

Vehículo autónomo y conectado: casos de uso, pronósticos de adopción y adaptación de la infraestructura

Autonomous and Connected Vehicles: Use Cases, Adoption Forecasts and Infrastructure Adaptation

Alejandro Lanuza García^{1*}

Resumen

Este artículo expone los casos de uso y los pronósticos de adopción del vehículo autónomo y conectado con objeto de identificar y priorizar las posibles opciones de inversión que podrían tener que hacer las administraciones de carreteras. Para ello, se comienza describiendo de forma general la tecnología en la que se basa el vehículo autónomo y conectado, los niveles de automatización en los que se clasifica y el marco legal que actualmente le afecta. A continuación, se exponen los casos de uso del vehículo autónomo, informando sobre las principales empresas del sector, y se recogen pronósticos globales y opiniones de expertos sobre el calendario de penetración del vehículo autónomo en la flota circulante. Por último, se exponen las opciones de inversión en infraestructura física y digital que facilitarían la implantación del vehículo autónomo, esbozando una priorización de estas actuaciones en función de su valor estratégico y viabilidad económica.

Palabras clave: vehículo autónomo, vehículo conectado, conducción automatizada, regulación, casos de uso, penetración en el mercado, infraestructura física, infraestructura digital.

Abstract

This article presents the use cases and adoption forecasts of the autonomous and connected vehicle to identify and prioritize the possible investment options that road administrations may have to make. To do so, this article begins by describing in general terms the technology on which the autonomous and connected vehicle is based, the levels of automation in which it is classified, and the legal framework that currently affects it. Afterwards, it gathers use cases for the autonomous vehicle, reporting on the main companies in the sector, and global forecasts and expert opinions on the schedule for the penetration of the autonomous vehicle in the circulating fleet. Finally, investment options in physical and digital infrastructure that would facilitate the implementation of the autonomous vehicle are explained, outlining a prioritization of these actions based on their strategic value and economic viability.

Keywords: Autonomous vehicle, connected vehicle, automated driving, regulation, use cases, market penetration, physical infrastructure, digital infrastructure.

1. INTRODUCCIÓN

Es extraordinario que una nueva tecnología tenga tanto potencial para influenciar nuestra economía y movilidad como tendrá el **vehículo autónomo y conectado** (VAC). Se prevé que genere nuevas oportunidades de negocio por valor de miles de millones de euros en múltiples segmentos de transporte, por lo que compañías tecnológicas, *startups*, fabricantes de automóviles y muchas otras empresas están realizando inversiones millonarias para colocarse a la cabeza de esta carrera.

Es fundamental que los legisladores y administradores de infraestructura tengan un conocimiento de este reto tecnológico y tomen decisiones con la suficiente perspectiva e información, de forma que se evite tanto lastrar el desarrollo tecnológico debido a la falta de acción, como hacer un uso desproporcionado de recursos como consecuencia de

sumarse a una fantasía colectiva alimentada por las constantes promesas disruptivas del sector. Bajo esta óptica, el presente artículo busca reflexionar sobre preguntas: ¿cómo se utilizará el VAC? y ¿cuándo será una realidad en nuestras carreteras?

Este artículo se divide en cuatro secciones en las que se repasa (1) en qué consiste la tecnología del coche autónomo, (2) qué casos de uso plantea, (3) la escala temporal de su posible adopción, y (4), de qué forma las administraciones de carreteras pueden prepararse para su adopción.

2. VEHÍCULO AUTÓNOMO

Un vehículo autónomo y conectado (VAC) es un vehículo diseñado para conducir por su entorno sin la necesidad de un conductor humano. Existe un creciente interés en esta tecnología debido al impacto que puede tener en la movilidad por su potencial para mejorar la seguridad en las carreteras, reducir la congestión del tráfico y mejorar la accesibilidad de personas con discapacidad o mayores.

La tecnología de los VAC se basa en una combinación de sensores, algoritmos de inteligencia artificial y sistemas de comunicación. Los sensores mostrados en la figura 1,

* Email: alejandro.lanuza@cedex.es

¹ Ingeniero de caminos, canales y puertos. Centro de Estudios del Transporte (CET), del CEDEX.

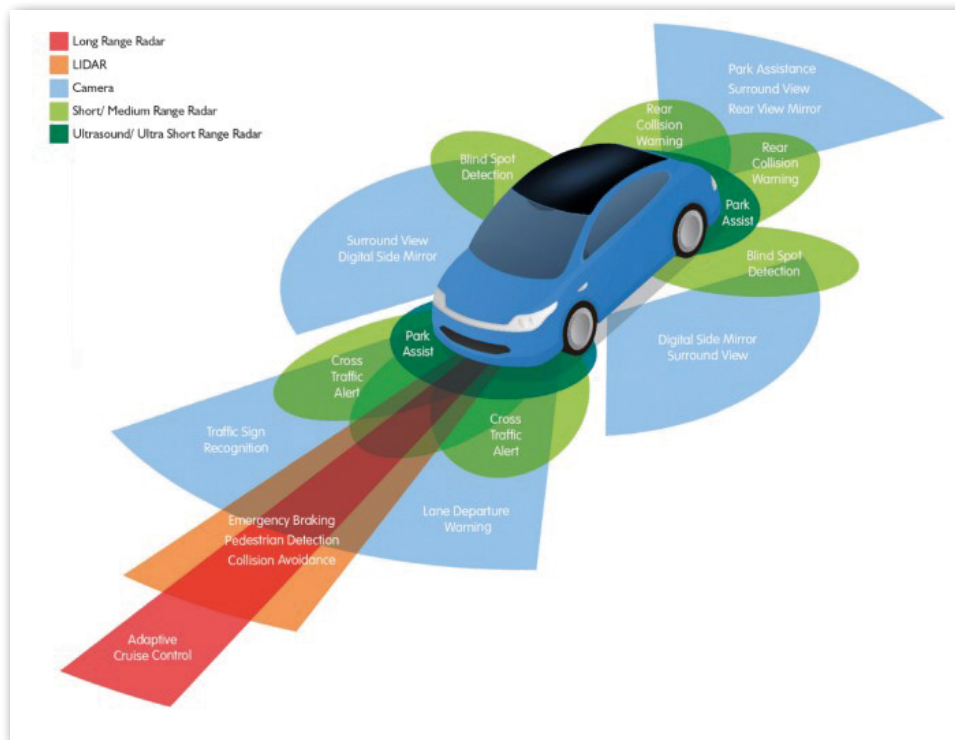


Figura 1. Sensores a bordo del VAC (Rablau, 2019).

como cámaras, radares y los LiDAR, recopilan información sobre el entorno del vehículo. Los algoritmos de inteligencia artificial utilizan esta información para tomar decisiones sobre la conducción, como el control de velocidad y la elección de rutas. Los sistemas de comunicación permiten que el vehículo se comuniquen con otros vehículos y con la infraestructura de la carretera y sus equipamientos.

Los mapas de alta definición (mapas HD) son también muy relevantes para el funcionamiento de los VAC, ya que proporcionan información precisa y detallada sobre el entorno en el que se mueven. Estos mapas incluyen información como la ubicación exacta de carreteras, señales de tráfico, límites de velocidad, marcas de carril y posibles obstáculos. Esta información es utilizada por el sistema de navegación del vehículo para tomar decisiones y conducir de manera segura y eficiente. No obstante, no todos los sistemas de conducción automatizada cuentan con estos elementos (Tesla en su estrategia tecnológica ha decidido optar por usar únicamente sensores visuales, prescindiendo de los LiDAR y los Mapas HD).

2.1. Niveles de automatización

A medida que la tecnología de los vehículos autónomos avanza, se están desarrollando varios niveles de automatización que van desde sistemas avanzados de asistencia al conductor (*Advanced Driver Assistance Systems*, ADAS) hasta la conducción completamente autónoma. La tabla 1 mostrada a continuación ha sido elaborada por la Sociedad de Ingenieros de Automoción (SAE) usada para clasificar el grado de automatización de los vehículos en 6 niveles (Jiménez, 2017):

- L0 (Sin automatización): todas las tareas de conducción recaen sobre el conductor humano (vehículo convencional).

- L1 (Asistencia al conductor): nivel pensado para mejorar la comodidad y seguridad de la conducción, en el que el vehículo cuenta con algún sistema ADAS, como por ejemplo mantenimiento de carril o controles de velocidad adaptativos. Actualmente, todos los coches de nueva homologación deben incorporar de serie ocho sistemas ADAS: asistente de velocidad inteligente, detector de fatiga y somnolencia, frenado de emergencia, cámara trasera con alerta de tráfico cruzado, alerta de cambio involuntario de carril, alerta de cinturón en plazas traseras, caja negra y alcoholímetro integrado.
- L2 (Automatización parcial): el vehículo controla la velocidad y el movimiento longitudinal y lateral, aunque no tiene detección y respuesta ante objetos, por lo que es necesario un conductor humano que realice los aspectos restantes de la tarea de conducción, vigilando el tráfico y controlando el vehículo en cualquier situación. Algunos ADAS, como el asistente de velocidad inteligente sitúan a los coches de nueva homologación dentro de esta categoría (De la Torre, 2022).
- L3 (Automatización condicionada): el sistema toma el control del vehículo en el movimiento longitudinal y lateral y en la detección y respuesta ante objetos, pero el conductor humano tiene que vigilar permanentemente el entorno y el sistema para poder retomar el control del vehículo en cualquier situación. Debido a los problemas de responsabilidad que esto suscita, algunas voces del sector señalan la conveniencia de saltarse este nivel de automatización y poner en funcionamiento el nivel 4 directamente después del nivel 2.
- L4 (Automatización alta): ya no es necesario que el conductor humano supervise permanentemente el sistema, pues recibirá el aviso para retomar el control

Tabla 1. Niveles de automatización según SAE

SAE J3016™ LEVELS OF DRIVING AUTOMATION

SAE LEVEL 0

SAE LEVEL 1

SAE LEVEL 2

SAE LEVEL 3

SAE LEVEL 4

SAE LEVEL 5

What does the human in the driver's seat have to do?

You are **driving** whenever these driver support features are engaged – even if your feet are off the pedals and you are not steering

You must constantly supervise these support features; you must steer, brake or accelerate as needed to maintain safety

You are **not driving** when these automated driving features are engaged – even if you are seated in “the driver's seat”

When the feature requests, you must drive

These automated driving features will not require you to take over driving

These are driver support features

These features are limited to providing warnings and momentary assistance

These features provide steering **OR** brake/acceleration support to the driver

These features provide steering **AND** brake/acceleration support to the driver

These are automated driving features

These features can drive the vehicle under limited conditions and will not operate unless all required conditions are met

This feature can drive the vehicle under all conditions

What do these features do?

- automatic emergency braking
- blind spot warning
- lane departure warning

- lane centering **OR**
- adaptive cruise control

- lane centering **AND**
- adaptive cruise control at the same time

- traffic jam chauffeur

- local driverless taxi
- pedals/steering wheel may or may not be installed

- same as level 4, but feature can drive everywhere in all conditions

Example Features

For a more complete description, please download a free copy of SAE J3016: https://www.sae.org/standards/content/j3016_201806/

del vehículo con suficiente margen de tiempo. Los VAC L4 pueden funcionar en áreas específicas que generalmente están definidas por límites geográficos. Esto se define a través de los “Dominios de Diseño Operativo” (ODD), que consisten en un conjunto de reglas y restricciones que definen el comportamiento del vehículo con respecto a la seguridad (límites a la velocidad, distancia de seguimiento, límites de rutas permitidas, normas de seguridad y restricciones legales) y al rendimiento (consumo de combustible o impacto ambiental). Este nivel de automatización también incluye rutas fijas preprogramadas, como las rutas de los autobuses locales, rutas de campus y viajes similares, generalmente a baja velocidad.

- L5 (Automatización completa): el sistema toma el control total y la figura del conductor como tal no existe, por lo que el vehículo podrá carecer de vo-

lante, pedales, mandos, etc. al estar automatizado a todos los niveles. Los VAC L5 podrán funcionar en cualquier lugar dentro de un país.

2.2. Datos VAC para la gestión de carreteras

Algunas empresas de vehículos autónomos están aprovechando la información que recopilan los VAC a través de sus sensores y mapas HD para ofrecer servicios de datos a los gestores de infraestructura, como por ejemplo los mostrados en la figura 2: inventarios de elementos viales, inspección dinámica, monitorización del estado del pavimento o la obtención de datos de movilidad (<https://ims.mobileye.com/data/en/>). Toda esta información puede ayudar a mejorar la gestión de carreteras, aunque todavía es necesario validar y estudiar su aplicabilidad de forma complementaria a las técnicas existentes.



Figura 2. Servicio de datos para la inspección de carreteras asistida por IA (Fuente: <https://ims.mobileye.com/data/en/>).

2.3. Normativa sobre conducción autónoma

2.3.1. Reglamentos y Estrategias de la Comisión Europea

El marco regulatorio del vehículo autónomo y conectado ha experimentado una gran evolución en los últimos años conforme se ha ido desarrollando la tecnología. Las principales normativas y estrategias dedicadas al vehículo autónomo son las siguientes (CCAM, 2023):

- 2016: Estrategia europea en Sistemas Inteligentes de Transporte Cooperativos (C-ITS).
- 2017-2018: Europa en movimiento: la Comisión Europea toma medidas en pro de una movilidad limpia, competitiva y conectada.
- 2018: Camino a una movilidad automatizada: una estrategia de la UE para la movilidad del futuro.
- 2019: El Pacto Verde Europeo.
- 2019: Reglamento (UE) 2019/2144 sobre la Seguridad General de los Vehículos: introduce una serie de sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS) con carácter obligatorio, desde su entrada en vigor el 6 de julio de 2022, en todos los coches de nueva homologación con el fin de mejorar la seguridad vial. Además, es la primera regulación en todo el mundo que establece el marco jurídico para la homologación de tipo de vehículo totalmente autónomo (nivel 4). Este reglamento faculta a la Comisión para completar el marco jurídico de los vehículos automatizados y conectados.
- 2020: Estrategia Europea de Movilidad Sostenible e Inteligente.
- 2022: Proyecto de Reglamento de la Unión Europea sobre Sistemas de Conducción Automatizada (ADS) (EU) 2022/1426 (IGARR, 2022): establece la normativa para aplicar el Reglamento (UE) 2019/2144 antes mencionado, en lo que respecta a la homogeneización de procedimientos y especificaciones técnicas para la homologación de tipos de Sistemas de Conducción Automatizada (*Automated Driving Systems*, ADS) de los vehículos totalmente automatizados.

Este proyecto de Reglamento establece las especificaciones técnicas, los requisitos de evaluación y ensayo, así como los requisitos administrativos necesarios para la homologación de tipo del sistema de conducción automatizada de los vehículos totalmente automatizados para tres casos de uso:

- a) Vehículos totalmente automatizados diseñados y fabricados para el transporte de pasajeros o mercancías en una zona predefinida en un entorno urbano o suburbano.
- b) “Hub-to-hub”: vehículos totalmente automatizados o vehículos bimodo autónomo-manual, diseñados y fabricados para el transporte de pasajeros o mercancías en una ruta predefinida con puntos fijos de inicio y final de un viaje, que pueden incluir un entorno urbano, suburbano o de autopista.

- c) “Servicio de aparcacoches automatizado”: vehículos de modo bimodo autónomo-manual con un modo de conducción totalmente automatizado para aplicaciones de estacionamiento dentro de instalaciones de estacionamiento predefinidas.

2.3.2. Normativa del Comité Europeo de Normalización (CEN)

En el marco del Comité Técnico CEN/TC 226 “Equipamientos Viales” existe un Grupo de Trabajo (WG 12) relativo a la interacción entre la carretera y los sistemas avanzados de ayuda al conductor (ADAS) y los vehículos autónomos. Dentro de este Grupo de Trabajo se ha elaborado un Informe Técnico (*Technical Report*), el CEN/TR 17828:2022 titulado “Road infrastructure - Automated vehicle interactions - Reference Framework Release 1” que analiza las acciones de estandarización que son necesarias para el despliegue de aplicaciones y casos de uso prioritarios a corto plazo en el contexto del despliegue de vehículos automatizados desde el nivel 1 de SAE hasta el nivel 5 de SAE.

Por otra parte, cabe destacar el CEN/TC 278 “Estandarización de ITS” gestiona la preparación de normas en el campo de los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) en Europa. Sirve como plataforma para que las partes interesadas europeas intercambien conocimientos, información, mejores prácticas y experiencias en ITS. Y el Comité UNE/CTN 159 “Sistemas inteligentes de transporte” se dedica a la normalización de la telemática aplicada al transporte y circulación por carretera en España.

2.3.3. Normativa española

En el ámbito nacional destaca la siguiente regulación:

- 2021: Estrategia de Movilidad Segura, Sostenible y Conectada 2030 del MITMA (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana): establece en el Eje 5 “Movilidad Inteligente” la Línea de Actuación 5.3., dedicada al impulso de los vehículos conectados y autónomos.
- 2022: Instrucción VEH 2022/07 sobre “Autorización de pruebas o ensayos de investigación realizados con vehículos de conducción automatizada en vías abiertas al tráfico en general” (DGT–Ministerio del Interior): establece un procedimiento para solicitar autorización a la Dirección General de Tráfico para la realización de una prueba o ensayo de investigación extraordinarios en vías de uso público.
- 2022: Anteproyecto de Ley de Movilidad Sostenible (MITMA): su Título V sobre “Innovación, digitalización y formación en el transporte y la movilidad”, y más concretamente el Capítulo I de espacio controlado de pruebas para la movilidad y el Capítulo II de vehículo automatizado, contemplan la regulación del vehículo autónomo y establece un procedimiento para la realización de pruebas en vías públicas.

3. CASOS DE USO

La adopción de los VAC depende de cuatro factores principales: la regulación, la preparación tecnológica, el atractivo del caso de negocio y la preferencia del cliente. A su vez, la preferencia del cliente depende en gran medida del coste de estos servicios VAC en comparación con otros modos de transporte (Heineke *et al.*, 2022).

Tradicionalmente se ha señalado la mejora de la seguridad en las carreteras y la reducción de la congestión del tráfico como los principales beneficios de la conducción automatizada. Sin embargo, estos beneficios sólo se conseguirán en fases tardías, cuando los porcentajes de penetración del VAC circulante sean altos. A modo de ejemplo, L3Pilot, el proyecto europeo que busca probar la viabilidad de la conducción autónoma a través de pruebas piloto a gran escala prevé que la conducción autónoma reduzca los accidentes de circulación hasta un 15 % cuando el 30 % de los vehículos circulantes utilice esta tecnología (Cassauwers, 2022). Además, el vehículo autónomo probablemente se desplegará primero en las vías de gran capacidad, que son las que menos accidentes tienen (el 25 % de los accidentes se producen en autopistas y autovías (OTLE-MITMA, 2022)).

La implantación y despliegue de servicios de transporte con VAC, por tanto, va a depender principalmente del valor comercial de su implantación, es decir, de su capacidad de reducir el coste repercutido en el usuario final (fundamentalmente proveniente de la mano de obra en conductores). En los casos en los que el coste del conductor repercute de forma significativa en el usuario final, como por ejemplo en el taxi, el beneficio de automatizarlo será mayor. Por el contrario, los modos de transporte colectivo en los que el coste del conductor constituye un pequeño porcentaje del coste repercutido al usuario, como en trenes o autobuses interurbanos, la automatización no genera un gran beneficio. Un ejemplo claro es el metro de Barcelona, que a pesar de que su Línea 9 del metro es autónoma desde su creación en 2009 (es decir, existe la tecnología para automatizarlo), el poco peso que representa el coste del conductor en el transporte, unido al riesgo que supone un posible fallo tecnológico, disuaden de la automatización en el resto de líneas convencionales.

En la figura 3 se muestran las tipologías de casos de uso que se explican a continuación.

	Personas	Mercancías
Urbano	 Robotaxis (Baidu Apollo robotaxi)	 Vehículos de entrega de último kilómetro (Starship)
	 Autobús autónomo (Alsa)	
Interurbano	 Vac para particulares (Tesla)	 Transporte de mercancías (Waymo)

Figura 3. Casos de uso de VAC.

3.1. Transporte de viajeros

3.1.1. Robo-taxi

El taxi, como se puede apreciar en la figura 4, es el medio de transporte con mayores costes para el usuario final y, por tanto, donde la implantación del vehículo autónomo tiene mayor importancia comercial. Al eliminar al conductor de la ecuación las ganancias de los robo-taxis se dispararían, y es por esto por lo que el robo-taxi puede ser el gran protagonista de la conducción autónoma.

Las principales empresas que compiten en desarrollar la conducción autónoma se están centrando en este servicio de transporte:

- Uber: empresa pionera en el desarrollo del VAC, trabajaba desde 2015 en un sistema llamado “Uber Advanced Technologies Group” (ATG) para investigar y desarrollar la tecnología. Su estrategia de negocio se centra en el desarrollo de robotaxis, dado que su especialización en servicios VTC (Vehículo de Transporte con Conductor) apenas obtiene ganancias, y su financiación depende de su credibilidad a la hora de convencer al inversor de su capacidad de desarrollar esta tecnología. Aun así, varios contratiempos costosos, y la trágica muerte de un peatón de Arizona en 2018, llevaron a Uber a vender en 2020 su operación VAC a Aurora, alineada con Toyota.
- Aurora: *startup* creada en 2017, compró en 2020 la división de desarrollo VAC de Uber y está asociada con fabricantes como Volvo, entre otros. Centra sus soluciones comerciales en dos líneas de producto: Aurora Horizon, especializada en camiones autónomos, y Aurora Connect, solución de robo-taxi. Esta empresa centrada en suministrar la “Conducción como Servicio” planea disponer de soluciones comerciales a partir de 2024.
- Waymo: una subsidiaria de Alphabet (el grupo empresarial de Google), Waymo ha estado trabajando en tecnología de vehículos autónomos desde 2009 y se

ha convertido en el líder indiscutible en la carrera de los taxis robotizados de EE. UU. Ha recaudado miles de millones de capital privado y opera una flota de unos 600 taxis robotizados nivel 4 sin conductor en Phoenix, Arizona, con el objetivo de expandirse por Los Ángeles y San Francisco, en California.

- Apollo Go: es el programa de taxis autónomos del gigante chino Baidu (el “Google” usado en el país asiático). Para 2023 se espera que haya una flota de más de 3000 vehículos nivel 4 de prueba en 23 ciudades chinas. Este país cuenta con un marco regulatorio más favorable para los empresarios y con menos limitaciones en cuanto a la seguridad, lo cual favorece el desarrollo del ecosistema empresarial y tecnológico del coche autónomo VAC, posicionándose como un fuerte competidor.
- Mobileye: antiguo socio de Tesla, Mobileye es una empresa israelí comprada por Intel por \$15 mil millones en 2017. Su estrategia se centra en otorgar licencias de su hardware y software autónomo a fabricantes de automóviles como BMW, Volkswagen y Nissan, lo que resuelve problemas como la producción en masa y la comercialización de vehículos. Una de las grandes ventajas es que sus desarrollos se podrían utilizar tanto en vehículos privados como en modelos públicos de viajes compartidos.

3.1.2. Autobús autónomo (robo-shuttle)

A modo de servicio híbrido entre el microbús urbano y el taxi, algunas empresas están desarrollando vehículos de 4 a 12 plazas destinados a proporcionar un servicio de transporte sin conductor, más flexible que el transporte público regular y sin los altos gastos generales de la propiedad de un automóvil privado. Este modelo de vehículo dirigido al servicio de transporte compartido permite a los fabricantes instalar los sensores LiDAR más recientes y costosos, mientras que, si se instalaran en turismos convencionales, quedarían fuera del rango de precios asumible por los consumidores.

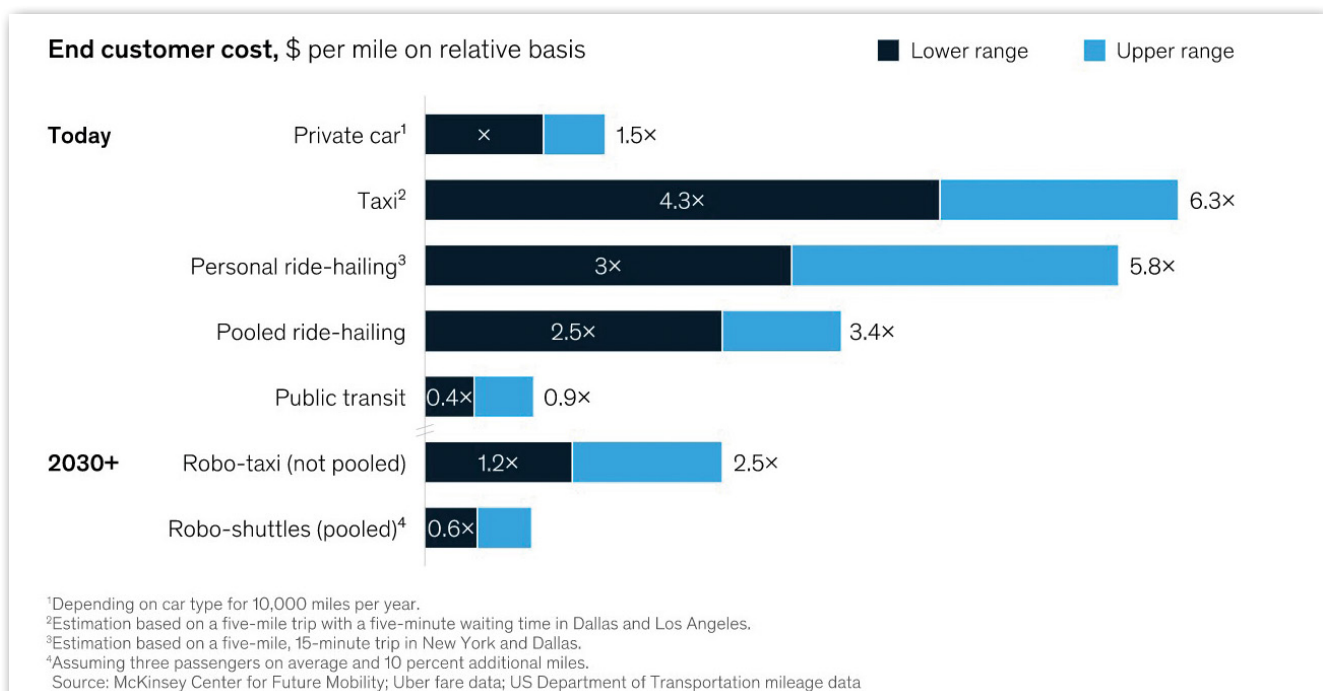


Figura 4. Costes de movilidad para el usuario final (Heineke *et al.*, 2022).

Al igual que el robo-taxi, este servicio de transporte autónomo está dirigido a cifras reducidas de pasajeros, ya que en modos de transporte colectivo de mayores dimensiones (autobús o incluso tren) el coste del conductor dividido entre el número de viajeros hace que la implantación de un sistema autónomo no tenga sentido comercial.

Existen multitud de empresas que están desarrollando *robo-shuttles*, dos ejemplos son:

- Navya: *startup* francesa con 280 empleados en Francia, EE. UU. y en Singapur. Desde 2015 ha sido la primera en comercializar y poner en servicio soluciones de movilidad autónoma. Cuenta con un servicio de autobús autónomo llamado Autonom Shuttle para el transporte de pasajeros, que está en uso en ciudades de más de 23 países. Asimismo, cuentan con un vehículo llamado *Autonom Tract* que está diseñado para el transporte de mercancías.
- 2GetThere: empresa holandesa subsidiaria de ZF Group, está especializada en autobuses autónomos. Cuenta con proyectos en Ámsterdam, Bruselas y la futurista ciudad de Masdar en los Emiratos Árabes Unidos.

3.1.3. Vehículo particular autónomo

La preferencia del cliente por la adquisición de un VAC particular dependerá fundamentalmente de la relación entre el coste del vehículo y la mejora de la experiencia de conducción. En los vehículos privados el coste del conductor es nulo, por lo que el cliente valorará adquirir un VAC cuando el valor subjetivo que asocia a la mejora de la experiencia de conducción supere el coste adicional que supone un VAC. En un sistema de nivel 2, el coste de los componentes de las funciones avanzadas está actualmente en el rango de 1.000 € a 2.000 €. En un sistema de nivel 3, en el que se requieren sensores adicionales, fusión sensor-datos, mayor potencia de cálculo y redundancia en la actuación, los componentes podrían costar hasta 5.000 €, más las licencias de *hardware* y *software* y los sistemas de seguridad requeridos en el momento del lanzamiento del sistema, que en el caso del “Autopilot” (considerado nivel de automatización 2+) de Tesla asciende a 8.000 € (Doll *et al.*, 2020).

En cualquiera de los casos, el aumento del coste de los vehículos convierte las características avanzadas de la conducción autónoma en una funcionalidad de alta gama, sólo al alcance de los consumidores más pudientes. Es decir, los productores enfocados al mercado masivo probablemente no buscarán las características avanzadas de conducción autónoma a corto y mediano plazo.

Algunas empresas que están especializándose en este segmento son:

- Tesla: su “Autopilot” está considerado como un nivel de automatización 2+, que requiere la atención del conductor en todo momento, sin soltar el volante.
- Mercedes: su “Drive Pilot” de nivel 3 se espera que sea aprobado este febrero de 2023 por las autoridades automovilísticas del estado de Nevada, EE. UU. En esta funcionalidad el conductor tiene diez segundos para retomar el control del coche en caso de que el sistema lo requiera o detendrá automáticamente el vehículo y encenderá las luces de emergencia.

3.2. Transporte de mercancías

3.2.1. Distribución de mercancías de último kilómetro

De forma similar al transporte de viajeros, el mayor interés comercial se encuentra en aquellos casos en los que es necesario un repartidor para una mercancía de volumen (o peso) reducido, y eso se da en la llamada distribución de último kilómetro (o última milla) de mercancías.

Esta modalidad de transporte autónomo es de máxima rentabilidad cuando las distancias de transporte son amplias, es decir, en zonas residenciales de baja densidad, como los suburbios residenciales de EE. UU., donde las distancias son largas y las calles homogéneas. En Europa, y particularmente en España, donde contamos con núcleos de población muy densos, esta opción de transporte presenta dudas, dadas las dificultades tecnológicas de la Inteligencia Artificial para identificar zonas de depósito seguro de mercancías o problemas de robo o vandalismo.

Algunas empresas que están especializándose en este segmento son:

- Amazon Scout: es un vehículo de 6 ruedas del tamaño de una nevera pequeña que se mueven “a ritmo de caminata” por la acera, que Amazon lleva probando en diversas ciudades de EE. UU. desde 2019. Estos dispositivos se detienen en la puerta del domicilio de los usuarios para que estos recojan sus pedidos.
- Goggo Network: *startup* alemana creada en 2018, se especializa en robots de entrega de baja velocidad optimizados para vecindarios residenciales del mismo estilo que los de Amazon Scout. Cuenta con proyectos de entrega de última milla en Francia y España.

3.2.2. Transporte con camiones autónomos

Alrededor del 70 % de las mercancías en los EE. UU. viajan por camión, cifra que asciende al 96 % en España (OTLE-MITMA, 2022), por lo que cualquier sistema que reduzca los costes, sin sacrificar la seguridad, cambiaría las reglas del juego. Se estima que las tecnologías de conducción autónoma podrían reducir el coste total del transporte de larga distancia por camión en más de un 30 % mediante el ahorro de mano de obra y el aumento de la eficiencia de conducción (Collie *et al.*, 2022). Esto, unido a la falta de relevo generacional en los conductores de este tipo de vehículos y la mayor simplicidad de circulación en vías interurbanas de gran capacidad, hace que exista un creciente interés en el desarrollo de los camiones autónomos. Aun así, las desventajas potenciales son mayores: un camión totalmente cargado conduciendo a 100 km/h puede causar un gran daño si algo sale mal.

La tecnología actual hace muy difícil transitar por vías urbanas, por lo que las empresas especializadas en transporte de mercancías autónomo están siguiendo el modelo “Transfer-Hub” en el que el trayecto se divide en dos partes: unos tramos en entornos urbanos, recorridos con conductores humanos que recogen y llevan la mercancía hasta un centro de operaciones a las afueras de la ciudad, donde toma el relevo el sistema de conducción autónomo que conecta una red de terminales (Adler, 2021).

Algunas empresas que están especializándose en este segmento son:

- TuSimple Autonomous Trucking: fundada en 2015, esta empresa californiana es líder en el segmento de camiones autónomos. Cuenta con una red de terminales de carga (*Autonomous Freight Network*, AFN) en el cinturón del sol de EE. UU. (figura 5) entre las que operan sus camiones autónomos. Cuenta con una flota de más de 100 vehículos en servicio, tiene pedidos de 7.500 camiones autónomos nivel 4 y ha realizado colaboraciones con grandes operadores de transporte y logística. Asimismo, en Europa están colaborando en un proyecto piloto con el fabricante sueco de vehículos pesados SCANIA para transportar mercancías en condiciones normales de tráfico a lo largo de 300 km, entre centros logísticos ubicados en las ciudades de Södertälje y Jönköping, con la primera y última milla manejada manualmente (<https://www.tusimple.com/>).
- Waymo Via: Es la apuesta tecnológica de Waymo por los camiones autónomos. Cuenta con zonas de pruebas en los estados de Texas, Arizona, California, Ohio y Michigan, en EE. UU., y está asociado con los grandes operadores logísticos.
- Aurora: Su línea de producto Aurora Horizon está especializada en los camiones autónomos y cuenta con proyectos piloto en Texas, con el objetivo de expandirse por el cinturón del sol de EE. UU. siguiendo el

modelo “Transfer-Hub”. Esta empresa centrada en proporcionar la “Conducción como Servicio” planea disponer de soluciones comerciales a partir de 2024.

3.2.3. Transporte con ferrocarriles autónomos

Con objeto de combinar la sostenibilidad del sistema ferroviario y la flexibilidad del transporte por carretera, la empresa Parallel Systems (<https://moveparallel.com/>) está conceptualizando una nueva arquitectura de transporte ferroviario. Concibe el transporte de mercancías por ferrocarril como una serie de vehículos portacontenedores que pueden autoensamblarse en ruta formando un pelotón, sin la necesidad de formar grandes convoyes, que hagan el servicio económico.

El ferrocarril es actualmente un medio de transporte adecuado para el transporte de mercancías de grandes volúmenes a largas distancias. En contraposición a esto, la solución propuesta por Parallel Systems permitiría atender a un transporte de corta y media distancia, liberando espacio de las autopistas, aprovechando las redes ferroviarias de media distancia infrautilizadas, mediante la construcción de microterminales cerca de los cargadores y clientes, que requieren mucha menos superficie que una terminal tradicional (figura 6).

Parallel Systems está probando actualmente su prototipo Mark 1 en un tramo de tramo de vía de 3 millas en Fillmore,



Figura 5. Red de terminales de carga de TuSimple (Fuente: <https://www.tusimple.com/>).



Figura 6. Sistema autónomo de transporte por ferrocarril de Parallel Systems.

California, que utiliza tecnología VAC autónoma para la propulsión. A fecha de enero de 2022, esta compañía californiana fundada por antiguos ingenieros de SpaceX, contaba con una financiación de \$53.15 millones.

4. ESCALA TEMPORAL DE SU PENETRACIÓN

Para determinar las necesidades de infraestructura que pueda llegar a requerir los niveles más altos de automatización, es necesario realizar previsiones sobre el grado de adopción de esta tecnología. La penetración de los vehículos autónomos en el mercado es un tema muy debatido en la industria automovilística y en las empresas tecnológicas. Los expertos tienen opiniones diversas sobre cuándo se alcanzará la masa crítica de adopción de los vehículos autónomos y la velocidad a la que esto sucederá.

4.1. Pronósticos globales

Existen multitud de pronósticos sobre la penetración del VAC en el mercado (S&P Global, 2020; CPCatapult, 2020). Un ejemplo de ellos es el realizado por el experto en el sector automotriz S&P Global/IHS Markit, que estima que alrededor de 4,5 millones de VAC nivel 3 (y algunos con funciones de nivel 4) estarán en circulación para 2030, tal y como indica la figura 7. En el caso de los vehículos autónomos de nivel 4 y superiores, IHS Markit prevé de forma muy optimista una flota de aproximadamente

5,5 millones para 2030, como muestra la siguiente figura (derecha). Se espera que estas flotas previstas estén compuestas principalmente por taxis robotizados y vehículos utilizados para servicios de alquiler y de transporte en lugar de los vehículos privados.

Sin embargo, las tendencias de pronósticos de penetración de mercado tienden a ser actualizadas constantemente y pospuestas para una fecha posterior, lo que genera una incertidumbre significativa en torno al tiempo de llegada de vehículos altamente automatizados (nivel 3 y superior) al mercado. Por ejemplo, Tesla anunció por primera vez su objetivo de lanzar vehículos autónomos nivel 5 en 2018 y desde entonces ha pospuesto esta fecha en repetidas ocasiones.

4.2. Opiniones de expertos y otros agentes del sector

Austrroads, en su informe de 2022 *Minimum Physical Infrastructure Standard for the Operation of Automated Driving. Scenarios for Potential Availability and Usage of Different Levels and Types of Automated Driving* (Xue et al., 2022), lleva a cabo una serie de consultas con agentes y expertos del sector con objeto de obtener sus puntos de vista sobre los futuros escenarios de conducción y obtener su opinión sobre problemas de la disponibilidad de las tecnologías VAC, la demanda de esta tecnología y las necesidades de infraestructura física para permitir la implementación de VAC (tabla 2).

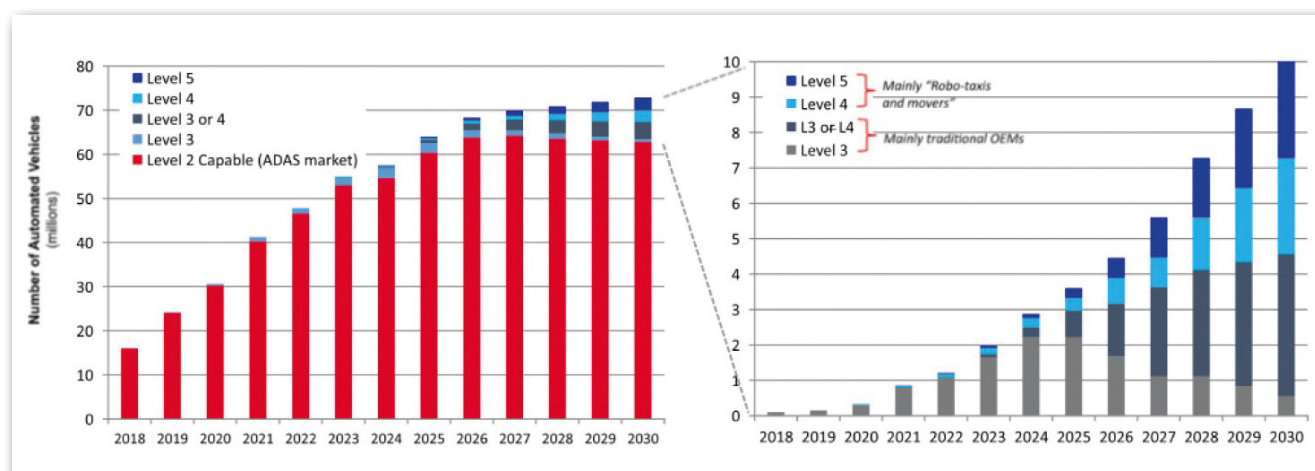


Figura 7. Crecimiento del mercado global de VAC (Doll et al., 2020).

Tabla 2. Grupos industriales consultados por Austrroads (Xue et al., 2022)

Sector	Organisation
OEMs	Tesla and Lexus
AV sensor technology vendors	Mobileye
AV-related technology vendors	Kapsch, HERE, Cisco, Transmax
AV trial leaders	Easymile, Centre for Accident Research and Road Safety – Queensland (CARRS-Q)
Automotive industry	ANCAP, Australian Federal Chamber of Automotive Industry
Insurance companies	Insurance Australia Group (IAG), Suncorp
Freight vehicle industry	Aramex (urban logistics), Australian Trucking Association
Australian researchers	QUT, UNSW, University of Melbourne, ADVI, TAS DCRC, Private Consultants
International experts	European Commission, FHWA, EuroRAP, Singapore Land Transport Authority

4.2.1. Vehículos de pasajeros

El coste de propiedad de los VAC durante los primeros años será seguramente alto, por lo que los consultados compartieron la opinión de que es más probable que los consumidores usen primero los VAC como un servicio a demanda en lugar de adquirirlos. Esta opinión es coherente con la literatura que apunta que el modelo de propiedad de automóviles cambiará de modo que los servicios de transporte bajo demanda, como los robo-taxis, sustituirán una parte significativa de los viajes que antes se realizaban en vehículos privados.

Dado el alto coste total de propiedad de los vehículos automatizados, la mayoría de los consultados estimó un calendario de:

- 5 a 10 años para el despliegue a gran escala del nivel 3 en las carreteras y áreas metropolitanas de las grandes ciudades.
- 10 a 20 años para el despliegue del nivel 4 en áreas urbanas y el nivel 3 en áreas rurales.
- 20 a 40 años para aplicaciones de nivel 5.

4.2.2. Vehículos de mercancías de larga distancia

El pelotón de camiones (*platooning*) y la automatización reducirían los costes de explotación y contribuirían a mejorar la seguridad, ya que los vehículos pesados funcionan durante más horas y viajan distancias más largas. Teniendo en cuenta que el ciclo de vida promedio del vehículo pesado es más corto que el de los automóviles de pasajeros, la evolución de los ADAS y la automatización puede ocurrir más rápido de lo esperado. Por ello, es probable que el transporte por carretera sea uno de los primeros casos de uso para la autonomía en el segmento comercial (Heineke *et al.*, 2021), pero sólo en dominios de diseño operativo limitado (puertos, almacenes, caminos rurales de poco tráfico o limitado a operaciones nocturnas), y en el transporte de mercancías pesadas de larga distancia. Por otra parte, existen barreras para su implementación, como son las restricciones regulatorias, la menor aceptación pública y las preocupaciones de seguridad.

4.3. Pronóstico de vehículos circulantes

Austrroads en su informe de 2022 *Minimum Physical Infrastructure Standard for the Operation of Automated Driving. Scenarios for Potential Availability and Usage*

of Different Levels and Types of Automated Driving (Xue *et al.*, 2022), realiza un pronóstico sobre la venta de vehículos altamente automatizados. A corto plazo (antes de 2030), prevén que los automóviles de pasajeros altamente automatizados y los taxis robotizados estarán disponibles comercialmente, sin embargo, representarán solo el 5 % de las nuevas ventas. Se espera que entre 2030 y 2035 los autobuses y camiones autónomos de larga distancia estarán disponibles comercialmente.

En la siguiente gráfica de la figura 8, Austrroads (Xue *et al.*, 2022) ilustra una posible cronología de penetración en el mercado de los vehículos de pasajeros, teniendo en cuenta el índice de venta de nuevas flotas, el crecimiento anual del mercado (una tasa per cápita constante basada en pronósticos de crecimiento demográfico bajo, medio y alto) y una vida útil promedio de los vehículos de pasajeros de 10 años.

Particularizando los datos al escenario español (edad media del parque de vehículos de 13,5 años, PIB y PIB *per cápita* estancado y un crecimiento demográfico decreciente hasta 2050 por una natalidad muy baja) cabe pensar que España se podría situar en un lugar más cercano al escenario más conservador (en rojo en la figura 8).

4.4. Quién ganará la carrera por los VAC: China, EE. UU. o Europa

Es difícil determinar con certeza quién ganará en el desarrollo tecnológico del vehículo autónomo, ya que depende de muchos factores, como la inversión, la regulación y la infraestructura.

China tiene una gran base de ingenieros y trabajadores altamente capacitados en las tecnologías de inteligencia artificial y robótica. Además, el gobierno chino ha proporcionado un fuerte apoyo político y financiero para el desarrollo de la industria del vehículo autónomo, estableciendo un marco regulatorio más favorable para los empresarios del país, lo cual acelera el desarrollo de los sistemas de conducción autónoma avanzados.

Los EE. UU. también tienen una gran fortaleza en el desarrollo del vehículo autónomo, ya que cuenta con un gran número de empresas líderes en tecnología, como Google y Tesla, que están invirtiendo fuertemente en esta área. Además, las regulaciones de los EE. UU. en esta área son ampliamente consideradas como algunas de las más progresistas del mundo.

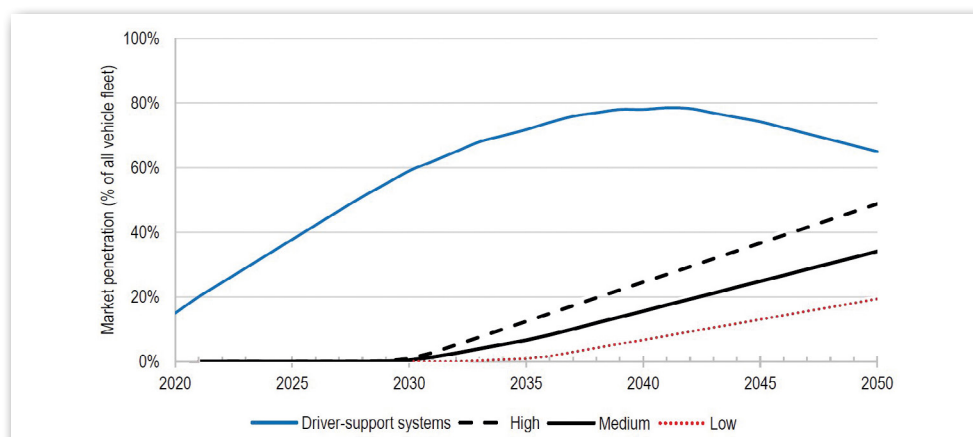


Figura 8. Pronóstico de penetración de VAC en la flota de vehículos circulantes (Xue *et al.*, 2022).

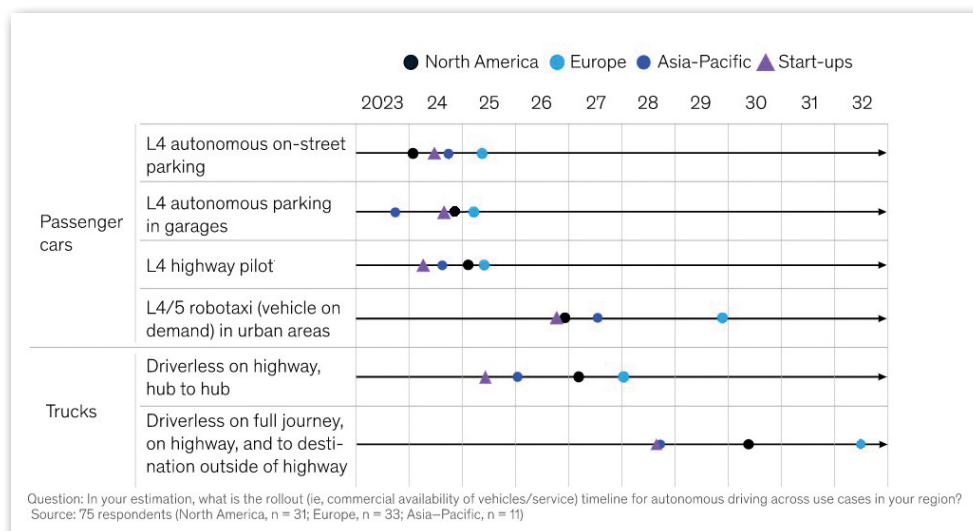


Figura 9. Cronograma de despliegue tecnológico por continente (Heineke et al., 2021).

Europa cuenta con varios fabricantes de automóviles líderes en el mundo, como Mercedes-Benz, BMW y Volvo, que están realizando fuertes inversiones en esta tecnología. Además, las regulaciones de la Unión Europea en esta área son muy exigentes, lo que proporciona una buena cobertura jurídica para las pruebas y el uso de estos vehículos en carreteras públicas. Sin embargo, los principales desarrolladores de VAC en Europa son en su mayoría pequeñas empresas que están cerrando o siendo absorbidas por empresas más grandes provenientes de fuera de la UE, como Microsoft, Google, Baidu o General Motors, capaces de sostener las inversiones necesarias sin necesidad de asegurar ingresos rápidos.

Existe una carencia, por tanto, de grandes empresas tecnológicas que puedan competir claramente por el liderazgo en el sector, así como una mayor aversión al riesgo en la inversión europea y una creciente demanda de profesionales de perfiles tecnológicos, lo que facilita su movilidad a mercados mejor remunerados como el estadounidense (Europa tiene el objetivo de aumentar el número de especialistas TIC de los 8,4 millones de 2020 hasta los 20 millones en 2030 (CE, 2021)). Estas condiciones hacen que Europa tenga una posición difícil en la competición a corto plazo por el liderazgo. Sin embargo, el modelo de desarrollo tecnológico de la UE basado en asociaciones entre el sector público y privado propicia un enfoque conjunto que avanza de una forma más lenta pero más firme, en contraposición al modelo americano basado en la unilateralidad de la iniciativa privada.

En general, se puede esperar que EE. UU. o China lideren el camino en el desarrollo de vehículos autónomos a corto-medio plazo, pero también es probable que se vean cambios en las tendencias y posiciones de liderazgo en el futuro, dependiendo de la inversión, la regulación y la innovación en este campo.

5. ADAPTACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA AL VEHÍCULO AUTÓNOMO

Con objeto de facilitar la implantación y futuro despliegue del vehículo autónomo es importante identificar y evaluar posibles cambios en la infraestructura que permitan respaldar su operación, de manera que la infraestructura

no obstaculice ni retrase su adopción. Para ello, se han de tener en cuenta los futuros escenarios de despliegue del VAC, la incertidumbre tecnológica que todavía existe y los posibles cambios de infraestructura necesarios, lo cual nos permite realizar una priorización de inversión.

5.1. Inversiones en infraestructura física

Astroads, en su informe de 2022 *Minimum Physical Infrastructure Standard for the Operation of Automated Driving Part D. Economic Analysis of Investment Options* (Xue et al., 2022), identifica posibles cambios en la infraestructura física para su adaptación al vehículo autónomo:

- **Señalización horizontal:** desempeña un papel fundamental para respaldar la operación de los VAC, que se basan en la visión artificial para navegar dentro de los límites de la calzada y del carril. En algunos casos, puede ser necesario invertir en señalización horizontal para adecuar la retrorreflexancia (EuroRAP, 2013), pero en la mayor parte de las carreteras de la Red del Estado bastaría con vigilar que se cumplen las disposiciones actuales en cuanto a niveles de retrorreflexión a lo largo de la vida útil de la marca vial, contenidas en el PG-3 (Leal, 2020). Esta inversión beneficia tanto a los vehículos convencionales como a los VAC.
- **Señalización vertical:** es necesario asegurar la visibilidad, homogeneidad y buen estado de la señalización vial, ya que la conducción autónoma seguirá dependiendo de la lectura de estas señales en combinación con otras herramientas de navegación como los mapas de alta definición. Esta inversión ayudará a reducir la probabilidad de errores de reconocimiento por parte de los VAC, beneficiando tanto a los vehículos convencionales como a los VAC.
- **Señalización de zonas de obras:** contempla sistemas de señalización inteligente para acomodar la presencia de VAC en las zonas de obras, tales como señales digitales, sensores, dispositivos de monitorización y comunicación. Un sistema de señalización inteligente beneficiaría tanto a los vehículos conven-

cionales como a los VAC. Actualmente la plataforma DGT 3.0 trabaja en un sistema de conos conectados para obras.

- **Semáforos:** reemplazo de la cabeza de los semáforos para mejorar su visibilidad por parte de los vehículos equipados con tecnología de visión artificial. Una de las barreras identificadas es que los VAC sean capaces de encontrar e interpretar, mediante procesamiento de imágenes, los semáforos que son aplicables. Para ello, pueden ser asistidos por mejoras en los dispositivos de semaforización, ya que, incluso cuando se utilizan herramientas como los mapas de alta definición y los C-ITS, los VAC siguen necesitando contrastar el estado de las luces de los semáforos con sus sistemas de visión. Esta inversión podría mejorar también la visibilidad de los semáforos para los conductores humanos, por lo que beneficiaría tanto a los VAC como a los vehículos convencionales.
- **Paradas VAC:** proporcionaría un área segura para la subida y bajada de pasajeros de los VAC en áreas urbanas. Esta medida solo beneficiaría a los VAC, ya que los vehículos convencionales no podrían acceder a estas instalaciones al impedir/desplazar el acceso de los VAC.
- **Enlaces a distinto nivel:** la separación a distinto nivel es una posible solución para evitar choques en nudos no señalizados a lo largo de carreteras en áreas urbanas e interurbanas. La separación a distinto nivel puede reducir la cantidad de colisiones en estos lugares donde la tecnología de conducción autónoma en la vía secundaria no puede dar preferencia de paso al tráfico que se aproxima en la vía principal como lo hacen los conductores humanos. De esta medida se beneficiarían tanto los vehículos convencionales como los VAC, aunque por lo general es una solución de alto coste.
- **Zonas de parada segura:** permitirían a los VAC estacionar de manera segura en el lateral de una carretera interurbana de alta capacidad durante un accidente u otros incidentes inesperados. Se trata esencialmente de espacios de estacionamiento donde un vehículo puede detenerse sin correr el riesgo de colisiones. Tanto los vehículos convencionales como los VAC podrían acceder a las zonas de parada segura durante un incidente, saliendo ambos beneficiados de dicha inversión.
- **Puentes y pavimentos:** posible necesidad de invertir en su refuerzo para soportar el aumento de cargas debido a la formación de pelotones de camiones (*platooning*).
- **Carril dedicado VAC:** carril dedicado para respaldar el funcionamiento de los VAC que dan servicio de transporte colectivo, como los robo-taxis o robo-buses. Esta medida sólo sería beneficiosa para los vehículos sin conductor.
- **Carril dinámico dedicado para camiones VAC:** consistiría en la instalación de tecnología de asignación dinámica en carriles existentes para dar servicio a los camiones VAC. Esta inversión proporcionaría unos beneficios de seguridad y un ahorro de tiempo de viaje.

- **Aparcamientos VAC remotos y hubs de movilidad:** permiten que los VAC que conducen solos estacionen en una instalación de estacionamiento remota.

La siguiente tabla (tabla 3), elaborada a partir de la información recogida en el informe de Austroads, agrupa dichos elementos de inversión en cuatro clases:

- Clase 1: mejoras de la infraestructura existente que pueden beneficiar tanto a los vehículos autónomos y conectados de bajo nivel (LVAC) (vehículos equipados con ADAS) como a los VAC de alto nivel (HVAC) (vehículos equipados con sistemas de conducción autónoma).
- Clase 2: creación de nueva infraestructura que puede beneficiar tanto a los LVAC como a los HVAC.
- Clase 3: actualizaciones de la infraestructura existente que benefician solo a los HVAC.
- Clase 4: creación de nueva infraestructura que beneficia únicamente a los HVAC.

Asimismo, se identifica la tipología de carretera a la que afectaría (urbana/interurbana), los vehículos a los que está destinado, el tipo de infraestructura digital que brindaría el mismo beneficio, la probabilidad de que puedan ser redundantes gracias a futuras tecnologías de sensores en vehículos, y el horizonte temporal dentro del cual se espera que el elemento de inversión sea más relevante para respaldar la conducción autónoma:

- Corto plazo: hasta 2030
- Medio plazo: del 2030 al 2040
- Largo plazo: del 2040 al 2050

Por último, el informe de Austroads (Xue *et al.*, 2022) hace un exhaustivo análisis económico evaluando la relación coste-beneficio de cada uno de los elementos identificados que justificarían su inversión, cuyas conclusiones son recogidas en la tabla 3.

Como se puede observar, las opciones de inversión a corto plazo tienen más probabilidades de estar justificadas que las que se requieren en un futuro más lejano. Aunque cabe señalar que las opciones a medio y largo plazo que se evalúan como no viables económicamente en este momento podrían estar justificadas en el futuro y por ende, es recomendable hacer una reevaluación futura de estas opciones de inversión.

El informe de Austroads utiliza la matriz de priorización mostrada en la figura 10 para ordenar las opciones de inversión en base a su viabilidad económica y valor estratégico a la hora de facilitar el despliegue y conducción del vehículo autónomo, ya sea mejorando el rendimiento o la percepción de los VAC, o por ser difícil su sustitución por tecnología como los mapas de alta definición o sensores en el vehículo.

A modo de conclusión, conviene que las inversiones para adaptar la infraestructura física a la conducción autónoma sean implementadas en etapas y en complejidad creciente:

- Inversiones a corto plazo: deben centrarse en respaldar la conducción de vehículos con ADAS. Estas

Tabla 3. Análisis de opciones de inversión en infraestructura física (Xue *et al.*, 2022)

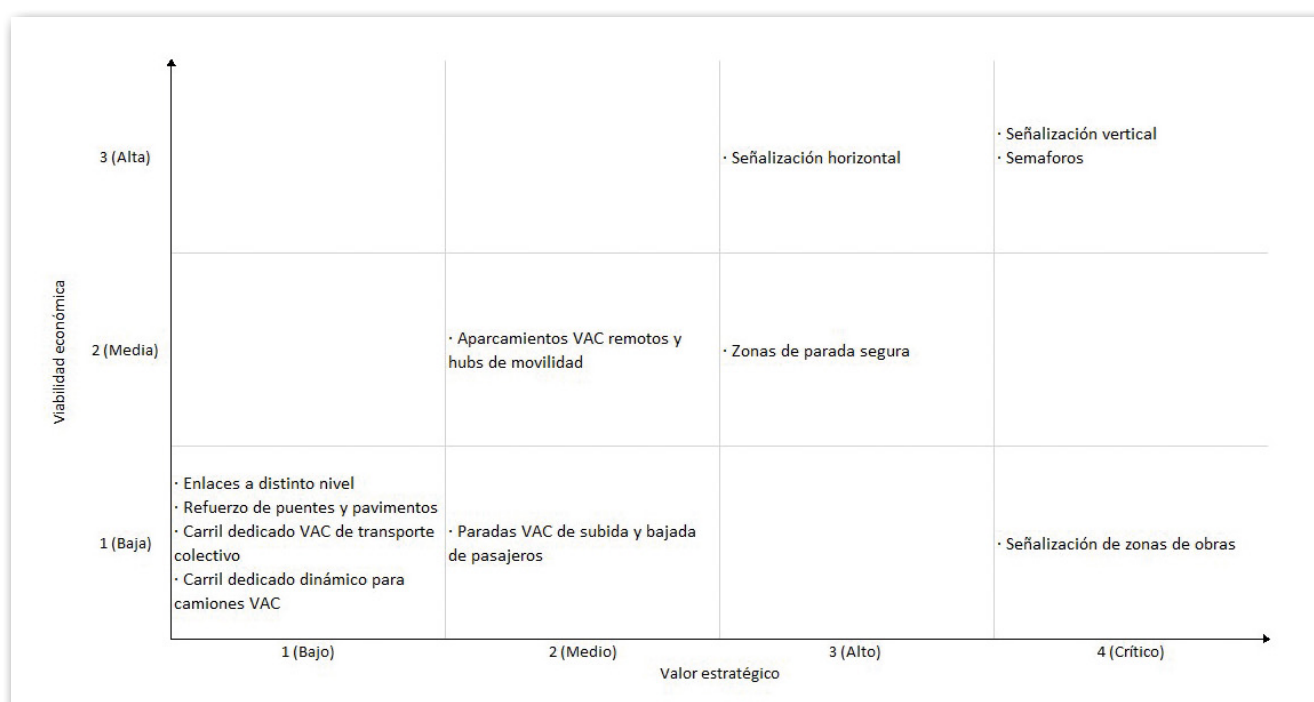
Elemento de inversión	Descripción de la acción de infraestructura	Clase de inversión	Tipo de carretera	Uso	Horizonte temporal	Cierre de brechas por infraestructura digital	Cierre de brechas mediante tecnologías de sensores	Probabilidad de que las opciones de inversión estén justificadas económicamente		
								Muy probable	Muy improbable	Sin resultados definitivos
Señalización horizontal y vertical	Mejorar la visibilidad de la señalización horizontal Mejorar la legibilidad de la señalización vertical	Clase 1	Todas	Todos	Corto Plazo	Es probable que lo aborden los mapas AV/HD	Probable	✓		
Señalización de zonas de obras	Uso de tecnología o armonización de señalización para mejorar la percepción de los VAC en las zonas de obras	Clase 1	Todas	Todos	Corto Plazo	Probable ser abordado por V2X	Probable		✓	
Semáforos	Mejorar la legibilidad actualizando las cabezas semafóricas	Clase 1	Urbana	Todos	Corto Plazo	Probable ser abordado por V2X	Probable	✓		
Paradas VAC de subida y bajada de pasajeros	Modificación de los bordillos y aceras para proporcionar áreas de subida/bajada o carga/descarga para vehículos autónomos de pasajeros y de reparto	Clase 2	Urbana	Robotaxis, robobuses y Veh. de entrega autónomos	Medio Plazo	N/D	N/D		✓	
Enlaces a distinto nivel	Segregación de carriles para eliminar los conflictos de tráfico a lo largo de corredores interurbanos	Clase 2	Interurbana	Todos	Medio Plazo	Probable ser abordado por V2X	Probable		✓	
Zonas de parada segura	Provisión de zonas de parada segura en carreteras interurbanas de gran capacidad	Clase 2	Interurbana	Todos	Medio Plazo	N/D	N/D			✓
Puentes y pavimento	Refuerzo estructural de puentes y pavimentos para soportar las mayores exigencias del platooning	Clase 3	Todas	Todos	Largo Plazo	N/D	N/D		✓	
Carril dedicado VAC de transporte colectivo	Conversión de un carril existente en un carril exclusivo HVAC de transporte colectivo	Clase 3	Urbana	Tránsito y robotaxis compartidos	Largo Plazo	Probable ser abordado por V2X	Muy probable		✓	
Carril dedicado dinámico para camiones VAC	Conversión de un carril existente en un carril exclusivo para HVAC de carga con capacidad de asignación dinámica de tráfico	Clase 4	Interurbana	Vehículos pesados de carga de larga distancia	Largo Plazo	Probable ser abordado por V2X	Muy probable		✓	
Aparcamientos VAC remotos y hubs de movilidad	Construcción de aparcamientos para HVAC	Clase 4	Urbana	Turismos autónomos y robotaxis	Largo Plazo	N/D	N/D			✓

inversiones se dirigirían a respaldar mejoras relativamente básicas en los activos viales existentes, como mejoras en la retrorreflectancia y perceptibilidad de los semáforos y la señalización horizontal y vertical, con la expectativa de que se reduzcan los errores de percepción cometidos por los VAC actuales.

- Inversiones a medio plazo: cuando se adopten más VAC para el transporte de viajeros, las inversiones

que apoyen el desarrollo de infraestructura nueva y dedicada comenzarían a estar justificadas, por ejemplo, las zonas de parada segura, aparcamientos VAC seguros, etc.

- Inversiones a largo plazo: cuando se adopte la conducción automatizada para el transporte de mercancías, la inversión debería centrarse en ampliar la mejora de productividad y eficiencia asociados a los VAC.

**Figura 10.** Matriz de priorización de opciones de inversión (Xue *et al.*, 2022).

5.2. Infraestructura de telecomunicaciones

Un aspecto fundamental para la seguridad y eficiencia del vehículo autónomo y conectado es la comunicación con otros agentes, como vehículos, semáforos y señalización de mensaje variable, infraestructura de control remoto, etc. Los vehículos autónomos necesitan la comunicación “Vehículo con Todo” (V2X) para intercambiar información en tiempo real que les permitan tomar decisiones informadas y reaccionar rápidamente a cambios en el entorno, lo que mejora la seguridad y la eficiencia del tráfico. Además, la comunicación también permite una mejor planificación de rutas y una mejor coordinación entre los vehículos autónomos, lo que puede ayudar a reducir el tráfico y los accidentes (Tsukada, 2020).

Las comunicaciones V2X son generalmente peer-to-peer y reservan la banda de frecuencia específica a 5,9 GHz para permitir el desarrollo de Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS). La comunicación V2X se compone de comunicación:

- Vehículo a Vehículo (V2V): tiene por objeto mantener un flujo de información constante entre todos los vehículos cercanos, intercambiando información general del automóvil, su posición, dirección, velocidad y aceleración, mensajes de emergencia como detección de peligros en la carretera, o incluso servicios como platooning.

- Vehículo a Infraestructura (V2I): conecta al vehículo con semáforos y señales de mensaje variable, con objeto de mantener un flujo de información constante sobre éstas y reenviar mensajes de emergencia, e infraestructuras de telecontrol, con objeto de tomar el control de los vehículos para aumentar la seguridad (evitar colisiones), y la eficiencia (conducción en pelotón, reducción del consumo de combustible).

Existen dos tipologías de tecnologías de telecomunicación para posibilitar la comunicación V2X:

- Comunicación celular (LTE-V2X/NG C-V2X): se basa en la utilización de la red de antenas de telefonía móvil de 3G/4G/5G para permitir la comunicación entre vehículos. Este modo de comunicación está ya muy extendido, por lo que el coste de implementación de esta tecnología es bajo, al estar la infraestructura principal ya instalada, e incluso algunos vehículos también tienen integrado este tipo de comunicación. Sin embargo, cuenta con la desventaja de que los desarrollos más avanzados no son retrocompatibles con las versiones anteriores, lo cual podría condicionar la evolución posterior de los sistemas de comunicación VAC. Actualmente, la iniciativa europea The Smart Networks and Services Joint Undertaking (SNS JU) (CE, 2020) tiene, entre sus objetivos, impulsar el despliegue de 5G en Europa mediante la creación de corredores 5G que faci-



Figura 11. Corredores 5G para la movilidad automatizada y conectada (Fuente: SNS JU, 2020).

liten la implantación del vehículo autónomo (figura 11) (SNS JU, 2020).

- Comunicación dedicada de onda corta C-ITS G5 (IEEE 802.11p/802.11bd): se basa en la utilización de RSU (*Road Side Units*) instaladas en la carretera a modo de 'router WiFi' para permitir la comunicación V2X con las OBU (*On Board Units*), instaladas en los vehículos. Este modo de comunicación necesita la instalación de equipos a lo largo de la carretera, con sus correspondientes costes de instalación y mantenimiento, pero cuenta además con la ventaja de tratarse de un sistema retrocompatible, interoperable y que permite la coexistencia con versiones anteriores, lo que lo hace muy adecuado para prestar servicio a una tecnología en desarrollo. Los proyectos C-Roads europeos (figura 12) (<https://www.c-roads.es/>) tienen como objetivo ampliar la prestación de servicios C-ITS probando ambas tecnologías de telecomunicación:

La combinación de ambas tecnologías en un sistema híbrido es una opción interesante, ya que tener diversos protocolos de comunicación que no sean interoperables en una misma banda de frecuencia podría ser contraproducente. A tal respecto, hay dos puntos de vista diferentes sobre este tema. Por un lado, hay quienes piensan que se debe seleccionar una de las tecnologías y funcionar solo con ella. Aquí, NR-V2X es el protocolo que está ganando importancia, ya que los análisis en entornos de simulación lo sitúan como el protocolo con mejor rendimiento (Gorospé Jáuregui y Alonso Gómez, 2023). Aunque, por otro lado, la Comisión Europea ha preferido optar por buscar una solución capaz de combinar ambas tecnologías en lugar de optar por una sola (CE, 2019).

Por último, cabe destacar el proyecto DGT 3.0, desarrollado por la Dirección General de Tráfico. Este proyecto, pionero en Europa, consiste en una plataforma de vehículo conectado con la que se ofrece información del tráfico en tiempo real a los usuarios de la vía. El proyecto ha optado por utilizar tecnologías basadas en comunicación celular con tecnología 3G y 4G, suficientes para la mayoría de los casos de uso que el proyecto contempla, ya que, si bien es cierto que 5G daría más ancho de banda y menos latencia, se

ha considerado que no es necesario mejorar estos aspectos. Y a su vez, se descarta el uso de tecnologías de comunicación dedicada de onda corta por no ser sostenibles económicamente debido al alto coste de equipar y mantener la infraestructura asociada a la instalación de RSUs en la carretera (Computerworld, 2023).

6. CONCLUSIONES

Actualmente existen en nuestras carreteras vehículos con un bajo nivel de autonomía y conectividad. Todos los vehículos de nueva homologación en Europa ya cuentan con un nivel 2 de autonomía y existen perspectivas de que las autoridades estadounidenses aprueben vehículos de nivel 3 en 2023. Sin embargo, la complejidad técnica exponencialmente mayor que supone enfrentarse a los escenarios completamente imprevisibles que implica la conducción sin supervisión humana (especialmente en ciudades), motiva que se vayan a tardar más años en llegar a los niveles 4 y 5 de autonomía.

Las ciudades serán las grandes protagonistas de la movilidad autónoma de viajeros, pues los esfuerzos inversores se centran en la actualidad en el desarrollo de soluciones de movilidad autónoma como los robo-taxis o *robo-shuttles* (nivel 4 o superior).

Por otra parte, el vehículo autónomo privado es hoy por hoy un artículo de alta gama, dado el alto coste de los sensores y licencias hardware y software que lo componen, solo accesible para la minoría más pudiente. La mayoría de los expertos estima que, debido al alto coste total de propiedad, el despliegue a gran escala del vehículo autónomo y conectado privado para pasajeros sucederá siguiendo el siguiente calendario:

- 5 a 10 años para el nivel 3 en áreas metropolitanas de grandes ciudades.
- 10 a 20 años para el nivel 4 en áreas urbanas y el nivel 3 en áreas regionales.
- 20 a 40 años para aplicaciones de nivel 5.

El transporte de mercancías con vehículos pesados autónomos de larga distancia es un caso diferente. Mediante el

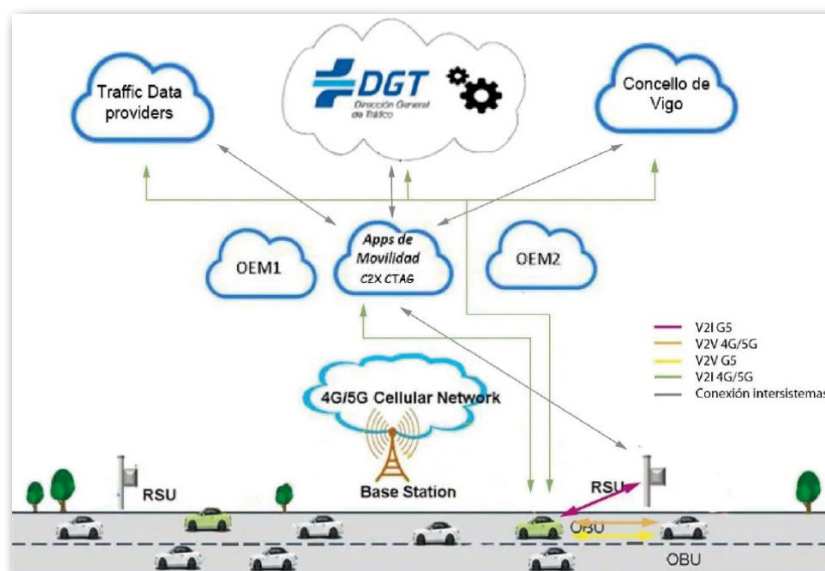


Figura 12. Sistema de comunicaciones híbrido (Fuente: <https://www.c-roads.es/>).

modelo “Transfer-Hub” se sorteja la complejidad de la conducción en ciudades, por lo que se espera que estos servicios estén disponibles comercialmente a partir de 2026. Su despliegue a gran escala muy probablemente ocurra antes que otras aplicaciones, pero solo en dominios de diseño operativo limitado y en el transporte de mercancías pesadas de larga distancia, por lo que sería uno de los primeros casos de uso de vehículos autónomos en el segmento comercial.

Las administraciones de carreteras, en su esfuerzo para adecuar la infraestructura a la circulación de estos vehículos, han de tener en cuenta los futuros escenarios de despliegue del vehículo autónomo y conectado, la incertidumbre tecnológica que todavía existe y los posibles cambios de infraestructura necesarios. Conviene que las inversiones sean implementadas en etapas y en complejidad creciente, centrándose a corto plazo en respaldar la conducción de vehículos con ADAS, ayudados por mejoras relativamente básicas en los activos viales existentes, como mejoras en la retrorreflectancia y perceptibilidad de los semáforos y la señalización horizontal y vertical. A medio y largo plazo, cuando la adopción del vehículo autónomo progrese, las inversiones que apoyen el desarrollo de infraestructura nueva y dedicada comenzarían a estar justificadas.

7. REFERENCIAS

- Adler, A. (2021). *Study: Autonomous trucking transfer hubs promise huge cost savings*. Chattanooga (TN/USA): Freight Waves. <https://www.freightwaves.com/news/study-autonomous-trucking-transfer-hubs-promise-huge-cost-savings>
- Cassauwers, T. (2022). *Los coches sin conductor logran avances notables en carreteras europeas lejos de los focos*. *El País* (28/12/22). <https://elpais.com/tecnologia/2022-12-28/los-coches-sin-conductor-logran-avances-notables-en-carreteras-europeas-lejos-de-los-focos.html>
- Collie, B., et al. (2022). *Mapping the Future of Autonomous Trucking*. Atlanta (GA/USA): Boston Consulting Group. <https://www.bcg.com/publications/2022/mapping-the-future-of-autonomous-trucks>
- Comisión Europea (2019). *Commission staff working document impact assessment accompanying the document Commission Delegated Regulation supplementing Directive 2010/40/EU of the European Parliament and of the Council with regard to the provision of EU-wide cooperative intelligent transport systems*. SWD(2019)96. [https://ec.europa.eu/transparency/documents-register/detail?ref=SWD\(2019\)96&lang=en](https://ec.europa.eu/transparency/documents-register/detail?ref=SWD(2019)96&lang=en)
- Comisión Europea (2020). *The Smart Networks and Services Joint Undertaking (SNS JU). 5G Strategic Deployment Agenda for Connected and Automated Mobility in Europe*. https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2020/10/20201002_5G_SDA_for_CAM_Final.pdf
- Comisión Europea (2021). *2030 Digital Compass: The European way for the Digital Decade*. https://commission.europa.eu/system/files/2023-01/cellar_12e835e2-81af-11eb-9ac9-01aa75ed71a1.0001.02_DOC_1.pdf
- Computerworld (2023). *Entrevista a Jorge Ordás, subdirector general de Gestión de la Movilidad y Tecnología en la DGT*. <https://www.computerworld.es/entrevistas/gracias-a-la-tecnologia-la-movilidad-por-carretera-sera-mucho-mas-inteligente-eficiente-sostenible-y-justa>
- Connected Places Catapult (2020). *Market forecast for connected and autonomous vehicles*. London (UK): Connected Places Catapult. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/919260/connected-places-catapult-market-forecast-for-connected-and-autonomous-vehicles.pdf
- Connected, Cooperative & Automated Mobility (CCAM) (2023). *Paving the way to driving automation in EU*. <https://www.ccam.eu/paving-the-way-to-driving-automation-in-eu/>
- Doll, G., et al. (2020). *Private autonomous vehicles: The other side of the robo-taxi story*. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/private-autonomous-vehicles-the-other-side-of-the-robo-taxi-story>
- EuroRAP (2013). *Roads that Cars Can Read. A Quality Standard for Road Markings and Traffic Signs on Major Rural Roads*. https://www.eurorap.org/wp-content/uploads/2015/02/roads_that_cars_can_read_2_spread.pdf
- Gorospa Jáuregui, J., y Alonso Gómez, A. (2023). *Equipo de Investigación de Teoría de la Señal y Comunicaciones*. Departamento de Electrónica y Ciencia Computacional, Facultad de Ingeniería, Mondragón Unibertsitatea. <https://www.mondragon.edu/es/investigacion/ingenieria-tecnologia/grupos-investigacion-transferencia/-/mu-inv-mapping/grupo/teoria-de-la-senal-y-comunicaciones>
- Heineke, K., et al. (2021). *What's next for autonomous vehicles?* McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/features/mckinsey-center-for-future-mobility/our-insights/whats-next-for-autonomous-vehicles>
- Heineke, K., et al. (2022). *The road to affordable autonomous mobility*. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-road-to-affordable-autonomous-mobility>
- Institute for Global Automotive Regulatory Research (2022). *EU: New implementing regulation for automated driving systems (ADS)*. <https://igarr.com/?s=new+implementing+regulation>
- Jiménez, F. (2017). *Retos tecnológicos en el desarrollo e implantación del vehículo autónomo y conectado*. *Carreteras*, nº 216, pp. 8-16.
- Leal, J.M. (2020). *Características de la infraestructura que pueden favorecer la conducción asistida y automatizada*. *Ingeniería Civil*, nº 197, pp. 106-117. <http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2433>
- Observatorio del Transporte y la Logística en España (OTLE-MITMA) (2022). *Datos de movilidad 2022*. <https://observatorio transporte.mitma.es/>
- Rablau, C. (2019). *LiDAR: a new self-driving vehicle for introducing optics to broader engineering and non-engineering audiences. Proceedings of the Fifteenth Conference on Education and Training in Optics and Photonics: ETOP 2019, Quebec City, Quebec, Canada, 2 July 2019*. <https://doi.org/10.1117/12.2523863>
- S&P Global (2020). *Autonomous Vehicles Whitepaper*. <https://www.spglobal.com/mobility/en/Info/0319/autonomous-vehicles-whitepaper.html>
- Torre, A. de la (2022). *Estos son los sistemas ADAS obligatorios en todos los coches homologados en 2022*. <https://www.xataka.com/automovil/estos-sistemas-adas-obligatorios-todos-coches-homologados-2022>
- Tsukada, M., Oi, T., Kitazawa, M., y Esaki, H. (2020). *Networked Roadside Perception Units for Autonomous Driving*. *Sensors*, 20(18): 5320. <https://doi.org/10.3390/s20185320>
- Xue, S., Irannezhad, E., y Karl, C. (2022). *Minimum Physical Infrastructure Standard for the Operation of Automated Driving*. Research Report AP-R665A-22. Sydney (Australia): Austroads. <https://austroads.com.au/publications/connected-and-automated-vehicles/ap-r665-22>