APÉNDICE A. ENCUESTA .....</b>	<b>53</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>59</b>



# ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

	Página
<b>TABLAS</b>	
<i>Tabla 1.</i> Entrenador de baloncesto, solución clásica .....	12
<i>Tabla 2.</i> Entrenador de baloncesto, solución fuzzy .....	12
<i>Tabla 3.</i> Entrenador de baloncesto, ránking valorado .....	13
<b>FIGURAS</b>	
<i>Figura 1.</i> Diseño general del sistema .....	20
<i>Figura 2.</i> Subsistema entorno .....	22
<i>Figura 3.</i> AnchoCarril .....	22
<i>Figura 4.</i> Luz .....	23
<i>Figura 5.</i> Firme .....	24
<i>Figura 6.</i> Lluvia .....	24
<i>Figura 7.</i> Calidad Entorno .....	25
<i>Figura 8.</i> Subsistema Coche .....	25
<i>Figura 9.</i> EdadCoche .....	26
<i>Figura 10.</i> KmCoche .....	27
<i>Figura 11.</i> Revisión .....	28
<i>Figura 12.</i> Ruedas .....	28
<i>Figura 13.</i> CalidadCoche .....	29
<i>Figura 14.</i> Subsistema Conductor .....	29
<i>Figura 15.</i> Experiencia .....	30
<i>Figura 16.</i> TiempoConduciendo .....	31
<i>Figura 17.</i> HorasSueño .....	31
<i>Figura 18.</i> Motivación .....	32
<i>Figura 19.</i> CapacConductor .....	33
<i>Figura 20.</i> Subsistema Seguridad .....	33
<i>Figura 21.</i> Seguridad .....	34
<i>Figura 22.</i> Subsistema Gap .....	34
<i>Figura 23.</i> DistanciaContrario .....	35
<i>Figura 24.</i> Velocidad .....	36
<i>Figura 25.</i> TipoVehículo .....	37
<i>Figura 26.</i> Gap .....	38
<i>Figura 27.</i> Subsistema DeseoAd .....	38
<i>Figura 28.</i> TipoVía .....	40

<i>Figura 29.</i> TiempoEnCola .....	41
<i>Figura 30.</i> Sí/No .....	42
<i>Figura 31.</i> Subsistema Posibilidad .....	42



## RESUMEN

La demora de vehículos es uno de los principales factores para determinar el nivel de servicio de una carretera convencional. La determinación de un método que permita calcularlo con fiabilidad para todos los conductores es materia de numerosos estudios, debido a la gran cantidad de factores, y a las diferencias entre conductores debido a la percepción subjetiva de estos factores. En este trabajo se ha diseñado un sistema de cálculo de demoras mediante el uso de técnicas de razonamiento aproximado a través de lógica fuzzy. De este modo se ha podido tratar adecuadamente la subjetividad de los conductores a la hora de calcular la demora independiente de cada vehículo. El sistema diseñado se divide en siete subsistemas fuzzy que calculan la calidad del entorno, el coche y el conductor, a partir de los cuales calcula el nivel de seguridad mediante otro subsistema fuzzy. Posteriormente utiliza esta información para calcular, mediante otros subsistemas fuzzy, si el espacio disponible para adelantar es suficiente, si el conductor considera posible adelantar y si desea adelantar. Finalmente se ha propuesto un nuevo sistema de clasificación de vehículos demorados que utiliza los datos de posibilidad y deseo de adelantar calculados anteriormente para determinar el estado del vehículo. Todos estos cálculos se realizan a partir de medidas externas relativas al entorno, al conductor, al coche y a la circulación. Para probar este sistema se realizaron encuestas a diferentes usuarios de carreteras convencionales y se compararon sus respuestas con las del sistema, obteniendo coincidencias en un más de un 90% de los casos. Se concluye que el nuevo enfoque fuzzy que se ha aportado al cálculo de la demora es efectivo y capaz de tratar la subjetividad que no se podía tratar con métodos tradicionales.

## PALABRAS CLAVE

Adelantamientos, carreteras convencionales, demora, flujos de tráfico, lógica difusa, nivel de servicio, razonamiento aproximado, teoría del tráfico.

## ABSTRACT

Car delay is one of the main factors used to calculate the level of service on rural highways. To establish a method which allows a faithful calculation for every driver is the subject of many researchs, because of the very different factors and the differences between the different subjective perceptions drivers have. In this work a system for the calculation of car delays has been developed using approximate reasoning with fuzzy logic. This way, drivers subjectivity has been managed when calculating individual car delays. The system is divided into seven fuzzy subsystems that calculate the quality of the environment, the car and the driver, and uses this qualities to calculate the level of safety using another fuzzy system. Then, this information is used to work out, by means of other fuzzy systems, if the gap available to overtake is enough, if the driver thinks he can overtake and if the driver wants to overtake. Finally a new system of clasification for delayed vehicles has been proposed. This proposed system uses the possibility and willing of overtaking data previously calculated to determine the state of the vehicle. All this calculations are made from external measurements related to car, environment, driver and traffic. Some surveys were made to several users of rural highways to test the system. Their answers were compared with system answers, being the same on a 90% of the answers. In conclusion, the new fuzzy approach given for the calculation of delay is effective, and is able to manage subjectivity, which was unable to manage with traditional methods.

## KEYWORDS

Overtaking, rural highways, delay, traffic flow, traffic theory, fuzzy logic, level of service, approximate reasoning.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Motivación y objetivos

Uno de los principales parámetros que determinan la calidad de una carretera es su nivel de servicio. A través del nivel de servicio podemos conocer el grado de comodidad de circulación de los conductores que circulan por ella, así como los niveles de congestión de la vía.

Para poder determinar el nivel de servicio de una carretera es necesario conocer el porcentaje de vehículos que circulan demorados por dicha carretera, es decir, el porcentaje de vehículos que circulan a una velocidad inferior a la que desean. Sin embargo, la determinación del estado de demora de un vehículo es algo muy poco preciso, y altamente variable en función del parámetro que se tome como principal en cada método de cálculo de la demora.

Esta imprecisión y variabilidad se deben a que son muchos los factores que influyen en la demora de un vehículo, y muchos ellos completamente subjetivos para cada conductor concreto. Los métodos tradicionales de cálculo de demora apenas pueden tener en cuenta dos factores, y en todo caso son completamente incapaces de tratar la subjetividad.

En este trabajo se pretende dar un nuevo enfoque al problema del cálculo de demoras mediante la utilización de razonamiento aproximado y lógica fuzzy, de modo que se

contemplan las diferentes subjetividades de los conductores. Para ello se ha desarrollado un sistema fuzzy con múltiples variables de entrada, tratando así de solventar los dos mayores problemas actuales para el cálculo de demoras: el gran número de variables que deben tenerse en cuenta, y el carácter subjetivo de muchas de ellas.

Al tratar cada conductor como un caso concreto, este sistema busca una mayor precisión en el cálculo de la demora, permitiendo un mejor ajuste de los niveles de servicio de las carreteras que, al final del proceso, revertirá en una mayor comodidad de conducción.

Del mismo modo se propone una nueva clasificación para vehículos demorados y vehículos libres (es decir, los que circulan por debajo de la velocidad esperada por el conductor y los que circulan a la velocidad deseada) basada en valores subjetivos como la posibilidad de adelantar que tenga el vehículo y el deseo de adelantar del conductor, además de tener en cuenta las diferencias de velocidades entre los vehículos en carretera.

A lo largo de esta memoria se explica el desarrollo de este sistema. Primero se plantea el problema y sus posibles modos de afrontarlo. A continuación se realiza un pequeño estudio del estado del arte tanto en el cálculo de demoras como en la lógica fuzzy aplicada a distintos problemas de tráfico. Se pasa después a describir el diseño e implementación del sistema, realizando primero una explicación general del mismo para después centrarse en la explicación de cada uno de los subsistemas, que tratan por grupos las variables externas que son similares. Una vez explicado el sistema se exponen los resultados y se plantean las conclusiones, para terminar proponiendo futuras líneas de trabajo.

## 1.2 Descripción del problema

El transporte por carretera ha sido desde siempre una de las principales formas de transporte a lo largo de la historia, desde los primeros carros tirados por animales a través de caminos de tierra hasta las modernas autopistas por las que circulan potentes coches. Ha contribuido al desarrollo del comercio y a la movilidad de las personas. Por ello, los métodos para el desarrollo y mejora de las redes de carreteras han sido objeto de un gran número de estudios, ya sean para mejorar la seguridad, la capacidad o la eficiencia de dichas redes.

Las administraciones públicas dedican esfuerzos para optimizar sus carreteras, desarrollando planes de actuación y mejora de sus redes. Por ejemplo, en España el Ministerio de Fomento estimó un gasto de 62.785 millones de euros al transporte por carretera dentro del PEIT 2005-2020 [20], y del mismo modo las comunidades autónomas tienen sus propios planes de actuación, como por ejemplo el Plan de Infraestructuras de Cataluña (PITC) [10].

Para saber en qué puntos de la red es más prioritario actuar en cada momento es necesario conocer cuáles son las carreteras que presentan mayores problemas tanto en su mantenimiento y seguridad como en la fluidez del tráfico, como, por ejemplo, explica el PEIT [20] en sus objetivos generales. Detectar el mal estado de una carretera o un mayor número de accidentes en ciertos puntos es algo que se puede realizar mediante mera observación.

Sin embargo, conseguir una sistematización que muestre de forma lo más fiable posible si una carretera tiene un nivel de fluidez aceptable es una labor complicada. Por ello el Transportation Research Board (TRB) definió en su Manual de Capacidad (1950) [36] el concepto de nivel de servicio, primero como una simple reflexión sobre la comodidad de los conductores, y de modo más específico en la edición de 1965 del Manual de Capacidad [37], en la que describía el nivel de servicio como una medida cualitativa descriptiva de las condiciones de circulación de una corriente de tráfico, y que tiene en cuenta factores como la velocidad, el tiempo de recorrido, la libertad de maniobra, las interrupciones del tráfico, la comodidad del usuario o la seguridad tanto activa como pasiva. Este Manual, en sus distintas ediciones, está mundialmente aceptado como manual de referencia en ingeniería del tráfico y del transporte, así como para la realización de manuales de capacidad de diversos países.

Para el cálculo del nivel de servicio concreto de cada carretera se tienen en cuenta diferentes factores en función del tipo de vía. Para carreteras de alta capacidad, como pueden ser las autopistas, el nivel de servicio se calcula en función de la intensidad del tráfico respecto a la capacidad de la vía (intensidad/capacidad). La posibilidad de adelantar en cualquier momento hace que el nivel de servicio en estas vías sea uniforme para todos los usuarios. Esto no es así en las carreteras convencionales de dos carriles ya que, tal y como explica Romana [27], la posible falta de posibilidades para adelantar provoca que haya usuarios que circulen a la velocidad que desean, pero también usuarios demorados por los vehículos más lentos.

Uno de los principales problemas generados por la demora de vehículos es el tiempo perdido en congestión, es decir, el tiempo extra que un conductor debe emplear en realizar su recorrido, y que puede causarle un mayor estrés en la conducción. Son varios

los estudios que se han realizado al respecto, como por ejemplo el que hizo la Fundación RACC para los accesos a Barcelona [13].

A partir de su edición de 1985 [38] y hasta la última edición hasta la fecha [40], el Manual de Capacidad determina los niveles de servicio en carreteras convencionales de dos carriles mediante dos factores: la velocidad media de recorrido y el porcentaje de demora en tiempo, siendo incluso este último factor el único utilizado a partir de la edición de 2000 del Manual de Capacidad [39] para carreteras en las que se considera que la velocidad no es un factor determinante para el usuario, como pueden ser carreteras turísticas o que recorren distancias significativamente cortas.

Se entiende como porcentaje de demora en tiempo al porcentaje de tiempo de recorrido en que un vehículo no puede circular a la velocidad deseada por encontrarse demorado por otros vehículos más lentos. Por lo general esta demora se estima mediante el denominado intervalo crítico, que es el tiempo de separación entre dos vehículos por encima del cuál dichos vehículos pueden considerarse aislados, es decir, que su velocidad no está influida por ningún otro vehículo. Si esa separación es menor, el vehículo posterior se considera demorado.

No existe ningún valor para el intervalo crítico que esté aceptado de forma extendida. El valor propuesto por el TRB ha ido variando a lo largo de las distintas ediciones del Manual de Capacidad. Además hay un gran número de estudios al margen del Manual de Capacidad que buscan los valores más adecuados en función de diferentes criterios, obteniendo valores muy diferentes según el criterio considerado como principal.

Calcular un intervalo para determinar si un vehículo está aislado es fácil: según Blank [3], si se suponen independientes, las llegadas de vehículos a una sección en un tiempo  $t$  seguirán una distribución tipo Poisson, y el tiempo intersucesos, que será el intervalo, seguirá una distribución exponencial.

Sin embargo en la realidad unos vehículos influyen en otros en función de sus velocidades, y esto provoca la formación de caravanas en los momentos en los que no es posible adelantar. Cuanto más se acrecenta este fenómeno, menos fiable es el método de cálculo del intervalo que supone independientes las llegadas de vehículos.

Por este motivo en muchos modelos teóricos se recurre a dividir el tráfico en dos poblaciones distintas: los vehículos libres, que son los que circulan a la velocidad que desean, y los demorados, que son los que ven su velocidad reducida a causa del vehículo que les precede ([5], [14]). Aún así, el número de factores que deben ser tenidos en cuenta en la práctica es tan grande que la división en dos poblaciones resulta insuficiente.

En el presente estudio se considerará que los vehículos pueden encontrarse en cuatro estados diferentes, tal como propone Romana [27] basándose en las definiciones de Valdés [41], Gullón [15] y Rozic [29]. Estos estados son:

- 1) **Vehículo aislado:** no está influido por ningún otro vehículo, por lo que el conductor elige la velocidad con total libertad.
- 2) **Vehículo libre:** escoge su velocidad libremente, pero debe tenerse en cuenta para la situación de otros vehículos. Puede ser que vaya reteniendo a los vehículos posteriores, o que esté muy cerca del vehículo anterior, pero éste vaya más rápido. Este caso se daría si el vehículo acaba de ser adelantado, por lo que el intervalo con el anterior sería muy pequeño, pero aún así circularía a la velocidad que desea.
- 3) **Vehículo en caravana:** su velocidad es menor de la que llevaría en caso de estar aislado, puesto que está frenado por el que lleva delante. Sin embargo, o bien no desea adelantarlo o bien no puede hacerlo por motivos de mecánica. Este caso se da cuando la velocidad del vehículo es muy próxima a la del precedente, y el conductor considera que no merece la pena adelantar.
- 4) **Vehículo demorado (o en cola):** su velocidad es menor de la deseada a causa del vehículo que lleva delante, y desea adelantarlo, pero no puede hacerlo bien por estar circulando por una zona con prohibición de adelantar, bien por haber en el carril contrario un tráfico tal que impide el adelantamiento.

Quizá el mayor problema para la determinación del estado de un vehículo es que la percepción de la situación de la vía es distinta para cada conductor. Por ejemplo, los factores que un conductor analiza a la hora de saber si tiene posibilidad de adelantar no son siempre los mismos, ni siquiera para el mismo conductor. Una longitud del espacio libre en el carril contrario para adelantar que a un conductor le puede parecer suficiente, a otro le puede parecer demasiado pequeña, o incluso la misma distancia le puede parecer suficiente o no al mismo conductor en función de, por ejemplo, el estado de conservación de la vía. Habrá conductores que guarden una distancia con el precedente mucho mayor que otros, y conductores que, aún sin deseo de adelantar, mantendrán una distancia menor con el coche precedente.

Como se puede comprobar, la determinación de la demora de un vehículo, y por tanto del nivel de servicio de una vía, depende de multitud de factores que son completamente subjetivos. Los métodos actuales que calculan la demora mediante intervalos apenas tienen en cuenta subjetividad ninguna, suponiendo igual el comportamiento de todos los conductores.

En este estudio se propone un método de cálculo del estado de demora de un vehículo que tiene en cuenta la subjetividad de la percepción humana y del proceso de toma de decisiones. Para ello se emplean mecanismos de razonamiento aproximado, y más concretamente lógica difusa, o lógica fuzzy.

En la mayoría de las ocasiones, el ser humano percibe la información de forma poco precisa. Por ejemplo, no observa si un coche se le acerca a 114 km/h, sino que observará que el coche se acerca “rápido”, o aún más imprecisamente “bastante rápido”. Del mismo modo, la idea que tendrá del estado de la carretera será “bueno”, “muy bueno” o quizá “excelente”. Además, la carretera que a mucha gente puede parecerle “excelente” otros pueden encontrarla simplemente “buena”.

La lógica fuzzy modela esta percepción imprecisa mediante la utilización conjuntos borrosos, conjuntos en los que la frontera no es precisa, igual que no es precisa la pertenencia de una variable a estos conjuntos. A cada variable se le asigna un grado de pertenencia a cada conjunto, pudiendo estar así multivaluada, y pertenecer 0,3 a un conjunto y 0,6 a otro. A partir de estas pertenencias se definen reglas mediante los conectores lógicos AND, OR y NOT que realizarán el proceso de decisión.

Así, mediante el uso de esta técnica de razonamiento aproximado, este estudio trata con la subjetividad de los conductores y ofrece un cálculo de la demora que tiene en cuenta algunos factores no medibles mediante el método de intervalo crítico, como la percepción de la seguridad por parte del conductor. Además el cálculo no se centra en sólo uno o dos factores, sino que trata todos ellos en conjunto, y permite a través de una sencilla interfaz gráfica comprobar cómo afecta la modificación de cada uno de ellos al estado de circulación del vehículo.



## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Cálculo de la demora

Uno de los factores principales para la obtención de los niveles de servicio de las carreteras convencionales es el porcentaje de tiempo que un vehículo circula demorado. Para el cálculo de la demora se utiliza habitualmente el intervalo crítico, es decir, un tiempo fijo de separación entre dos vehículos por debajo del cual se considera demorado al vehículo que va detrás. Para la determinación del valor del intervalo crítico se han propuesto en la literatura muchos y muy diversos métodos en función del criterio principal que se elige para su obtención. Algunos de estos criterios son el tiempo de reacción, la velocidad del vehículo seguidor, la posibilidad de adelantar, el intervalo con posibilidad de adelantamiento en el sentido contrario, el espaciamiento entre vehículos o, más habitualmente, diferentes criterios estadísticos.

La elección de uno u otro parámetro principal a la hora de determinar el intervalo crítico influirá directamente en su valor, llegando a proponerse valores tan dispares como 1,2 segundos y 11 segundos. Es tan amplia la discusión acerca de este tema que en este apartado tan solo se mostrarán algunos ejemplos de diferentes valores de intervalos críticos según cada criterio.

Athol [2] eligió un intervalo de 2,1 segundos de entre cuatro intervalos distintos (1,2; 1,5; 2,1 y 2,7) teniendo en cuenta la importancia del tiempo de reacción y de respuesta.

Un gran número de autores han optado por criterios basados tanto en el intervalo como en la velocidad. La O.C.D.E. [22] define como vehículo en cola aquel que tiene una distancia menor de 5 segundos con el que le precede y además la diferencia de velocidades entre ambos es menor a 10 km/h. Siguiendo criterios similares, Hoban [17] encontró interferencias entre los vehículos en intervalos de hasta 6 segundos, y Pahl [24] hasta 8, aunque éste último propone valores de intervalo de entre 4 y 5 segundos.

La mayor parte de las investigaciones realizadas en torno al cálculo del intervalo crítico optan por criterios estadísticos, buscando una distribución teórica que se adapte lo mejor posible a la distribución real, y buscando después qué valores de intervalo eran característicos. Entre estas investigaciones pueden citarse las de Branston [4], que propone valores de intervalo entre 3,75 s y 4 s; de Miller [19], que propone valores de 8 s al ajustar la distribución de intervalos a una exponencial negativa; o de Buckley [5], que observó interferencias alrededor de 4 s.

Puede destacarse en este último grupo a Ovuworie et al. [23], que además de los vehículos aislados y los vehículos en cola distinguen también una tercera población, la de los casos ambiguos. Sus valores de intervalo son de 1,4 a 2 segundos para los vehículos en cola, y de 2,8 a 3,8 segundos para los vehículos aislados. Aquellos vehículos por debajo del primer intervalo circularán demorados. Los que circulen por encima del segundo estarán aislados. Los vehículos que estén entre ambos intervalos son casos ambiguos que o bien acaban de dejar una cola, o bien acaban de incorporarse a ella.

Los criterios que tienen en cuenta el intervalo con posibilidad de adelantamiento en el sentido contrario tratan de obtener el tiempo mínimo de distancia entre vehículos que debe haber en el carril contrario para que se pueda realizar un adelantamiento. Siguiendo este criterio realizaron sus investigaciones, entre otros, Corupe et al. [9], que proponen 25 segundos como intervalo que permite un adelantamiento, o Fletcher [12], que propone 32 segundos.

Además de los ejemplos citados para la determinación del intervalo crítico, hay otros aspectos de las investigaciones en torno a los intervalos críticos que resultan interesantes para este estudio. Como se ha citado anteriormente, Valdés, Gullón, Rozic y Romana, en sus respectivos trabajos, distinguen cuatro estados distintos en los que puede encontrarse un vehículo, en lugar de los dos estados considerados habitualmente o los tres de Ovuworie et al. Estos estados son: vehículo aislado, vehículo libre, vehículo en caravana y vehículo en cola o demorado.

También Romana habla en su tesis doctoral [27] sobre la influencia que pueden tener en el conductor diferentes factores a la hora de considerar su vehículo demorado. Cita la

seguridad en la conducción como un factor que puede hacer reducir o aumentar los intervalos sin ello afecte considerablemente en la demora. Considera la velocidad como un factor importante en la determinación del nivel de servicio, pero resalta que una restricción de velocidad no implica necesariamente una disminución del nivel de servicio, y cita como ejemplo cómo algunos conductores prefieren seguir a otros vehículos si circulan por la noche, aunque este vehículo restrinja su velocidad. Así mismo afirma que “un usuario tiene una velocidad deseada y un rango de velocidades aceptables, y mientras que esté dentro de este rango no se considera malo el nivel de servicio”.

## 2.2 Conjuntos fuzzy

En la teoría de conjuntos tradicional, los conjuntos clásicos (conocidos como *crisp*) sólo permiten dos opciones: un elemento puede pertenecer o no pertenecer a un conjunto. Estos conjuntos *crisp* pueden superponerse unos con otros, pudiendo un elemento pertenecer a más de un conjunto. Pero tienen sus fronteras perfectamente definidas, por lo que un elemento respecto a un conjunto o bien pertenece, o bien no pertenece.

En la realidad hay multitud de situaciones en la que los límites de muchos conjuntos no están completamente claros, sino que tienen fronteras difusas, dependientes de la subjetividad y generalmente representadas por etiquetas lingüísticas. Por ello, Lofti A. Zadeh [43] propuso la teoría de conjuntos difusos, o conjuntos fuzzy. Un conjunto fuzzy no tiene su frontera precisamente definida, sino que cada elemento puede pertenecer a él en un determinado grado de pertenencia, que se caracteriza por una función de pertenencia, y que puede tomar valores reales dentro del intervalo  $[0,1]$ , siendo los límites de este intervalo los que indicarían que un elemento no pertenece al conjunto (0) o pertenece por completo (1).

Un ejemplo típicamente utilizado para ilustrar el concepto de los conjuntos difusos es el de la altura de las personas. Supongamos que, según la teoría clásica, una persona se considera alta a partir de una estatura de 185 cm. En este caso, alguien que mida 190 cm se consideraría exactamente igual de alto que alguien que mida 215 cm, puesto que en ambos casos la pertenencia de las personas al conjunto *crisp* “alto” sería 1. Por el contrario, alguien que mida 184 cm nunca sería considerado como una persona alta, ya que su pertenencia al conjunto *crisp* “alto” es 0.

Este mismo problema tratado mediante conjuntos fuzzy se resuelve de manera mucho más acorde con la realidad. La pertenencia de la persona de 190 cm al conjunto fuzzy

“alto” sería de, por ejemplo, 0,85, mientras que de la persona de 215 cm sería de 1. Por otro lado, la persona de 184 cm podría tener una pertenencia de 0,15 al conjunto fuzzy “alto”.

Como puede observarse, mientras que tratado mediante conjuntos *crisp* una persona de 190 cm y una de 215 cm serían igual de altos, y una de 184 cm no sería considerada alta; usando conjuntos fuzzy tanto la de 190 cm como la de 215 se consideran altos, pero queda patente la diferencia de altura entre ambos. Además, la persona de 184 cm tiene una pequeña consideración como “alto”.

Que las diferencias entre los grados de pertenencia a un conjunto fuzzy modelen correctamente las diferencias reales entre los elementos depende de la correcta definición de la función de pertenencia de cada conjunto.

## 2.3 Razonamiento aproximado y lógica fuzzy

La lógica tradicional estudia razonamientos mediante la utilización de proposiciones que pueden ser ciertas o falsas. Está estrechamente relacionada con la teoría de conjuntos, ya que cada operación entre conjuntos (intersección o unión, por ejemplo) tiene su correspondencia directa en la lógica proposicional (conjunción o disyunción).

Del mismo modo que la lógica tradicional tiene su correspondencia con la teoría clásica de conjuntos, Zadeh [44] y [45] propuso, basándose en la lógica multivaluada de Łukaziewicz, una lógica correspondiente a los conjuntos fuzzy, y que sería la base del razonamiento aproximado: la lógica fuzzy.

La lógica fuzzy utiliza los operadores tradicionales de la lógica clásica, conjunción, disyunción y negación (AND, OR y NOT), aplicados, junto con el grado de pertenencia a cada conjunto, a la teoría de conjuntos fuzzy.

Una vez definidos los conjuntos y sus funciones de pertenencia que modelan cada etiqueta lingüística, se definen mediante el uso de los operadores una serie de reglas de inferencia de la forma:

Si (X es A) AND (Y es B) entonces (Z es C)

Donde A, B y C son etiquetas lingüísticas, X e Y son variables de entrada, y Z es la salida.

Debido al carácter impreciso de la lógica fuzzy, el grado de pertenencia de cada variable de entrada a cada conjunto será distinto, y por tanto la salida Z de cada regla tendrá un grado de pertenencia a C que dependerá de la interpretación que se haga de la intersección, la disyunción y la negación. Una interpretación habitual es la propuesta inicialmente por Zadeh:

$$x \text{ AND } y \rightarrow \min(x, y)$$

$$x \text{ OR } y \rightarrow \max(x, y)$$

$$\text{NOT } x \rightarrow 1 - x$$

Sin embargo, existen muchas más interpretaciones para cada conectiva.

Además, cada variable de entrada puede pertenecer a varios conjuntos, y por tanto disparar distintas reglas simultáneamente, por lo que será necesario también concretar las diferentes pertenencias de la salida en una sola. Un método posible es aplicar la función OR a las salidas, pero existen muchos otros.

Un ejemplo que ilustra el razonamiento aproximado de la lógica fuzzy y sus ventajas frente a la lógica clásica es el siguiente, basado en el ejemplo mostrado en [11]:

Un entrenador de baloncesto desea seleccionar para su equipo jugadores que sean altos y buenos tiradores. La solución clásica es: altura > 185 cm y encestar 13 de 16 tiros a canasta. Se obtienen los resultados mostrados en la tabla 1, tomando a los candidatos F e I, pero dejando fuera a E, que tuvo un pleno de aciertos y es sólo ligeramente más bajo que el mínimo de altura buscado.

Utilizando la lógica fuzzy, se modelarían, por ejemplo, los conjuntos fuzzy “alto” y “bajo” para la variable altura, y los conjuntos fuzzy “bueno” y “malo” para la variable tirador. Posteriormente se definiría la regla

*Si (alturaJugador es ALTO) AND (aciertoJugador es BUENO) entonces (valor es RANKING)*

Cada jugador tendría un grado de pertenencia en cada conjunto. Al evaluar la regla, aplicando AND como, por ejemplo, el producto de los grados de pertenencia a ambos conjuntos, obtendríamos los resultados de la tabla 2, que indican el nivel de pertenencia al conjunto difuso “ránking”.

JUGADOR	ALTURA (cm)	ACIERTO (16 tiros)	SOLUCIÓN
A	167	12	0
B	169	6	0
C	175	15	0
D	179	12	0
E	184	16	0
F	186	13	1
G	187	12	0
H	190	10	0
I	200	13	1

TABLA 1 – Entrenador de baloncesto, solución clásica

JUGADOR	ALTURA (cm)	ACIERTO (16 tiros)	SOLUCIÓN
A	167	12	0
B	169	6	0
C	175	15	0,33
D	179	12	0,50
E	184	16	0,87
F	186	13	0,75
G	187	12	0,50
H	190	10	0
I	200	13	0,75

TABLA 2 – Entrenador de baloncesto, solución fuzzy

En la tabla 3 se pueden ver los resultados ordenados y comparando entre ambas soluciones. Se comprueba que el método de razonamiento aproximado mediante lógica fuzzy evita dejar fuera a un gran tirador que tiene una altura aceptable, tal como habría hecho un entrenador real, mientras que el método clásico lo habría dejado fuera. Además, en el método fuzzy no se aceptan o rechazan los jugadores, sino que se ofrece una graduación intermedia.

En la mayoría de los casos será necesario que la salida sea un número *crisp*, y no un valor fuzzy. Para esto se utiliza un proceso llamado defuzzyficación, que consiste en aplicar un método de transformación del valor del conjunto fuzzy de salida en un número *crisp*.

JUGADOR	ALTURA (cm)	ACIERTO (16 tiros)	SOLUCIÓN FUZZY	SOLUCIÓN CLÁSICA
E	184	16	0,87	0
F	186	13	0,75	1
I	200	13	0,75	1
D	179	12	0,50	0
G	187	12	0,50	0
C	175	15	0,33	0
A	167	12	0	0
H	190	10	0	0
B	169	6	0	0

TABLA 3 – Entrenador de baloncesto, ránking valorado

## 2.4 Lógica fuzzy aplicada al control de flujo de tráfico

La lógica fuzzy se ha aplicado en diferentes estudios al control del tráfico. Son muchas las investigaciones que tratan de obtener sistemas de gestión y ordenación óptimas del tráfico mediante sistemas fuzzy. Pappis y Mamdani [25] fueron los primeros en aplicar la lógica fuzzy para resolver problemas relacionados con el tráfico, al diseñar un sistema de control de tráfico en intersecciones con semáforo. Muchos más autores han trabajado posteriormente en el control del tráfico en intersecciones con semáforo.

Chang and Shyu [6] produjeron un sistema experto fuzzy para la evaluación de la necesidad de colocar un semáforo en una intersección, teniendo en cuenta volúmenes de tráfico, demoras en horas punta, datos sobre accidentes en el cruce, numero de carriles en las calles de la intersección y cercanía de colegios.

Teodorović et al. [35] aplicaron también técnicas fuzzy para el control inteligente de intersecciones.

Menos relacionado con este estudio, pero muy importante en el control de flujos de tráfico, es el problema de la elección de ruta. Teodorović y Kikuchi [34] utilizaron por primera vez técnicas fuzzy para la elección de ruta complejas.

La aplicación de la lógica fuzzy a los centros de control de tráfico en vías urbanas de alta capacidad también ha generado mucha literatura. Una muestra de ello son los estudios de Sasaki y Akayima [30][31][32], de Chen et al. [8] o de Hegyi et al. [16].

En cuanto a temas con relación directa con este estudio la aplicación de la lógica fuzzy es mucho menor. Chakroborty y Kikuchi [7] aplican la teoría de conjuntos fuzzy al cálculo del nivel de servicio en autopistas. Modelan cada nivel de servicio como un conjunto fuzzy, en lugar de las propuestas tradicionales que definen conjuntos *crisp* con fronteras fijas en función de los parámetros de entrada y de las condiciones presupuestas como fijas, pero inciertas en la práctica. Para ello representan mediante números fuzzy muchos de los parámetros de entrada, como capacidad ideal de la vía, distancia de visión, volumen de tráfico o distancia entre coches, pudiendo así definir niveles de servicio fuzzy. Además ponen de manifiesto la variabilidad de algunos parámetros en función de la percepción individual de cada conductor, como puede ser el espacio mínimo necesario en el carril adyacente para que un conductor considere posible cambiar de carril. Para modelar estos factores utilizan el método de razonamiento aproximado.

Murat [21] propuso y comparó técnicas fuzzy y de redes neuronales para la obtención de la demora de vehículos en intersecciones. En su estudio tuvo en cuenta el volumen de tráfico, la cola media, el periodo en el que el semáforo está en rojo y las condiciones del entorno.

No se han encontrado investigaciones que apliquen lógica fuzzy al cálculo de demora en carreteras convencionales.

En [33] puede encontrarse un amplio estudio del estado del arte en este tema hasta la fecha de su publicación.

## 2.5 Xfuzzy

Xfuzzy es un entorno de desarrollo de sistemas fuzzy basados en inferencia desarrollado por el Instituto de Microelectrónica de Sevilla, y publicado bajo licencia GNU [18]. Está compuesto de diferentes herramientas que cubren las diferentes fases del proceso de



diseño de sistemas fuzzy. Sus principales características son su capacidad para desarrollar sistemas complejos y la flexibilidad de permitir al usuario extender el conjunto de funciones disponibles.

Todas las herramientas usadas para cada fase del proceso tienen una interfaz gráfica que hace sencillo el uso de todas ellas. Se puede ejecutar y utilizar cada herramienta independientemente, pero también ofrece una interfaz gráfica general desde la que se puede acceder fácilmente a cada herramienta.

El nexo de unión entre todas las herramientas es el lenguaje XFL3, propio de Xfuzzy. Es un lenguaje flexible y potente, que permite expresar relaciones muy complejas entre variables fuzzy a través de bases de reglas jerárquicas, conectivas fuzzy definidas por el usuario, modificadores lingüísticos, funciones de pertenencia y métodos de defuzzyficación.

Además de herramientas gráficas para la definición del sistema; de simulación, monitorización y representación gráfica para la fase de verificación; y otras que permiten la aplicación de distintos algoritmos para la sintonización, Xfuzzy ofrece también una fase de síntesis que genera el código del sistema en lenguajes de alto nivel como Java, C o C++.

Xfuzzy en su versión 3.0 ha sido la herramienta utilizada para las distintas fases del presente proyecto.



### 3. DESARROLLO DEL SISTEMA

El problema del cálculo de la demora en carreteras convencionales de dos carriles es complejo. La percepción del estado de demora de cada vehículo es distinta para cada conductor. Mientras que un conductor puede sentir una gran frustración al no poder adelantar al vehículo que le precede y que le hace reducir su velocidad, otro conductor distinto en exactamente la misma situación puede sentirse cómodo circulando a una velocidad menor de la prevista, y en ningún caso tendrá intención de adelantar.

El deseo de adelantar, la elección de un momento para adelantar de forma segura o la seguridad del entorno son parámetros que influyen directamente en la sensación de demora de un conductor, y que dependen por completo de la percepción subjetiva individual de cada usuario de la vía.

En este trabajo se ha desarrollado un sistema que modela todos estos factores subjetivos y a partir de ellos calcula el estado de demora del vehículo. Esto se ha hecho mediante razonamiento aproximado a través de lógica fuzzy.

## 3.1 Toma de datos

Para la elección de las variables que deberían tenerse en cuenta y que formarían la entrada del sistema se utilizó una combinación de diferentes métodos.

Primero se recogieron diversos factores propuestos en la literatura, ya sea cómo parámetros utilizados en sistemas similares, parámetros utilizados para el cálculo de la demora mediante intervalos críticos, o simplemente propuestos en ejemplos.

Romana [27] nombra factores como la seguridad, el deseo de adelantar, la separación entre vehículos, las condiciones ambientales (día o noche, lluvia o seco), el tipo de vehículo, el espacio disponible para adelantar en el carril contrario, además de algunos otros habitualmente usados en el cálculo de la demora. Romana y López [28] también hablan del porcentaje de vehículos pesados que circulan por la vía.

La mayoría de factores usados por Murat [21] no son aplicables a este sistema, ya que resuelve el problema de la demora en intersecciones. Sin embargo uno de los factores que utiliza, las condiciones del entorno, son aplicables también al caso de las carreteras convencionales.

Valverde et al. [42] desarrollaron un sistema fuzzy de prevención de riesgos en carretera en el que tomaban en cuenta distintos valores que agrupaban para calcular el nivel de riesgo a partir de tres sistemas fuzzy diferentes:

- Entorno: Día/noche, tiempo climatológico, tipo de vía, longitud de la vía
- Conductor: Capacidad visual, cansancio, horas de sueño, motivación
- Coche: Luces, ruedas, frenos, tiempo desde la última revisión, kilómetros, edad del coche

Factores como la velocidad del vehículo seguidor, el espacio disponible en el carril contrario o el espaciamiento entre vehículos son factores que han sido utilizados como principales en varios trabajos para el cálculo del intervalo crítico.

A estos factores se les añadieron algunos otros con los que se realizó una encuesta que fue completada por usuarios de carreteras convencionales. En ella se citaban diferentes factores al usuario para que éste los valorase en función de la importancia que le da a la hora de realizar o no un adelantamiento, así como algunas características personales del usuario cuando se encuentra al volante.

Este método de adquisición del conocimiento para el posterior modelado de los datos a través de encuestas fue utilizado con éxito en trabajos como los de Akiyama y Tsuboi [1] o Pattnaik y Ramesh Kumar [26].

En el apéndice A puede consultarse la encuesta utilizada.

## 3.2 Definición del sistema

Una vez obtenidos los datos que permitían escoger las variables de entrada adecuadas se realizó el diseño general del sistema.

Se optó por definir siete subsistemas fuzzy MISO (entradas múltiples, salida única; del inglés *Multiple Input, Single Output*) distintos de modo que las salidas de unos sirvieran como entradas de otros para poder ir modelando adecuadamente cada factor, hasta conseguir finalmente dos de los datos necesarios para obtener el estado de demora del vehículo: la posibilidad de adelantar y el deseo de adelantar del conductor. Estos dos datos serían, junto con las velocidades del vehículo estudiado y de su precedente, las entradas de un sencillo sistema nítido que calcula finalmente el estado de demora.

Por tanto, el sistema general consta de un total de siete subsistemas fuzzy y un subsistema nítido, y de 23 variables de entrada distintas.

Cada uno de los subsistemas fuzzy trata un grupo de variables para obtener la información sobre los factores que realmente son tenidos en cuenta para calcular la demora: la posibilidad de adelantar y el deseo de adelantar. Dos de los subsistemas fuzzy (PosibilidadAd y DeseoAd) se encargan de calcular cada uno de estos factores, que tendrán como salidas posibles “sí” o “no”.

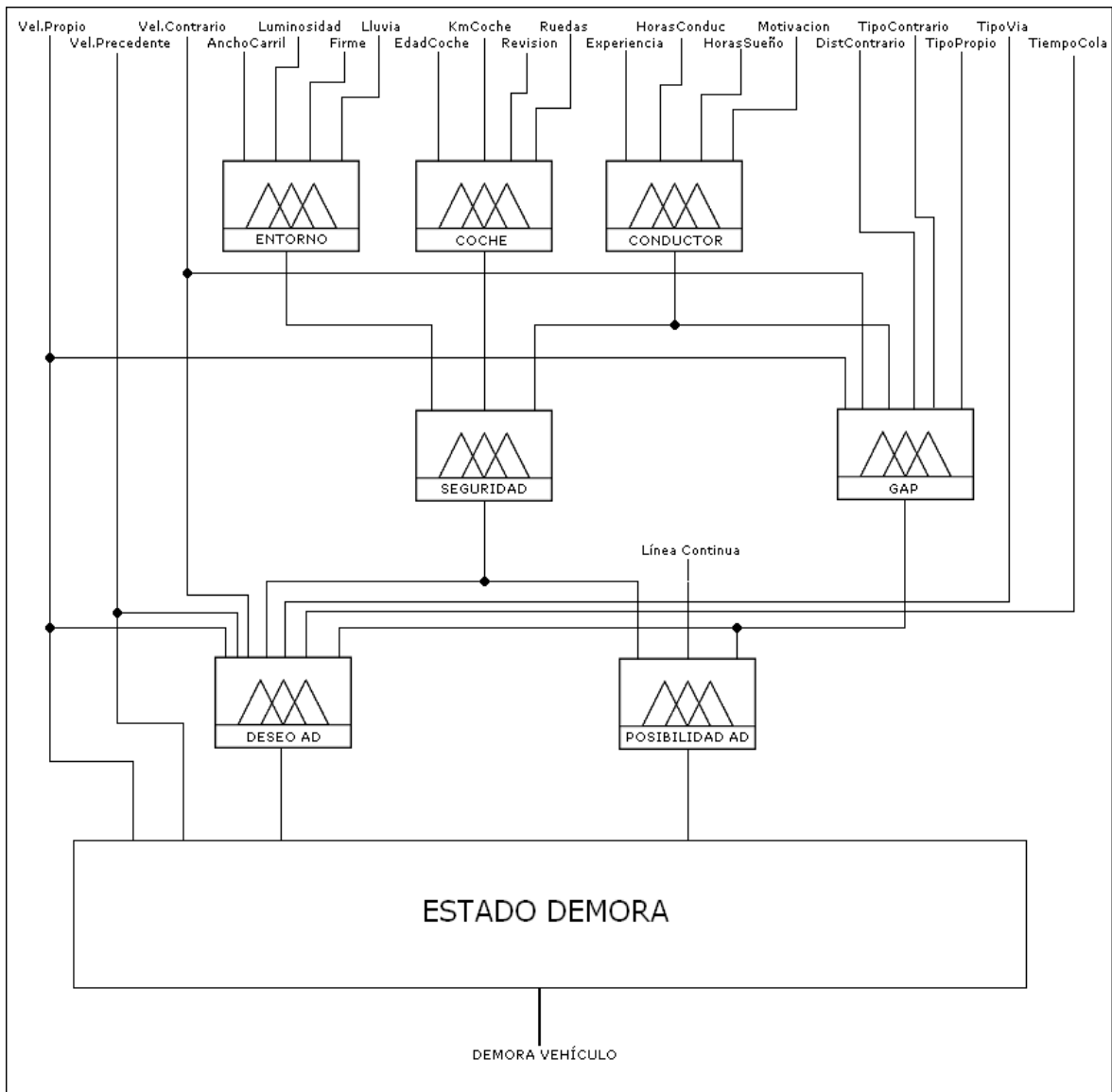
El subsistema DeseoAd necesita saber, además de variables de entrada al sistema general, la sensación de seguridad que tiene el usuario. Esta se calcula mediante otro subsistema fuzzy (Seguridad), cuya salida es entrada de DeseoAd.

Para el cálculo de la seguridad se sigue la idea propuesta por Valverde et al. [42] y se tienen en cuenta independientemente la calidad del entorno, el estado del coche y la capacidad del conductor, que se calculan mediante los subsistemas fuzzy Entorno, Coche y Conductor. Las salidas de estos subsistemas son las únicas tres entradas del subsistema Seguridad, y sus entradas son variables de entrada del sistema general.

Por otro lado, el subsistema PosibilidadAd necesita conocer si existe línea continua en el tramo de carretera, que es una variable de entrada del sistema general. También necesita la percepción de seguridad del conductor, que obtiene de la salida del subsistema Seguridad, y la estimación que el conductor realiza sobre si el espacio en el carril contrario es suficiente para adelantar. Este último dato se obtiene mediante el subsistema fuzzy Gap, que tiene en cuenta, además de varias entradas del sistema general, la capacidad del conductor calculada en el subsistema Conductor.

Por último, las salidas de PosibilidadAd y DeseoAd se usarán junto con las velocidades del vehículo estudiado y del precedente como entrada del subsistema nítido EstadoDemora, que indicará si el vehículo se encuentra demorado, en caravana, libre o aislado.

En la figura 1 se muestra el diseño general del sistema.



**Figura 1** – Diseño general del sistema

En la evaluación de las reglas de inferencia se ha escogido en todos los casos la t-norma producto para el operador AND. Se eligió esta t-norma porque ofrece el escalado (*scaling*) de la función de pertenencia frente al simple recorte (*clipping*) de la t-norma mínimo, pudiendo así ajustar mejor el resultado. En el caso del operador NOT se eligió (1-x).

Las reglas tienen inicialmente entre 3 y 7 variables, dependiendo del número de entradas de cada sistema. Cada variable de entrada puede tener desde 2 posibles valores en casos como líneaContinua, que puede ser sí o no, hasta 4 en TipoVehículo o Firme. Por lo general, la mayoría de las variables tendrán 3 posibles valores, que equivaldrán a situaciones mala, media y buena.

La combinación de todas las variables con todos sus posibles valores producen árboles de decisión que llegan hasta las 1.296 posibilidades en el caso del subsistema DeseoAd o las 972 del subsistema Gap. Sin embargo, no fue necesario definir números tan grandes de reglas, ya que en muchas ocasiones con la definición de sólo algunas de las variables era posible podar el árbol. Por ejemplo, en el caso de DeseoAd la regla

Si (*seguridad* es POCA) AND (*VelocPrec* es RAPIDA) entonces (*deseoAd* Es NO)

nos permite definir con una única regla las 144 posibilidades resultantes de combinar poca seguridad y velocidad del precedente rápida con todas las opciones de TipoPropio, TipoPrecedente, TipoVia, TiempEnCola y VelocPropio.

Por el contrario, habrá casos en los que sea necesario concretar los valores de todas las variables para obtener el valor de salida adecuado. Es el caso de

Si (*seguridad* es MEDIA) AND (*VelocPrec* es RAPIDA) AND (*TipoPrec* es GRANDE) AND  
(*TipoPropio* es GRANDE) AND (*TipoVia* es PRINCIPAL) AND (*TiempoEnCola* es POCO) AND  
(*VelocPropio* es RAPIDA) entonces (*deseoAd* Es NO)

también del subsistema DeseoAd, en el que es necesario definir los valores de las siete variables.

Las reglas de todos los sistemas se evalúan en paralelo mediante la implicación de Mamdani, salvo en los casos de los dos sistemas con salidas binarias, PosibilidadAd y DeseoAd, que se utiliza Sugeno.

A continuación se explica el funcionamiento de cada uno de los subsistemas, las variables de entrada que utilizan y por qué las utilizan, los conjuntos fuzzy usados para cada variable y sus funciones de pertenencia.

### 3.2.1 Subsistema Entorno

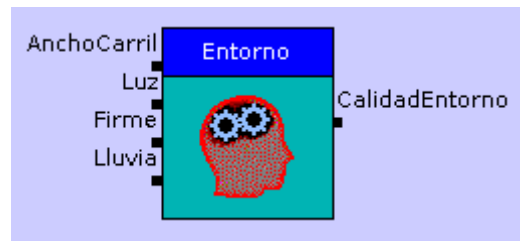


Figura 2 – Subsistema Entorno

Este subsistema tiene en cuenta distintas distintas variables del entorno externo ajeno a la circulación a partir de las cuales genera el nivel de calidad del entorno, evaluándolo con un valor entre 1 y 10, siendo 1 la peor calidad y 10 la mejor.

Tiene como variables de entrada AnchoCarril, Luz, Firme y Lluvia, todas ellas entradas directas del sistema general provenientes de fuentes externas. Su salida es CalidadEntorno.

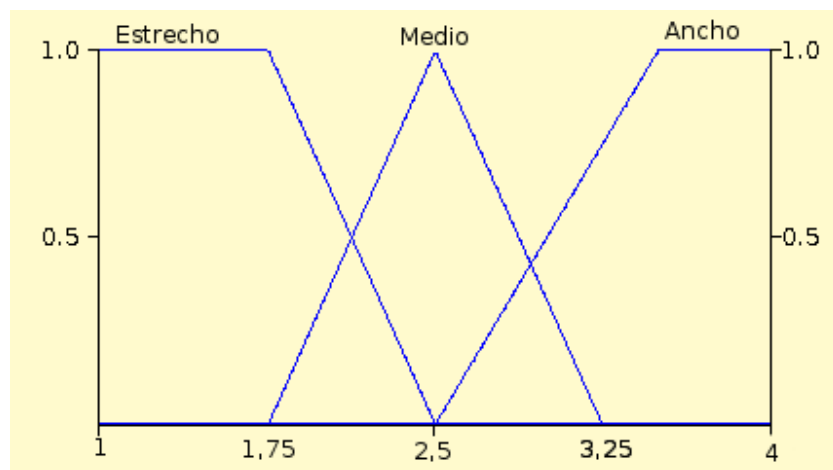


Figura 3 – AnchoCarril

- **AnchoCarril:**

Un carril demasiado estrecho provoca que el conductor tenga menos espacio por el que guiar el coche correctamente, y hace que los vehículos de uno y otro carril circulen demasiado próximos entre sí. Con el aumento de la anchura del carril estos problemas se atenúan.

Su rango de valores es [1, 4], que representan los metros que el carril tiene de ancho. Tiene tres conjuntos fuzzy, los dos extremos trapezoidales (**ancho** y **estrecho**) no simétricos entre sí, y el central (**medio**) triangular. Su función de pertenencia puede verse en la figura 3.



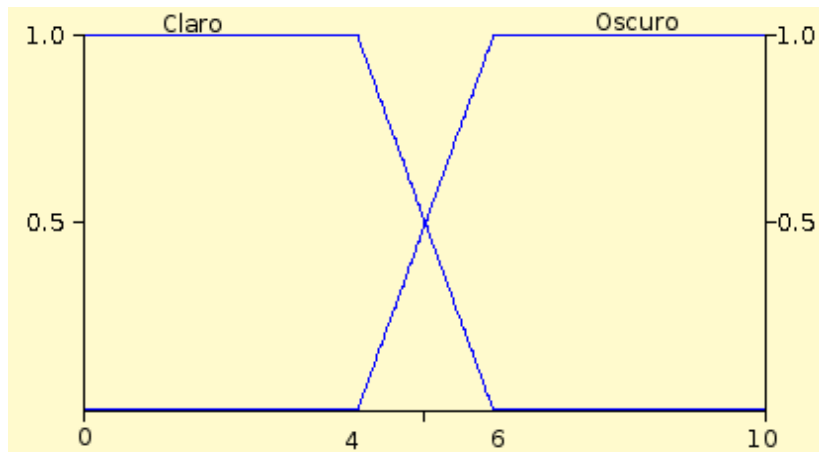


Figura 4 – Luz

- **Luz:**

La cantidad de luz ambiental influye directamente en la visibilidad del conductor, convirtiéndose en uno de los principales factores a tener en cuenta a la hora de determinar la calidad de las condiciones del entorno. En este caso se tiene en cuenta no tanto lo soleado o nublado que esté el día, sino la diferencia entre día y noche, y los periodos de amanecer y anochecer.

Sus valores están entre  $[0, 10]$ , siendo 0 el nivel máximo de luz, y 10 la máxima oscuridad. Sus funciones de pertenencia son dos funciones trapezoidales para representar los conjuntos **claro** y **oscuro**. Estas funciones se muestran en la figura 4.

- **Firme:**

Una calzada en mal estado, bacheada o con grava suelta provoca una mala adherencia de los neumáticos, e incluso hace menos sencillo el guiado del coche si el firme está realmente deteriorado.

Se han definido cuatro funciones de pertenencia para las etiquetas **muy malo**, **malo**, **bueno** y **muy bueno**, que se encuentran entre  $[0, 10]$ , donde 0 es el firme en peor estado posible y 10 el mejor. La representación gráfica de las funciones es la mostrada en la figura 5.

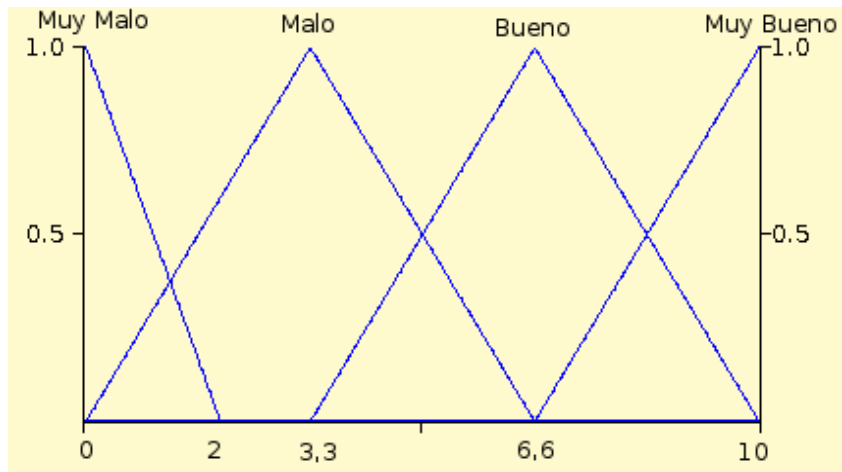


Figura 5 – Firme

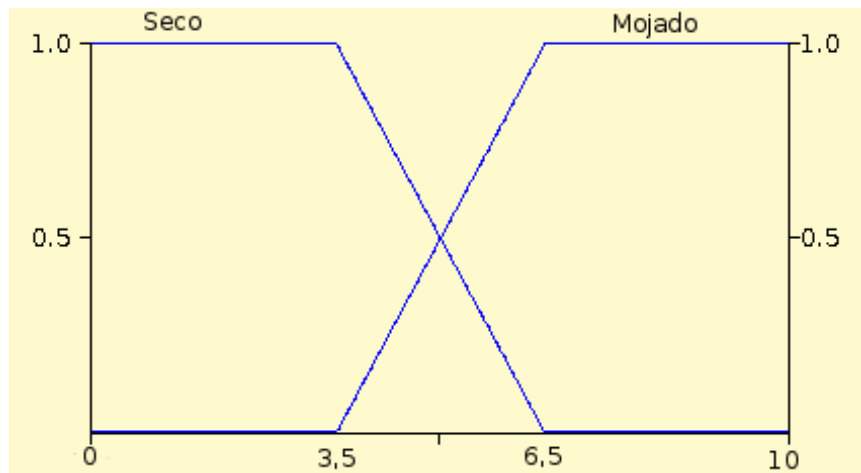


Figura 6 – Lluvia

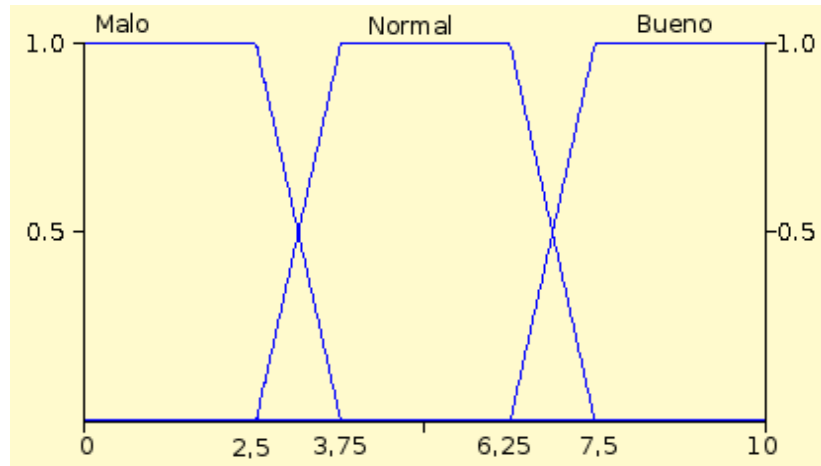
- **Lluvia:**

Un suelo deslizante es probablemente uno de los mayores peligros a la hora de circular por una carretera. Muestra de ello es que ha sido el factor valorado como más tenido en cuenta por los usuarios encuestados.

Los valores de entrada de esta variable pueden oscilar entre [1, 10], siendo mayor el valor cuanto más mojada está la calzada. Tiene dos conjuntos fuzzy diferentes, **seco** y **mojado**, que se han modelado mediante dos funciones trapezoidales mostradas en la figura 6.

- **CalidadEntorno:**

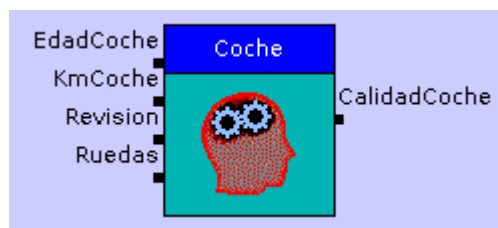
Es la salida del subsistema Entorno. Ofrece un valor entre 0 y 10 que evalúa la calidad del entorno tal y como es percibida por el conductor. Se han utilizado tres funciones trapezoidales como funciones de pertenencia, que se corresponden con niveles de calidad **malo**, **medio** y **bueno**, según se puede observar en la figura 7.



**Figura 7** – Calidad entorno

Entorno es un sistema de tipo Mamdani que se ha defuzzyficado mediante el método del centro de gravedad.

### 3.2.2 Subsistema EstadoCoche



**Figura 8** – Subsistema Coche

Aunque son muchos los factores que pueden afectar a la calidad del coche, no todos ellos están patentes para el conductor. Para este subsistema se han elegido los factores que pueden influir en la percepción que un conductor tiene del estado de su coche. Estas variables son la edad del coche, los kilómetros del mismo, el tiempo transcurrido desde la última revisión y el estado de las ruedas, con las que se calcula la salida, CalidadCoche.

- **EdadCoche:**

Además de la relación que habitualmente hay entre el número de kilómetros y la edad del coche (los coches con más edad suelen tener más kilómetros), un coche antiguo genera en muchos conductores la impresión de tener peores prestaciones que el resto de vehículos más nuevos que circulan junto a él.

Las entradas, que representan los años del coche y están dentro del rango [1, 30], se han dividido tal como se muestra en la figura 9: dos conjuntos triangulares (**nuevo** y **medio**), y un conjunto trapezoidal **viejo**.

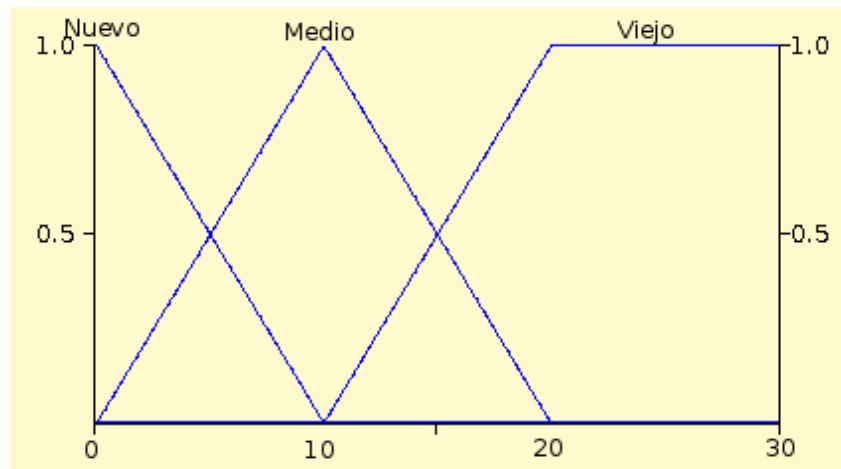


Figura 9 – EdadCoche

- **KmCoche:**

Con el aumento de los kilómetros la fiabilidad del coche disminuye, y con ella la imagen que tiene un conductor de la seguridad y prestaciones de su vehículo.

Se ha determinado un rango de kilómetros entre 0 y 300.000 que se dividen en tres conjuntos fuzzy con funciones de pertenencia asimétricas y triangulares. Estos tres conjuntos, **nuevo**, **medio** y **viejo**, se han representado en la figura 10.

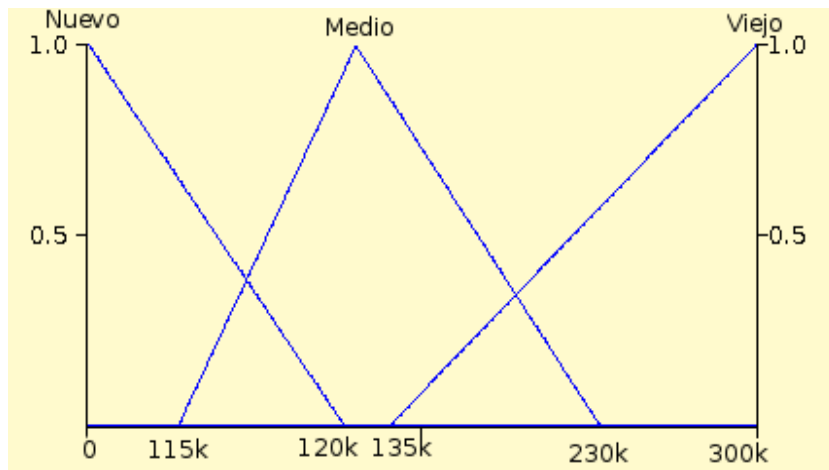


Figura 10 – KmCoche

- **Revisión:**

Aunque el tiempo transcurrido desde la realización de la última revisión del coche no es uno de los factores más tenidos en cuenta por los conductores a la hora de determinar el grado de seguridad que ofrece su coche, saber que el vehículo ha sido revisado con éxito recientemente ofrece una pequeña garantía extra de seguridad, sobre todo en vehículos antiguos. Por otro lado, que el tiempo transcurrido desde la última revisión sea mucho no es un factor habitualmente tomado en consideración.

La entrada de esta variable puede oscilar entre los 0 y 24 meses, que se agrupan bajo dos funciones de pertenencia triangulares para los conjuntos **reciente** y **lejana**. La figura 11 representa esta variable.

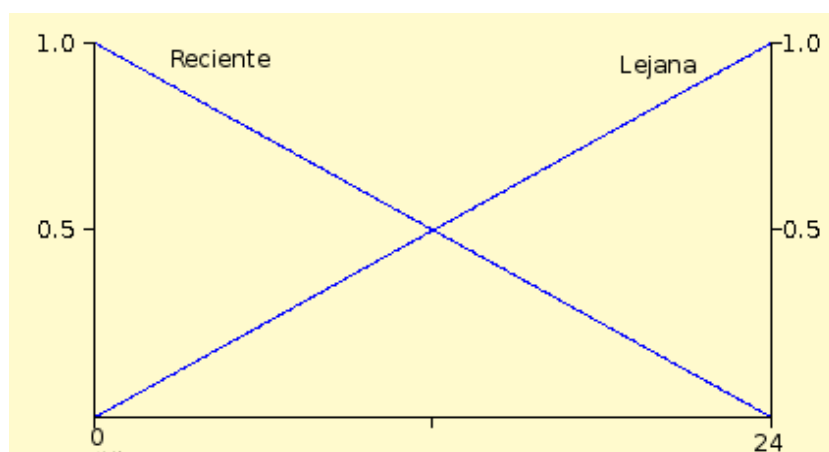
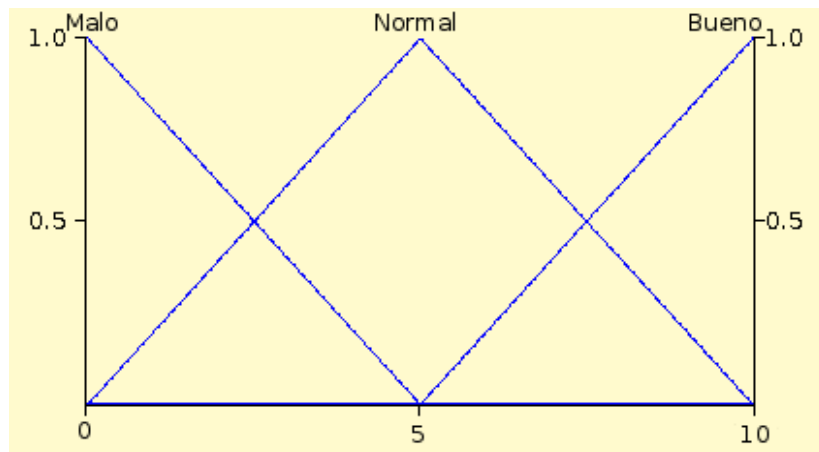


Figura 11 - Revisión

- **Ruedas:**

El mal estado de las ruedas es uno de los principales motivos de baja seguridad en un coche. Sin embargo, a la vista de las encuestas son muchos los conductores que a la hora de circular no tienen en cuenta el estado de sus ruedas. Por contra, aquellos que son conscientes del buen o mal estado de las ruedas tienen este factor muy en cuenta a la hora de plantearse un adelantamiento.

El estado de las ruedas se evalúa con un valor entre 0 y 10, 0 para neumáticos en mal estado y 10 para los que están en buen estado. Para esta función se definen los conjuntos **malo**, **normal** y **bueno** mediante las tres funciones de pertenencia triangulares de la figura 12.

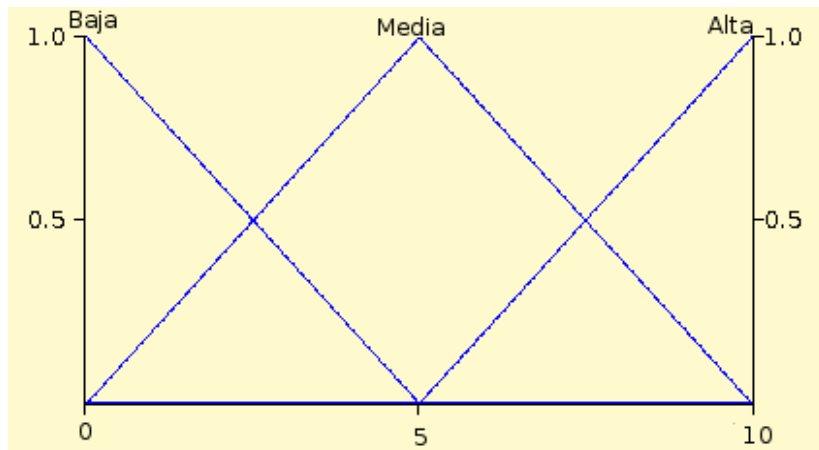


**Figura 12** - Ruedas

- **CalidadCoche:**

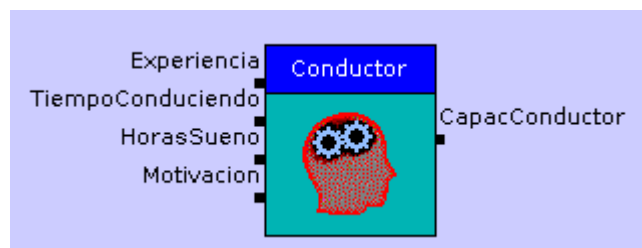
Es la salida del subsistema EstadoCoche. Al igual que ocurría con la calidad del entorno, CalidadCoche muestra la percepción que tiene el conductor de la calidad de su vehículo mediante un valor entre 0 y 10. En este caso también se han utilizado como funciones de pertenencia tres funciones trapezoidales para los niveles de calidad **malo**, **medio** y **bueno**, tal y como puede observarse en la figura 13.

La defuzzyficación del subsistema EstadoCoche, que es de tipo Mamdani que se ha realizado utilizando el método del centro de gravedad.



**Figura 13** - CalidadCoche

### 3.2.3 Subsistema Conductor



**Figura 14** – Subsistema Conductor

La capacidad del conductor es un factor primordial a la hora de determinar la seguridad durante la circulación de un vehículo. Las características personales del conductor también influyen en su percepción del entorno. Un mismo conductor puede interpretar una misma situación de dos modos completamente distintos en función de, por ejemplo, lo cansado que esté por el número de horas que lleve conduciendo.

En este subsistema se han tenido en cuenta variables que son más o menos fijas en un conductor, como los años de experiencia, junto a otras que dependen del momento concreto durante la conducción, como el número de horas seguidas conduciendo, el descanso durante la noche anterior y la motivación en la conducción. Con todo ello se genera la salida CapacConductor.

- **Experiencia:**

Los conductores inexpertos tienden a reaccionar peor ante los imprevistos, están menos acostumbrados a los avatares del tráfico y en ocasiones conducen con más inseguridad que aquellos que llevan muchos años al volante.

Se ha establecido para la experiencia un rango de valores que va desde 0 hasta 50 años. Las funciones de pertenencia son tres funciones triangulares para los conjuntos **poca**, **media** o **mucha**. Tal y como se puede ver en la figura 15, la función correspondiente a **mucha** tiene una bajada al final, puesto que se considera que una persona con mucha edad tendrá un comportamiento similar al de una persona con una experiencia menor, y alguien que tenga una experiencia correspondiente a la zona de bajada debe encontrarse necesariamente en este rango de edades.

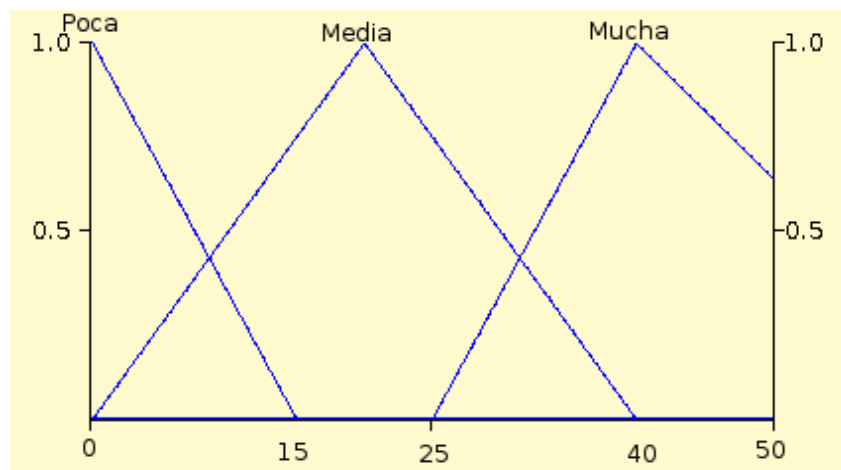


Figura 15 - Experiencia

- **TiempoConduciendo:**

El cansancio acumulado tras muchas horas seguidas al volante produce una relajación de la atención del conductor o pérdida de capacidad de reacción entre otras reacciones que afectan a la seguridad.

Tiene por rango  $[0, 6]$ , en función del número de horas seguidas de conducción. En la figura 16 se comprueba que para esta variable se han definido los conjuntos triangulares asimétricos **pocas**, **medio** y **muchas**.



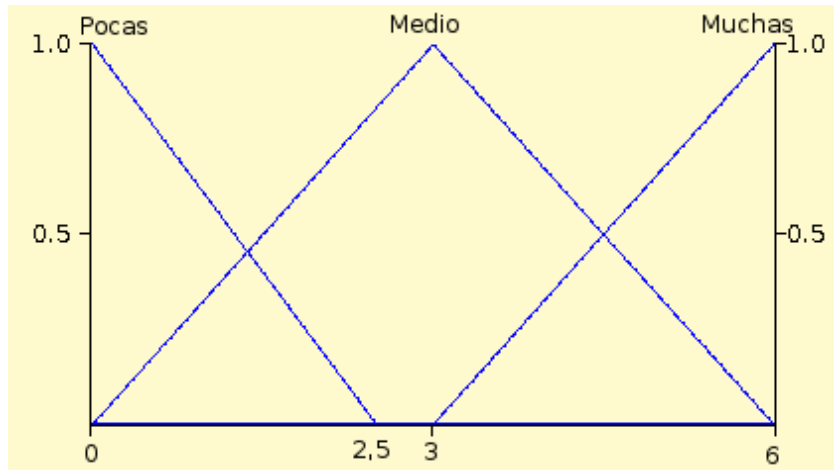


Figura 16 – TiempoConduciendo

- **HorasSueño:**

Del mismo modo que el cansancio tras muchas horas seguidas conduciendo, el cansancio producido por un mal descanso antes de realizar el desplazamiento afecta también a la conducción. Por este motivo las horas de sueño de la noche anterior se consideran un factor importante.

Sobre un rango de [0, 12] se han definido tres conjuntos fuzzy **poco**, **medio** y **mucho**, con funciones trapezoidales no simétricas que pueden verse en la figura 17.

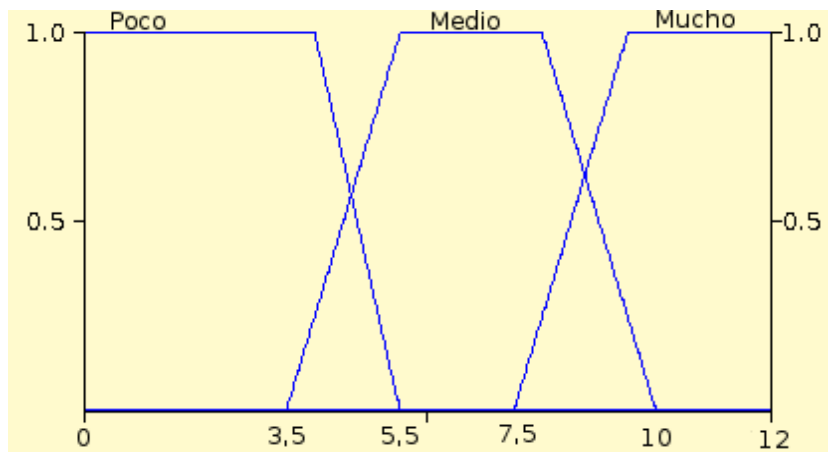
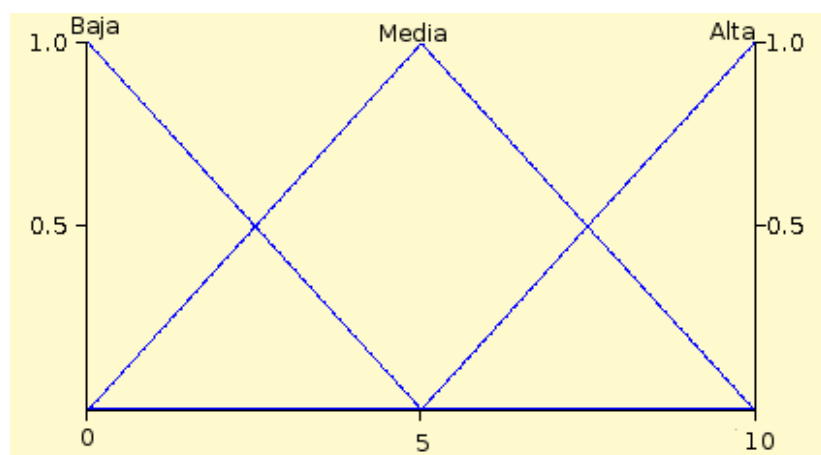


Figura 17 – HorasSueño

- **Motivación:**

La tarea de conducir se realiza mejor cuando se trata más como un entretenimiento que como una obligación o una rutina. Por ejemplo, un conductor estará más atento durante un viaje a su destino de vacaciones que durante un viaje a su lugar de trabajo en el que la rutina de repetir el mismo recorrido día tras día puede hacerle caer en una falta de atención.

La motivación tiene un rango [1, 10]. Sus funciones de pertenencia son **poca**, **media** y **mucho**, de tipo triangular las tres. Ver figura 18.



**Figura 18** - Motivación

- **CapacConductor:**

La salida del subsistema Conductor se define igual que las salidas de Entorno y EstadoCoche: tres funciones triangulares que dividen el rango de [1, 10] en **poca**, **media** y **mucho**. Está representado en la figura 19.

Conductor es también un sistema Mamdani defuzzyficado mediante centro de gravedad.

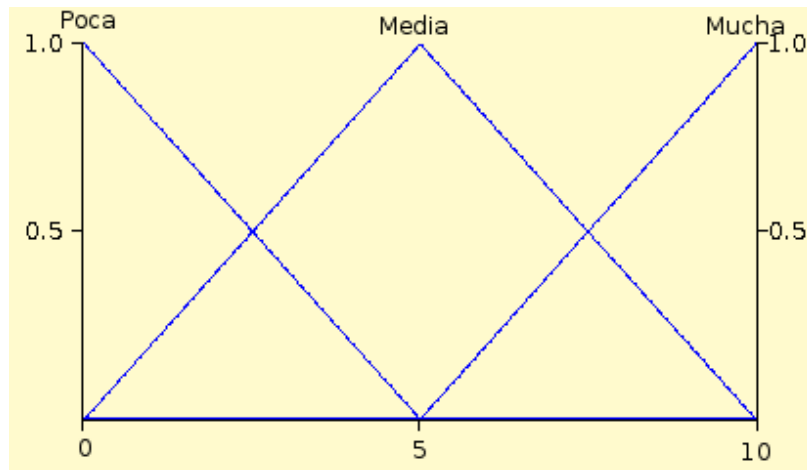


Figura 19 - CapacConductor

### 3.2.4 Subsistema Seguridad

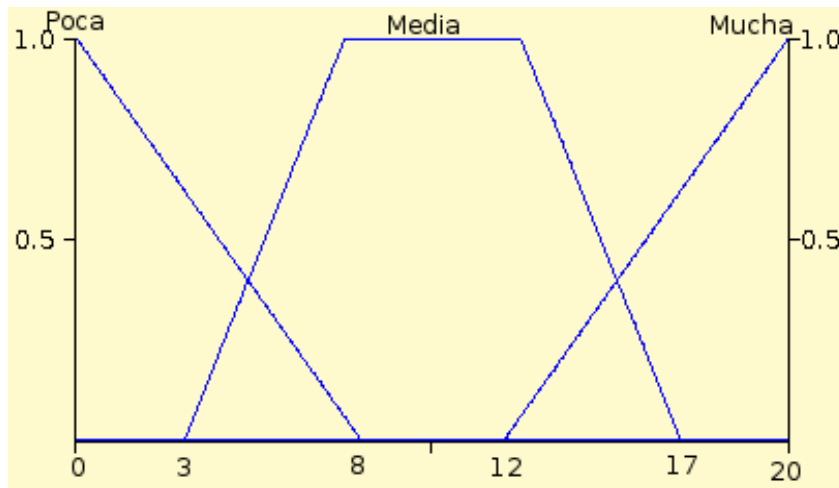


Figura 20 – Subsistema Seguridad

A través del nivel de calidad del entorno, del coche y de la capacidad del conductor se calcula el nivel de seguridad con el que se circula. Este nivel de seguridad será tenida en cuenta para calcular tanto el deseo como la posibilidad de adelantar.

Recibe como entradas las salidas *crisp* de los subsistemas Entorno, EstadoCoche y Conductor, que representan la seguridad concreta de cada uno de los elementos a tener en cuenta. Pueden verse sus definiciones en las figuras 7, 13 y 19 respectivamente.

La salida del sistema fuzzy Seguridad es la variable llamada seguridad. El rango que define el nivel de seguridad es  $[0, 20]$ , donde 0 representa el nivel más inseguro y 20 el más seguro. Se han definido tres conjuntos fuzzy: **poca** y **mucha** con funciones triangulares, y **media** con una función trapezoidal. Los tres pueden observarse en la figura 21.

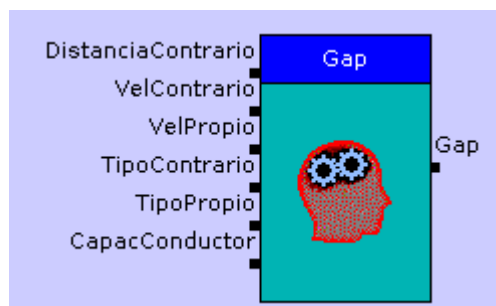


**Figura 21** – Seguridad

En Seguridad, que se ha construido como tipo Mamdani, se ha usado nuevamente el método de defuzzyficación centro de gravedad.

### 3.2.5 Subsistema Gap

El factor más importante de todos a la hora de adelantar es tener sitio suficiente en el carril contrario para realizar con éxito la maniobra. Para ello se tienen en cuenta la distancia a la que se encuentra el coche que se aproxima, su velocidad y el tipo de vehículo que es, la velocidad a la que se desplaza el vehículo del que se quiere calcular la demora, el tipo de este vehículo, tomadas todas ellas de las entradas externas del sistema general, y también la capacidad de su conductor calculada en el subsistema Conductor.



**Figura 22** – Subsistema Gap

Sus variables de entrada son DistanciaContrario, VelContrario, VelPropio, TipoContrario y TipoPropio, todas ellas entradas directas del sistema general provenientes de fuentes externas; y también una entrada que proviene de la salida del subsistema Conductor,

CapacConductor. Su salida es Gap, que representa la evaluación del espacio disponible en el carril contrario.

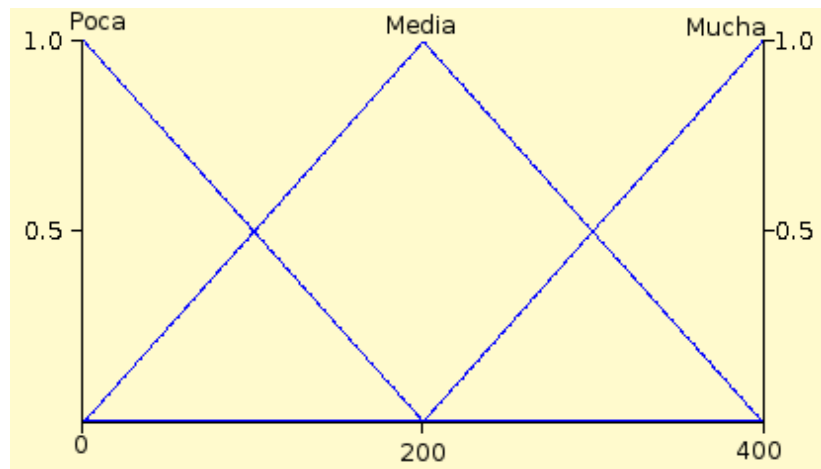


Figura 23 - DistanciaContrario

- **DistanciaContrario:**

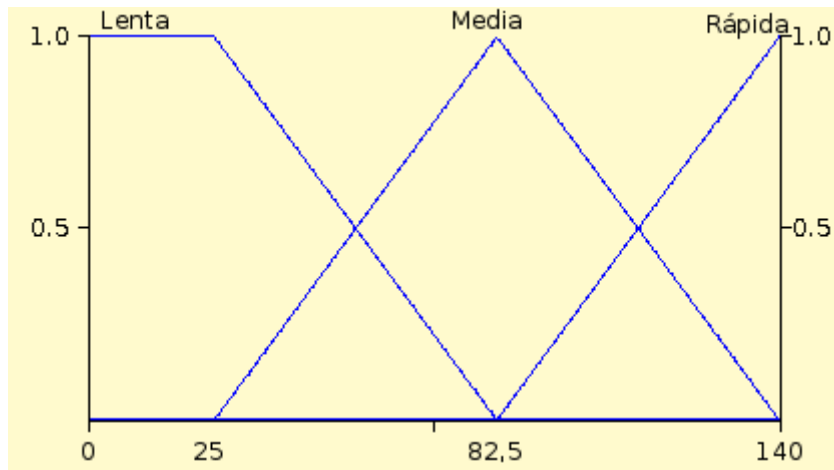
Si el vehículo que se aproxima está demasiado cerca el adelantamiento no será posible. Para ello se comprueba a qué distancia está el vehículo que se aproxima.

El rango de valores de DistanciaContrario es  $[0, 400]$ , que representa la distancia en decámetros. Se modeló mediante tres funciones triangulares para los conjuntos **poca**, **media** y **mucha**, representados como en la figura 23.

- **VelContrario:**

Indica la velocidad a la que se acerca el vehículo del carril contrario. Cuánto más rápido se acerque, menos aceptable será un hueco para adelantar.

El rango de velocidades va desde 0 hasta 140, medidos en km/h. Pese a que el límite de velocidad en estas vías es como mucho de 100 km/h, la tendencia general a superar dichos límites sugería tratar velocidades hasta los 140 km/h. Las velocidades se han modelado usando dos funciones triangulares para las velocidades **media** y **alta**, y una trapezoidal para **baja**, en el que se supone cualquier velocidad por debajo de 25 km/h como 100% baja. La tendencia a circular a velocidades más altas que bajas provocó el desplazamiento hacia velocidades superiores de los vértices de los conjuntos **media** y **alta**, como queda patente en la figura 24.



**Figura 24** - Velocidad

- **VelPropio:**

Un vehículo que circula a una velocidad muy superior a la de su predecesor podrá adelantar en menos espacio que un vehículo que intenta adelantar a otro que circula más o menos a su misma velocidad. Por este motivo es necesario conocer la velocidad a la que circula el vehículo estudiado.

El modelado de la velocidad se realizó igual que para VelContrario, y quedó representada en la figura 24.

- **TipoContrario y TipoPropio:**

El tipo de coche según la potencia del motor permitirá una mayor aceleración para los coches grandes, facilitando así la tarea de adelantamiento. Del mismo modo, un coche potente que se acerque por el carril contrario podrá acelerar con mayor facilidad que uno pequeño, reduciendo en caso de producirse dicha aceleración el espacio para adelantar.

El modelado de los tipos de vehículos se realizó teniendo en cuenta dos tipos de vehículos distintos: coches y camiones. El tipo de vehículo es una entrada externa del sistema general. Sus valores podrán ser o bien un número del rango [0 3.000] (centímetros cúbicos del motor del coche) en el caso de ser un coche; o bien una indicación de camión, que se realiza introduciendo cualquier valor entre 3.000 y 5.000, concretamente 4.000.

En la parte correspondiente a los coches, entre los valores 0 y 3.000 hay dos funciones trapezoidales para coches **pequeños** y **grandes**, y una función triangular para el coches **medianos**.

Inmediatamente a continuación de estas funciones, por encima del valor 3.000, están representados los camiones como un único tipo. El tipo camión es binario, es decir, o es 100% camión, o es 0% camión.

Todas estas funciones de pertenencia pueden verse gráficamente en la figura 25.

Es necesario aclarar que no se tuvo en cuenta el caso de que TipoPropio fuera un camión. La ausencia de datos sobre el comportamiento de los conductores de camión en carreteras convencionales provocó que este estudio se centrara únicamente en los conductores de coches.

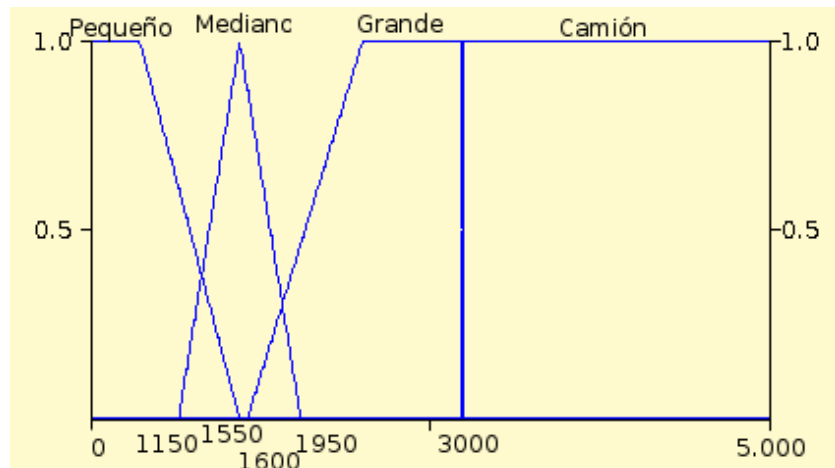


Figura 25 - TipoVehículo

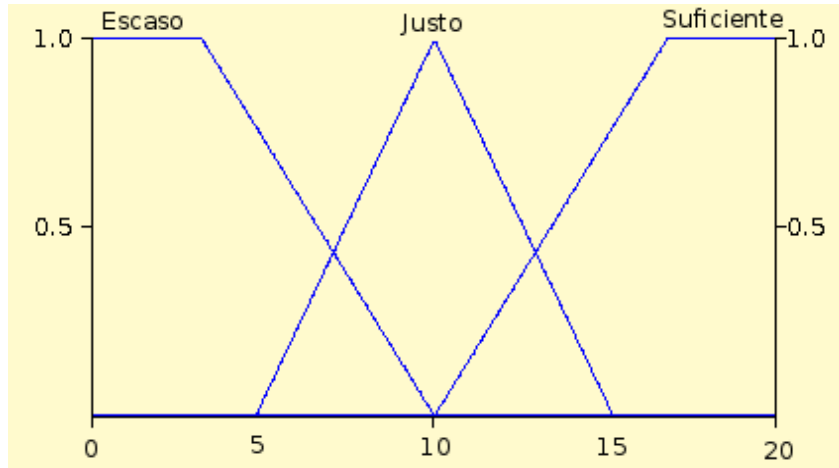
- **CapacConductor:**

Como se comentó para el subsistema Conductor, las características personales del propio conductor a la hora de realizar un adelantamiento influyen en la percepción del entorno, y por tanto también en la percepción de la posibilidad de adelantar en un hueco concreto.

La entrada de CapacConductor es la salida CapacConductor del subsistema Conductor, y su modelado se puede consultar en la figura 19.

- **Gap:**

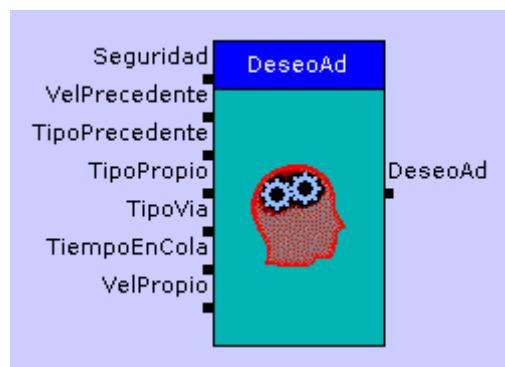
La salida Gap del subsistema Gap está definida mediante tres funciones de pertenencia que dividen el rango [0, 20] en **escaso**, **justo** y **suficiente**, siendo los valores menores los que menos aceptable consideran el hueco. Todo esto se puede ver representado gráficamente en la figura 26.



**Figura 26** - Gap

El subsistema Gap se ha desarrollado como sistema de tipo Mamdani y se ha defuzzyficado usando el método del centro de gravedad.

### 3.2.6 Subsistema DeseoAd



**Figura 27** – Subsistema DeseoAd

Que un vehículo obligue a otro a reducir su velocidad no implica necesariamente que el segundo vehículo se encuentre demorado. Es posible que por algún motivo considere oportuno continuar a esa nueva velocidad y no desee adelantar, en cuyo caso se encontraría en caravana.



Se han considerado como variables que producen o inhiben el deseo de adelantar las velocidades a las que circulan tanto el vehículo precedente como el vehículo estudiado, el tipo de vía por el que se circula, el tipo de vehículo que son tanto el precedente como el estudiado, y el tiempo que lleva el vehículo estudiado siendo retenido por el precedente. También se ha considerado la seguridad calculada previamente en el subsistema Seguridad un factor influyente. Todo esto determinará la salida de DeseoAd, el deseo de adelantar, que podrá ser “sí” o “no”.

- **VelPrecedente y VelPropio:**

Uno de los principales motivos que pueden hacer que un coche que ha tenido que reducir su velocidad a causa de otro no pretenda adelantarle es que su diferencia de velocidades fuese muy pequeña. En ese caso es posible que el segundo vehículo considerara la nueva velocidad aceptable, y no desee adelantar. Por el contrario, si un vehículo que circulase a muy alta velocidad se encontrara con otro muy lento, el vehículo veloz desearía adelantar lo antes posible.

La representación y modelado de velocidades en DeseoAd se ha realizado de modo idéntico a como se ha hecho para VelPropio y VelContrario en Gap, y puede verse en la figura 24.

- **TipoPrecedente y TipoPropio:**

La opinión de los usuarios en las encuestas mostró que el tipo de vehículo que llevan delante les influye a la hora de plantearse un adelantamiento, sobre todo si el vehículo precedente es un camión.

TipoPropio y TipoPrecedente se han realizado de forma igual a la de TipoContrario y TipoPropio, y están representadas en la figura 25.

Tampoco en este caso se permite que el TipoPropio sea un camión, al tratarse de exactamente la misma entrada que la utilizada en Gap.

- **TipoVía:**

El circular por una carretera principal, con amplios tramos de recta y habitualmente buena visibilidad propicia que el deseo de adelantar sea mayor que por carreteras secundarias, a

menudo con muchas curvas, y muchas veces turísticas, por lo que es posible que el usuario se encuentre en un viaje de turismo y tenga menos intenciones de adelantar que en un desplazamiento a su lugar de trabajo, por ejemplo.

Dos funciones de pertenencia, **secundaria** y **principal** ambas triangulares, cubren el rango [0 10], en el que valores menores indican una carretera secundaria y los valores más altos una carretera principal. En la figura 28 se representa TipoVía.

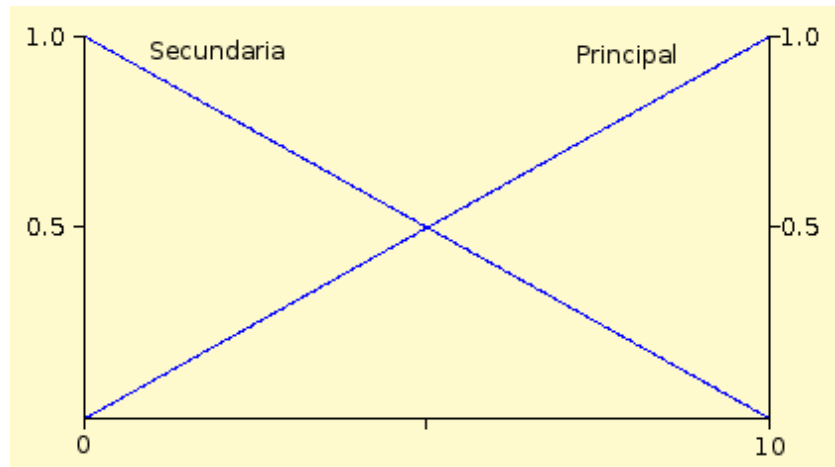
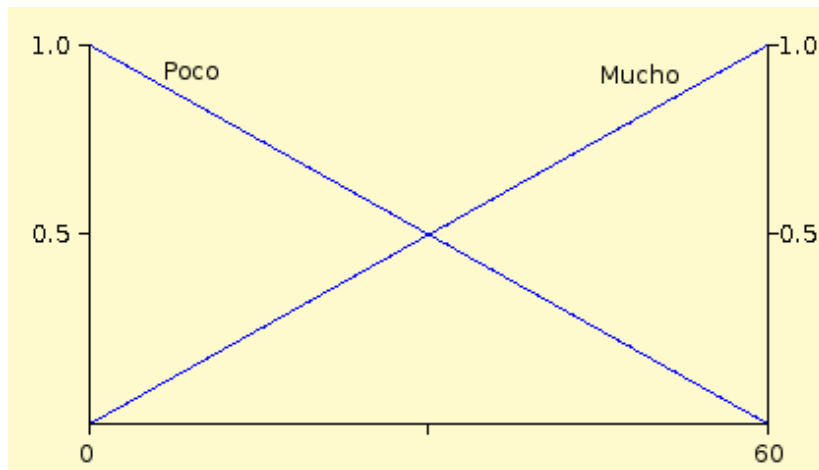


Figura 28 – TipoVía

- **TiempoEnCola:**

Llevar mucho tiempo con una velocidad por debajo de la deseada puede hacer crecer la ansiedad del conductor y hacer que se reduzca su rango de velocidades aceptables, pudiendo pasar en algún momento de considerar la velocidad actual como aceptable, y no desear adelantar, a ser inaceptable para él y hacerle desear adelantar.

El tiempo en cola puede oscilar entre los 0 y los 60 minutos. Bajo este rango se han definido dos conjuntos fuzzy, **poco** y **mucho**, que tienen funciones de pertenencia triangulares. Son los representados en la figura 29.



**Figura 29** - TiempoEnCola

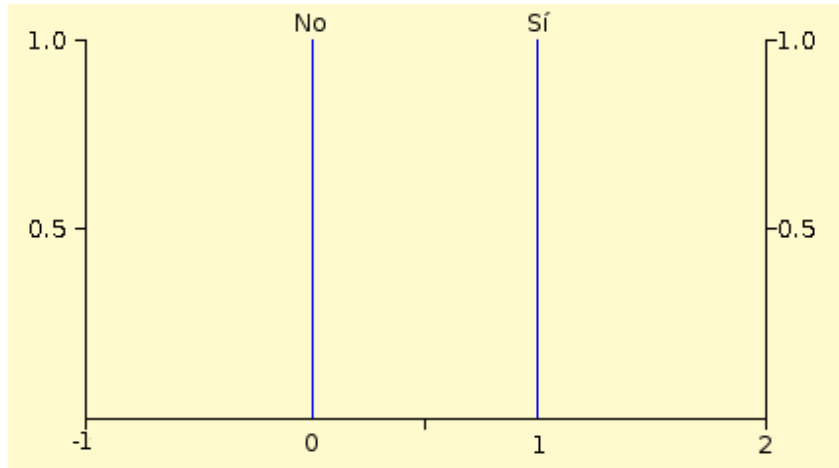
- **Seguridad:**

Otro factor que puede influir notablemente en la decisión de adelantar o no es la percepción de seguridad. Si un conductor tiene dudas acerca del nivel de seguridad sólo adelantará en caso de ver la maniobra realmente clara.

El subsistema Seguridad proporciona los valores de entrada de esta variable. Por tanto, sus conjuntos, funciones de pertenencia y rango son los mostrados en la figura 21.

- **DeseoAd:**

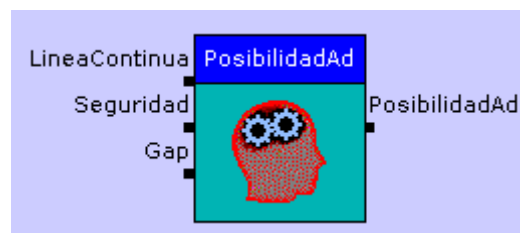
DeseoAd puede tomar los valores “sí” o “no” según si el conductor considera aceptable la velocidad a la que le permite circular el vehículo anterior o por contra la considera inadecuada. Para definirla se han usado dos singletons, según se muestra en la figura 30.



**Figura 30** - Si/No

El subsistema DeseoAd se ha realizado como un sistema de tipo Sugeno de orden-cero.

### 3.2.7 Subsistema PosibilidadAd



**Figura 31** – Subsistema PosibilidadAd

Para poder calcular la demora de un vehículo es imprescindible saber si éste tiene posibilidad de adelantar al vehículo que le precede o no. Si el vehículo precedente circula más despacio pero no puede ser adelantado, bien por la presencia de una prohibición de adelantar, bien por falta de espacio suficiente en el carril contrario, es muy probable que el estado del vehículo estudiado sea demorado.

Para el cálculo de la posibilidad de adelantamiento se utiliza una entrada externa directa al sistema general (LíneaContinua) y las salidas de los sistemas Gap y Seguridad calculadas anteriormente.

- **LineaContinua:**

Indica la prohibición o no de adelantar en el tramo por el que circula el vehículo en estudio.

Es una entrada binaria cuyos valores pueden ser únicamente “sí” o “no”. Está modelada mediante singleton, tal como se representa en la figura 30.

- **Gap:**

El principal factor que debe tenerse en cuenta para determinar si es posible adelantar es la distancia al coche que se aproxima por el carril contrario. Si esta distancia es suficiente, se podrá adelantar. En caso de que dicha distancia sea escasa, será necesario esperar otro momento para realizar el adelantamiento.

Se corresponde con la salida del subsistema Gap, por lo que pueden verse sus conjuntos y funciones de pertenencia en la figura 26.

- **Seguridad:**

En los casos en los que el espacio para adelantar sea escaso el adelantamiento no se realizará en ningún caso. Si el hueco es claramente suficiente no habrá problema para adelantar. Sin embargo, en los casos en los que el espacio libre para adelantar no es claramente suficiente ni completamente insuficiente, la seguridad es el factor que determinará la posibilidad de realizar el adelantamiento.

Esta entrada toma su valor directamente de la salida del subsistema Seguridad. Sus conjuntos, funciones de pertenencia y rango son los mostrados en la figura 21.

- **PosibilidadAd:**

PosibilidadAd es una salida binaria, que puede tomar los valores “sí” o “no” en función de si se ha determinado que el adelantamiento puede o no puede llevarse a cabo. Se ha definido mediante singletons tal y como aparece en la figura 30.

El subsistema PosibilidadAd se ha realizado como un sistema de tipo Sugeno de orden cero.

### 3.2.8 Subsistema EstadoDemora

EstadoDemora es el único subsistema nítido del sistema general. Toma como entradas las velocidades del vehículo precedente y del vehículo estudiado, la salida *crisp* del subsistema DeseoAd y la salida *crisp* del subsistema PosibilidadAd.

Es en este subsistema donde realmente se realiza la clasificación del vehículo en su estado de demora correspondiente, que podrá ser LIBRE si escoge su velocidad sin estar influido por algún otro vehículo, EN CARAVANA si ve influida su velocidad pero no desea adelantar, o DEMORADO si debe reducir la velocidad por influencia de otro vehículo y no tiene posibilidad de adelantarle aunque lo desee.

Si la velocidad del vehículo precedente supera en 4 km/h o más la velocidad del vehículo estudiado, el estado del vehículo será LIBRE.

Si la velocidad del vehículo precedente es menor a la del estudiado, o mayor hasta 3 km/h de diferencia, se distinguirían los siguientes casos:

Si DeseoAd es “no”, entonces el vehículo está EN CARAVANA.

Si DeseoAd es “sí”, y PosibilidadAd es “no”, el vehículo está DEMORADO.

Si DeseoAd es “sí” y PosibilidadAd es “sí”, el vehículo adelantará, por lo que está LIBRE

De este modo es en EstadoDemora donde se implementa la nueva definición de los estados de demora basada en criterios subjetivos propuesta en este proyecto.

## 3.3 Interfaz gráfica

Para facilitar la introducción de todos los datos y comprobar el estado del vehículo se ha desarrollado una sencilla interfaz gráfica implementada en Java.

Mediante unos slides se elige el valor para cada variable, o se marca la casilla “CAMIÓN” si es necesario en el tipo de vehículo. Una vez seleccionados los valores de todas las variables se pulsa el botón “ACEPTAR” para que el sistema realice el cálculo del estado del vehículo, que será mostrado por pantalla.

Tras el cálculo del vehículo se pueden modificar algunos factores para comprobar cómo influiría su modificación en la demora del vehículo, pudiendo así obtener una orientación sobre qué parámetros conviene mejorar para reducir la demora.





## 4. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

Los diferentes datos de entrada necesarios para el funcionamiento de la aplicación son de naturaleza muy distinta. Poco tienen que ver entre sí el estado del firme de una carretera con las horas que ha dormido un conductor la noche anterior. Por otro lado, de algunas de las entradas son de carácter muy subjetivo.

Por todo ello, sumado a los escasos medios con los que se contó para la realización de este trabajo y que hizo imposible, por ejemplo, la toma de velocidades de vehículos en circulación, resultó complicado encontrar un método sistemático para la recogida de datos en carreteras y situaciones reales.

Ante la necesidad de probar la eficiencia del sistema se optó por la realización de encuestas a diferentes tipos de usuarios de carreteras convencionales con un carril por sentido. En estas encuestas se plantearon varios supuestos en los que se describían distintas situaciones en las que se tenían en cuenta varios factores en cada una que se iban cambiando ligeramente en las siguientes preguntas. Se pedía a los usuarios que expresaran en cada caso su percepción de las posibilidades de adelantar, su deseo de adelantar o sus sensaciones ante cada situación.

Para facilitar el proceso de recogida de encuestas y de búsqueda de encuestados se aprovechó la encuesta utilizada durante el desarrollo del sistema para la determinación y priorización de factores, añadiendo al final las preguntas con los supuestos que se utilizarían después para esta fase de experimentación.

En el apéndice A puede verse el modelo de encuesta que se utilizó.

Se realizaron un total de 50 encuestas, de las que el 20% se utilizaron en la fase de ajuste. Con el 80% restante se obtuvieron los siguientes resultados:

- Vehículos demorados:  
37 de los 40 (92,5%) usuarios que se mostraron como demorados en las encuestas fueron identificados correctamente como demorados por el sistema.
- Vehículos en caravana:  
36 de los 40 (el 90%) de los usuarios que expresaron en las encuestas circular por debajo de su velocidad deseada, pero a una velocidad aceptable y sin querer adelantar al vehículo precedente fueron identificados correctamente como vehículos en caravana por el sistema.
- Vehículos libres y aislados:  
Ante la simplicidad del sistema para el cálculo de los vehículos libres y aislados, y teniendo en cuenta que todo coche que no esté demorado o en caravana circulará a la velocidad que desea, no se tomaron datos para estos casos.

Estos resultados sugieren una alta fiabilidad del sistema implementado, con un acierto entorno al 90% en la determinación del estado de demora del vehículo, objetivo principal de este trabajo.

Sin embargo, el bajo número de muestras que pudieron ser recogidas provoca una alta variabilidad de los porcentajes con pocos datos de diferencia. Además, pese a que se observa una buena precisión en el funcionamiento del sistema, no se puede asegurar las mismas tasas de acierto ante un mayor número de muestras, sobre todo teniendo en cuenta la gran disparidad existente entre los diferentes criterios de los diferentes conductores, que, salvo en algunos factores concretos, no mostraron ningún patrón fijo entre los distintos usuarios.

## 5. CONCLUSIONES

De la realización de este proyecto se pueden obtener diferentes conclusiones, tanto de carácter práctico como teórico.

Entre las conclusiones prácticas cabe destacar que este trabajo ofrece una solución, fiable a la vista de los resultados, al problema del cálculo de la demora en carreteras convencionales con un carril por sentido. Para ello se ha implementado un sistema que es capaz de tratar con la subjetividad de los conductores a la hora de realizar un adelantamiento.

Además, el sistema desarrollado trata individualmente a cada conductor como un sujeto concreto y distinto del resto, a diferencia de las soluciones clásicas que se basan únicamente en medidas de tiempos y consideran iguales a todos los conductores sin distinción.

Más allá de las aportaciones prácticas, con este trabajo se realiza también una nueva propuesta teórica para la clasificación de los estados de demora de los vehículos, basada en criterios subjetivos y diferencias de velocidades.

Según esta propuesta, todo vehículo que circule a menos de 4 km/h de su precedente será considerado libre. Si esa diferencia es menor, se tendrán en cuenta factores subjetivos como el deseo de adelantar y la posibilidad de adelantar.

Si el conductor no desea realizar el adelantamiento, el vehículo estará en caravana, independientemente de que el conductor pueda o no adelantar.

Si por el contrario el conductor desea adelantar, pero no lo considera posible, el vehículo estará demorado.

Esta nueva propuesta facilita futuras aproximaciones que aborden el problema del cálculo de la demora a través de razonamiento aproximado, ya que realiza una clasificación que tiene en cuenta el punto de vista personal y el razonamiento de cada conductor en lugar de trabajar únicamente con mediciones externas.

## 6. TRABAJO FUTURO

Durante la realización del trabajo se detectaron algunas evoluciones y optimizaciones que permitirían mejorar la solución propuesta:

- **Mejora de la toma de datos.** El sistema de encuestas, aunque se ha mostrado útil tanto en este como en otros trabajos, no siempre consigue obtener el 100% de la información buscada. Además, en el caso concreto de este proyecto, la falta de experiencia en la realización de encuestas y el bajo número de sujetos encuestados permite suponer que una mejora en la toma de datos, ya sea mediante nuevas encuestas mejoradas, ya sea con un método alternativo, permitirá obtener una mayor precisión del sistema.
- **Introducción de nuevas variables de seguridad.** Aunque viene determinada por otros factores tratados en este estudio, la utilización directa de la distancia al vehículo precedente puede ayudar a obtener una mayor precisión en el nivel de seguridad del vehículo estudiado.

En la misma situación se encuentra el factor nivel de estrés. En este caso una ampliación que podría realizarse para tener en cuenta este factor, y a la vez mejorar la precisión del cálculo de la capacidad del conductor, es la separación del factor actual “motivación” en dos factores menos abstractos, como son el estrés del conductor y el tipo de viaje que está realizando.

- **Estudio de la forma de elección de la velocidad por parte de los conductores.**  
Un conductor no va siempre a la misma velocidad en un mismo lugar en idénticas condiciones en dos momentos diferentes. Del mismo modo, a lo largo de una vía los vehículos tienen grandes oscilaciones de velocidad sin motivo aparente. Las causas de estas variaciones, que pueden influir a la hora de calcular la demora de un vehículo, se corresponden con muchos y muy diversos factores, sujetos en su mayoría a la subjetividad del conductor. El estudio de estas variaciones de velocidad y su tratamiento y sistematización sería un trabajo interesante que aportaría un nuevo enfoque al cálculo fuzzy de la demora.
  
- **Ampliación del estudio a camiones y motocicletas.** A causa de la falta de datos en el caso de los camiones, y de la diferencia de comportamiento en los adelantamientos de las motocicletas, se ha dejado fuera de este estudio a los conductores de este tipo de vehículos. Sin embargo, los camiones y motocicletas son también vehículos habituales en las carreteras convencionales, por lo que sería interesante ampliar el estudio a estos vehículos en un futuro.

## APÉNDICE A. ENCUESTA

A continuación va a leer una serie de preguntas acerca de su percepción del tráfico y los adelantamientos en carreteras convencionales con un único carril para cada sentido. Por favor, tenga en cuenta en sus respuestas que todas las preguntas se refieren únicamente a este tipo de vía. A la hora de responder, hágalo con sinceridad y trate de considerar todos los factores descritos en las preguntas, incluso si cree que pueden influirle inconscientemente.

Recuerde también que esta encuesta es completamente anónima. Su colaboración será de gran ayuda en el desarrollo de una investigación para la mejora de los flujos de tráfico.

**A.-** ¿Cuántos años lleva usted conduciendo de forma regular? No responda los años de antigüedad de carné, sino el tiempo que lleva conduciendo de forma más o menos habitual. \_\_\_\_\_

**B.-** ¿Qué cilindrada tiene el vehículo que conduce habitualmente? Marque con una X el que corresponda.

Menos de 1.4 litros \_\_\_

Entre 1.4 y 1.8 litros \_\_\_

Más de 1.8 litros \_\_\_

En este caso, ¿es un camión o furgoneta? \_\_\_

¿Cuántos kilómetros, aproximadamente, tiene su vehículo? \_\_\_\_\_

**C.-** Desea adelantar a un vehículo que circula más lento que usted. ¿De qué manera influyen en usted los siguientes factores a la hora de evaluar si puede realizar o no el adelantamiento? Valore cada factor con un número de 1 a 10, siendo 1 muy poca influencia y 10 mucha influencia. Hágalo tanto para los apartados generales como para los subapartados.

**Carretera por la que circula.....** \_\_\_\_\_

Ancho del carril.....

Estado del firme.....

Cantidad de luz (día/noche).....

Carretera seca o mojada.....

Tipo de vía por la que circula (con muchas curvas, pequeña carretera entre pueblos, etc.).....

**Vehículo que conduce.....** \_\_\_\_\_

Antigüedad del coche.....

Kilómetros del coche.....

Tiempo desde la última revisión.....

Estado de las ruedas.....

Tipo de vehículo que conduce (más o menos potente).....

**Características personales.....** \_\_\_\_\_

Años de experiencia.....

Horas seguidas conduciendo.....

Horas de sueño / cansancio .....

Motivación en la conducción.....



Tipo de viaje que realiza (turístico sin hora de llegada fija, al trabajo, regreso a casa, etc.)..... \_\_\_\_\_

**Resto de vehículos en la carretera..... \_\_\_\_\_**

Densidad de tráfico en el carril contrario..... \_\_\_\_\_

Velocidad del vehículo que se aproxima por el carril contrario..... \_\_\_\_\_

Velocidad a la que circula usted..... \_\_\_\_\_

Tipo de vehículo al que pretende adelantar ..... \_\_\_\_\_

Tipo de vehículo que se aproxima por el carril contrario ..... \_\_\_\_\_

Espacio libre en el carril contrario ..... \_\_\_\_\_

Distancia del vehículo que lleva detrás, o cantidad de vehículos que lleva detrás.. \_\_\_\_\_

**D.-** Lea los siguientes supuestos, en los que se encuentra usted conduciendo su vehículo habitual. Para cada supuesto intente tener en cuenta todos los factores mencionados en el grado en el que los tendría en cuenta en una situación real y responda lo más concretamente posible a las preguntas que se le realizan a continuación. Si desea realizar cualquier observación, hágalo.

D1.- Circula por una carretera seca, en buen estado y con buena visibilidad. Por el carril contrario hay una densidad media de tráfico, y hay huecos suficientes para adelantar. Se encuentra usted de regreso a casa tras una excursión de fin de semana. El vehículo que circula delante va ligeramente más lento que usted, pero prácticamente a su misma velocidad. ¿Trata de adelantarlo? \_\_\_\_\_

Si la densidad de tráfico por el carril contrario es densa, y los huecos para adelantar son escasos, ¿intentará aprovechar la primera oportunidad para adelantar, o permanecerá tras el vehículo, circulando ligeramente más despacio de lo que desea? \_\_\_\_\_

D2.- El vehículo que circula delante, un utilitario pequeño, va frenándose. El firme de la carretera está en muy mal estado, y sus neumáticos están gastados. Su vehículo ha pasado recientemente una revisión con éxito, salvo por los neumáticos. Por el carril contrario se aproxima, a una distancia sobradamente suficiente para adelantar en condiciones normales, un coche grande (potente) a gran velocidad. ¿Intentará el adelantamiento? \_\_\_\_\_

Si el vehículo del carril contrario fuese un camión, ¿adelantaría? \_\_\_\_\_

Y si sus neumáticos estuvieran en buen estado, ¿qué haría en los casos tanto del camión como del coche potente? \_\_\_\_\_

En la misma situación inicial, pero con una carretera con buen firme aunque con lluvia, ¿adelantaría? \_\_\_\_\_

D3.- Por motivos de trabajo ha tenido que desplazarse a otra provincia. Lleva tres horas conduciendo sin haber parado a descansar. Frente a usted circula un potente deportivo a 90 km/h. Usted se acerca a él circulando al límite permitido en la vía, 100 km/h. Por el carril contrario circula una densidad media de vehículos. Ve que en carril contrario se abre un hueco no excesivamente grande, pero que parece suficiente para adelantar. El vehículo que se acerca por el carril contrario es un pequeño utilitario a gran velocidad. ¿Realizaría el adelantamiento? En caso de respuesta negativa, especifique si es porque 90 km/h le parece una velocidad adecuada o porque no le parece seguro adelantar.

Partiendo del mismo supuesto inicial, indique si adelantaría o no si se produjeran los siguientes cambios:

- El vehículo que pretende adelantar es un camión \_\_\_\_\_
- El vehículo que se acerca lo hace a poca velocidad \_\_\_\_\_
- Usted ha descansado recientemente \_\_\_\_\_
- Es de noche \_\_\_\_\_
- Es de noche y usted ha descansado recientemente \_\_\_\_\_
- Es de noche y llueve \_\_\_\_\_
- Es de noche y el firme está ligeramente bacheado \_\_\_\_\_
- Usted conduce un coche de poca potencia \_\_\_\_\_
- Usted conduce un coche de gran potencia \_\_\_\_\_

D4.- Acaba de comenzar sus vacaciones y se dirige a la playa con su familia / amigos. El vehículo que circula frente a usted va a una velocidad muy baja. Por estar circulando por una zona en la que está prohibido adelantar, debe circular también a esa velocidad hasta encontrar un punto donde sea posible adelantar. Una vez terminada la prohibición, encuentra un espacio que parece suficiente para adelantar, pero no sobradamente. El vehículo que se acerca por el carril contrario lo hace a gran velocidad. Recuerde que usted circula a una velocidad muy baja a causa del vehículo que le precede. ¿Adelantaría? \_\_\_\_\_

¿Y si detrás de usted se estuviera formando una cola de coches? \_\_\_\_\_

Si ese mismo hueco para adelantar lo hubiera encontrado antes de la prohibición de adelantar y no hubiera tenido que reducir su velocidad (es decir, si circulara a velocidad alta), ¿cambiaría su percepción de la posibilidad de adelantar? \_\_\_\_\_

Si en lugar de dirigirse a su lugar de vacaciones se dirigiera a su lugar de trabajo, ¿cambiaría su percepción tanto si circula retenido por el vehículo de delante como si circula a su velocidad habitual? \_\_\_\_\_

Muchas gracias por su tiempo y su colaboración.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] AKIYAMA, T. y TSUBOI, H. (1996) "Description of Route Choice Behaviour by Multi-Stage Fuzzy Reasoning", Highways to the Next Century Conference, Hong Kong.
- [2] ATHOL, P. (1965). "Headway Groupings". Highway Research Board Record 72, TRB, Washington D.C.
- [3] BLANK, L (1980): "Statistical Procedures for Engineering, Management, and Science". McGraw-Hill, New York (Citado por [27])
- [4] BRANSTON, D. (1979). "A Method of Estimating the Free Speed Distribution for a Road". Transportation Science, Vol. 13, N1 2, mayo 1979. ORSA, EE.UU.
- [5] BUCKLEY, DJ. (1968). "A Semi-Poisson Model of Traffic Flow". Transportation Science, Vol. 2, N° 2, mayo 1968. ORSA, EE.UU.
- [6] CHANG, Y.H. y SHYU, T.H. (1993), "Traffic Signal Instalation by the Expert System Using Fuzzy Set Theory for Inexact Reasoning". Transportation Planning and Technology, 17, pp. 191-202.

- [7] CHAKROBORTY, P, y KIKUCHI, S. (1990), "Application of Fuzzy Set Theory to the Analysis of Capacity and Level of Service of Highways", Proceedings of the ISUMA '90, The First International Symposium on Uncertainty Modelling and Analysis. IEEE Computer Press, College Park, Maryland, pp: 146-150.
- [8] CHEN, L., MAY, A. y AUSLANDER, D. (1990), "Freeway Ramp Control Using Fuzzy Set Theory for Inexact Reasoning", Transportation Research 24A, pp: 15-25
- [9] CORUPE, E.G., GEISSLER, E.H., HUNTER, G.K. et al. (1975). "Design Procedure for Passing Lanes". Systems Design, Northwestern Region, Thunder Bay, Canada.
- [10] DEPARTAMENTO DE POLÍTICA TERRITORIAL Y OBRAS PÚBLICAS DE LA GENERALITAT DE CATALUNYA (2006) "Plan de infraestructuras de Cataluña (PITC)", disponible en <http://www10.gencat.cat/ptop/AppJava/cat/plans/sectors/pitc.jsp>
- [11] D'NEGRI, C.E. y DE VITO, E.L. (2006), "Introducción al razonamiento aproximado: lógica difusa", Revista Argentina de Medicina Respiratoria, N°4, pp. 126-136.
- [12] FLETCHER, J.H. (1968). "Traffic Capacity of Rural Two-Lane Highway". Traffic Engineering and Control, marzo.
- [13] FUNDACIÓN RACC (2007) "La congestión en los corredores de acceso a Barcelona", 2ª edición, Fundación RACC, Barcelona.
- [14] GARDETA OLIVEROS, J.G. (1983). "Estudio de modelos de tráfico vial para carreteras bidireccionales de dos carriles". Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.
- [15] GULLÓN LÖW, M. (1994). "Niveles de servicio en carreteras de dos carriles y doble sentido de circulación". X Curso Internacional de Carreteras. Fundación Agustín de Bethencourt, Madrid.
- [16] HEGYI, A., DE SCHUTTER, B., HOOGENDORN, S., RABUS, R., VAN ZUYLEN, H. y SCHUURMAN, H. (2001), "A Fuzzy Decision Support System For Traffic Control Centers", IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings, Oakland, California, EE.UU. August 25-29 pp: 358-363.
- [17] HOBAN, C. (1984). "Bunching on Two-Lane Rural Roads", ARRB Internal Report 359-14, Australian Road Research Board, Victoria, Australia.

- [18] INSTITUTO DE MICROELECTRÓNICA DE SEVILLA – C.N.M. “Herramientas de CAD para lógica difusa Xfuzzy 3.0”, disponible en <http://www2.imse-cnm.csic.es/Xfuzzy/>
- [19] MILLER, A.J. (1961). “A Queuing Model of Road Traffic Flow”. Journal of the Royal Statistics Society 23B, pp. 64-75.
- [20] MINISTERIO DE FOMENTO (2005) “Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte”, disponible en [http://www.fomento.es/MFOM/LANG\\_CASTELLANO/\\_ESPECIALES/PEIT/](http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/_ESPECIALES/PEIT/)
- [21] MURAT, S.Y. (2006), “Comparison of Fuzzy Logic and Artificial Neural Networks Approaches in Vehicle Delay Modeling”, Transportation Research Part C 14, Elsevier Science, Nueva York, pp: 316-314.
- [22] O.C.D.E. (1972). “Limitations de vitesse en dehors des zones habitées”. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico. París.
- [23] OVUWORIE, G.C., DARZENTAS, J. y McDOWELL, M.R.C. (1980). “Free Movers, Followers and Other: a Reconsideration of Headway Distributions”. Traffic Engineering and Control, agosto/septiembre.
- [24] PAHL, J (1971). “The Effect of Discrete Time Measurements in Speed Data”, Highway Research Record 349, TRB, Washington D.C.
- [25] PAPPIS, E y MAMDANI, E (1977), “A Fuzzy Controller for a Traffic Junction”, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics SMC-7, pp. 707-717.
- [26] PATTNAIK, S.B. y RAMESH KUMAR, K. (1996) “Level of Service of Urban Roads Based on Users' Perception”, Civil Engineering Systems 14, pp: 87-110.
- [27] ROMANA GARCÍA, M. (1996): “Evaluación práctica de niveles de servicio en carreteras convencionales de dos carriles en España”. Tesis doctoral, Departamento de Transportes, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.
- [28] ROMANA GARCÍA, M. y LÓPEZ GÓMEZ, M.G. (1996) “Estimación del porcentaje de vehículos demorados en función de variables de la circulación en carreteras convencionales de doble sentido”, Revista de Obras Públicas Nº 3.359, Noviembre 1996, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, España pp: 85-92.

- [29] ROZIC, P. (1992). "Capacity of Two-Lane, Two-Way Rural Highways: The New Approach". 71st TRB Annual Meeting, 1992. Washington, D.C
- [30] SASAKI, T. y AKAYIMA, T. (1986), "Development of Traffic Control System on Urban Expressway", Preprints 5<sup>th</sup> IFAC/IFIP/IFORS International Conference in Transportation Systems, pp: 333-338.
- [31] SASAKI, T. y AKAYIMA, T. (1987), "Fuzzy On-Ramp Control Model on Urban Expressway and Its Extension", Transportation and Traffic Theory, Elsevier Science, Nueva York, pp: 377-395.
- [32] SASAKI, T. y AKAYIMA, T. (1988), "Traffic Control Process on Expressway by Fuzzy Logic", Fuzzy Sets and Systems 26, pp: 165-178.
- [33] TEODOROVIĆ, D. (1999) "Fuzzy Logic Systems for Transportation Engineering: the State of the Art", Transportation Research Part A 33, Pergamon, pp: 337-364.
- [34] TEODOROVIĆ, D., KIKUCHI, S. (1990), "Transportation Route Choice Model Using Fuzzy Inference Technique", Proceedings of the ISUMA '90, The First International Symposium on Uncertainty Modelling and Analysis. IEEE Computer Press, College Park, Maryland, pp: 140-145.
- [35] TEODOROVIĆ, D., LUCIC, P., POPOVIC, J., KIKUCHI, S., STANIC, B. (2001), "Intelligent Isolated Intersection", Proceedings of the 10<sup>th</sup> IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Melbourne, Australia, 2-5 Diciembre, 276-279.
- [36] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (1950): "Highway Capacity Manual". Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- [37] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (1965): "Highway Capacity Manual". Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- [38] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (1985): "Highway Capacity Manual". Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- [39] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (2000): "Highway Capacity Manual". Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- [40] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (2010): "Highway Capacity Manual". Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.



[41] VALDÉS GONZÁLEZ-ROLDÁN, A. (1982). "Ingeniería de Tráfico". Tercera edición corregida y aumentada. Dossat, Madrid.

[42] VALVERDE, L., SANTOS, M. y LÓPEZ, V. (2010) "Fuzzy Decision System for Safety on Roads", Intelligent Decision Making Systems, Proceedings of the 4<sup>th</sup> International ISKE Conference, pp: 326-331.

[43] ZADEH, L.A. (1965), "Fuzzy Sets", Information and Control, 8, pp. 338-353.

[44] ZADEH, L.A. (1973), "The Concept of a Linguistic Variable and Its Application to Approximate Reasoning", Memorandum No. ERL-M411, Electronics Research Lab., University of California, Berkeley, California.

[45] ZADEH, L.A. (1975), "Fuzzy logic and Approximate Reasoning", Synthese 30, pp. 407-428, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.