

EL VEHÍCULO AUTÓNOMO Y EL MEDIO AMBIENTE: UNA REVISIÓN DE LA LITERATURA CIENTÍFICA

Óscar Silva

Doctorando, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria

Rubén Cordera

Investigador contratado, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria

Esther González González

Profesora Ayudante Doctor de Urbanística y Ordenación del Territorio, E.T.S.I. Caminos,
Canales y Puertos, Universidad de Cantabria

Soledad Nogués

Profesora Titular de Urbanística y Ordenación del Territorio, E.T.S.I. Caminos, Canales y
Puertos, Universidad de Cantabria

RESUMEN

El cambio climático y el desarrollo sostenible son actualmente materias prioritarias en las agendas de todos los países y organizaciones mundiales. Dado que el transporte -y principalmente el vehículo privado- es uno de los sectores más contaminantes, la mejora de su eficiencia ambiental se ha convertido en un objetivo de máxima relevancia. En esta línea, los avances tecnológicos apuntan hacia nuevos modos entre los cuales el vehículo autónomo (VA) presenta un enorme potencial.

Este artículo hace una revisión de la literatura científica existente sobre los efectos ambientales derivados de la irrupción de los VA. Para ello se utilizan las herramientas Scopus y WoS, estableciendo categorías de búsqueda según los medios físicos que pueden verse afectados (aire, suelo...). La revisión no solamente se centra en las emisiones, el campo más explorado, sino que amplía el foco a los cambios en los usos del suelo y sus implicaciones, y a la contaminación acústica y lumínica, con el objetivo de adquirir una perspectiva más general que la conseguida hasta ahora.

Los artículos analizados presentan enfoques diferentes, aunque principalmente centrados en tres aspectos: consumos y emisiones en diferentes escenarios, hábitos del consumidor frente a las posibilidades de uso e interrelaciones con el resto de sistemas de transporte. Las estrategias y planteamientos para obtener resultados son también heterogéneos. Así, el análisis de emisiones se suele basar en modelos matemáticos con resultados variables, aunque en general se observa que la mayor eficiencia en la conducción favorecida por las comunicaciones vehículo a todo (V2X) conlleva ahorros energéticos y reducción de emisiones, amplificadas si se opta por la movilidad compartida.

No obstante, otros estudios indican que las prioridades de los usuarios pueden llevar a escenarios donde, al maximizarse el beneficio individual, se produzcan efectos ambientales negativos, lo que conduce a la necesidad de establecer una planificación que permita dar pasos hacia el modelo de desarrollo deseado.

1. INTRODUCCIÓN

En 2015 había casi 1.300 millones de vehículos en uso en todo el mundo, de los cuales casi 1.000 millones correspondían a vehículos de pasajeros (OICA, 2020), cifra que puede duplicarse para finales de la década de 2020 o principios de la década de 2030 según los parámetros actuales (Sperling y Gordon, 2009). Esto hace que el vehículo privado (incluyendo todos los tipos: turismos, SUV, pequeñas furgonetas, etc.) suponga aproximadamente el 60% de las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) dentro del sector del transporte, que es a su vez el mayor contaminante dentro de todos los sectores económicos ya que emite casi 2.000 millones de toneladas de CO₂ equivalente a la atmósfera por año, es decir, casi un 30% de las emisiones totales en el caso de EE.UU. (US Environmental Protection Agency, 2020).

Con el objetivo de alcanzar una economía sin emisiones, el reto de conseguir un sector del transporte sostenible ambientalmente tiene gran importancia en la agenda de la mayoría de las organizaciones nacionales e internacionales. Actualmente, el estudio del transporte sostenible como parte del más amplio concepto de desarrollo sostenible es objeto de gran atención por parte de investigadores y agentes políticos y económicos (Zhao et al., 2020). La UE tiene como objetivo reducir las emisiones del sector del transporte en un 60% para el año 2050 con respecto a datos de 1990 (European Commission, 2011).

En este contexto, el vehículo autónomo muestra un gran potencial gracias a su circulación más eficiente con vehículos más ligeros, seguros y eléctricos, además de favorecer la adopción de la movilidad compartida. Aunque estos potenciales beneficios sean sustanciales, su uso puede generar unos importantes riesgos y desafíos que deben ser gestionados para que tales beneficios sean efectivos (Legacy et al., 2018). Teniendo en cuenta que el 70% de los GEI se emiten desde las ciudades (IEA, 2016), parece evidente que afrontar el objetivo de reducción de emisiones debe considerar la dualidad vehículo privado-ciudad.

La tecnología que permitiría alcanzar el grado de autonomía necesario para influir positivamente en el medio ambiente está todavía en desarrollo. En general, se considera que el máximo beneficio se conseguirá, entre otros factores, con el grado de automatización 5 según el estándar comúnmente aceptado. Este estándar considera 6 niveles, desde la nula automatización (nivel 0) hasta la completa automatización (nivel 5) con la que el vehículo es capaz de operar en cualquier condición ambiental o estado de la infraestructura (SAE, 2018).

Las estimaciones que diferentes autores hacen sobre la disponibilidad de esta tecnología son muy variables, en general alrededor de 2030, considerando que serán necesarios 10 o 20 años más para conseguir un escenario con una mayoría de vehículos autónomos (Milakis et al., 2017a; Hörl et al., 2016). Independientemente de la aceptación de una nueva tecnología por los consumidores, si se considera el ratio de sustitución de la flota de vehículos de pasajeros en la UE-28 del 5,6% (ICCT, 2018), no sería factible un alto grado de presencia de vehículos autónomos (VAs) en las carreteras antes de 25 años.

Algunas proyecciones económicas consideran que el vehículo autónomo y los servicios de movilidad generarán una cifra de negocio de 7 trillones de USD (5,9 billones de euros) para 2050, más que el PIB en 2017 de Japón y Brasil combinados (Lanctot, 2017), lo que supone un importante incentivo para su desarrollo. Incidiendo en su potencial, Greenwald y Kornhauser (2019) proponen una serie de motivos por los que el vehículo autónomo puede suponer una gran oportunidad de mejora para la sociedad: 1,3 millones de víctimas anuales en accidentes en el mundo, 600 billones de horas de conducción al año con una ocupación de asientos muy baja, vehículos detenidos el 96% del tiempo, el estrés que provoca la conducción, las posibilidades comerciales, las posibilidades para complementarse con los servicios de transporte público, etc. En definitiva, la consideración de las calzadas como recursos públicos limitados cuyo uso debe ser optimizado y para lo cual deben ser tenidas en cuenta las preferencias de los usuarios, muchas veces contradictorias, como la decisión antieconómica de mantener el vehículo privado y usar servicios de movilidad bajo demanda (los conocidos en España como Vehículos de Transporte con Conductor o VTC).

Debido a todas estas oportunidades y capacidades para modificar el transporte en el futuro, se está desarrollando una gran cantidad de literatura científica sobre los vehículos autónomos. De hecho, el vehículo autónomo en general es uno de los temas con una mayor atención dentro de la literatura científica hoy en día, con un ritmo de publicación de artículos creciendo por encima del 30% anual cuando la media en la literatura científica está en el entorno del 8-9% (Marçal et al., 2019). Entre toda la literatura que se genera al respecto, los estudios sobre los impactos ambientales, aunque escasos aún, empiezan a tener más presencia por la importancia de la reducción de emisiones a nivel global que podrían implicar.

En general, la literatura científica cuando estudia las repercusiones en el medio ambiente de los vehículos autónomos se centra en el consumo energético y las emisiones de GEI, analizando el vehículo autónomo individualmente, en grupo, como flotas de vehículos o como medio de transporte genérico integrado en el sistema general de transporte. Milakis et al. (2017b) identifican el consumo energético y la polución atmosférica como un efecto de tercer orden en el modelo “ripple effect” adaptado a la conducción autónoma. En ese modelo, los efectos de primer orden serían los producidos sobre el propio tráfico, el coste de viaje y la selección del modo de transporte. En el segundo orden se sitúan los efectos sobre el vehículo en propiedad, los usos del suelo y las infraestructuras.

En el tercer nivel se sitúan los efectos ambientales, la seguridad vial, la economía y la igualdad social y la salud pública. Wadud et al. (2016) identifican una serie de factores con efectos ambientales positivos –eco-driving (conducción eficiente), platooning (agrupación de vehículos circulando en fila), reducción de las congestiones, menor aceleración/frenado, disminución de accidentes, movilidad compartida y ajustes de diseño gracias a los sistemas de seguridad– y negativos –aumento de la velocidad en autopistas, incremento de peso debido a elementos de confort y entretenimiento, reducción del coste del tiempo de viaje que implica más kilómetros recorridos y acceso de nuevos usuarios.

Hay diferentes aproximaciones para estudiar los efectos del transporte en el medio ambiente que se pueden particularizar para el caso concreto de los vehículos autónomos. Taiebat et al. (2018) definen cuatro niveles de estudio: nivel “vehículo”: funcionamiento, diseño, electrificación, platooning; nivel “sistema de transporte”: coste del viaje, servicios de movilidad, usos, congestión, capacidad; nivel “sistema urbano”: implicaciones en las infraestructuras, VAs y sistema de producción de energía, usos del suelo; y nivel “sociedad”: cambio en las costumbres de viajar, usos compartidos y cambios en otros sectores. Por otro lado, según Dean et al. (2019) la gran mayoría de estudios se interesan directamente en la eficiencia energética, las emisiones y las implicaciones por kilómetros recorridos por vehículo (VKT) y muestran menor interés en el estudio del ciclo completo de vida o la contaminación acústica.

Los cambios en el uso del suelo, punto que está recibiendo creciente atención en los estudios recientes por los posibles efectos tanto positivos –liberación de espacio urbano– como negativos –dispersión urbana–, tienen gran repercusión ambiental. En ese sentido, Wilson y Chakraborty (2013) agrupan los efectos ambientales de la dispersión urbana, en “aire”: pérdida de la calidad del aire, efecto isla de calor, olas de calor extremo; “energía”: emisiones; “suelo”: pérdida de suelo agrícola, pérdida de terreno natural y de hábitat; “agua”: inundaciones, exceso de consumo de agua y restricciones de suministro, equilibrio hidrológico y pérdida del agua de lluvia.

También Bicer y Dincer (2018) identifican siete efectos ambientales derivados de los vehículos a lo largo de su ciclo completo de vida: agotamiento de recursos abióticos, acidificación, eutrofización, calentamiento global, toxicidad en humanos, reducción de la capa de ozono y toxicidad del suelo. Muchos de estos factores no se están teniendo en cuenta en la cuantificación de los impactos medioambientales de la implantación de los vehículos autónomos.

Por el momento no hay muchas revisiones con un punto de vista holístico sobre los impactos ambientales del vehículo autónomo. Sí hay artículos que hacen cierto compendio de la literatura publicada pero dentro de un análisis más amplio del “estado de la cuestión”.

Dentro de aquellos que hacen una revisión concreta, Kopelias et al. (2020) analizan dos tipos de estudios desarrollados entre 2008 y 2019: estimaciones en base a propuestas lógicas sobre cómo los VAs y VEs (vehículos eléctricos) modificarán el consumo de combustible y las emisiones, y modelos matemáticos que utilizan distintos datos de entrada para obtener resultados sobre distintos escenarios simulados.

La conclusión es que el medio ambiente se ve afectado directa o indirectamente por 11 factores: vehículos eléctricos/combustibles alternativos; diseño y tamaño del vehículo; platooning; eco-driving; selección de ruta óptima; reducción de las congestiones de tráfico; kilómetros recorridos por vehículo; movilidad bajo demanda o compartida; nivel de penetración en el mercado; uso por población sin posibilidad de conducir y la predisposición del consumidor hacia el modo de transporte.

Autores como F. Liu et al. (2019) también analizan 12 grupos de datos para evaluar consumo y emisiones con alguna ligera variación respecto al anterior ya que, además de agrupar o detallar algunos de los conceptos antes indicados, incorpora otros como el ratio de sustitución de vehículos, la posible circulación a mayor velocidad y la reducción de accidentes.

Como se puede ver, algunos de los factores enumerados dependerán de la aceptación por parte del usuario. En ese sentido, Whittle et al. (2019) integran los resultados de una serie de entrevistas con expertos en transporte junto con un análisis de literatura existente para analizar qué influye en la toma de decisiones de los usuarios, que a su vez tendrá que ver con el nivel de penetración en el mercado del vehículo autónomo y si el vehículo será mayoritariamente usado de manera compartida o no.

Proponen grupos de factores relacionados con la demografía (como el poder adquisitivo), la motivación (la autonomía), los hábitos y las normas sociales y el acceso y la predisposición hacia el transporte público.

Con una visión más general, Martínez-Díaz et al. (2019) proponen un análisis amplio sobre todos los efectos de los VAs aunque no exactamente basado en una revisión sistemática de la literatura existente. En general identifican los mismos factores ya mencionados, como por ejemplo: aspectos tecnológicos, movilidad compartida, demanda, seguridad vial, aceptación social, etc. Sin embargo, mencionan dos aspectos que no aparecen citados anteriormente, el impacto territorial y las consideraciones éticas y legales.

Las implicaciones legales quedarían fuera de los efectos medioambientales de los VAs pero no así el impacto territorial, que puede hacer evolucionar la nueva movilidad hacia un escenario más sostenible o hacia uno opuesto y más contaminante (Nogués et al., 2020).

2. METODOLOGÍA

La revisión de la literatura existente sobre las implicaciones ambientales de la implantación del vehículo autónomo se llevó a cabo a partir de los buscadores Scopus y Web of Science.

Dado que un primer resultado sobre vehículos autónomos arrojó decenas de miles de referencias, fue necesario filtrar la búsqueda mediante palabras clave. Para ello se utilizó un primer bloque de palabras con las que habitualmente se hace referencia al vehículo autónomo en la literatura científica, al que se añadieron una serie de palabras para definir más la búsqueda según los parámetros del estudio. En el cuadro siguiente se incluyen las palabras clave generales utilizadas.

“Automated” OR “Autonomous” OR “Self-driving” OR “Driverless”
AND
Vehicle(s) OR Car(s)

Tabla 1: Palabras clave generales.

La búsqueda se amplió a los términos relacionados con impactos medioambientales en los diferentes medios físicos, incluyendo dos conceptos ambientales que pueden verse afectados por la implantación del vehículo autónomo en sentido positivo o negativo, la contaminación acústica y la contaminación lumínica.

AIRE	“Emissions” OR “Pollution” OR “Global Warming” OR “Greenhouse” OR “Carbon” OR “Air Quality”
SUELO	“Built environment” OR “Land use” OR “Urban form” OR “Territorial Impact”
AGUA	“Water Pollution” OR “Water Contamination” OR “Aquatic Toxicity”, “Water Consumption”
OTROS	“Noise Pollution”, “Light Pollution”

Tabla 2: Palabras clave específicas.

El procedimiento se desarrolló en tres fases. Una primera consistió en la identificación de artículos con las palabras clave indicadas. Se tuvieron en cuenta solamente los artículos publicados en inglés en revistas científicas. Después de identificados, se hizo una revisión para eliminar los artículos duplicados (se realizó la búsqueda con dos herramientas, WoS y Scopus) y aquellos que no correspondían al ámbito de estudio (por ejemplo, vehículos autónomos marinos). Los artículos restantes fueron los que se analizaron en esta investigación, estructurados según los temas de búsqueda.

En algunos casos, para reforzar o completar algún punto de vista, ampliar un análisis o incluir referencias sobre cuestiones aún no suficientemente desarrolladas se recurrió a la técnica “bola de nieve” en un sentido u otro.

3. RESULTADOS

La mayor parte de los resultados obtenidos hacen referencia al impacto medioambiental en general, al nivel de consumo energético o a las emisiones. Sobre el impacto en el uso del suelo comienza a desarrollarse un cuerpo de literatura con varias referencias, pero apenas se refieren a efectos ambientales sino urbanísticos. No se encontraron referencias que identifiquen efectos en el medio acuático como consecuencia de la irrupción del vehículo autónomo y, sin embargo, sí empiezan a analizarse los efectos en la contaminación acústica y lumínica. Finalmente se han seleccionado 90 artículos y se han tenido en cuenta varios más como resultado de las búsquedas según la técnica “bola de nieve”.

Palabras clave	Fuentes identificadas	Duplicados/Fuera de tema	Revisión inicial	No representativos	Selección
“Emissions”, “Pollution”, “Global Warming”, “Greenhouse”, “Carbon”, “Air Quality”.	968	812	156	79	77
“Built Environment”, “Land Use”, “Urban Form”, “Territorial Impact”	139	89	50	39	11
“Water Pollution”, “Water Contamination”, “Aquatic Toxicity”, “Water Consumption”	18	18	0	0	0
“Noise Pollution”	16	12	4	3	1
“Light Pollution”	2	1	1	0	1

Tabla 3: Número de referencias seleccionadas.

Por cada medio se identificaron subtemas, siendo más notables estas divisiones en los aspectos más estudiados, como por ejemplo en el caso de las emisiones. Se encontraron análisis con gran cantidad de enfoques, desde el punto de vista operacional de un vehículo en particular y en su interacción con otros vehículos en situaciones de conducción concretas donde la conducción más eficiente y las comunicaciones V2V (vehículo a vehículo) y V2I (vehículo a infraestructura) son determinantes. Igualmente hay estudios a nivel de flota y de servicios de movilidad compartida o bajo demanda, a nivel de ciudad o país, con combustibles convencionales o propulsión eléctrica, etc.

A continuación se exponen los resultados de los efectos producidos en los diferentes medios afectados, cuyo esquema puede verse en la figura 1.

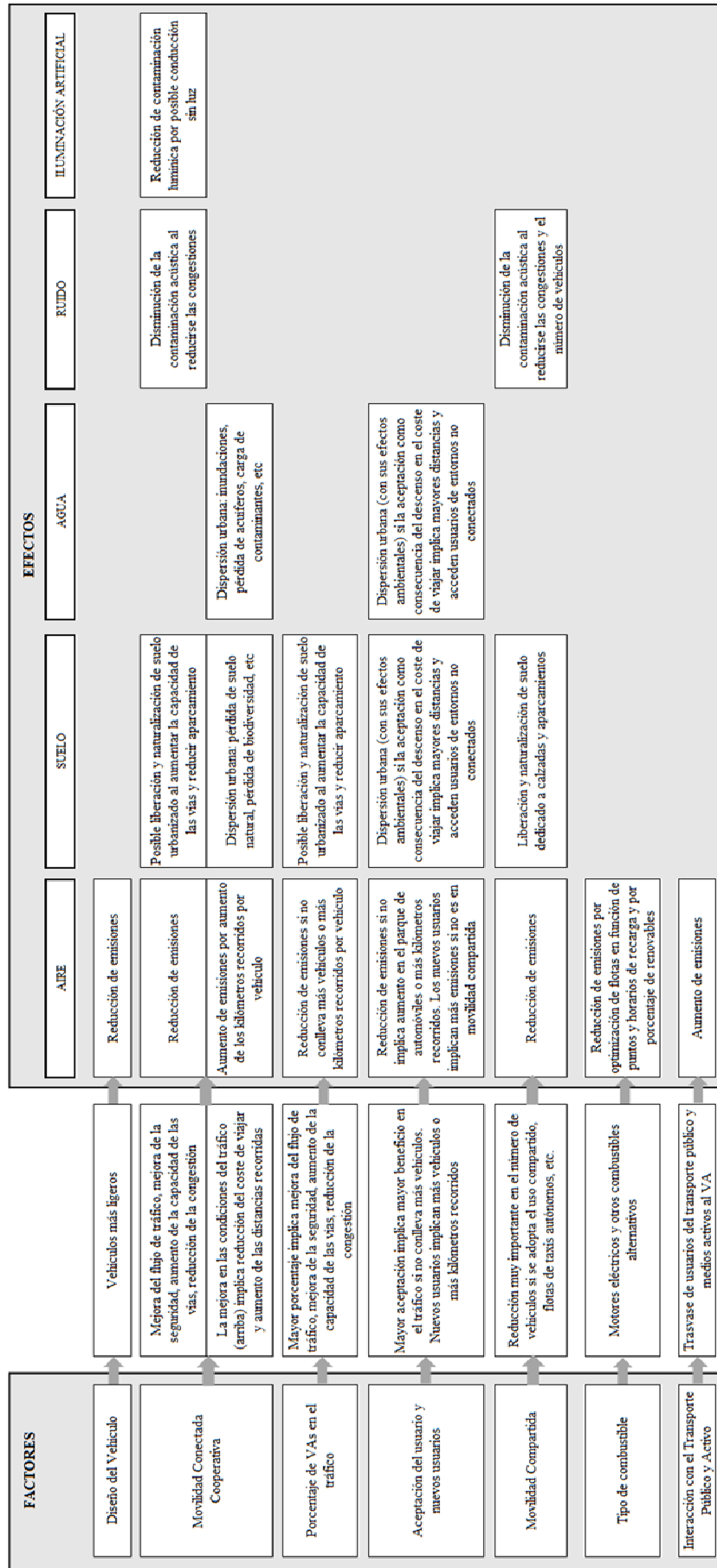


Figura 1: Efectos del vehículo autónomo en el medio ambiente.

3.1 Efectos en la calidad del aire: polución atmosférica, emisiones

3.1.1 Efectos debidos al diseño, los sistemas integrados y la circulación de los VAs

Dentro de las variables que afectan al consumo y a las emisiones del VA, en primer lugar se podrían considerar las derivadas de su propio diseño, de los sistemas de conducción empleados y de los equipos necesarios para el propio vehículo y para sus ocupantes. En ese sentido, C. Zhang et al. (2019) discretizan los consumos energéticos de un vehículo autónomo eléctrico, concluyendo que el 53,4% se consume en acelerar y vencer las resistencias al rozamiento; el 20,7% en pérdidas en el motor incluso con los motores eléctricos más eficientes; el 17,2% se pierde por las baterías y el sistema de recarga; el 3,68% por la climatización (HVAC) y el resto por los sistemas de sensorización, computación, aire acondicionado, etc. En definitiva, toda mejora en la eficiencia en la circulación redundará en menores consumos y por tanto menores emisiones.

Aparte de las mejoras puramente mecánicas (motores, baterías, etc.), gran parte de la eficiencia energética del VA se consigue mediante la mejora general del flujo del tráfico gracias a los sistemas de automatización cooperativa. Z. R. Wang et al. (2020) distinguen 5 diferentes conceptos operacionales cooperativos de los vehículos autónomos conectados (VACs) con beneficios para la seguridad, la movilidad y la sostenibilidad: 1) Control de Crucero Adaptativo Cooperativo (Cooperative Adaptive Cruise Control, CACC) y Platooning; 2) Incorporación Cooperativa en Accesos de Autopistas (Cooperative Merging at Highway On-Ramps); 3) Armonización de Velocidad en Autopistas (Speed Harmonization on Highways); 4) Conducción Eficiente Cooperativa en Intersecciones Señalizadas (Cooperative Eco-driving at Signalized Intersections); 5) Conducción Eficiente Cooperativa en Intersecciones No Señalizadas (Cooperative Eco-driving at Non-Signalized Intersections); clasificando además sus potenciales beneficios ambientales, siendo mayores en el caso 4) seguido del 1) y ya menor en el resto de los conceptos.

Numerosos estudios modelizan los conceptos operacionales antes indicados. Uno de ellos es la mejora del tránsito de los VAs en las intersecciones mediante las conexiones entre vehículos y/o con la propia infraestructura, con evidentes consecuencias medioambientales en cuanto a la reducción de las emisiones al conseguir mayor fluidez de tráfico (Almannaa et al., 2019; Astarita et al., 2019; Bento et al., 2019; Bichiou y Rakha, 2019; Chen y Liu, 2019; Feng et al., 2018; Filocamo et al., 2020; Jiang et al., 2018; Z. Li et al., 2015; Lin et al., 2017; C. Wang et al., 2020; Z. Wang et al., 2020).

Lo mismo ocurre con las rotondas (Cao y Zöldy, 2020), carriles de aceleración/acceso a autopistas (Ding et al., 2020) o circulación general (Xiao et al., 2020), e igualmente, diversos autores proponen mejoras en el flujo del tráfico reduciendo aceleraciones y frenazos mediante límites de velocidad cooperativos u otros sistemas combinados relativos al control de la velocidad (Arefizadeh y Talebpour, 2018; Guo et al., 2020; C. L. Liuet al., 2019; C. S. Miao et al., 2018; Stebbins et al., 2017; Yu y Fan, 2019; X. Zhang et al., 2019).

Además de la optimización de ciertos movimientos y la conducción en general, diversos estudios analizan los efectos de la incorporación a los VAs de varios sistemas de análisis, control y gestión de múltiples parámetros con los que también se obtienen reducciones importantes en el nivel de emisiones (Djavadian et al., 2020; C. R. Lu et al., 2019a; J. Q. Ma et al., 2019; Mahdinia et al., 2020; Phan et al., 2020; Rong et al., 2018; Tu et al., 2019; Zhai et al., 2019)

Independientemente de operaciones concretas o de la aplicación de diferentes sistemas, Stogios et al. (2019) analizan la fluctuación en las emisiones simulando ciertas condiciones de tráfico y en función de cómo se programen los parámetros de conducción.

Otras funciones que se avanza tienen que ver, por ejemplo, con las posibilidades del aparcamiento en doble fila con estacionamientos dinámicos que, a la vez que aumentan la capacidad de aparcamiento en horas determinadas, reducen las emisiones frente a la opción de circular en vacío hasta un parking (Estepa et al., 2017).

No obstante, algunos estudios alertan sobre la necesidad de considerar el ciclo completo de vida de un vehículo y no centrarse solamente en su fase operativa. Patella et al. (2019a) tienen en cuenta tres fases: producción, uso y final de vida útil. Los resultados indican que, por unidad de vehículo, el autónomo es el que más impacto ambiental genera. Las emisiones correspondientes a la fase de construcción, mantenimiento y fin de vida útil, de media son un 35% superiores a los de un vehículo convencional de combustión interna, un 22% superiores a los de un vehículo híbrido y un 5% superiores a los de un vehículo eléctrico pese a que, en la fase operacional, el vehículo autónomo consigue ahorros del 60%, si bien es cierto que este resultado es muy dependiente del “pool” de generación de energía eléctrica y de las hipótesis consideradas en la fase operativa.

3.1.2 Efectos con tráfico mixto VAs/VCs (vehículos autónomos/vehículos convencionales) y grados de penetración en el mercado de los VAs

La penetración del vehículo autónomo será gradual, por lo que durante un periodo de tiempo considerable lo habitual será la convivencia de vehículos autónomos y vehículos convencionales, conectados o sin conectar en ambos casos, y cuyos tiempos de respuesta ante la información recibida y la toma de decisiones varían enormemente. En experimentos de campo en circuito cerrado, la presencia de VAs, incluso en bajos porcentajes (5%), estabiliza el tráfico y suaviza los intervalos de parada-aceleración consiguiendo reducciones de emisiones del 15% en CO₂ y hasta el 73% en NO_x (Stern et al., 2019). No obstante, en modelizaciones de tráfico real con vehículos con conductor, vehículos autónomos y vehículos autónomos conectados, no siempre la presencia de vehículos autónomos mejora las condiciones del tráfico ya que, si no están interconectados, al considerar parámetros de seguridad y confort en situaciones de alta densidad de tráfico, reducen la velocidad y obligan a bajar la velocidad del resto de vehículos, disminuyendo la capacidad de las vías y generando más congestión (Mattas et al., 2018).

Rafael et al. (2020) estudian el impacto de los VAs en la calidad del aire en una zona urbana con un ratio de penetración del 30%, produciéndose un ligero incremento en emisiones de CO₂ y NO_x como consecuencia de un aumento en la demanda y de aceleraciones después de paradas; sin embargo, en un escenario de vehículos autónomos con un 30% eléctricos se consiguen reducciones en emisiones, variando según la época del año e incluso del día en función de la composición de la generación eléctrica. Simulaciones en entornos urbanos de un vehículo autónomo conectado con propulsión híbrida gestionados mediante modelos predictivos y estrategias “eco-driving” muestran resultados satisfactorios en cuanto a reducción de emisiones (S. Wang et al., 2020)

Se aprecia en diferentes estudios que el ratio de VAs en el tráfico afecta a dos parámetros fundamentales, a su vez relacionados con las emisiones: la capacidad de la vía y el límite de velocidad, de tal manera que es esperable una reducción en las emisiones en la medida que crece la presencia de VAs y por tanto mejora la capacidad de las vías, siempre y cuando esto no conlleve aumentos en los límites de velocidad por encima de un óptimo estimado en 95 km/h (Hwang y Song, 2019).

Igualmente, en una simulación de un tramo de autopista real, con modelos de tráfico relativamente congestionado (entre el 0,7 y el 0,9 de la capacidad de la vía), la introducción de VAs arroja beneficios en cuanto a las emisiones generadas, que disminuyen a medida que aumenta el porcentaje de VAs, pero si se simula un escenario extremo fuertemente congestionado -3 veces la capacidad de la vía- con el 100% de VAs, aunque mejora el flujo de vehículos, se produce degradación medioambiental como consecuencia de una mayor densidad de tráfico (Li y Wagner, 2019). Es decir, en situaciones de congestión, los VAs conectados aumentan la capacidad de las vías, pero generan más emisiones en términos absolutos (Makridis et al., 2020).

De forma similar, Jin et al. (2020) modelizan un entorno de tráfico mixto concluyendo que el flujo de vehículos mejora con la presencia de VAs, gracias al procesamiento de la información que suministran los vehículos que van por delante. Sin embargo, este flujo se puede desestabilizar a medida que aumentan los tiempos de respuesta de los conductores de los vehículos convencionales así que, un aumento del ratio de penetración de vehículos autónomos puede mejorar la eficiencia y hacer descender las emisiones. Sin embargo, el ahorro de combustible, y por tanto el descenso de emisiones de un vehículo concreto, no siempre conlleva ahorros y descenso de emisiones de todo el sistema.

De hecho, la localización de los VAs dentro de la fila de vehículos circulando debe tenerse en cuenta en los análisis y así, si al frente de una hilera de vehículos parte convencionales y parte autónomos se sitúa un vehículo autónomo, todo el grupo puede conseguir hasta un 2% adicional de ahorro de combustible y linealmente reducir las emisiones (C. R. Lu et al., 2019b).

Al igual que está siendo desarrollada la optimización de movimientos en intersecciones con tráfico exclusivamente de VAs, también empiezan a estudiarse las intersecciones con combinaciones de VAs y vehículos parcialmente conectados, consiguiendo, en general, mejorar el rendimiento de la intersección y, por tanto, reduciendo las emisiones (Jiang et al., 2017; Z. Yao et al., 2020; Kamal et al., 2020), aunque con bajos niveles de penetración de VAs conectados las emisiones pueden aumentar debido al comportamiento ineficiente de los vehículos con conductor no conectados (McConky y Rungtan, 2019).

También la implementación de los sistemas ACC (Adaptative Cruise Control) tiene su influencia en entornos de tráfico mixto ya que incluso un grupo de vehículos heterogéneos, parte convencionales y parte autónomos, tiene unos niveles de consumo y de emisiones inferiores a los de un grupo de vehículos convencionales gracias a estos sistemas, incluso mejorando en la medida que el ratio de penetración en el mercado de los VAs es mayor (Huang et al., 2020). F. Ma et al. (2019) incluso proponen mejoras en el consumo energético, y por tanto en las emisiones, respecto a las actuales propuestas de sistemas ACC utilizando estrategias predictivas con modelos no lineales. También Ghiasi et al. (2019) proponen un sistema para armonizar la velocidad entre vehículos autónomos, vehículos conectados pero no autónomos y vehículos con conductor y no conectados, es decir, a todo el flujo de tráfico, y adaptable en tiempo real.

3.1.3 Efectos de la movilidad compartida, vehículos autónomos compartidos (VACs) y otras flotas de VAs

Las tecnologías de la comunicación han supuesto un cambio radical en la movilidad urbana, reduciendo los tiempos de búsqueda de pasajeros en los que habitualmente incurren los servicios de taxi tradicionales. Las plataformas de servicios de movilidad permiten a pasajeros y conductores optimizar oferta y demanda, lo que lleva a disminuir viajes en vacío y, por tanto, consumos y emisiones. Solamente en términos de coste se estiman ahorros de hasta 6.000 USD por familia en EE.UU. utilizando servicios de movilidad compartida en vez de tener vehículo en propiedad (Anderson et al., 2014).

Los investigadores viendo el potencial que presentan este tipo de plataformas para reducir el número de vehículos en circulación, garantizando el mismo nivel de servicio, junto con las posibilidades que presentan los AVs para la mejora del tráfico, han empezado a estudiar los efectos de las flotas de vehículos autónomos (VACs – Vehículo Autónomo Compartido, Autonomous taxis o aTaxis) como posibles opciones de transporte alternativas a los vehículos convencionales.

El procedimiento habitual para estos análisis son las modelizaciones (en general “agent-based”) de entornos urbanos, genéricos o reales (Austin-Texas, Nueva York, Tokio, Lisboa...), con diferentes variables: tamaño de flota, tarifa, tiempos de espera, patrones de distribución, motor eléctrico o convencional, distribución de puntos de recarga, niveles de congestión, tasas por emisiones, etc.

Diferentes resultados indican que un solo vehículo autónomo es capaz de sustituir hasta 11 vehículos convencionales (Fagnan y Kockelman, 2014) o entre 7 y 10 si se tiene en cuenta la relación tiempo de espera/coste del sistema (Iacobucci et al., 2018), con la consiguiente reducción de emisiones, que en el caso de taxis eléctricos autónomos podrían llegar al 87-94% con respecto a los vehículos convencionales con conductor (Greenblat y Saxena, 2015).

Tres modelizaciones desarrolladas tomando como base la ciudad de Austin, Texas (EE.UU.) y sus patrones de transporte, desarrollo urbano, demografía y desplazamientos de vehículos, analizan el desempeño y los efectos de una flota de taxis autónomos en el sistema. Gawron et al. (2019) avanza reducciones del 60% en emisiones en el periodo 2020-2050 frente a los vehículos convencionales. Este estudio considera los efectos directos e indirectos de los subsistemas de sensorización y computación, eco-driving y conectividad en las intersecciones, kilómetros recorridos en vacío, parking, recarga, mejoras en el diseño, penetración del motor eléctrico, movilidad compartida y tiempo de vida útil, aunque no tiene en cuenta los efectos del “platooning”, las congestiones ni el incremento de velocidad en entornos urbanos.

La reducción comentada del 60% se debe principalmente a la electrificación (57%). Es interesante señalar que el modelo avanza posibles reducciones del 87% para 2050 en un escenario de generación eléctrica con el 92% de renovables, incremento de movilidad compartida para reducir los VKT un 22%, una mayor vida útil de los vehículos (hasta 643.738 km) y una serie de mejoras en la eficiencia, diseño y consumo.

J. Liu et al. (2017) estudian los efectos de las tarifas del servicio de taxi autónomo concluyendo que, si las tarifas son suficientemente bajas, se pueden conseguir reducciones en emisiones entre el 16,8 y el 42,7% frente a vehículos convencionales; no obstante, el exceso de millas recorridas por los AV reduce los porcentajes anteriores, aunque sin comprometer el beneficio global según el modelo.

Sin tener en cuenta los efectos de las tarifas, un estudio usando los datos de la flota de taxis de Nueva York (NYC) concluye que cambiando el sistema de taxis tradicional por una flota de taxis autónomos compartidos se pueden mantener los niveles de servicio con un 59% menos de vehículos y reduciendo las emisiones en 725 toneladas de CO₂ al día (Lokhandwala y Cai, 2018).

También modelizando una flota de taxis en Manhattan, en el centro de la ciudad de Nueva York, pero en este caso con taxis autónomos eléctricos compartidos, Bauer et al. (2018) concluyen posibles reducciones de emisiones de hasta el 73% con respecto a la misma flota con motores de combustión interna, considerando la composición actual del suministro eléctrico en Nueva York y estableciendo una determinada infraestructura de recarga de baterías. Los costes y las emisiones además mejoran si las recargas se pueden programar durante el día cuando la energía eléctrica proveniente de la generación solar está operativa.

Sin embargo, H. Zhang et al. (2020), estudiando las necesidades de infraestructura de recarga de una flota de VAs eléctricos en entornos urbanos, concluyen que en la medida que las flotas aumentan en tamaño por encima de un óptimo y aumenta la capacidad de las baterías, las emisiones se incrementan al realizarse más recargas durante la noche cuando la producción eléctrica con renovables desciende. Para que un sistema de taxis autónomos eléctricos conectados y compartidos sea eficiente deben hacerse estimaciones adecuadas de las necesidades de servicio por áreas geográficas y establecer un ratio correcto de vehículos por punto de recarga, pudiendo llegar a reducciones de emisiones del 42% condicionadas sobre todo por factores como la rapidez de carga además del rango de uso y el parque de vehículos (H. Miao et al., 2019)

Calculando el impacto de la sustitución de todos los desplazamientos en vehículo privado y autobuses tradicionales por una flota de taxis autónomos en una ciudad europea de tamaño medio como Lisboa, Martínez y Viegas (2017) también obtienen resultados positivos en cuanto a reducción de emisiones, llegando casi al 40% en el mejor escenario.

Aunque los modelos realizados tomando como ejemplo tramas y datos de ciudades reales, en general avanzan resultados positivos en cuanto a reducción de emisiones, las conclusiones no tienen por qué ser extrapolables a cualquier otra ciudad. En un intento de hacer un análisis más general estableciendo diferentes categorías de ciudades, Oke et al. (2020) concluyen que la introducción de los servicios de movilidad con vehículos autónomos en ciudades con redes importantes de transporte público es contraproducente para la congestión, ya que los usuarios tienden a cambiar del transporte público hacia los VACs; en ciudades grandes muy dependientes del vehículo privado, poco densificadas y con poco desarrollo del transporte público, no parecen tener efecto la penetración de los VACs y, sin embargo, es en ciudades más densas con un uso moderado del transporte público donde la penetración de la movilidad compartida con vehículos autónomos obtiene mejores resultados para reducir la congestión.

Diversos estudios analizan la introducción de tasas contaminantes para fomentar la movilidad compartida. En ese sentido, Jones y Leibowicz (2019) diseñan una serie de escenarios de movilidad compartida con VACs de cuyo análisis concluyen que, incluso con planteamientos sin tasas contaminantes, se consiguen descensos en las emisiones hacia 2035 llegando en 2050 a la mitad de los obtenidos en 2015, pero si se aplican tasas a los gases contaminantes de manera escalonada, se aprecian descensos más pronunciados en las emisiones y mucho antes, llegando a casi cero en 2050. En general, se demuestra que un sistema con una significativa adopción de VACs es menos costoso y genera menos emisiones, incluso si se doblan los VKT con respecto a los vehículos convencionales que sustituyen.

No obstante, algunos modelos analizando exclusivamente los desplazamientos a los lugares de trabajo (commuting) obtienen resultados no tan prometedores desde el punto de vista ambiental.

Si bien con un 20% de taxis autónomos sería posible dar el mismo servicio que toda la flota de vehículos privados dedicados a los viajes de traslado a los centros de trabajo, con una reducción del coste de viaje del 38%, las emisiones de gases de efecto invernadero aumentan un 25% debido principalmente a los recorridos “en vacío” para ir a buscar al siguiente ocupante (M. Lu et al., 2018).

F. Yao et al. (2020) modelizan un escenario híbrido con conductores y vehículos autónomos de servicios de movilidad a gran escala, concluyendo que en la medida en que se van sustituyendo vehículos con conductor por VAs las emisiones descienden llegando hasta reducciones del 12,3%.

3.1.4 Efectos del sistema de transporte conjunto y visiones generales

Una línea de análisis consiste en el estudio de los efectos del coche autónomo considerando su implantación global dentro de un sistema de transporte. Los efectos del vehículo autónomo en el consumo energético y las emisiones no son muy relevantes a pesar de un mayor grado de eficiencia en la conducción, pero donde sí es capaz de producir grandes transformaciones es en el sistema de transporte general, por sus interacciones con otros medios y por su potencial para cambiar ciertos hábitos entre los usuarios. Por ejemplo, hoy en día las emisiones diarias del transporte generadas en una gran área metropolitana como puede ser Toronto, corresponden en un 96% al vehículo privado, mientras que el 4% restante corresponde al transporte público, que sin embargo realiza el 32% de los traslados. Con la introducción del VA, se observa que podrían aumentar los kilómetros recorridos y las emisiones, sin embargo, si el estudio se realiza con VAs eléctricos se pueden conseguir reducciones en las emisiones a nivel regional del 5% (A. Wang et al., 2018).

El modelo generalista de Noussan y Tagliapietra (2020) analiza el efecto de la digitalización sobre la demanda de transporte, el consumo de energía y las emisiones en la UE-28 comparando dos escenarios diferentes, Digitalización Responsable (DR) y Digitalización Egoísta (DE), y dos horizontes temporales, 2030 y 2050. Cada escenario presenta diferentes hipótesis para 4 áreas: movilidad como servicio, movilidad compartida, vehículos autónomos y digitalización en otros sectores (e-commerce, teletrabajo). Se concluye que la demanda total de transporte aumenta y el coche sigue siendo el medio de transporte más utilizado, aunque en 2050 disminuye su uso en el escenario DR a favor del transporte público y bicicleta. En cuanto al consumo energético, el modelo muestra que el consumo general permanece estable hasta 2030, descendiendo en 2050 en el escenario DR hasta un 34% respecto a los valores actuales como consecuencia del efecto combinado de un cambio hacia medios más eficientes y un uso del coche compartido con más pasajeros por vehículo. La tendencia en las emisiones sigue aproximadamente el mismo patrón que el consumo de energía, consiguiendo para 2050 un descenso del 43% respecto a las emisiones de 2015 debido a las mejoras tecnológicas. El escenario DE, en el que la tecnología se usa de manera que se maximice el beneficio individual, muestra un aumento del 7% en el consumo energético para 2050, disminuyendo las emisiones un 8% debido a las mejoras tecnológicas.

En otro modelo generalista, F. Liu et al. (2019) calculan las emisiones de los vehículos de pasajeros en China según la penetración de los VAs teniendo en cuenta una larga serie de factores, como las ventas de vehículos, el ratio de supervivencia, la distancia anual recorrida, consumos y emisiones relacionadas basados en eco-driving, incremento de la velocidad, mejora de la circulación (conectividad e intersecciones), reducción de accidentes, platooning, diseños específicos (optimización del tamaño, menor carga de elementos de seguridad, mayor carga de sensorización, computación, confort y entretenimiento), carga aerodinámica y otros. El modelo no asume cambios muy radicales en cuanto a evolución de la penetración en el mercado y distancias recorridas así que los resultados indican que no se perciben reducciones importantes en cuanto a emisiones hasta 2050, incluso podrían darse incrementos. Solamente a partir de 2045, con unos mejores parámetros de consumo y una mayor penetración de VAs se podrían ver mejoras en la reducción de emisiones a nivel global.

3.2 Efectos en el suelo

El impacto ambiental del vehículo autónomo en el suelo (y por tanto en los hábitats naturales) no está siendo objeto de estudio por el momento, pese a que varios autores ya indican que uno de los posibles efectos indeseados es la agudización de la dispersión urbana, siendo este fenómeno uno de los ya estudiados en la literatura científica desde la perspectiva del vehículo convencional.

Si nos atenemos únicamente al impacto del vehículo autónomo en la forma urbana, sí está recibiendo creciente atención por parte de los investigadores ya que, como se ha dicho, por sus propias características reúne el potencial suficiente como para multiplicar ciertos efectos indeseados o favorecer nuevas, e impensables hasta este momento, posibilidades de uso del suelo. Dentro de los primeros podemos contar con que, al no tener que conducir, los usuarios del vehículo autónomo podrán dedicar el tiempo de viaje a trabajar o a actividades de ocio, haciendo disminuir el coste de viajar y estando más dispuestos a recorrer largas distancias, afectando a la toma de decisiones en cuanto al lugar de residencia o a la localización de las empresas. Por otro lado, las mejoras del flujo del tráfico que avanzan los VAs hacen más fáciles los desplazamientos urbanos y más atractivo el espacio del centro de las ciudades y eso redundará en que, bajo ciertas circunstancias, ganaría atractivo para sus habitantes permanecer en la ciudad y no mudarse a zonas residenciales alejadas.

Un parámetro que definirá, por tanto, la actuación de los usuarios es el valor del tiempo de viaje un indicativo de cuánto está dispuesto a pagar el viajero por disminuir el tiempo que asignan a viajar de carácter subjetivo, y por tanto influenciado por multitud de factores: contexto espacial urbano-suburbano-rural, normas sociales, estatus, forma de vida, etc. En diversos estudios se aprecia que la introducción del vehículo autónomo disminuye el coste de viajar, en mayor o menor medida, pero eso ocurre tanto para usuarios urbanos como para suburbanos y rurales.

Esto, puede implicar diferentes tendencias en la forma urbana, algunas de ellas opuestas: desde un crecimiento suburbial e improbable densificación de los centros urbanos hasta el crecimiento de ambos polos, la periferia y los centros urbanos (Milakis et al., 2018). Gelauff et al. (2019) obtienen que, en un escenario de alta automatización combinado con buenas prestaciones de transporte público en las grandes zonas urbanas de Holanda, la población tiende a aumentar en las grandes metrópolis y sus suburbios, disminuyendo en ciudades más pequeñas y sus suburbios. Zhong et al. (2020) analizando zonas metropolitanas de tamaño medio en EE.UU. concluyen que la reducción del tiempo de viaje es más pronunciada cuando se trata de VAs privados y entre habitantes de zonas suburbanas, llegando al 32%, pero también es importante entre los usuarios urbanos, lo que no redundaría en apreciables redistribuciones de población. Moore et al. (2020) igualmente obtienen ahorros en el valor del tiempo de viaje del 30%, pero predicen una expansión urbana horizontal del 68%. Bin-Nun y Binamira (2020) observan que la implantación de los VAs ocasionaría aumentos de población en las zonas más urbanizadas (hasta el 12%) frente a pérdidas de población en las zonas rurales menos densamente pobladas.

Como se puede apreciar en los diferentes estudios, la tendencia hacia la dispersión urbana (sprawl) como consecuencia de la penetración del vehículo autónomo a veces arroja resultados contradictorios. Larson y Zhao (2020), a pesar de que la mayoría de los modelos conducen al sprawl, también analizan esa ambigüedad concluyendo que es producida por la tensión entre la reducción del coste del viaje al trabajo, el incremento de costes por el aumento de la congestión y el aumento de la densidad urbana como consecuencia del nuevo uso residencial de la superficie de parking no necesaria con los VAs.

Si no se adopta el uso compartido y el espacio de parking no se dedica a uso residencial, el modelo resultante es un modelo urbano disperso. Kang y Kim (2019) también observan para Seúl y su área metropolitana un aumento de la superficie suburbana mientras que se densifica el principal centro comercial, perdiendo tierras agrícolas que pasan a uso residencial y con descenso general del suelo dedicado a actividades comerciales.

Por otro lado, varios estudios se centran en otro de los aspectos significativos y positivos: la posibilidad de liberación de espacio urbano actualmente dedicado a vías y aparcamiento. No obstante, se alerta que solamente en combinación con políticas activas adecuadas se podrá desarrollar todo su potencial (González-González et al., 2020).

Así, la reducción del espacio dedicado a aparcamiento puede llegar a ser muy significativa con la adopción de la movilidad compartida (W. Zang et al., 2015). No obstante, algunos estudios reflejan que, al mismo tiempo que se libera espacio de aparcamiento en los centros metropolitanos, los vehículos recorren mayores distancias diarias y se produce un aumento de la superficie dedicada al aparcamiento en la periferia (Harper et al., 2018; W. Zang y Wang, 2020).

Desde el punto de vista ambiental, los anteriores efectos o posibilidades se trasladan a sus repercusiones en el consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero pero, siendo la agudización de la dispersión urbana una de las posibles consecuencias negativas de la implantación del vehículo autónomo, se hace necesario considerar los efectos contaminantes no solamente en el aire sino en el resto de medios, entre ellos el suelo.

Johnson (2001) resume los impactos que diferentes investigadores identifican en relación con la dispersión y entre ellos, los siguientes afectan al suelo: pérdida de tierras ambientalmente frágiles, espacios abiertos más reducidos, pérdida del atractivo paisajístico, ausencia de vistas del paisaje (montañas), paisaje monótono o inapropiado, pérdida de tierras de cultivo, reducción de la biodiversidad, aumento de la escorrentía y aumento de las inundaciones, pérdida de vegetación nativa y fragmentación de los ecosistemas.

Muchos de los efectos en el suelo son más fácilmente apreciables que medibles y de ahí la dificultad en su estudio. También es evidente que hay impactos cuyos efectos perniciosos no se aprecian hasta que pase un cierto tiempo y además la percepción del riesgo asociado a estos impactos es variable entre diferentes individuos. De ahí quizá que todavía no se encuentren dentro de la literatura científica artículos que aborden el problema de los efectos contaminantes en el suelo como consecuencia de la introducción del vehículo autónomo como medio de transporte de relevancia.

3.3 Efectos en el agua

Los cambios en el uso del suelo son uno de los principales factores que contribuyen a la degradación de la calidad del agua. Como se ha podido ver en el punto anterior, la expansión suburbana es uno de los posibles efectos de la penetración del vehículo autónomo y, por tanto, además de impacto en la calidad del aire y del suelo, tendrá impactos indeseados en la calidad del agua.

La urbanización provoca cambios sustanciales en los sistemas hidrogeológicos ya que, al incrementarse la superficie construida impermeable, aumenta la ocurrencia e intensidad de las inundaciones, disminuye la recarga de acuíferos, elimina los pequeños cursos de agua superficial, altera la permeabilidad del resto del terreno natural y aumenta la carga de contaminantes, a la vez que también aumenta la demanda de agua para la población y sus servicios. Considerando la presencia de nitratos ($\text{NO}_3\text{-}_\text{N}$), fosfatos (TP) y *Escherichia Coli* en los cursos naturales de agua, R. Wang et al. (2021) obtienen que los desarrollos urbanos más densos son más efectivos en la reducción de nitratos y fosfatos, aunque pueden tender, dependiendo de la época del año, a aumentar la presencia de *E. Coli*, pero en general concluyen que la degradación de los flujos naturales de agua es consecuencia del “sprawl”. S. Wang et al. (2019), igualmente, analizando la degradación y disminución de los recursos hídricos como consecuencia de la urbanización suburbana en una megalópolis como Pekín desde la década de los años 90, concluyen que tales niveles pueden comprometer el futuro la sostenibilidad de la ciudad.

Si, como avanzan ciertos estudios, hay relación entre un posible aumento de la expansión urbana de baja densidad y la adopción del AV como medio de transporte masivo, deberían considerarse sus probables graves efectos en el medio acuático más allá de las emisiones generadas. A la vista de los resultados obtenidos en las plataformas WoS y Scopus, no hay por el momento literatura que tenga en cuenta estos efectos.

3.4 Contaminación acústica

La contaminación acústica y la contaminación atmosférica son los dos factores de riesgo más importantes para la salud en los espacios urbanos y son responsables de más del 75% de las enfermedades atribuibles a condicionantes ambientales (Hanninen et al., 2014), siendo el tráfico rodado uno de los mayores emisores de ruido.

Para el análisis de los efectos sobre la salud de la contaminación acústica se suelen emplear los parámetros L_{dn} , nivel día-noche, que es el nivel de sonido equivalente de 24h con los niveles de sonido nocturnos incrementados en 10dB(A) y el L_{den} , nivel día-tarde-noche. La población residente en entornos urbanos en países industrializados está expuesta a niveles L_{dn} por encima de 50dB(A) y hay suficiente evidencia científica que afirma que exposiciones por encima de esos niveles puede inducir disfunción auditiva, hipertensión, cardiopatía isquémica, irritación y alteraciones del sueño (Passchier-Vermeer y Passchier, 2000).

A pesar del potencial del VA para modificar el futuro del transporte y los hábitos de los usuarios, no hay apenas literatura que estudie el impacto que su penetración puede tener en un factor de riesgo para la salud de tal relevancia.

No obstante, algunos primeros estudios, como el realizado por Patella et al. (2019b) analizando los efectos de la penetración del AV en una red de carreteras real (Roma), indican que en un escenario con 100% de presencia de vehículos autónomos las vías urbanas interiores se beneficiarían de descensos en la contaminación acústica al reducirse la congestión, mientras que aumentaría la contaminación en ciertas autopistas de acceso como consecuencia del mayor número de trayectos extra-urbanos.

3.5 Contaminación lumínica

Otro de los contaminantes asociados a los entornos urbanos y las vías de transporte es la luz artificial por la noche. Aunque no se ha desarrollado suficiente evidencia científica sobre sus efectos en la salud, diversos estudios alertan de que, al afectar al comportamiento, el sueño y la melatonina, podría ser un factor de riesgo en desórdenes metabólicos como la obesidad y las enfermedades cardiovasculares, ciertos tipos de cáncer y salud mental (Flies et al., 2019).

Además de en la salud humana, la luz artificial tiene impactos negativos en los ecosistemas (Gaston et al., 2015) y consume una gran cantidad de energía, generando 1900 Mt de CO₂ al año (IEA, 2006).

Al igual que con la contaminación acústica, se ha desarrollado poca literatura en relación con el vehículo autónomo a pesar de que, al no tener conductor, se podría reducir en gran medida la necesidad de luz artificial en ciertos entornos, ya que la iluminación de las calles y de los aparcamientos constituyen el 90% de la iluminación exterior. En ese sentido, Stone et al. (2019) analizan las posibilidades de eliminar iluminación en aparcamientos y autopistas, además de promover un análisis del diseño de los AVs para que sean capaces de circular en la oscuridad en condiciones de seguridad.

3.6 VAs y usuarios: percepción general y compatibilidad con otros medios de transporte

Como se ha podido ver, los efectos ambientales del vehículo autónomo son muy sensibles al grado de penetración, su forma de uso y su interacción con otras formas de transporte. Algunos modelos, teniendo en cuenta los porcentajes de VAs en el conjunto de la flota de vehículos, si son compartidos o no, su impacto en la red de infraestructuras, la posibilidad de viajar “de puerta a puerta”, la reducción del valor del tiempo de viaje y la incorporación de los potenciales usuarios que no conducen, concluyen que, para el horizonte de 2050, los kilómetros por vehículo podrían aumentar un 50%, que el uso del transporte público podría descender un 18% y el uso de los modos activos (andar en bicicleta y a pie) podría bajar un 13% (May et al., 2020). Por tanto, es muy importante conocer la respuesta del usuario hacia esta nueva tecnología y la forma en que considera su uso.

Para analizar estos aspectos, diferentes autores dirigen encuestas y entrevistas con espectros más o menos amplios. Potoglou et al. (2020) analizan las preferencias de los usuarios por los VAs y los combustibles alternativos, identificando y explorando las diferencias entre seis países y sus diferentes segmentos de población. Los resultados indican que, por ejemplo, los participantes japoneses son los que más valoran los avances del VA, quizá por ser una sociedad cuya economía está basada en la alta tecnología o porque anticipan las ventajas que los VAs pueden ofrecer a una población envejecida. Los participantes alemanes, suecos y británicos no tienen esa predisposición positiva y los resultados para EE.UU. varían con respecto a otras encuestas anteriores, indicando actualmente una menor predisposición, quizá derivada de los accidentes ocurridos con VAs. También se encuentran diferencias entre los diversos grupos sociales encuestados resultando, en general, que los más jóvenes están más dispuestos a aceptar altos niveles de autonomía en los vehículos mientras que los que se definen como menos innovadores, menos concienciados ambientalmente y que viven en zonas rurales tienen menor predisposición. Un resultado llamativo se encuentra dentro de los encuestados de Suecia, que pese a autodefinirse como ambientalmente responsables y valorar positivamente los VEs, no consideran interesante el máximo nivel de automatización de los VAs, quizá por un cierto escepticismo sobre los verdaderos beneficios ambientales de los mismos. En este sentido, Müller (2019) incluye en su estudio la actitud del encuestado hacia la protección ambiental y la innovación, concluyendo que una actitud positiva hacia esos factores predispone hacia una mejor aceptación del VE y el uso compartido, pero no necesariamente hacia el VA.

Se observa en ciertos estudios que la penetración en el mercado de los VAs podría cambiar ciertos hábitos actuales relacionados con la movilidad activa y el transporte público, a su vez relacionados con mayores beneficios para la salud y para el medioambiente. Son los segmentos de población más joven los que más utilizan estos medios y a su vez los más dispuestos a adoptar nuevas tecnologías como el VA, lo que puede redundar en un trasvase de usuarios. En este sentido, Booth et al. (2019) han realizado una encuesta con el objetivo de explorar en qué grado son usuarios de modos de transporte activo y en qué medida estarían dispuestos a sustituirlos por VAs. Se concluye que un 48% de los encuestados estarían dispuestos a sustituir el transporte público por un vehículo autónomo, al igual que el 32% de los que usan la bicicleta y el 18% de los que andan.

Blau et al. (2018) han estudiado la influencia de los vehículos autónomos en los usuarios de bicicletas compartiendo las mismas vías, concluyendo que el VA supone un elemento disuasorio para los usuarios de la bicicleta a pesar de presuponer una conducción mucho más segura frente a los vehículos convencionales, por lo que los ciclistas llegan a doblar la preferencia por infraestructuras separadas con respecto a las condiciones actuales. También Latham et al. (2019) se preguntan si la penetración de los VAs desplazarán otros modos de transporte o permitirán una mayor y más igualitaria configuración del espacio urbano. Mediante un experimento con ciclistas haciendo un giro a la derecha en una calle urbana de Carlisle (Reino Unido) con doble sentido de circulación llega a la conclusión de que, pese a las normas formales e informales que regulan una maniobra tan simple, los diferentes usuarios tienen múltiples razonamientos sobre lo que se considera razonable y apropiado. Por ello, y aunque actualmente los VAs se están desarrollando partiendo de calzadas convencionales con tráfico motorizado, deben tener el objetivo de circular en entornos donde se priorice el movimiento y la seguridad de los usuarios no motorizados.

De nuevo respecto a la interacción o desplazamiento que el vehículo autónomo pueda ejercer sobre los modos de transporte activo, y en definitiva sobre la salud pública, Crayton y Meier (2017) identifican que algunas posibilidades beneficiosas desde el punto de vista de la salud pública no lo son tanto desde el punto de vista ambiental si no se regulan correctamente. La capacidad del VA para circular de manera más segura redundaría en menores emisiones al evitar los atascos generados por los accidentes, lo que es positivo, pero el acceso a una movilidad autónoma por parte de población actualmente imposibilitada para conducir implicaría un aumento en los kilómetros recorridos por vehículo y por tanto más emisiones. En definitiva, se percibe como negativo tanto para la salud pública como para el medioambiente un desplazamiento desde medios de transporte activo hacia el vehículo autónomo, por el aumento del sedentarismo y las enfermedades asociadas y por la sustitución de hábitos de movilidad sin emisiones por transporte con cierto grado de emisiones.

El potencial que el vehículo autónomo tiene para conseguir un transporte más sostenible medioambientalmente se basa en que el usuario cambie la preferencia actual hacia el coche privado por un uso compartido con varios usuarios por viaje.

Para comprobar si ese cambio de tendencia es posible, Stoiber et al. (2019) analizan la influencia de varios instrumentos para fomentar el uso del transporte compartido en un escenario de total presencia de VAs. En este caso, un 61% de las respuestas eran favorables a escoger VAs compartidos mientras que el 39% sigue prefiriendo un uso privado. El porcentaje de aceptación de uso compartido es superior a otros estudios anteriores, pero se puede deber a que en este caso no se da la opción de escoger un transporte convencional que no sea autónomo, lo que sugiere que los usuarios están más dispuestos al uso compartido en un escenario de total penetración de VAs al no poder optar por opciones más conocidas.

Dentro de la literatura existente, una forma de análisis consiste en realizar entrevistas a expertos sobre sus puntos de vista acerca de diferentes posibilidades. Lang et al. (2019) conducen una serie de entrevistas cuyos resultados indican que los vehículos eléctricos seguirán creciendo en importancia, pero a pesar de la creciente conciencia ambiental los usuarios no parecen inclinados a otras alternativas como los VA.

Se percibe, no obstante, que los vehículos autónomos tendrán un papel muy importante en el futuro y que es el sector tecnológico con el crecimiento más rápido y un mayor grado de innovación, todo ello estimulado por la competitividad y las alianzas entre empresas. Sin embargo, alcanzar la autonomía completa todavía requerirá un cierto tiempo debido a los costes y a la necesidad de establecer nuevos estándares en la legislación vigente. Adicionalmente, los entrevistados indican que, desde su punto de vista, los usuarios están todavía tratando de averiguar en qué consisten los cambios y sus consecuencias.

También entre los expertos encuestados por Nogués et al. (2020) se aprecia cierto escepticismo sobre los efectos de los VAs -incluso utilizados de modo compartido- en los entornos urbanos, de tal manera que para evitar problemas de sostenibilidad en el futuro se deben implementar políticas activas, como la promoción de los modos de transporte activos, la mejora del transporte público, las restricciones para los vehículos privados en el centro de las ciudades y la promoción de una más compacta y mejor estructurada trama urbana.

4. CONCLUSIONES

Los efectos ambientales de los vehículos autónomos están generando una gran cantidad de estudios con resultados muy dispares y enfoques muy diferentes, aunque principalmente centrados en analizar consumos y emisiones en diferentes escenarios. Para conseguir sus objetivos los investigadores adoptan diferentes estrategias y planteamientos. Si se trata de analizar emisiones se suelen basar en modelos matemáticos con resultados variables y muy dependientes de los parámetros que asumen en la modelización. La mayor eficiencia en la conducción y la posibilidad de la circulación en grupo favorecida por las comunicaciones V2X indican ahorros energéticos y reducción de emisiones, amplificadas si los usuarios optan por la movilidad compartida al conseguir una reducción significativa del parque automovilístico sin pérdidas en los niveles de servicio.

No obstante, otros análisis indican que las prioridades de los usuarios pueden llevar a escenarios donde todos los potenciales beneficios que aporta la tecnología son usados para maximizar el aprovechamiento individual, provocando efectos ambientales negativos con respecto al estándar actual. Igualmente, la tendencia del usuario puede provocar un cambio en el uso del más conveniente transporte activo (uso de la bicicleta, andar) o del transporte público hacia el vehículo autónomo, aún en su modalidad compartida, lo que también tendría efectos contraproducentes en el medio ambiente y a su vez en la salud pública.

Además, ciertos impactos negativos como la dispersión urbana no solamente deben ser estudiados desde el punto de vista del aumento de las emisiones, sino que el efecto negativo se multiplica si se tienen en cuenta la degradación del suelo, el paisaje, los ecosistemas y los recursos de agua natural. Igualmente, nuevas posibilidades que se apuntan, como la posible reducción de la contaminación lumínica, redundarían, por ejemplo, en posibles descensos muy importantes en consumos energéticos y emisiones del sistema global. Es decir, las consecuencias positivas o negativas pueden amplificarse de una manera exponencial si se tiene en cuenta todo el posible espectro ambiental afectado (aire, suelo, agua, ruido, luz artificial, etc.). En este sentido sería importante que futuros estudios tuvieran una visión más amplia en cuanto a los efectos ambientales del vehículo autónomo puesto que potenciales beneficios directos, por ejemplo, en el descenso de las emisiones según un cierto modelo, pueden ser mayores si se aplica la posible reducción de las emisiones por una menor necesidad de iluminación nocturna o la “naturalización” del suelo urbano liberado. También sucede al contrario, modelos que indican incremento de emisiones debido al aumento de vehículos o a las mayores distancias recorridas, pueden ser mucho más perniciosos si se tienen en cuenta las probables degradaciones del suelo, los hábitats naturales y los recursos hídricos como consecuencia de la dispersión urbana.

Muchos de los efectos sobre el suelo y los recursos hídricos naturales son más difíciles de analizar puesto que no son fácilmente evaluables de forma cuantitativa, necesitan plazos más amplios para ser apreciados y además son susceptibles de visiones subjetivas. Sin embargo, las consecuencias de no ser tenidos en cuenta son relevantes por sí mismos y por su interrelación con el resto de los efectos ambientales.

Existe un consenso entre los expertos al considerar que el vehículo autónomo es una tecnología que marcará el devenir del transporte en las próximas décadas, pero hoy en día existen tantas incertidumbres tecnológicas para considerarlo viable en un plazo razonable que el usuario no es capaz de valorar realmente sus potenciales beneficios. Es un hecho que la movilidad está sufriendo una importante transformación con respecto a los usos tradicionales (VEs, VTCs) y que una mayor conciencia medioambiental acelerará este proceso, aunque a día de hoy no parece que ese sea un motivo que favorezca la implantación del VA. La dificultad que supone prever el grado de aceptación y cómo será usada una tecnología tan disruptiva hacen que los resultados de los estudios sean muy variables e incluso antagónicos.

Sin embargo, sí se puede apreciar un cierto pensamiento general por el que el beneficio social óptimo de los sistemas de transporte futuros debe incluir una movilidad autónoma, compartida y complementaria con el resto de medios, y para ello se requiere la motivación de todos los usuarios.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se ha desarrollado dentro del proyecto “Formas innovadoras de planificación urbana y del transporte ante los nuevos sistemas de movilidad basados en la conducción autónoma” - AUTONOMOUS, 2020-2023, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN) / ERDF (EU) en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2017-2020 (referencia PID2019-110355RB-I00).

REFERENCIAS

ALMANNAA, M.H., CHEN, H., RAKHA, H.A., LOULIZI, A., EL-SHAWARBY, I. (2019). Field Implementation and Testing of an Automated Eco-cooperative Adaptive Cruise Control System in the Vicinity of Signalized Intersections. *Transportation Research Part D-Transport and Environment* 67, pp. 244-262

ANDERSON, J.M., KALRA, N., STANLEY, K.D., SORENSEN, P., SAMARAS, C., OLUTOWATOLA, O.A. (2014). *Transportation and Technology (program), autonomous vehicle technology: a guide for policymakers*. Rand Corporation, 214 p.

AREFIZADEH, S., TALEBPOUR, A. (2018). A Platooning Strategy for Automated Vehicles in the Presence of Speed Limit Fluctuations. *Transportation Research Record* 2672, pp.154-161.

ASTARITA, V., GIOFRE, V.P., GUIDO, G., VITALE, A. (2019). A Single Intersection Cooperative-Competitive Paradigm in Real Time Traffic Signal Settings Based on Floating Car Data. *Energies* 12 (3), 409.

BAUER, G.S., GREENBLATT, J.B., GERKE, B.F. (2018). Cost, Energy, and Environmental Impact of Automated Electric Taxi Fleets in Manhattan. *Environmental Science and Technology* 52 (8), pp. 4920-4928.

BENTO, L.C., PARAFITA, R., RAKHA, H.A., NUNES, U.J. (2019). A Study of the Environmental Impacts of Intelligent Automated Vehicle Control at Intersections via V2V and V2I Communications. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations* 23 (1), pp. 41-59.

BICER, Y., DINCER, I. (2018). Life cycle environmental impact assessments and comparisons of alternative fuels for clean vehicles. *Resources, Conservation and Recycling* 132, pp. 141-157.

- BICHIOU, Y., RAKHA, H.A. (2019). Developing an Optimal Intersection Control System for Automated Connected Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 20 (5) 8463636, pp. 1908-1916.
- BIN-NUN, A.Y., BINAMIRA, I. (2020). A framework for the impact of highly automated vehicles with limited operational design domains. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 139, pp. 174-188.
- BLAU, M., AKAR, G., NASAR, J. (2018). Driverless vehicles' potential influence on bicyclist facility preferences. *International Journal of Sustainable Transportation* 12 (9), pp. 665-674.
- BOOTH, L., NORMAN, R., PETTIGREW, S. (2019). The potential implications of autonomous vehicles for active transport (2019) *Journal of Transport and Health* 15, Art. N°. 100623.
- CAO, H., ZÖLDY, M. (2020). An investigation of autonomous vehicle roundabout situation. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering* 48 (3), pp. 236-241.
- CHEN, W., LIU, Y., CHEN, W., LIU, Y. (2019). Gap-based automated vehicular speed guidance towards eco-driving at an unsignalized intersection. *Transportmetrica B* 7 (1) 23, pp.147-168.
- CRAYTON, T.J., MEIER, B.M. (2017). Autonomous vehicles: Developing a public health research agenda to frame the future of transportation policy. *Journal of Transport and Health* 6, pp. 245-252.
- DEAN, J., WRAY, A.J., BRAUN, L., CASELLO, J.M., MCCALLUM, L., GOWER, S. (2019). Holding the keys to health? A scoping study of the population health impacts of automated vehicles. *BMC public health* 19 (1), pp.1471-2458.
- DING, J., PENG, H., ZHANG, Y., LI, L. (2020). Penetration effect of connected and automated vehicles on cooperative on-ramp merging. *IET Intelligent Transport Systems* 14 (1), pp. 56-64.
- DJAVADIAN, S., TU, R., FAROOQ, B., HATZOPOULOU, M. (2020). Multi-objective eco-routing for dynamic control of connected & automated vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 87,102513.
- ESTEPA, R., ESTEPA, A., WIDEBERG, J., JONASSON, M., STENSSON-TRIGELL, A. (2017). More Effective Use of Urban Space by Autonomous Double Parking. *Journal of Advanced Transportation* 2017, 8426946.
- EUROPEAN COMMISSION, 2011. European Commission's communication 'Energy roadmap 2050' COM (2011) 885 Available at https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2012_energy_roadmap_2050_en_0.pdf

- FAGNANT, D.J., KOCKELMAN, K.M. (2014). The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 40, pp. 1-13.
- FENG, Y., YU, C., LIU, H.X. (2018). Spatiotemporal intersection control in a connected and automated vehicle environment. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 89, pp. 364-383.
- FILOCAMO, B., RUIZ, J.A., SOTELO, M.A. (2020). Efficient Management of Road Intersections for Automated Vehicles-The FRFP System Applied to the Various Types of Intersections and Roundabouts. *Applied Sciences Basel* 10 (1), 316.
- FLIES, E.J., MAVOA, S., ZOSKY, G.R., MANTZIORIS, E., WILLIAMS, C., ERI, R., BROOK, B.W., BUETTEL, J.C. (2019). Urban-associated diseases: Candidate diseases, environmental risk factors and a path forward. *Environment International* 133, 105187.
- GASTON, K.G., BENNIE, J., HOPKINS, J. (2015). Benefits and costs of artificial nighttime lightning of the environment. *Environmental Reviews* 23, pp. 14-23.
- GAWRON, J.H., KEOLEIAN, G.A., DE KLEINE, R.D., WALLINGTON, T.J., KIM, H.C. (2019). Deep decarbonization from electrified autonomous taxi fleets: Life cycle assessment and case study in Austin, TX. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 73, pp. 130-141.
- GELAUFF, G., OSSOKINA, I., TEULINGS, C. (2019). Spatial and welfare effects of automated driving: Will cities grow, decline or both? *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 121, pp. 277-294.
- GHIASI, A., LI, X., MA, J. (2019). A mixed traffic speed harmonization model with connected autonomous vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 104, pp. 210-233.
- GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, E., NOGUÉS, S., STEAD, D. (2020). Parking futures: Preparing European cities for the advent of automated vehicles. *Land Use Policy* 91, 104010.
- GREENBLATT, J.B., SAXENA, S. (2015). Autonomous taxis could greatly reduce greenhouse-gas emissions of US light-duty vehicles. *Nature Climate Change* 5, pp. 860-863.
- GREENWALD, J.M., KORNHAUSER, A. (2019). It's up to us: Policies to improve climate outcomes from automated vehicles. *Energy Policy* 127, pp. 445-451.
- GUO, Y.Q., XU, H.L., ZHANG, Y., YAO, D.Y. (2020). Integrated Variable Speed Limits and Lane-Changing Control for Freeway Lane-Drop Bottlenecks. *IEEE Access* 8, pp. 54710-54721.
- HANNINEN, O., KNOL, A.B., JANTUNEN, M., LIM, T.A., CONRAD, A., RAPPOLDER, M., CARRER, P., FANETTI, A.C., KIM, R., BUEKERS, J., TORFS, R., LAVARONE, I., CLASSEN, T., HORNBERG, C., MEKEL, O.C., GROUP EBW (2014). Environmental Burden of Disease in Europe: Assessing Nine Risk Factors in Six Countries. *Environmental Health Perspectives* 122, pp. 439-446.

- HARPER, C.D., HENDRICKSON, C.T., SAMARAS, C. (2018). Exploring the economic, environmental, and travel implications of changes in parking choices due to driverless vehicles: An agent-based simulation approach. *Journal of Planning and Development* 144 (4), 04018043.
- HÖRL, S., CIARI, F., AXHAUSEN, K.W. (2016). Recent Perspectives on the impact of autonomous Vehicles. Working Paper ETH, Zurich. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000121359>.
- HUANG, L., ZHAI, C., WANG, H., ZHANG, R., QIU, Z., WU, J. (2020). Cooperative Adaptive Cruise Control and exhaust emission evaluation under heterogeneous connected vehicle network environment in urban city. *Journal of Environmental Management* 256, 109975.
- HWANG, H., SONG, CH-K. (2019). Changes in air pollutant emissions from road vehicles due to autonomous driving technology: A conceptual modeling approach. *Environmental Engineering Research* 25 (3), pp. 366-373
- IACOBUCCI, R; MCLELLAN, B; TEZUKA, T. (2018). Modeling shared autonomous electric vehicles: Potential for transport and power grid integration. *Energy* 158, pp.148-163.
- ICCT. European vehicle market statistics. Pocketbook 2018/19. THE INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION. Available at https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Pocketbook_2018_Final_20181205.pdf
- IEA. Light's labour's lost: policies for energy-efficient lighting. International Energy Agency, Paris 2006.
- IEA. Energy Technology Perspectives 2016. International Energy Agency, Paris 2016. Available at <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2016>
- JIANG, H., AN, S., WANG, J., CUI, J. (2018). Eco-approach and departure system for left-turn vehicles at a fixed-time signalized intersection. *Sustainability* 10 (1), 273.
- JIANG, H., HU, J., A. N., S., WANG, M., PARK, B.B. (2017). Eco approaching at an isolated signalized intersection under partially connected and automated vehicles environment. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 79, pp. 290-307.
- JIN, S., SUN, D.-H., ZHAO, M., LI, Y., CHEN, J. (2020). Modeling and stability analysis of mixed traffic with conventional and connected automated vehicles from cyber physical perspective. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 551, 124217.
- JOHNSON, M.P. (2001). Environmental impacts of urban sprawl: a survey of the literature and proposed research agenda. *Environmental Planning A* 33, pp. 717-735.
- JONES, E.C., LEIBOWICZ, B.D. (2019). Contributions of shared autonomous vehicles to climate change mitigation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 72, pp. 279-298.

- KAMAL, M.A.S., HAYAKAWA, T., IMURA, J.-I. (2020). Development and Evaluation of an Adaptive Traffic Signal Control Scheme under a Mixed-Automated Traffic Scenario. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 21 (2) 8643726, pp. 590-602.
- KANG, N.-Y., KIM, Y. (2019). Potential of urban land use by autonomous vehicles: Analyzing land use potential in Seoul capital area of Korea. *IEEE Access* 7, 2929777, pp. 101915-101927.
- KOPELIAS, P., DEMIRIDI, E., VOGIATZIS, K., SKABARDONIS, A., ZAFIROPOULOU, V. (2020). Connected & autonomous vehicles – Environmental impacts – A review. *Science of the Total Environment* 712, 135237.
- LANCTOT, R. (2017). *Accelerating the Future: The Economic Impact of the Emerging Passenger Economy*. Strategy Analytics: Boston, MA, USA, 2017, 30p.
- LANG, L., MOHNEN, A. (2019). An organizational view on transport transitions involving new mobility concepts and changing customer behavior. *Environmental Innovation and Societal Transitions* 31, pp. 54-63.
- LARSON, W., ZHAO, W. (2020). Self-driving cars and the city: Effects on sprawl, energy consumption, and housing affordability. *Regional Science and Urban Economics* 81, 103484.
- LATHAM, A., NATTRASS, M. (2019). Autonomous vehicles, car-dominated environments, and cycling: Using an ethnography of infrastructure to reflect on the prospects of a new transportation technology. *Journal of Transport Geography* 81, 102539.
- LEGACY, C., ASHMORE, D., SCHEURER, J., STONE, J., CURTIS, C. (2019). Planning de driverless city. *Transport Reviews* 39 (1), pp. 84-102.
- LI, D., WAGNER, P. (2019). Impacts of gradual automated vehicle penetration on motorway operation: a comprehensive evaluation. *European Transport Research Review* 11 (1), 36.
- LI, Z., CHITTURI, M.V., YU, L., BILL, A.R., NOYCE, D.A. (2015). Sustainability effects of next-generation intersection control for autonomous vehicles. *Transport* 30 (3), pp. 342-352.
- LIN, P.Q., LIU, J.H., JIN, P.J., RAN, B. (2017). Autonomous Vehicle-Intersection Coordination Method in a Connected Vehicle Environment. *Intelligent Transport Systems Magazine* 9 (4), pp. 37-47.
- LIU, C.L., WANG, J.Q., CAI, W.J., ZHANG, Y.Z. (2019). An Energy-Efficient Dynamic Route Optimization Algorithm for Connected and Automated Vehicles Using Velocity-Space-Time Networks. *IEEE Access* 7, pp. 108866-108877.
- LIU, F., ZHAO, F., LIU, Z., HAO, H. (2019). Can autonomous vehicle reduce greenhouse gas emissions? A country-level evaluation. *Energy Policy* 132, pp. 462-473.

- LIU, J., KOCKELMAN, K.M., BOESCH, P.M., CIARI, F. (2017). Tracking a system of shared autonomous vehicles across the Austin, Texas network using agent-based simulation. *Transportation* 44 (6), pp. 1261-1278.
- LOKHANDWALA, M., CAI, H. (2018). Dynamic ride sharing using traditional taxis and shared autonomous taxis: A case study of NYC. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 97, pp. 45-60.
- LU, C.R., DONG, J., HU, L. (2019a). Energy-Efficient Adaptive Cruise Control for Electric Connected and Autonomous Vehicles. *IEEE Intelligent transport systems magazine* 11 (3), pp. 42-55.
- LU, C.R., DONG, J., HU, L., LIU, C.H. (2019b). An Ecological Adaptive Cruise Control for Mixed Traffic and Its Stabilization Effect. *IEEE Access* 7, pp. 81246-81256.
- LU, M., TAIEBAT, M., XU, M., HSU, S.C. (2018). Multiagent spatial simulation of autonomous taxis for urban commute: Travel economics and environmental impacts. *Journal of Urban Planning and Development* 144 (4) 04018033.
- MA, F., YANG, Y., WANG, J., LIU, Z., LI, J., NIE, J., SHEN, Y., WU, L. (2019). Predictive energy-saving optimization based on non linear model predictive control for cooperative connected vehicles platoon with V2V communication. *Energy* 189, 116120.
- MA, J.Q., HU, J., LESLIE, E., ZHOU, F., HUANG, P., BARED, J. (2019). An eco-drive experiment on rolling terrains for fuel consumption optimization with connected automated vehicles. *Transportation Research part C- Emerging technologies* 100, pp.125-141.
- MAHDINIA, I., ARVIN, R., KHATTAK, A.J., GHIASI, A. (2020). Safety, Energy, and Emissions Impacts of Adaptive Cruise Control and Cooperative Adaptive Cruise Control. *Transportation Research Record* 2674 (6).
- MAKRIDIS, M., MATTAS, K., MOGNO, C., CIUFFO, B., FONTARAS, G. (2020). The impact of automation and connectivity on traffic flow and CO2 emissions. A detailed microsimulation study. *Atmospheric Environment* 226, 117399.
- MARÇAL, R., ANTONIALLI, F., CAVAZZA, B.H., MIRANDA, A., ALVES DE LIMA, D., YUTAKA, J., NICOLAI, I., ZAMBALDE, A. L. (2019) Autonomous vehicles: scientometric and bibliometric review. *Transport Reviews* 39 (1), pp. 9-28.
- MARTINEZ, L.M., VIEGAS, J.M. (2017). Assessing the impacts of deploying a shared self-driving urban mobility system: An agent-based model applied to the city of Lisbon, Portugal. *International Journal of Transportation Science and Technology* 6 (1), pp. 13-27.
- MARTÍNEZ-DÍAZ, M., SORIGUERA, F., PÉREZ, I. (2019). Autonomous driving: A bird's eye view. *IET Intelligent Transport Systems* 13 (4), pp. 563-579.
- MATTAS, K., MAKRIDIS, M., HALLAC, P., RAPOSO, M.A., THIEL, C., TOLEDO, T., CIUFFO, B. (2019). Simulating deployment of connectivity and automation on the Antwerp ring road. *IET Intelligent Transport Systems* 12, pp. 1036-1044.

- MAY, A.D., SHEPHERD, S., PFAFFENBICHLER, P., EMBERGER, G. (2020). The potential impacts of automated cars on urban transport: An exploratory analysis. *Transport Policy* 98, pp. 127-138.
- MCCONKY, K., RUNGTA, V. (2019). Don't pass the automated vehicles! System level impacts of multi-vehicle CAV control strategies. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 100, pp. 289-305.
- MIAO, C.S., LIU, H.O., ZHU, G.M.G., CHEN, H.Y. (2018). Connectivity-based optimization of vehicle route and speed for improved fuel economy. *Transportation Research Part C-Emerging Technologies* 91, pp. 353-368.
- MIAO, H., JIA H., LI J., QIU T.Z. (2019). Autonomous connected electric vehicle (ACEV)-based car-sharing system modeling and optimal planning: A unified two-stage multi-objective optimization methodology. *Energy* 169, pp. 797-818.
- MILAKIS, D., KROESEN, M., VAN WEE, B. (2018). Implications of automated vehicles for accessibility and location choices: Evidence from an expert-based experiment. *Journal of Transport Geography* 68, pp. 142-148.
- MILAKIS, D., SNELDER, M., VAN AREM, B., VAN WEE, B., CORREIA, G. (2017a). Development and transport implications of automated vehicles in the Netherlands: scenarios for 2030 and 2050. *European Journal of Transport and Infrastructure Research* 17 (1), pp. 63-85.
- MILAKIS, D., VAN AREM, B., VAN WEE, B. (2017b). Policy and society related implications of automated driving: A review of literature and directions for future research. *Journal of Intelligent Transportation Systems* 21(4), pp. 324-348.
- MOORE, M.A., LAVIERI, P.S., DIAS, F.F., BHAT, C.R. (2020). On investigating the potential effects of private autonomous vehicle use on home/work relocations and commute times. *Transportation research part C: Emerging Technologies* 110, pp. 166-185.
- MÜLLER, J.M. (2019). Comparing technology acceptance for autonomous vehicles, battery electric vehicles, and car sharing-A study across Europe, China, and North America. *Sustainability* 11 (16), 4333.
- NOGUÉS, S., GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, E., CORDERA, R. (2020). New urban planning challenges under emerging autonomous mobility: evaluating back casting scenarios and policies through an expert survey. *Land Use Policy* 95, 104652
- NOUSSAN, M., TAGLIAPIETRA, S. (2020). The effect of digitalization in the energy consumption of passenger transport: An analysis of future scenarios for Europe. *Journal of Cleaner Production* 258, 120926.
- OICA. World vehicles in use by country/region and type, 2005-2015. The International Organization of Motor Vehicle Manufacturers. Available at <http://www.oica.net/category/vehicles-in-use/>

OKE, J.B., AKINEPALLY, A.P., CHEN, S., XIE, Y., ABOUTALEB, Y.M., AZEVEDO, C.L., ZEGRAS, P.C., FERREIRA, J., BEN-AKIVA, M. (2020). Evaluating the systemic effects of automated mobility-on-demand services via large-scale agent-based simulation of auto-dependent prototype cities. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 140, pp. 98-126.

PASSCHIER-VERMEER, W., PASSCHIER, W.F. (2000). Noise Exposure and Public Health. *Environmental Health Perspectives* 108 (1), pp. 123-131.

PATELLA, S.M., ALETTA F., MANNINI, L. (2019b). Assessing the impact of Autonomous Vehicles on urban noise pollution. *Noise Mapping* 6 (1), pp. 72-82.

PATELLA, S.M., SCRUCICA, F., ASDRUBALI, F., CARRESE, S. (2019a). Carbon Footprint of autonomous vehicles at the urban mobility system level: A traffic simulation-based approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 74, pp. 189-200.

PHAN, D., BAB-HADIASHAR, A., FAYYAZI M., HOSEINNEZHAD R., JAZAR R.N., KHAYYAM, H. (2020). Interval Type-2 Fuzzy Logic Control for Energy Management of Hybrid Electric Autonomous Vehicle. *IEEE Transactions on Intelligent vehicles* 2020.

POTOGLOU, D., WHITTLE, C., TSOUROS, I., WHITMARSH, L. (2020). Consumer intentions for alternative fuelled and autonomous vehicles: A segmentation analysis across six countries. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 79, 102243.

RAFAEL, S., CORREIA L.P., LOPES D., BANDEIRA J., COELHO M.C., ANDRADE M., BORREGO C., MIRANDA A.I. (2020). Autonomous vehicles opportunities for cities air quality. *Science of the Total Environment* 712, 136546.

RONG, B., ZHAO, H., CUI, S., ZHANG, C. (2018). Continuum Dynamic Traffic Assignment Model for Autonomous Vehicles in a Polycentric Urban City with Environmental Consideration. *Mathematical Problems in Engineering* 2018, 8345979.

SAE. Taxonomy and definitions for terms related to driving Systems for on road Motor Vehicles. Society of Automotive Engineers. Technical report J3016_201806: SAE International 2018. Available at https://www.sae.org/standards/content/j3016_201806/

SPERLING, D., GORDON, D. (2009). *Two billion cars: Driving toward sustainability* (book). Oxford University Press. New York.

STEBBINS, S., HICKMAN, M., KIM, J., VU, H.L. (2017). Characterizing Green Light Optimal Speed Advisory trajectories for platoon-based optimization. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 82, pp. 43-62.

STERN, R.E., CHEN, Y., CHURCHILL, M., WU, F., DELLEMONACHE, M.L., PICCOLI, B., SEIBOLD, B., SPRINKLE, J., WORK, D.B. (2019). Quantifying air quality benefits resulting from few autonomous vehicles stabilizing traffic. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 67, pp. 351-365

- STOGIOS, C., KASRAIAN, D., ROORDA, M.J., HATZOPOULOU, M. (2019). Simulating impacts of automated driving behavior and traffic conditions on vehicle emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 76, pp. 176-192
- STOIBER, T., SCHUBERT, I., HOERLER, R., BURGER, P. (2019). Will consumers prefer shared and pooled-use autonomous vehicles? A stated choice experiment with Swiss households. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 71, pp. 265-282.
- STONE, T., SANTONI DE SIO, F., VERMAAS, P.E. (2019). Driving in the dark: designing Autonomous Vehicles for Reducing Light Pollution. *Science and Engineering Ethics* 26, pp. 387-403.
- TAIEBAT, M., BROWN, A.L., SAFFORD, H.R., QU, S., XU, M. (2018). A Review on Energy, Environmental, and Sustainability Implications of Connected and Automated Vehicles. *Environmental Science & Technology* 52 (20), pp. 11449-11465.
- TU, R., ALFASEEH, L., DJAVADIAN, S., FAROOQ, B., HATZOPOULOU, M. (2019). Quantifying the impacts of dynamic control in connected and automated vehicles on greenhouse gas emissions and urban NO₂ concentrations. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 73, pp. 142-151.
- US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990–2018, EPA Report 430-R-20-002; U.S. EPA, 2020. Available at <https://www.epa.gov/sites/production/files/2020-04/documents/us-ghg-inventory-2020-main-text.pdf>
- WADUD, Z., MACKENZIE, D., LEIBY, P. (2016). Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 86, pp. 1-18.
- WANG, A., STOGIOS, C., GAI, Y., VAUGHAN, J., OZONDER, G., LEE, S., POSEN, I.D., MILLER, E.J., HATZOPOULOU, M. (2018). Automated, electric, or both? Investigating the effects of transportation and technology scenarios on metropolitan greenhouse gas emissions. *Sustainable Cities and Society* 40, pp. 524-533.
- WANG, C., DAI Y., XIA J.A. (2020). CAV platoon control method for isolated intersections: Guaranteed feasible multi-objective approach with priority. *Energies* 3, 625.
- WANG, R., KIM, J.H., LI, M.-H. (2021). Predicting stream water quality under different urban development pattern scenarios with an interpretable machine learning approach. *Science of Total Environment* 761, 144057.
- WANG, S., LIN X. (2020). Eco-driving control of connected and automated hybrid vehicles in mixed driving scenarios. *Applied Energy* 271, 115233.
- WANG, S., YANG, K., YUAN, D., YU, K., SU, Y. (2019). Temporal-spatial changes about the landscape pattern of water system and their relationship with food and energy in a mega city in China. *Ecological Modelling* 401, pp. 75-84.

- WANG, Z., WU, G., BARTH, M.J. (2020). Cooperative Eco-Driving at Signalized Intersections in a Partially Connected and Automated Vehicle Environment. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 21 (5), 8704319, pp. 2029-2038
- WANG, Z.R., WU, G.Y., BARTH, M.J., BIAN, Y.G., LI, S.E., SHLADOVER, S.E. (2020). A Survey on Cooperative Longitudinal Motion Control of Multiple Connected and Automated Vehicles. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 12 (1) 8944077, pp. 4-24
- WHITTLE, C., WHITMARSH, L., HAGGER, P., MORGAN, P., PARKHURST, G. (2019). User decision-making in transitions to electrified, autonomous, shared or reduced mobility. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 71, pp. 302-319.
- WILSON, B., CHAKRABORTY, A. (2013). The environmental impacts of sprawl: emergent themes from the past decade of planning research. *Sustainability* 5, pp. 3302-3327.
- XIAO, Y., LIU, Y., SONG, X., WU Y. (2020). Linked vehicle model: A simple car-following model for automated vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 2020.
- YAO, F., ZHU, J., YU, J., CHEN, C., CHEN, X.M. (2020). Hybrid operations of human driving vehicles and automated vehicles with data-driven agent-based simulation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 86, 102469.
- YAO, Z., ZHAO, B., YUAN, T., JIANG, H., JIANG, Y. (2020). Reducing gasoline consumption in mixed connected automated vehicles environment: A joint optimization framework for traffic signals and vehicle trajectory. *Journal of Cleaner Production* 265, 121836.
- YU, M., 'DAVID' FAN, W. (2019). Optimal variable speed limit control in connected autonomous vehicle environment for relieving freeway congestion. *Journal of Transportation Engineering Part A: Systems* 145 (4) 04019007.
- ZHAI, C., LUO, F., LIU, Y., CHEN, Z. (2019). Ecological cooperative look-ahead control for automated vehicles travelling on freeways with varying slopes. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 68 (2) 8572784, pp.1208-1221.
- ZHANG, C., YANG, F., KE, X., LIU, Z., YUAN, C. (2019). Predictive modeling of energy consumption and greenhouse gas emissions from autonomous electric vehicle operations. *Applied Energy* 254, 113597
- ZHANG, H., SHEPPARD, C.J.R., LIPMAN, T.E., ZENG, T., MOURA, S.J. (2020). Charging infrastructure demands of shared-use autonomous electric vehicles in urban areas. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 78, 102210.
- ZHANG, W., GUHATHAKURTA, S., FANG, J., ZHANG, G. (2015). Exploring the impact of shared autonomous vehicles on urban parking demand: An agent-based simulation approach. *Sustainable Cities and Society* 19 (302), pp. 34-45.

ZHANG, W., WANG, K. (2020). Parking futures: Shared automated vehicles and parking demand reduction trajectories in Atlanta. *Land Use Policy* 91, 103963.

ZHANG, X., HUANG, C., LIU, M., STEFANOPOULOU, A., ERSAL, T. (2019). Predictive Cruise Control with Private Vehicle-to-Vehicle Communication for Improving Fuel Consumption and Emissions. *IEEE Communications Magazine* 57 (10) 8875721, pp. 91-97.

ZHAO, X., KE, Y., ZUO, J., XIONG, W., WU, P. (2020). Evaluation of sustainable transport research in 2000-2019. *Journal of Cleaner Production* 256, 120404.

ZHONG, H., LI, W., BURRIS, M.W., TALEBPOUR, A., SINHA, K.C. (2020). Will autonomous vehicles change auto commuters' value of travel time? *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 83, 102303.