

2019

estudios regionales en

economía, población y desarrollo

cuadernos de trabajo de la UACJ

Modelos de transporte por carretera y emisiones de carbono aplicables en las ciudades y su entorno

Pablo Martín Urbano
Juan Ignacio Sánchez Gutiérrez
Abril Yuriko Herrera Ríos

NOVIEMBRE / DICIEMBRE

54

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

PUBLICACIÓN AFILIADA A LA
RED IBEROAMERICANA DE ESTUDIOS DEL DESARROLLO

Modelos de transporte por carretera y emisiones de carbono aplicables en las ciudades y su entorno

*Pablo Martín Urbano, Juan Ignacio Sánchez Gutiérrez
y Abril Yuriko Herrera Ríos*

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

PUBLICACIÓN AFILIADA A LA
RED IBEROAMERICANA DE ESTUDIOS DEL DESARROLLO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

PUBLICACIÓN AFILIADA A LA
RED IBEROAMERICANA DE ESTUDIOS DEL DESARROLLO

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

2018-2024

Mtro. Juan Ignacio Camargo Nassar

Rector

Mtro. Daniel Alberto Constandse Cortez

Secretario General

Mtro. Jesús Meza Vega

Director General de Comunicación Universitaria

Dra. Beatriz Araceli Díaz Torres

Coordinadora General de Investigación y Posgrado

*Comité de Coordinación de la Red Iberoamericana
de Estudios del Desarrollo 2018-2020*

Dra. Paulina Sanhueza Martínez (Universidad de la Frontera, Chile)

Coordinadora General

Dr. Ignacio Rodríguez Rodríguez (Universidad de la Frontera, Chile)

Secretario general

Dra. Myrna Limas Hernández

(Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México)

Vocal de Organización

Dr. Pablo Galaso Reca (Universidad de la República, Uruguay)

Vocal de Organización

Dr. Luis Enrique Gutiérrez Casas

Director y editor de Cuadernos de Trabajo

Estudios Regionales en Economía, Población y Desarrollo

Comité editorial

Sección internacional

Dra. Sofía Boza Martínez

(Universidad de Chile, Chile)

Dra. Olga Biosca Artiñano

(Glasgow Caledonian University, Reino Unido)

Dra. Ángeles Sánchez Díez

(Universidad Autónoma de Madrid, España)

Dr. Thomas Fullerton Mankin

(University of Texas at El Paso, Estados Unidos)

Dr. Adrián Rodríguez Miranda

(Universidad de la República, Uruguay)

Dra. Ikuho Kochi

(Kanazawa University, Japón)

Sección local

(Universidad Autónoma de Ciudad Juárez)

Dra. Myrna Limas Hernández

Dra. Rosa María García Almada

Dr. Raúl Alberto Ponce Rodríguez

Dr. Isaac Leobardo Sánchez Juárez

Dr. Héctor Alonso Barajas Bustillos

Dr. Juan Carlos Medina Guirado

Diseño de cubierta

Abigail Bautista

Estudios Regionales en Economía, Población
y Desarrollo. Cuadernos de Trabajo de la UACJ
ISSN 2007-3739

Número 54. Noviembre - Diciembre 2019
Modelos de transporte por carretera y emisiones de
carbono aplicables en las ciudades y su entorno

Pablo Martín Urbano, Juan Ignacio Sánchez Gutiérrez
y Abril Yuriko Herrera Ríos

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Estudios Regionales en Economía, Población y Desarrollo. Cuadernos de Trabajo de la UACJ

Año 9, No. 54 noviembre - diciembre 2019, es una publicación bimestral editada por la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez a través del Cuerpo Académico de Estudios Regionales en Economía, Población y Desarrollo. Redacción: Avenida Universidad y H. Colegio Militar, Zona Chamizal s/n., C.P. 32300, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

Teléfonos: (656) 688-38-00, ext. 3792. Correo electrónico: igtz@uacj.mx. Editor responsable: Luis Enrique Gutiérrez Casas. Reserva de derechos al uso exclusivo: edición impresa, ISSN 2007-3739, edición digital, No. de reserva 04-2019-050218151500. Impresa por Studio Los Dorados, calle Del Campanario, número 820-2, Santa Cecilia, C.P. 32350, Cd. Juárez, Chihuahua. Distribuidor: Subdirección de Gestión de Proyecto y Marketing Editorial. Ave. Plutarco Elías Calles 1210, Foviste Chamizal, C.P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua. Este número se terminó de imprimir el 15 de octubre 2019 con un tiraje de 120 ejemplares.

Los ensayos publicitarios son responsabilidad exclusiva de sus autores. Se autoriza la reproducción total o parcial bajo condición de citar la fuente.

Registrada en:



RePEc

Publicación afiliada a la Red Iberoamericana
de Estudios del Desarrollo



Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
Ave Plutarco Elías Calles 1210
Foviste Chamizal, C. P. 32310

Ciudad Juárez, Chihuahua, México

www.uacj.mx

© Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Modelos de transporte por carretera y emisiones de carbono aplicables en las ciudades y su entorno

Pablo Martín Urbano*, Juan Ignacio Sánchez Gutiérrez**
y Abril Yuriko Herrera Ríos***

Resumen

Este artículo explica los modelos básicos de transporte por carretera, centrado especialmente en las conexiones dentro de las ciudades, con el propósito de presentar un panorama amplio de los principales planteamientos de modelización de emisiones de carbono. Aquí se desarrollan los aspectos teóricos generales que enmarcan este tipo de herramientas y se revisa la importancia de los modelos para la evaluación de las emisiones de carbono causadas por la movilidad urbana. Asimismo, se plantea una tipología de modelos de transporte carretero, algunos métodos de cálculo de emisiones comúnmente utilizados y sus limitaciones.

Palabras clave: *Trasporte, emisiones, modelos de transporte.*

Abstract

This article explains the basic models of road transport, with a particular focus on inner urban connections, with the aim of presenting a comprehensive overview of the main approaches to carbon emission modelling. Here we develop the theoretical aspects that support this type of tools and review the importance of models for the assessment of carbon emissions caused by urban mobility. A typology of road transport models is also proposed, some commonly used emissions calculation methods and their limitations.

Keywords: *Road transportation, pollution, road transport modelling.*

JEL Classification: Q51, Q52, R40.

- **Recibido en:** Julio de 2019.
- **Aprobado en:** Octubre 2019.

* Profesor del Departamento de Estructura Económica y Economía del Desarrollo de la Universidad Autónoma de Madrid.
Correo electrónico: pablo.urbano@uam.es.

** Profesor del Departamento de Estructura Económica y Economía del Desarrollo de la Universidad Autónoma de Madrid.
Correo electrónico: juanignacio.sanchez@uam.es

*** Doctoranda del Programa de Doctorado en Economía y Empresa de la Universidad Autónoma de Madrid.
Correo electrónico: abril.herrera@estudiante.uam.es

➤ 1. Introducción.

Existe un consenso generalizado sobre la necesidad de reducir aceleradamente las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), y sobre la urgencia de transitar hacia economías *descarbonizadas*, consenso cuya expresión más representativa es el denominado Acuerdo de París de 2015. En ese contexto el transporte ha de evolucionar hacia un cambio en sus patrones energéticos donde crecimiento y transporte se desacoplen, lo que significa una transformación sistémica y profunda para lograr los objetivos del acuerdo. Las implicaciones de todo ello, como bien señala PPMC (*Paris Process on Mobility and Climate, 2016*), afectan en paralelo a la evolución de los usos, los cambios en el comportamiento, la contribución de las innovaciones tecnológicas, la aparición de nuevos ecosistemas y la creación de nuevos modelos económicos. Tal mutación, por su magnitud y su urgencia, requiere una movilización masiva, inmediata y coordinada, de todos los actores del transporte, público y privado, político y económico, de las instituciones y de la sociedad civil.

El transporte urbano es una pieza fundamental para estos logros por cuanto significa más de un tercio de las emisiones del sector transporte, que por sí solo genera más del 23% de las emisiones de CO₂ debidas a la combustión de combustibles fósiles. En esa dirección, una cuestión crucial radica en tomar medidas que permitan reducir el alcance de las emisiones de este subsector del transporte lo que pasa por conocer su situación concreta, cuantificar su dimensión y atribuir su origen de manera que no solo se favorezca la toma de conciencia individual y colectiva en relación a la contribución a la generación de gases de efecto invernadero debidas a la movilidad, sino que también pueda determinarse la situación inicial (línea de base) sobre la que se va a intervenir para frenar las emisiones, establecer unos objetivos de reducción y valorar los resultados de las medidas desarrolladas (políticas y proyectos de transporte urbano). Por tanto, además del desarrollo de políticas de movilidad urbana sostenible, es necesario la medición y rendición de cuentas en relación con los objetivos de reducción de emisiones de GEI ya que esta tarea en el ámbito del transporte urbano resulta más compleja y costosa que en otros sectores (*Agence Française de Développement, 2015*).

Un paso previo es identificar la fuente de emisión que puede definirse como la parte de una instalación o proceso que genera emisiones, esto es, descargas a la atmosfera favorecedoras del efecto invernadero y, por tanto, del calentamiento global de la Tierra. Atendiendo a su origen, las fuentes de emisión pueden ser naturales, debidas a la actividad del planeta (volcán, vegetales, animales...) y antropogénicas, debidas a la actividad del hombre (industria, transporte...). Atendiendo a sus características, las fuentes pueden clasificarse en fijas (también llamadas estacionarias o puntuales), móviles y fugitivas (Ministerio de Medio Ambiente, Gobierno de Chile, 2011):

- i. Las fuentes fijas recogen las emisiones debidas a la quema de combustibles en actividades industriales y residenciales, para la generación de energía.

- ii. Las fuentes móviles incluyen las emisiones provenientes de los gases procedentes de la combustión de los motores, del rozamiento con el asfalto o del uso de los frenos por los vehículos de todos los modos de transporte.
- iii. Las fuentes fugitivas responden a escapes por la pérdida de estanqueidad de los equipos o ausencia de canalización por ductos.

Otros tipos de ordenación de las fuentes recogen tres categorías de emisiones con una caracterización ligeramente diferente (Desjardins y Llorente, 2009):

- i. Puntuales, se trata de fuentes fijas o difusas de una gran significación entre las fuentes emisoras (focos de importancia) lo que hace que tengan que analizarse individualmente (plantas siderúrgicas, papeleras, aeropuertos). Suele utilizarse un umbral para su categorización.
- ii. Lineales, incluyen focos emisores cuya actividad se organiza en torno a ejes de transporte (carreteras, ferrocarriles, vías fluviales, marítimas) o conducciones de combustibles (oleoductos, gaseoductos). Las fuentes lineales pueden considerarse espaciales cuando se seccionan en tramos.
- iii. Espaciales (o de área) recogen las otras fuentes no incluidas en las puntuales ya sean fijas o difusas (emisiones de suelos agrícolas) o lineales (el tráfico urbano asimilado por su densidad a una fuente de superficie). La información de las unidades emisoras suele tratarse de forma agregada vinculadas a una determinada estructura administrativa territorial ya sea por la escasa relevancia de la actividad o por que los datos se suministran globalmente (establecimientos y unidades productivas, comerciales, residenciales, áreas naturales).

Las emisiones según su origen pueden clasificarse en dos grupos:

- i. las directas: se trata de emisiones de fuentes que están bajo control o posesión del sujeto u organización que genera la actividad. Se producen por el uso directo de la energía para realizar un producto o servicio (combustión de calderas, uso de vehículos, los escapes de gases etc.); y
- ii. las indirectas: se trata de emisiones debidas a las actividades que realiza el sujeto u organización, pero que tienen lugar en fuentes que posee o controla otro sujeto. Estas últimas se presentan en una doble óptica:

- a. Las asociadas al consumo de energía demandada para otras actividades pero que se produce en instalaciones distintas a las del sujeto u organización donde se incluyen la electricidad y el calor, vapor o frío adquiridos, cuyas emisiones se generan en la instalación productora, no en la consumidora, caso del consumo de electricidad suministrado en red para el transporte de tracción eléctrica.
- b. Las restantes emisiones indirectas asociadas a la extracción y producción de materiales adquiridos, los viajes de trabajo, el transporte de personas o mercancías por parte de otros, o la utilización de productos o servicios ofrecidos por terceros. Son emisiones ligadas al ciclo de vida de producto, esto es, las generadas aguas arriba, en los procesos previos necesarios para que la fabricación del producto o la prestación del servicio; y las generadas aguas abajo de la producción en los procesos posteriores (Departamento de Medio Ambiente y Política Territorial, Gobierno Vasco, 2013 y Oficina Catalana del Cambio Climático, Generalitat de Catalunya, 2011).

Para evitar un doble recuento de las emisiones y favorecer una mejor definición de los GEI generados por organizaciones y sujetos, se han establecido tres categorías de emisiones que determinan el alcance de la contabilización, su perímetro operacional:

- i. El alcance 1 (*scope 1*) donde se incluyen las emisiones directas que representan el alcance más pequeño, más concreto de la contabilización de las emisiones. Así, en el ámbito del transporte se incluye las emisiones de GEI debidas directamente a la quema de combustible por los vehículos de transporte y máquinas o equipos móviles.
- ii. El alcance 2 (*scope 2*) donde se recogen las emisiones indirectas producidas en otra instalación, aunque se consideran parte del alcance 1. Aquí, en el sector transporte, se incluye las emisiones GEI (indirectas) por el consumo de electricidad suministrado en red para el transporte de tracción eléctrica.
- iii. El alcance 3 (*scope 3*) donde se contabilizan las emisiones indirectas de gases de efecto invernadero distintas de las emisiones del alcance 2 que se generan en la economía en general. Suponen el mayor alcance de contabilización. Aquí, además de los viajes al trabajo ya indicados, en el transporte se engloban las debidas a la construcción de los vehículos, a su mantenimiento, el final de su vida útil.

Entre las diversas metodologías generales que pueden aplicarse para la cuantificación de las emisiones cabe destacar los inventarios y la huella de carbono cuya utilización varía en función de las características propias de cada organización, actividad o producto, los objetivos y las estrategias de mitigación de los GEI. Los datos de emisiones incluidos en inventarios y huella de carbono son una compilación de los datos informados y los datos estimados (cuando no se miden / informan y se basan en los datos disponibles). Estas estimaciones se basan en datos de actividad y factores de emisión (cantidad de emisión por unidad de actividad), específicos para cada tipo de fuente. Por ejemplo, construir el inventario de emisiones para un año dado requiere el uso de múltiples fuentes y bases de datos diferentes.

Los inventarios de emisiones atmosféricas constituyen una herramienta de registro y medida de las cantidades de gases contaminantes lanzados a la atmósfera como residuo por la realización de una actividad en un determinado espacio y tiempo. Incluyen las emisiones directas ligadas a la producción, esto es, las derivadas del uso directo de la energía para realizar un producto o servicio, pérdida de gases o reacciones químicas, aunque pueden incorporarse algunas emisiones indirectas, relacionadas con el consumo de energía de electricidad, el calor, el frío y el vapor, solo para el dióxido de carbono (CO₂).

La huella de carbono permite cuantificar la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero, incluyendo todas las fuentes de emisiones por “efecto directo o indirecto por un individuo, organización, evento o producto” según definición de la Oficina Española de Cambio Climático (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2016) que establece a su vez dos tipos de huella: la de una organización que mide la totalidad de GEI generados por efecto directo o indirecto provenientes de la actividad de tal organización (por ejemplo una empresa de transporte de viajeros); y la de un producto que incluye los GEI liberados durante el ciclo de vida de un producto (el transporte) desde su extracción, hasta la etapa de uso y final de la vida útil, pasando por el producción y distribución.

En el caso del transporte, desde la perspectiva sectorial, los inventarios pueden considerar la medida solo del combustible asociado a la utilización del vehículo (*Tank-to-Wheel - TTW*), de manera que nada más se tiene en cuenta las emisiones GEI cuando se circula, cuantificándose las emisiones directas. Sin embargo, en los vehículos de propulsión eléctrica todas las emisiones resultan de la producción de energía, no durante el uso del vehículo, de manera que no hay emisiones directas en la escala local, emitiéndose aguas arriba especialmente al generar electricidad a partir de fuentes de energía que contienen carbono (carbón y gas) (Dünnebeil, et al., 2017).

Para completar adecuadamente la generación de emisiones debidas al uso de vehículos y al suministro de energía aguas arriba debería considerarse cubrir la producción de combustible (*Well-to-Wheel contribution, WTW*), para incidir además de en las emisiones GEI, en el uso eficiente de

la energía y los costes industriales, desde el punto de extracción de materia prima del combustible hasta el punto donde el combustible es transferido a un vehículo (Curran et al. 2014), ampliando el computo de emisiones directas con las indirectas ligadas a las operaciones de producción, transmisión y distribución del combustible.

Estos cálculos asociados a las operaciones de transporte, difieren de un análisis de ciclo de vida (*Life Cycle Assessment - LCA*), tipo huella de carbono, que parten de un planteamiento más amplio para contabilizar las emisiones en el sector transporte y sus repercusiones en las de otros sectores por cuanto se considera todos y cada uno de los materiales y energía a los que es necesario recurrir para producir sus servicios. Se entiende en consecuencia que las emisiones no se corresponden solo con el uso del vehículo sino con el de su construcción, las infraestructuras e instalaciones en que se apoya, la fabricación de los carburantes, el mantenimiento, las necesidades asociadas al final de su vida útil o el transporte preciso para cada una de estas tareas. Estrictamente hablando, restringir la evaluación a las emisiones operacionales solo es adecuado si se están considerando decisiones a corto plazo (Samaras et al. 1999).

Los métodos de cuantificación de las emisiones tienen un amplio campo de aplicación por cuanto afectan a actividades y servicios muy variados (construcción, agricultura, transporte) y a territorios muy diversos (desde el barrio a la nación pasando por la ciudad, el municipio, la región). Esta cuantificación se realiza en todos los casos sobre la base de unas reglas de utilización que pueden variar de una metodología a otra lo que plantea problemas para comparar los resultados (Desjardins y Llorente, 2009).

En cualquier caso, la observación del comportamiento del transporte desde la perspectiva espacial resulta fundamental para una correcta definición de las políticas de transporte, permitiendo a las autoridades de cualquier ámbito administrativo competente conocer la situación de los consumos energéticos y emisiones asociados al sector.

Como señala el documento de la *Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie y la Réseau des Agences Régionales de l'Energie*, existen muchos métodos para estimar los consumos de transporte y las emisiones de CO₂ a nivel espacial, pudiéndose agrupar en dos amplias categorías (RARE-ADEME, 2011):

- i. Método por modos: se basa en las entradas de datos de tráfico para cada modo (carretera, ferrocarril, mar, aire, canal).
- ii. Método por motivos de desplazamiento: se basa en una reconstrucción de las movi- lidades a partir de la información relacionada con los motivos de los desplazamientos. Los datos de entrada utilizados en este tipo de enfoque son el número de despla- zamientos por motivo (desplazamientos domicilio trabajo, hogar-escuela, ocio...).

No obstante, las informaciones sobre los motivos no pueden ser exhaustivas, de manera que este método no permite abarcar todo el consumo de transporte en un territorio dado.

A estos métodos, cabe añadir dos enfoques que son habituales en función del alcance de los estudios, que difieren según sus principios de asignación de emisiones de CO₂:

- i. Enfoque territorial: se basa en una estimación de emisiones en el perímetro de un territorio determinado, cualquiera que sea la infraestructura utilizada, el tipo y la naturaleza de los viajes considerados. Tiene la ventaja de evitar cualquier riesgo de doble conteo al consolidarse a nivel territorial superior; aunque el inconveniente de que no se centra en la implementación de estrategias para la reducción de viajes por motivos específicos (ejemplo: trabajo a domicilio...).
- ii. Enfoque basado en el principio de responsabilidad: se basa en el principio de afectación de las emisiones debidas a los desplazamientos a una comunidad determinada (la de salida o de llegada), lo que permite identificar los ejes de mejora y de reducción de la demanda de transporte donde se genera. Tiene la ventaja de favorecer en mayor medida la definición de un programa de acción en el contexto de los Planes Climáticos Territoriales pero el inconveniente de su mayor complejidad porque requieren conocer los motivos de desplazamiento de las personas y de los flujos de bienes a través del territorio (RARE-ADEME, 2011).

Las ciudades, donde se producen una cantidad desproporcionada de emisiones de tráfico por carretera en comparación con su tamaño geográfico, constituyen un escenario esencial para establecer un enfoque territorial donde identificar, calcular e informar sobre los gases de efecto invernadero en relación con el transporte, uno de los seis sectores principales en que según el World Resources Institute et al (2014) pueden organizarse las actividades urbanas generadoras de GEI (además del ‘Transporte’, ‘Energía estacionaria’, ‘Residuos’, ‘Procesos industriales y uso de productos’, ‘Agricultura, silvicultura y otros usos del suelo’, ‘Cualquier otra emisión que se produce fuera del límite geográfico como resultado de actividades de la ciudad’).

En este sentido, una primera apreciación necesaria es la delimitación del propio concepto de ciudad, cuestión compleja (Roca, 2003) que se presta a no pocas interpretaciones relacionadas con la historia, la economía, la demografía, la geografía, la sociología... en función de muy diversas variables estadísticas, morfológicas, funcionales, relacionales, administrativas, legales... de manera que la idea de ciudad puede referirse a distintas áreas espaciales, a veces por desagregación o agregación, como un barrio, un distrito, una comunidad, un municipio, una zona metropolitana e, incluso, a una región o país.

Por tanto, es preciso establecer criterios con que delimitar el área urbana lo que claramente depende de cual sea el propósito del inventario y la disponibilidad de datos, aspectos que condicionan el detalle y precisión requerido por el cómputo y, en consecuencia, el valor informativo y sus resultados. En general, una definición adecuada y práctica a escala de ciudad se corresponde con los límites administrativos del gobierno local en tanto que entidades legales. Ello no impide conformar otros límites sumando otras divisiones administrativas o dividiendo el territorio urbano. También se pueden establecer otras delimitaciones sobre bases distintas a las administrativas. Ahora bien, los límites deben determinarse de manera exhaustiva: son cruciales para que los resultados del monitoreo sean comprensibles y comparables.

Un problema específico de las ciudades resulta de la dificultad de cuantificar las emisiones móviles por cuanto al contrario que las fijas no están ancladas al territorio, de manera que en las actividades que no sean internas de la ciudad, hay que asignarlas. Distintos principios ayudan a esta tarea (Bongardt et al., 2016, Dünnebeil et al., 2017).

- i. El principio de “territorialidad” abarca todas las actividades de transporte en la ciudad definida administrativamente, definición geográfica que se corresponde ampliamente con la esfera política de influencia de una ciudad. Presenta la ventaja de abarcar todas las actividades de transporte en el territorio independientemente de quién viaja lo que le hace especialmente adecuado para los inventarios de transporte urbano, aunque acusa la debilidad de una escasa diferenciación de las actividades de transporte por lo que sus resultados no proporcionan información adecuada sobre las causas de las emisiones relacionadas con el sector y ni permite identificar las oportunidades para reducir las emisiones.
- ii. El principio de “habitantes”, solo abarca las actividades de transporte de los habitantes de la ciudad, el tráfico generado por la población urbana, independientemente de dónde se produce ese tráfico, por lo que no se circunscribe a actividades de transporte en el territorio de la ciudad, incluyendo también viajes a destinos regionales y a veces viajes de larga distancia. Este principio tiene la ventaja de permitir conocer las pautas de movilidad de la población urbana mediante encuestas a los hogares y el inconveniente de que no tiene límites territoriales fijos, ignorando toda la información sobre el tráfico de terceros, tales como viajeros que no viven dentro de los límites de la ciudad, de manera que una reducción de los flujos externos no sería contabilizada y un incremento de la movilidad interurbana interna tendría escaso reflejo en las emisiones de la ciudad a pesar de que incrementaría las emisiones. Además, las encuestas requieren recursos crecientes cuanto más precisas, y la información no siempre está disponible, acudiéndose frecuentemente a valores promedio nacionales.

- iii. El principio de “inducido por la ciudad” se centra en las emisiones de GEI por el transporte causadas por las distintas funciones de la ciudad en relación con la vida, el trabajo, el suministro de bienes y servicios, etc. Por lo tanto, abarca los viajes de habitantes y no habitantes (por ejemplo, personas que viajan diariamente, visitantes). Las emisiones de tráfico origen destino se asignan sólo en parte a la ciudad que considera la responsabilidad compartida con aquel municipio del que el tráfico viene o va. Ningún tráfico de tránsito es considerado en el balance de GEI.
- iv. El principio de las “ventas de energía” se organiza sobre la base de contabilizar de emisiones de GEI basado en los consumos de energía en el territorio por parte del sector del transporte que proporciona una perspectiva global sin la necesidad de los datos específicos, costosos de implementar, pero no proporciona información sobre las actividades reales de transporte relacionadas con el área y está sujeto a incertidumbres significativas en cuanto a donde finalmente se quema el combustible.

En este contexto urbano de necesidad de dar respuesta a la asignación de las actividades de transporte en la ciudad, un planteamiento muy operacional, compatible con los principios anteriores, lo proporciona el World Resources Institute et al (2014) que, junto a los tráficos urbanos, establece cuatro tipos de flujos transfronterizos, ya sean por tierra, agua o aire, con afectación para la ciudad:

- a) Viajes iniciados en la ciudad y terminados fuera de la ciudad.
- b) Viajes originados fuera de la ciudad y concluidos en la ciudad.
- c) Tráfico regional (generalmente los autobuses y trenes) con una o varias paradas intermedias en la ciudad.
- d) Viajes que pasan por la ciudad, con origen y destino fuera de la ciudad.

La dimensión temporal de la contabilización de las emisiones es otro aspecto fundamental. En general, los inventarios nacionales de GEI se presentan anualmente al igual que sucede a escala ciudad. La información normalmente se refiere a un año de base, recogiendo doce meses completos siendo lo usual en el ámbito urbano que coincidan con el año natural o fiscal. Ello no impide otros plazos (horas, días, fines de semana, meses, estación, año, bianual...) en función de los objetivos a los que se destine la contabilización y la escala de su realización (Hickman et al, 2003). No hay que olvidar que la movilidad es cíclica y por tanto también las emisiones que se derivan de ella.

Por otro lado, en la medida que uno de los objetivos de los cómputos es conocer la situación de las emisiones en un momento dado para actuar, tiene una gran importancia hacer un seguimiento posterior y considerar los periodos de aplicación de las medidas o políticas diseñadas para mitigar los GEI. En este sentido, se habla de cálculos *ex ante* y *ex post* en términos simples, para evaluar las

diferencias entre dos situaciones normalmente en relación a una intervención para valorar el impacto generado con ella. Por último, la temporalidad tiene además una dimensión de futuro que resulta esencial en la medida en que uno de los objetivos del cómputo se concreta en monitorizar las tendencias en el tiempo de los gases de efecto invernadero.

La elección de los modos de transporte es la base para los cálculos de emisiones de GEI de acuerdo con el consumo específico de energía y emisiones de GEI relacionadas con cada medio. La definición de actividades de transporte incluye la selección y diferenciación de los diversos medios de transporte. A la escala ciudad, idealmente, todos los modos de transporte están cubiertos para un inventario de emisiones de GEI de transporte completo (viajes por carretera, ferroviarios, vías navegables, marítimos y aéreos, incluyendo los viajes interurbanos e internacionales) pero en realidad los datos pueden no estar fácilmente disponibles para calcular las emisiones de todos los modos. Puede ser necesario establecer prioridades basadas en la relevancia del medio de transporte para el objetivo de monitoreo local. Por lo general, el transporte local y regional de pasajeros causa la mayor parte de las emisiones de transporte en el territorio de la ciudad, por lo que es una prioridad (Dünnebeil et al. 2017), aunque las emisiones debidas al transporte de mercancías urbanas son importantes y crecientes, representando el 20% del total de las emisiones del transporte en la ciudad (Blanquart, 2013).

La valoración de las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con la combustión de una fuente de energía se basa en principios establecidos en el contexto de los trabajos del IPCC. Los métodos de cálculo nacionales e internacionales resultantes se basan en el mismo principio: convertir el consumo de una cantidad de fuente de energía en dióxido de carbono o dióxido de carbono equivalente (cuando se tiene en cuenta otros gases de efecto invernadero distintos al CO₂) mediante el uso de un factor de emisión que es específico para el elemento que se consume (MEDDE, 2012).

Para evaluar las emisiones de varias fuentes, se pueden diferenciar dos tipos de enfoques (Costa y Baldasano, 1996; Colville et al., 2001): los enfoques denominados *TOP-DOWN* (arriba abajo o descendente) y los *BOTTOM-UP* (abajo arriba o ascendente) a los que cabe añadir los enfoques híbridos que combinan ciertos elementos de ambos tipos de enfoques. De hecho, los enfoques intermedios entre los dos tipos de enfoque son muy frecuentes por la dificultad de disponer de datos desagregados en algunos tipos de emisión o la necesidad de desagregar los datos agregados disponibles. No obstante, existe una cierta especialización en el uso de estos enfoques, de manera que en la escala nacional los inventarios de emisiones se construyen con enfoques descendentes, mientras que a escala local y regional predominan los enfoques ascendentes. En todo caso, los resultados de unos y otros no siempre son coherentes por los distintos planteamientos metodológicos y fuentes de error (Thunis et al. 2016). La evaluación comparativa de ambos tipos de enfoques y sus desarrollos está ayudando a comprender mejor los resultados y las inconsistencias (Denier van der Gon et al., 2011)

El primer enfoque, *TOP-DOWN* o descendente, también llamado de *macroescala* por su cobertura geográfica en general amplia (país, región), puede ser visto como un análisis de lo general a lo particular. La estimación de las emisiones de un área de estudio se realiza globalmente, distribuyendo después de forma prorrateada entre las diferentes zonas preestablecidas (celdas) las emisiones totales en función de diferentes parámetros que conforman el ámbito espacial de análisis (desagregación espacial), tales como la densidad de tránsito, la población residente o la flota registrada, que ofrecen una imagen completa y metodológicamente homogénea, aunque no detallada de la situación urbana y permiten una idea más ajustada del comportamiento histórico del área.

En el ámbito del transporte los modelos descendentes trabajan con datos de consumo total de combustible en el área de estudio, lo que se relaciona con la capacidad de contaminar el aire por la fuente de energía vinculada a un factor de emisión obtenido en el laboratorio simulando unas determinadas condiciones de funcionamiento. La desagregación puede realizarse suponiendo una distribución espacial de las emisiones locales según el comportamiento aproximado de algunas variables zonales que se asume es similar a la actividad contaminante (Colvile et al., 2001). Por tanto, la quema de combustible se erige en un indicativo de las pautas de desplazamiento que puede considerarse como un indicador representativo de la actividad de transporte (*World Resources Institute* et al. 2014), pero, este enfoque restringe las posibilidades de percibir los impactos de las políticas para reducir las emisiones ya que al medir los cambios en el uso o las ventas de combustible no puede utilizarse para imputar cambios en el transporte de viajeros, de mercancías o la actividad del vehículo porque más de un tipo de vehículo se usa con cada tipo de combustible e, incluso, los combustibles pueden usarse en actividades que no contabilizan como transporte carretero (Schipper, et al., 2009). La gran ventaja de este enfoque es que permite una agregación fácil para conseguir datos *subnacionales* o nacionales y que favorece estimaciones cuando no se conocen los datos locales o bien resulta compleja o costosa su recolección.

El enfoque de abajo hacia arriba (*BOTTOM-UP*) o ascendente, también llamado de *microescala* por su menor cobertura geográfica (local, urbana), puede entenderse como un análisis de lo particular a lo general. Las emisiones se estiman para cada una de las zonas (celdas) de desagregación espacial (localización de una o varias industrias, viviendas o tramo de carretera) determinando los parámetros de cada zona específica, obteniéndose el valor total de las emisiones agregando las estimaciones efectuadas para cada celda. Estos inventarios de carácter ascendente presentan la dificultad de requerir mucha información no siempre disponible con la cantidad y calidad necesaria, aunque pueden ser más precisos aportando mayor detalle espacial o temporal que los inventarios “de arriba a abajo”.

En el ámbito del transporte, se parte con datos conocidos relativos a un espacio concreto, como puede ser el flujo de tráfico en un tramo de carretera delimitado. En algunas fuentes, los datos

de emisiones se determinan directamente por medida de cada fuente individual. Sin embargo, en muchos otros casos, especialmente para las emisiones de transporte donde existe una gran cantidad de pequeñas fuentes individuales, es preciso utilizar promedios de emisiones por vehículo y kilómetro conducido. Las emisiones totales para un área geográfica de interés se pueden obtener sumando todas las contribuciones individuales. Estas soluciones ascendentes presentan la desventaja de su exigencia en datos que en muchos casos desemboca en supuestos o aproximaciones (promedios, encuestas) que pueden derivar en infra o sobreestimaciones de la actividad (Colville et al., 2001).

La aplicación de estos métodos ascendentes hace necesario comprender que factores influyen en las emisiones de GEI generadas por los vehículos. Las emisiones contaminantes del transporte en las ciudades están directamente relacionadas con el consumo de combustible por los motores térmicos que equipan los vehículos actuales donde el modo carretero tiene un absoluto protagonismo. Son la consecuencia a menudo de la combustión incompleta del combustible (gasolina, diésel). Los diferentes gases y sustancias así emitidos a la atmósfera contribuyen a la contaminación atmosférica de las ciudades y al fenómeno de efecto invernadero. La intensidad de estas emisiones tiene que ver con una serie de factores, que actúan en función del vehículo, el trayecto, el tráfico y el clima (Trépanier y Coelho, 2017):

- i. Ligados al vehículo se señalan algunos factores cuya variación afecta directamente a la intensidad de las emisiones como el tipo de vehículo y de motorización (potencia), su peso, el volumen del cilindro motor, la viscosidad del aceite, la edad, los elementos auxiliares (faros, equipos de radio, música...), y otros cuya variación afecta inversamente a las emisiones como la aerodinámica, la transmisión, el tipo de combustible, el mantenimiento, los neumáticos, los sistemas *antipolución* como los catalizadores, el *start-stop* (arranque-parada automática),
- ii. Ligados al trayecto se recogen factores como la carga, la distancia a recorrer, el relieve (pendientes), el tipo de conductor cuya variación influye directamente a las emisiones, y otros cuya influencia tiene una relación inversa con ellas como el tipo de calzada, su estado, los accesos o la sección transversal (carriles y arcenes).
- iii. Ligadas al tráfico se señalan factores cuya variación afecta enormemente a los niveles de emisiones como la fluidez o lentitud de la circulación, así como los diferentes tipos de congestión. Tanto las fases de aceleración y desaceleración, así como los arranques y paradas condicionan fuertemente la intensidad de las emisiones.
Ligadas a las características climáticas surgen de un lado, factores como el viento
- iv. y la precipitación que tienen una relación directa con la intensidad de las emisiones y, por otro lado, la temperatura ambiente, la altitud, o la humedad, que tienen una

relación inversa; junto a ellas se presentan también, la climatización, la temperatura-motor y el arranque en frío del motor, que tienen una naturaleza mixta entre las características del vehículo y el entorno climático. La climatización, ligada a una elevada temperatura exterior, supone un importante sobreconsumo de carburante y por tanto de emisiones; la temperatura motor da lugar a emisiones en caliente producidas cuando los “órganos” del vehículo (motor, convertidor catalítico) han alcanzado su temperatura de funcionamiento adecuada, aunque estas emisiones se incrementan en un entorno de mucho calor exterior por la necesidad de un sobreesfuerzo del motor para enfriarse; finalmente, el arranque con el motor frío da emisiones por falta de lubricación, lo que hace trabajar más al motor, y por una mala mezcla de combustible y aire, lo que le hace menos eficiente, todo ello acompañado por el trabajo en frío del convertidor catalítico, favoreciendo el escape de las emisiones.

La cuantificación de muchos de estos factores no resulta una tarea sencilla ya que se requiere mucha precisión, conocimientos y cálculos complejos. Algunos de ellos tienen una incidencia muy diversa, por ejemplo, la incidencia directa de la temperatura en el consumo relacionado con la propulsión es mínimo, mientras que resulta ser muy importante en relación a la climatización dentro del vehículo a través del uso del aire acondicionado y la calefacción. En otros casos como la velocidad, el estado de la calzada o algunos referidos al entorno ambiental, aunque puedan medirse, son incontrolables e impredecibles. Otros resultan controlables pero difíciles de cuantificar como es el caso del mantenimiento de vehículo o el relieve de la ruta.

A veces se conoce muy bien la incidencia de un factor en el comportamiento de la generación de emisiones, pero se desconoce su trascendencia en el sentido de su incidencia entre los conductores (el tipo de conducción). Muchos de los factores están fuertemente interrelacionados y en muchos casos no es fácil individualizar la aportación de cada factor, por ejemplo, vencer una pendiente tiene que ver no solo con la potencia sino también con el rendimiento del motor, de los equipos mecánicos, de los neumáticos, de la aerodinámica, el diseño de la vía, la climatología... (Cillero, et al. 2008). Existe, así mismo, un gran desfase entre las emisiones unitarias establecidas para los vehículos nuevos y las generadas por su uso real lo que dificulta la cuantificación, lo que ha sido objeto de importantes fraudes por parte de algunos de los más importantes constructores de vehículos como es el caso del grupo Volkswagen¹ aunque no único, pues también han sido objeto de acusación los grupos Renault, Fiat-Chrysler, o Peugeot-Citroën, por manipular sus motores diésel para engañar a la inspección medioambiental y rebajar ficticiamente sus emisiones durante los exámenes oficiales.

Otros factores con influencia tienen un marcado carácter socioeconómico como el precio del combustible, los peajes, los costes del seguro, los impuestos, los aparcamientos, la multimodalidad, la forma urbana, la distribución funcional de las ciudades, las diferencias de renta, la inversión en infraestructura, la cultura del automóvil, el grado de envejecimiento, entre otros tantos aspectos.

➤ 2. Modelos de transporte y evaluación de emisiones.

Un instrumento relevante en la evaluación de las emisiones de GEI son los modelos de transporte, donde se recogen en forma de variables muchos de estos factores. Los modelos en general, incluidos los de transporte, son una representación simplificada de una realidad más compleja donde se recogen fenómenos y procesos de una manera sencilla. La modelización del transporte permite, en general, realizar una cierta previsión en cuanto a la cantidad de viajes generados o atraídos entre diferentes áreas, el modo en que se reparten esos viajes por las diferentes zonas, la alternativa modal en cada viaje o los volúmenes a transportar, tanto de pasajeros como de mercancías, así como los flujos de vehículos (Ríos Prado, 2015).

Por su parte, los modelos de emisión han sido desarrollados en el contexto de una creciente contaminación del aire y generación de GEI, para pronosticar las emisiones producidas por diferentes fuentes. Un modelo de estimación de emisiones atmosféricas cabe definirlo como el modelo matemático (o el conjunto integrado de modelos matemáticos de diferente grado de complejidad) para estimar las emisiones hacia la atmósfera de diferentes fuentes localizadas en un área espacial concreta, en un momento temporal determinado (Campos, 2017). El concepto básico del modelo de cálculo, con un planteamiento más o menos complejo, siempre es el mismo: relacionar una actividad con la emisión de contaminantes propios de cada actividad.

Tratar con el modelado de CO₂ del transporte requiere la adopción de un proceso de dos pasos, basado, por un lado, en la provisión de la demanda de viaje y, por otro, en el cálculo de sus consumos y emisiones de combustible relacionados. El enlace entre estos dos módulos podría obtenerse adoptando diferentes enfoques, de acuerdo con la escala geográfica, el horizonte temporal, el comportamiento de los conductores y las simplificaciones decididas por los modeladores (Nocera et al., 2017).

¹ Esta multinacional alemana, que agrupa a nueve marcas de turismos y es mayoritario en Porsche, ha superado en 2016 al grupo Toyota como primer vendedor mundial con 10,3 millones de vehículos vendidos. Fue acusada en 2015 por la Agencia de Protección Medioambiental (EPA) de los Estados Unidos encargada de homologar vehículos y controlar sus emisiones en territorio norteamericano, de instalar en modelos con motores turbodiesel 2.0 vendidos entre 2009 y 2015 un software capaz de detectar las pruebas de emisión de contaminantes, activando en el momento del test el control de emisiones para situarlas dentro de los márgenes legales. En circulación las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) en estos vehículos podrían ser hasta 40 veces superiores a lo permitido en Estados Unidos. Volkswagen reconoció la instalación fraudulenta del software en los motores diésel EA 189 equipados en vehículos Volkswagen y Audi afectando a 11 millones de automóviles en todo el mundo en el periodo de referencia.

Los modelos de transporte aplicados a la generación de inventarios de emisiones suelen tener capacidad para simular en distintos momentos temporales los movimientos de los vehículos a través de la red de transporte en el área objeto de medición que puede ser, como a menudo ocurre, una ciudad o parte de ella o su red, permitiendo aportar los insumos (caracterización de la actividad vehicular) necesarios al modelo de emisiones, transformándose en un medio útil para explorar la dinámica, la escala y la magnitud de las emisiones relacionadas con el transporte, de manera que actualmente son una herramienta imprescindible para quienes deciden no solo sobre las políticas de transportes en sentido amplio sino también a los gobernantes en general por las interacciones entre transporte y la actividad socioeconómica y sus impactos en el entorno. La cuestión entonces es elegir el modelo y alcance más adecuado para enfrentar la búsqueda de soluciones a los problemas y retos planteados, así como la urgencia de transitar hacia fórmulas de actividad sostenibles.

Como recuerdan Racero et al. (2008) citando a Bailey (1995) y Joumard, (1998), los métodos de estimación de inventario de emisiones atmosféricas generadas por el tráfico se organizan en dos fases: la primera fase está dirigida a establecer la intensidad de tráfico y velocidad media de circulación ya sea con modelos de transporte o contadores/detectores de tráfico; la segunda fase se dedica a clasificar el parque automotor para posteriormente definir las expresiones y factores de emisión (por contaminante) en función de la distancia recorrida, velocidad y tipo de vehículos.

Según Samaras et al. (1999), el grado de complejidad de los modelos está relacionado con la disponibilidad de los datos de entrada necesarios sobre tres tipos de información específica: una actividad o un indicador de movilidad (por ejemplo vehículo-kilómetros), un factor de emisión (por ejemplo, g/veh-km) y una definición de la diferenciación necesaria o deseada, aspecto que determina las características y la complejidad del modelo, especialmente en relación con los contaminantes cubiertos, las categorías de vehículos según su tamaño, su tecnología o su combustible, las condiciones de conducción (promedio velocidad o dinámica de los patrones de conducción), los factores de influencia adicionales (por ejemplo, altitud, pendiente, inspección / mantenimiento), y finalmente la segmentación de la actividad (es decir, veh-km) conforme a los objetivos últimos del modelo.

Estos modelos se usan bien para conocer una situación actual determinada o bien para realizar pronósticos futuros, en este último caso, tratando de analizar el mejor modo de cumplir ciertas metas o de evaluar medidas y políticas concretas. Existe una amplia variedad de enfoques y aplicaciones pudiendo identificarse enfoques macroscópicos (modelos relacionados con la ciudad o el país), o de una escala más local (nivel de la calle). Algunos modelos se limitan al comportamiento de un solo vehículo (simuladores de vehículos), mientras que otros solo consideran cuestiones relacionadas con los contaminantes del proceso de emisión; por ejemplo, el efecto de arranque en frío (Samaras et al. 1999).

Un ejemplo de la complicación inherente al desarrollo de estos modelos queda de manifiesto en la modelización del consumo de combustible de los vehículos automóviles que, como señalan

López y Sánchez (2008), conlleva una gran dificultad por la gran cantidad de variables casi aleatorias que inciden en su funcionamiento según se ha visto anteriormente, puestas en relación con las múltiples posibilidades de rutas para un mismo trayecto en línea recta, la amplia variedad de situaciones de tráfico posibles para un recorrido tanto en el espacio como en el tiempo, los diferentes estilos de conducción practicados por los automovilistas adoptados de formas muy aleatorias casi impredecibles o la gran cantidad de modelos y versiones de vehículos a disposición de los usuarios.

La eficiencia de los motores térmicos puede ser objeto de grandes variaciones incluso en condiciones normales de conducción, de manera que hacer un modelo que exprese con rigor los consumos reales resulta muy difícil por las enormes posibilidades de resultados, casi infinita, lo que puede conducir a grandes errores, todo lo cual genera incertidumbre referida a la falta de conocimiento en estadística, o a la falta de precisión o imprecisión en las estimaciones, y limita la interpretación de los resultados, siendo necesario precisar los límites del cálculo realizado especialmente en relación con la cantidad y calidad de los datos disponibles. Es preciso, por tanto, la adaptación permanente de los modelos para conseguir que los inventarios se asemejen cada vez más a los verdaderos valores de emisión.

➤ 3. Tipología de modelos de transporte y cálculo de emisiones.

Samaras et al. (1999), diferencian los modelos de transporte para calcular emisiones de acuerdo con las características del factor de emisión, dividiéndolos en tres categorías:

- i. Los modelos basados en velocidad promedio o modelos base. Estos son los más comúnmente utilizados, modelan y toman en cuenta la dinámica del vehículo usando el concepto de velocidad promedio. Trabajan sobre la base de factores específicos de emisión / consumo para las tecnologías de vehículo / motor en condiciones de tráfico particulares. Por lo general, forman la base de los cálculos de calidad del aire local, y trabajan a escala de una ciudad.
- ii. Los modelos de emisión desagregados. Estos tienen en cuenta la cinemática del vehículo a través de parámetros detallados como la velocidad y la aceleración. Permiten cálculos a escala local (hasta las intersecciones de tráfico), pero también pueden integrarse en inventarios a nivel regional o nacional. Permiten que las características del vehículo se modifiquen individualmente y, por tanto, calcular las tendencias futuras esperadas.
- iii. Los modelos agregados consisten en el tercer tipo de herramientas de estimación de emisiones. Estos se basan en las estadísticas de uso del vehículo, como kilo-

anual, los tipos de carretera, las velocidades promedio tipo, etc. Calculan las emisiones / consumos totales, incluido los efectos del arranque en frío, evaporación, etc., y se utilizan para inventarios, considerando la emisión / consumo regional o nacional. Estos también hacen uso de factores empíricos promedio de emisión / consumo, normalmente producidos sobre la base de valores integrados resultantes de los modelos de velocidad promedio. También debe tenerse en cuenta que la clasificación anterior está de acuerdo con la distinción entre la *macroescala* o modelos descendentes (agregados) y la *microescala* o modelos ascendentes (desagregados) (Samaras et al. 1999).

Como se vio más arriba, la elección de los enfoques analíticos para evaluar las emisiones del transporte ya sea a escala “macro” y “micro” es relevante por cuanto la escala afecta la idoneidad de los resultados, de forma que mientras que el modelado macro permite entender cómo los cambios a ese nivel afectan a la producción de carbono, la evidencia microeconómica da gran importancia de la heterogeneidad individual en las decisiones para el tráfico y los resultados de la distribución modal (el llamado “comportamiento individual”) lo que puede generar fallos en este enfoque (Nocera et al., 2017).

En este sentido, la clasificación realizada por Linton et al (2015), organiza los modelos utilizando una perspectiva amplia de las distintas alternativas de modelización del sistema de transporte por carretera aptas para cuantificar las emisiones considerando diferentes momentos temporales (corto y largo plazo) y alcance espacial (de local a global). La clasificación recoge seis tipos de modelos: modelos de red de tráfico, modelos de comportamiento, modelado basado en agentes, modelado de dinámica de sistemas, modelos técnico económicos y modelos de evaluación integrados.

3.1. Modelos de escala micro.

Los tres primeros modelos (de red de tráfico, de comportamiento, basados en agentes) representan *microenfoques* que desagregan la demanda de viajes de acuerdo con los movimientos y elecciones individuales. Estos métodos se basan en *microsimulaciones* que determinan cómo los vehículos interactúan en unas condiciones de tráfico preestablecidas y predicen los flujos de tráfico. En algunos casos, incluso incluyen los comportamientos de viaje. Presentan un alto grado de precisión: en muchos casos, la red de carreteras y la condición del tráfico se modelan a partir de situaciones reales, sin adoptar simplificaciones (Nocera et al., 2017). Los modelos a *microescala* dan detalle de los fenómenos asociados al transporte y sus relaciones con las emisiones. A partir del análisis del tráfico es posible plantear diversos escenarios en función de su intensidad y otros factores (características de vehículo, de la conducción...) y calcular las emisiones con un modelado específico combinando los datos e integrando herramientas. En el Cuadro 1 se presentan los principales rasgos de cada uno de ellos siguiendo el esquema de Linton et al (2015).

Cuadro 1
Modelos de transporte

Modelos Micro: a nivel de carretera, corredor, intersección, barrio				
Modelos	Ámbito de aplicación	Datos – variables más significativas	Características básicas	Software – aplicación relevante
De redes de tráfico	A escala micro (nivel de calle) y macro (de forma agregada en tiempo y zona)	Seguimiento de los automóviles y sus interacciones con otros vehículos.	<ul style="list-style-type: none"> Basados en los modelos de cuatro etapas (Generación, distribución, reparto modal y asignación de ruta). Emisiones GEI determinadas a conforme a la demanda de movilidad y cambios en la red. 	VISSIM DRACULA (Dynamic Route Assignment Combining User Learning and microsimulatio n)
De Comportamiento	Carreteras, corredores...	Motivaciones y restricciones que determinan las necesidades de movilidad.	<ul style="list-style-type: none"> Basados en la psicología social y la economía del comportamiento. Exploran las actividades y sus necesidades de movilidad. Permiten comprender los niveles de transporte y el proceso de decisión. La demanda de movilidad permite calcular emisiones GEL. 	ARCHISIM
Basados en agentes	Área de red, carreteras, corredores.	Demanda de viaje según evolución de la programación diaria y decisiones de viaje.	<ul style="list-style-type: none"> Dinámica de comportamiento de los agentes en el sistema de transporte y su modelización. Simulación del movimiento individual de los vehículos base de la estimación de las emisiones. 	MATSim (Multi-Agent Transportation Simulator Toolbox)

Fuente: Elaboración propia a partir de Linton et al., 2015, Nocera et al., 2016, Alkafoury et al., 2013 y Fallah, 2014.

3.1.1. Los modelos de red de tráfico.

Estos modelos cubren distintas escalas micro (nivel de calle) y macro (realizados de forma agregada en tiempo y zona). Plantean un modelo de microsimulación² donde se genera la demanda de transporte en una red de enlaces y nodos. Los primeros son las vías de la red con sus propias caracte-

² Los modelos de microsimulación son modelos estocásticos donde se representa explícitamente vehículos individuales que circulan por las redes, intentando replicar el comportamiento individual de los conductores y el rendimiento de la red. Usan técnicas discretas de modelado de tiempo que simulan el movimiento de los vehículos individuales basado en algoritmos de seguimiento de automóviles, cambio de carril y maniobras de adelantamiento que se actualizan varias veces por segundo. Estas interacciones de vehículo a vehículo proporcionan la base para calcular las demoras. Este tipo de modelado puede proporcionar una mejor representación de las colas, la congestión y los retrasos en las redes urbanas a plena capacidad (Roads and Maritime Services, NSW, 2013).

rísticas de diseño y operación que son enlazados mediante nodos representativos de las intersecciones o lugares donde se modifica el diseño de un enlace. También se consideran las zonas como áreas para ingresar la demanda mediante matrices Origen Destino representativa de los viajes entre estas zonas (entre un origen y un destino) dentro de la red asignándose el tráfico en cuatro etapas: generación (viajes producidos y atraídos por una zona), distribución (atribución de viajes entre zonas), reparto modal (alternativas de medio entre cada par origen destino) y selección de ruta (encaminamiento escogido y hora de salida para el destino). Se establecen los principios de interacción entre los vehículos dentro de la red, tratando de generalizar el comportamiento de un automóvil al ir tras otro al conjunto de los presentes en una vía simulando los niveles de tráfico entre los diferentes nodos. El cálculo de emisiones se determina a partir de los niveles de demanda de movilidad, modelizando los cambios en la red y sus repercusiones en el transporte y las emisiones.

Tal es el caso del modelo DRACULA (Dynamic Route Assignment Combining User Learning and microsimulAtion), que captura el movimiento de vehículos dentro de una red de tráfico predefinida (Linton et al. 2015). El modelo simula explícitamente las elecciones de viaje diarias de los individuos y los movimientos de los vehículos individuales a través de la red, con un proceso de aprendizaje del conductor día a día. Calcula las emisiones y el consumo de combustible de cada vehículo individual de acuerdo con su modo de conducción actual: aceleración, desaceleración, ralentí y crucero, y factores de emisión y relaciones con el consumo de combustible. (Liu, 2005). También se incluye al modelo VISSIM, acrónimo en alemán de “Verkehr In Städten - SIMulation” “*Simulación de tránsito en ciudades*”. En un solo modelo permite representar a todos los usuarios de la vía pública y estudiar sus interacciones: autos, transporte de carga y cualquier tipo de transporte público, ya sea ferroviario o convencional (PTV, 2017). Captura datos agregados a través de la red para retrasos, tiempo de viaje, etc. Las salidas de datos de vehículos de VISSIM importadas a través del módulo ENVIVER permiten calcular las emisiones de CO₂ en el área de estudio (Linton et al. 2015).

3.1.2. Los modelos de comportamiento.

Se esfuerzan por modelar la toma de decisiones de los agentes con diferentes perspectivas temporales (a corto, mediano y largo plazo). Los modelos a corto plazo consideran las decisiones inminentes de los conductores (por ejemplo, aceleración, cambio de carril y aceptación de hueco), los peatones (por ejemplo, la aceleración y la dirección de la marcha) y otros viajeros. Los modelos a mediano plazo atienden la planificación diaria de las decisiones que a menudo surgen de las tareas donde se ocupan los viajeros. Los modelos a largo plazo reflejan las interacciones del mercado de las empresas, los desarrolladores y los consumidores conforme se construyen, adquieren y venden propiedades, y también otras decisiones sobre empleo y localización de trabajadores y empresarios (Lovric y Raveau –dirs-, 2017). Por tanto, la investigación conductual en el transporte persigue incre-

mentar la comprensión de las razones que impulsan a un determinado uso de las redes por parte de los usuarios tratando de mejorar la toma de decisiones y la predicción de las necesidades futuras. Solo comprendiendo las restricciones y factores que inducen el comportamiento de la movilidad es posible alcanzar fórmulas sostenibles en el uso de los transportes lo que está relacionado no solo con los sistemas de transporte sino también con las lógicas de localización (Medda y Boarnett, 2005). En este sentido, Stern y Richardson (2005) señalan el avance que supone el modelado del comportamiento de viaje basado en actividades y enfocado a procesos, donde los motivos y las necesidades impulsan una toma de decisiones con limitaciones que llevan al comportamiento de respuesta (de conducción y demanda de viaje) tanto espacial como temporal.

En todo caso, son precisas mejoras en las explicaciones teóricas de la conducta de viaje. Se busca entender el viaje más allá de la conexión origen destino, entrando en el proceso, en el comportamiento en relación con el viaje, sus motivaciones, la programación o las restricciones, con objeto de clarificar los patrones de viaje y cuantificar la demanda de carreteras, lo que puede permitir calcular las emisiones de GEI, utilizando los factores de emisión correspondientes (Linton et al. 2015).

3.1.3. Los modelos basados en agentes (ABM).

Se trata de un tipo de modelo prospectivo relativamente nuevo cuyas características permiten realizar simulaciones a distintas escalas y para diferentes campos de estudio. Este tipo de modelo de *microsimulación* de operaciones e interacciones simultáneas tiene la capacidad de integrar el comportamiento de los agentes a un medio práctico, simulado o modelado, donde estos interactúan permitiendo mejorar la comprensión de la dinámica conductual individual de tales agentes, su interacción con otros y con su entorno. Por esta razón, los modelos basados en agentes también incluyen modelos de comportamiento (humanos o de otro tipo). Todas estas características, hace de ellos un enfoque poderoso para simular sistemas de movilidad a través de la captura de la dinámica de comportamiento en el sistema de transporte, aprehendiendo más detalles que el viaje en sí, aportando la motivación y el comportamiento.

Existen distintas aplicaciones para gestionar los flujos de tráfico, que pueden favorecer los trabajos de planificación metropolitana mediante el establecimiento de patrones de actividad diaria de una población (como viajes al trabajo, compras y recreación, etc.), la simulación de los movimientos de vehículos individuales en una red de transporte de un territorio y la estimación de las emisiones contaminantes generadas por los movimientos de vehículos (Bonabeau, 2002). Se pueden combinar distintos modelos que simulen la demanda de viajes, flujos de tráfico y emisiones de vehículos. MATSIM (*Multi-Agent Transport Simulation*) que es un desarrollo de software de código abierto, proporciona un marco para implementar simulaciones de transporte basadas en agentes a gran escala, no calcula las emisiones del transporte por carretera, aunque ha sido combinado con MOBILE6.2 para

calcularlas. Otras aplicaciones basadas en agentes permiten capturar diferentes aspectos del sistema de transporte como por ejemplo la lógica de comportamiento del mercado de vehículos en relación con los automóviles eléctricos frente al predominio de los motores convencionales, lo que, en relación con las emisiones, sin calcularlas, puede ayudar a comprender la dinámica de sustitución del parque móvil (Linton et al. 2015).

3.2. Modelos de escala macro.

Sin embargo, todos estos tipos de modelos de escala micro presentados se han revelado insuficientes para dar respuesta a los nuevos problemas de movilidad y sostenibilidad que requieren aumentar la perspectiva de estudio con una óptica crecientemente macro, conforme se recoge en el Cuadro 2, cada vez más holística, donde se incrementan los factores y variables a considerar. Se da lugar, así, a una mayor complejidad, que resulta de la integración de herramientas y modelos para ampliar los resultados y las dimensiones observadas, como una manera de mejorar el realismo de los mismos, aunque al agrandarse la perspectiva desciende la precisión.

Cuadro 2
Modelos de transporte

Modelos Macro: a nivel internacional, nacional, regional o urbano				
Modelos	Ámbito de aplicación	Datos – variables más significativos	Características básicas	Software – aplicación relevante
De Dinámica de Sistemas	Regionales y urbanos	<ul style="list-style-type: none"> • Múltiples datos de naturaleza económica, social, ambiental, de transporte... • Integración variables en distintos submódulos. 	<ul style="list-style-type: none"> • A medio camino entre los modelos macro y micro. • Muy versátiles: combinación modelos cuantitativos - cualitativos (diagramas de bucle causal – CLD) → identificación de interacciones y reacciones en sistemas complejos como el transporte. 	ASTRA (Assessment of Road Transport Strategies) MARS (Metropolitan Activity Relocation Simulator)
Técnico-económicos	Globales: internacionales y nacionales	<ul style="list-style-type: none"> • Módulos socioeconómicos, demográficos, energéticos y medioambientales. • Estimación de emisiones del transporte a partir de indicadores socioeconómicos y proyecciones de tecnología de vehículos y combustibles. 	<ul style="list-style-type: none"> • Identificación de dinámicas a gran escala de los sistemas de transporte, a través de los cambios socioeconómicos. • Enfoque de modelización top-down. • A veces enfoque tan extenso, con transporte solo subsector económico. 	WEPS+ (World Energy Projection System Plus) ICCT Roadmap Imaclim-R
de Evaluación Integral (o Integrados)	Globales: internacionales, nacionales y regionales	<ul style="list-style-type: none"> • PIB, población y otras variables socioeconómicas para determinar la demanda futura de viajes. • Representación extensa del mundo aportando un esquema de interacciones e interrelaciones entre la economía y el entorno mediambiental, para comprender futuros escenarios de cambio climático. 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelización a gran escala de la economía y el medio ambiente. • Sector transporte como un componente más de la actividad económica. Algunos modelos: submódulo para el transporte, que capta el cambio tecnológico y el impacto ambiental impulsados por factores socioeconómicos. 	PECE GCAM (Global Change Assessment Model)

Fuente: Elaboración propia a partir de Linton et al., 2015, Nocera et al., 2016, Alkafoury et al., 2013 y Fallah, 2014.

3.2.1. El modelado de dinámica de sistemas.

Se basa en la dinámica de sistemas que facilita el estudio del comportamiento y las consecuencias de las múltiples interacciones de los elementos de un sistema a través del tiempo (Morlán, 2010)³. Los modelos de dinámica de sistemas se encuentran a medio camino entre los modelos de microescala ya vistos y la gran escala de los que se van a presentar después. Estos modelos tienen un carácter muy versátil, gracias a la combinación de modelos cuantitativos y cualitativos, estos últimos articulados mediante diagramas de bucle causal (*CLD*, *Casual Loop Diagram*) o de manera más sencilla, diagramas causales o de influencias, que posibilitan mostrar la estructura y las relaciones causales de un sistema para entender sus mecanismos de realimentación en una escala temporal (Linton et al. 2015)⁴.

En relación a la modelación, la característica específica de la Dinámica de Sistemas radica en sus estructuras y funciones de retroalimentación no lineal. Por esta razón, la interdependencia entre los submódulos del sistema tiene que ser identificada e ilustrada en un procedimiento de modelado iterativo según recogen Thaller et al. (2017).

La dinámica de sistemas en tanto que trata de modelar y comprender el comportamiento temporal en entornos complejos resulta muy útil para modelar sistemas de transporte, ya que son sistemas complejos con múltiples variables y de bucles de retroalimentación no lineal e influenciados por factores económicos, sociales, ambientales y de transporte (Wang et al., 2008). Al respecto, las distintas partes del sistema de transporte se retroalimentan en el tiempo, con distinto grado de retardo entre ellas, según el momento de la respuesta de cada uno de los componentes o agentes implicados. Todo ello, se ajusta adecuadamente a las necesidades y dificultades de la planificación del transporte especialmente en el ámbito urbano y regional donde se precisa enfoques muy dinámicos. Justamente en estos entornos, los modelos de dinámica de sistemas han alcanzado una elevada eficacia para aprehender la *multiactividad* espacio temporal en que se desenvuelven, muy por encima

³ Por tanto, este enfoque metodológico permite explicar los sistemas dinámicos, esto es, aquellos que cambian con el tiempo ya que las partes del sistema sufren mutaciones a consecuencia de las interacciones entre ellas. El conjunto de las relaciones entre los elementos de un sistema recibe la denominación de estructura del sistema. Los bucles de realimentación positiva y negativa constituyen los ejemplos más simples de estructura de un sistema capaces de generar comportamiento autónomo.

⁴ Los diagramas de bucle causal se erigen en la técnica esencial para el modelado de la dinámica de sistemas, por cuanto posibilitan acercarse a un esquema básico de las relaciones internas generadas en la estructura de un sistema dinámico. En tal estructura destacan diferentes variables con capacidad de influir o ser influidas, denominadas variables de nivel (o de acumulación o Stocks), variables de flujo y auxiliares, así como la relación entre los elementos que la conforman. Los Diagramas Causales son las flechas o enlaces que reflejan una relación de causalidad o de influencia entre dos variables ya sea positiva o negativa (también llamada compensadora). Un bucle de realimentación constituye un conjunto de variables interconectadas mediante relaciones causales o de influencia (ya sean positivas o negativas), que determinan un camino cerrado cuyo comienzo y fin conduce a la variable de inicio (Morlán, 2010). Los bucles positivos refuerzan la variación inicial en el sistema y tienden a favorecer el crecimiento, los bucles negativos la contrarrestan resultando inhibidores y frecuentemente autorreguladores y limitantes, actuando como un estabilizador en el sistema. El comportamiento global del sistema es consecuencia de su estructura interna, o lo que es igual, de la totalidad de las características de sus partes y del conjunto de sus interacciones entre los bucles, tengan carácter positivo o negativo.

de la lograda por los modelos de comportamiento, permitiendo recoger procesos y productos anteriores a la propia operación de transporte ligados a la fabricación de la energía o los vehículos y sus emisiones, lo que pone de manifiesto la capacidad adaptativa y posibilidades de estos instrumentos de modelización.

Así, algunos modelos de evaluación regional basados en la dinámica de sistemas, como ocurre en el caso de ASTRA (*Assessment of Road Transport Strategies*), incluyen un submódulo de entorno que calcula las emisiones de transporte, combinando los factores socioeconómicos que impulsan el modelo con el submódulo que incluye factores de emisiones de arranque en frío, factores de emisión caliente, etc., Otros modelos estratégicos de menor nivel de detalle, caso de MARS (*Metropolitan Activity Relocation Simulator*), para establecer las interacciones entre usos del suelo y transporte incorporan un modelo de consumo y emisión de combustible que permite la evaluación de los impactos ambientales de los desarrollos de transporte y uso del suelo. MARS calcula entre otras muchas variables el consumo de combustible, el ruido y las emisiones de CO₂, etc. Estos valores pueden mostrarse para cada período de simulación, para cada zona individual, para cada par de zonas (destino / origen), para cada medio de transporte, para el período pico y fuera del pico y también pueden ser acumulados a una suma amplia del sistema.

3.2.2. Los modelos técnico económicos

Son modelos representativos del enfoque macro (Nocera et al., 2017)⁵. Reúnen una gama de herramientas que permiten describir y analizar las características y relaciones tecnológicas y económicas para un determinado escenario o referencia, e incluso observar los impactos derivados de ello. También pueden combinar datos socioeconómicos (Anable et al. 2012). Se usan como apoyo para la formulación de políticas globales, nacionales e internacionales, con un horizonte temporal de muy largo plazo (Nocera et al., 2017).

El objetivo de los modelos E3, que son un subconjunto de esta categoría usados para contrastar políticas en diferentes ámbitos y entornos, es la formulación de escenarios internamente consistentes de cambio en la economía, la sociedad, la tecnología, el acceso a los recursos de combustibles, y otros factores que afectan a los niveles futuros del consumo de energía y las emisiones de GEI y de otros tipos. Son capaces de proporcionar información sobre las emisiones a nivel sectorial y, en

⁵ Nocera et al. (2017) clasifican como macro los modelos técnico económicos según una perspectiva macro o micro adoptada en relación a los modelos para determinar la demanda de transporte y las emisiones de CO₂. Scapecchi (2010) sin embargo dentro de su clasificación orientada a distinguir los modelos económicos por su enfoque descendente o ascendente sitúa modelos técnico económicos como ascendentes en una perspectiva general de evaluación de los costes macroeconómicos de las políticas de reducción de las emisiones de GEI. Ambas posiciones dan importancia a los planteamientos híbridos o mixtos para resolver las insuficiencias de los enfoques analizados. De hecho, Linton et al. (2015), pese a definir los modelos técnico económicos con tendencia a la escala macro, recogen en su clasificación modelos híbridos como ejemplo de los modelos técnico económicos. Tales modelos híbridos tienen por finalidad paliar los defectos de los enfoques simples.

general, de forma agregada, a veces considerando el transporte solo como un subsector de actividad económica dentro de un contexto más amplio. Al igual que con muchos modelos a *macroescala*, los detalles capturados en los modelos de tráfico o en los enfoques de comportamiento a menudo se pasan por alto, pero hay ejemplos de intentos de integrar algunos de estos detalles en estos enfoques (Linton et al. 2015). No obstante, el modelo *ICCT Roadmap*, que es un modelo técnico económico del sistema de transporte con un enfoque descendente, estima los cambios en la actividad de transporte real por país y región en función de los cambios en las previsiones de la población, el producto interno bruto (PIB) y los precios relativos del combustible. Cubre las emisiones del ciclo de vida del combustible de los gases de efecto invernadero y los contaminantes atmosféricos locales de los principales modos de transporte, tipos de combustible y tecnologías de los vehículos. Utiliza indicadores socioeconómicos junto con proyecciones de tecnología de vehículos y combustibles para estimar las emisiones del transporte por carretera a muy largo plazo y para modos o regiones específicos (ICCT, 2018).

En esa línea, el modelo *Imaclim-R*, que pertenece a la familia de modelos híbridos dirigidos a compatibilizar los enfoques ascendentes y descendentes, plantea un modelo de Energía-Economía-Medioambiente que representa explícitamente el sector del transporte, incluyendo sus determinantes distintos del precio (organización urbana, infraestructuras, organización espacial), tratando de captar sus interacciones con el resto de la economía a través de un modelo de equilibrio general donde se incorporan una desagregación sectorial micro específica. Estos determinantes que impulsan las emisiones del transporte son la tecnología (intensidad del carbono de los combustibles y la intensidad energética de la movilidad) y el comportamiento de la movilidad (volumen de la movilidad y las participaciones modales) (Schäfer, 2012).

Imaclim-R explicita los determinantes del comportamiento de la movilidad que impulsan la demanda de transporte: los límites a las necesidades de movilidad impuestos por la organización espacial de la residencia y la producción (es decir, desplazamientos), las elecciones modales condicionadas por la infraestructura disponible y la intensidad de la producción de transporte de mercancías (Waisman et al., 2013). Este marco ayuda a desentrañar el papel del transporte en las trayectorias socioeconómicas a largo plazo y el potencial que ofrecen las medidas específicas en este sector frente a la necesidad de mitigar el cambio climático. Se demuestra la dificultad de controlar y, más aún, reducir las emisiones debidas al sector, al que distintas proyecciones y pronósticos sitúan a largo plazo como uno de los esenciales en la generación de gases de efecto invernadero y, por tanto, para frenar el cambio climático.

3.2.3. Los modelos de evaluación integrados (IAM).

Este tipo de modelos suponen una representación extensa del mundo aportando un esquema teórico amplio donde indagar sobre las interacciones e interrelaciones entre la economía y el entorno medioambiental para comprender las posibles consecuencias de futuros escenarios generados por el cambio climático.

El objetivo de estos modelos, es proyectar climas futuros alternativos con y sin varios tipos de políticas de cambio climático para dar a los responsables de todos los niveles del gobierno y la industria una idea de lo que está en juego al decidir si implementar o no diversas políticas, según la apreciación de Weyant (2017), para quien, la principal contribución de las IAM hasta ahora ha sido proporcionar marcos conceptuales para desarrollar ideas sobre sistemas altamente complejos, no lineales, dinámicos e inciertos, aunque estos modelos, sin embargo, no han sido capaces de proporcionar pronósticos de alta precisión. La vocación de los IAM, no obstante, es a largo plazo y con perspectiva macro tratando de proyectar los impactos de las estrategias de mitigación intersectoriales y de toda la economía, enfocándose principalmente en las opciones de combustible y emisiones de GEI.

La relevancia del sector del transporte como consumidor final de energía, lleva a que la mayor parte de estos modelos recojan una representación relativamente detallada de desarrollos en este sector y su potencial para contribuir a la mitigación de las emisiones de GEI (Edelenbosch, et al. 2016). En este sentido, los modelos de evaluación integrada (IAM) tienen capacidad para capturar el sector transporte como un componente más de la actividad económica existiendo algunos modelos donde se puede reproducir el funcionamiento independiente del sector a través de un submódulo como señalan Linton et al. (2015) a quienes los IAM les recuerda en escala y alcance a los modelos técnico económicos, si bien, incidiendo más en el medio ambiente y los cambios derivados para la economía.

El enfoque argumentativo de los IAM se centra en la descarbonización del suministro de energía, lo que implica para el sector del transporte un cambio de combustible pasando del petróleo a la electricidad, el hidrógeno y / o los biocombustibles (Schönduwe y Lennert, 2016). Al respecto, el *Global Change Assessment Model (GCAM)* es un modelo de evaluación integrado que vincula los sistemas de energía mundiales, la agricultura, los usos del suelo y los sistemas climáticos. Se trata de un modelo a largo plazo, global, tecnológicamente detallado y de equilibrio parcial lo que permite, por tanto, modelar áreas separadas de la economía de forma independiente. GCAM contiene una representación detallada del uso de energía de transporte y las demandas de servicios en el sector dividido en tres grupos: pasajeros, carga y envío internacional según el enfoque descrito por Kim et al. (2006). La elección del modo de transporte para un viaje personal está determinada por diversos atributos, como el costo de viaje, el tiempo de viaje, las preferencias personales y las

características socioeconómicas individuales. Esto determina el comportamiento de viaje y puede afectar la demanda de viaje y las emisiones relacionadas con el transporte.

Por lo tanto, un modelo de decisión de modo de transporte proporciona una metodología para estimar la demanda de viaje y la división modal. Linton et al. (2015) señalan que, como en el caso de los enfoques tecno económicos, los resultados agregados relativos a las emisiones del transporte se producen a partir de este tipo de modelo, siendo posible también capturar los cambios adicionales en la tecnología, los factores de carga y la participación modal, así como analizar los impactos en las emisiones del sector del transporte.

➤ 4. Limitaciones de los modelos de tráfico.

Todos los modelos planteados presentan aspectos positivos y negativos dada la complejidad e incertidumbre que representa la modelización del transporte en un contexto de cambio climático donde la movilidad juega un papel fundamental y donde aún se desconocen los efectos a largo plazo de muchas de las políticas implementadas. Tales dificultades, dada la cantidad de elementos y procesos interrelacionados y la propia variabilidad de muchos de ellos, significan para los constructores de modelos un desafío formidable, aunque, como indica Weyant (2017), estos modelos parecen demostrarse bastante útiles para evaluar la magnitud del problema del cambio climático y la eficacia de soluciones potenciales.

Entre la dificultades existentes, Fallah (2014) recoge las diferentes fuentes de error derivadas de estimaciones incorrectas de tráfico estudiadas por Ortuzar y Willumsen (2011) que pueden ser: a) errores de medición ya afecten a la red o a información inexacta recogida por el entrevistador; b) errores de muestreo por un número insuficiente de observaciones; c) errores computacionales basados en los procedimientos iterativos de la mayoría de los modelos aunque pequeños comparativamente con otros; d) errores de especificación al simplificar los procesos en los modelos u omitir o tergiversar un fenómeno mal comprendido; e) errores de transferencia cuando un modelo desarrollado en un determinado contexto temporal o espacial se traslada a otro diferente; y, finalmente, f) errores de agregación cuando por agregar datos se pasa por alto el comportamiento individual.

Willumsen (1985) entre esos errores señala dos que afectaban en mayor medida a la exactitud de los modelos: los de especificación y los de datos, errores que interactúan entre ellos de forma que si la complejidad de un modelo con más variables reduce el error (s) de especificación, el error de medición de datos probablemente aumentará con la complejidad del modelo. Consecuentemente, siguiendo a Alonso (1968) el modelo predictivo más elaborado e inclusivo no tiene por qué ser necesariamente el mejor para el trabajo aplicado. En general, los datos más pobres requieren mo-

delos más simples (Alonso, 1968) debiéndose buscar un nivel óptimo de complejidad.

Los errores de especificación, ya se ha dicho, tienen lugar cuando el modelo no resulta una imagen fiel del mundo real. La utilización muchas veces forzada de supuestos que posibilitan la consecución de sistemas de ecuaciones más simples y la aplicación de métodos aproximados para su solución están generalmente en esta clase de error. Mejorar la especificación o incrementar el realismo del modelo ampliando el número de variables y su desagregación, plantear otras relaciones y enlazar o concatenar modelos para responder a la complejidad del transporte puede ayudar a resolverlo, aunque al coste de un modelo de mayor dificultad.

En cuanto a los errores de los datos se producen en la asignación de valores a las variables con que se alimenta al modelo (datos de entrada) ya sean errores de muestreo, transcripción y codificación. Estos errores pueden ser mayores cuando se establecen valores futuros para las variables por la incertidumbre de la evolución temporal de muchas estimaciones. También el proceso de calibración de un modelo puede ser fuente de errores adicionales en los datos, especialmente si no se aplica una técnica solvente para evitarlos. Incrementar el tamaño de las muestras, aplicar las normas de control de calidad adecuadas en la recogida de datos y utilizar modelos eficientes con la información permiten minimizar estos errores, aunque elevando el coste de operar los modelos (Willumsen, 1985).

Los modelos en el ámbito del transporte, como se ha indicado, se basan en una amplia variedad de datos, pudiéndose necesitar, según el objetivo (Gendre, 2008).

- i. En relación con el tráfico por carretera: las velocidades, los flujos, las distancias recorridas, y las tasas de ocupación, preferentemente por clases de vehículos, promedios diarios u horarios e, incluso, periodos más cortos (minutos);
- ii. En relación con la oferta de transporte: el tiempo de viaje, los horarios de transporte en común (redes, líneas, paradas, horarios, puntos de intercambio);
- iii. En relación con la demanda de transporte: las matrices origen/destino resultantes de las encuestas de viajes, a menudo con diferente zonificación, fechas;
- iv. En relación con la descripción de redes tanto en formas topológicas (crecientemente), como geométricas, las herramientas permiten una representación cartográfica de los resultados de la modelización, en cuyo caso también es posible la superposición con mapas de trama.⁶
- v. En su caso, datos específicos del transporte de mercancías (polos de atracción, flujos por tipo de carga).

⁶ Las mediciones de las características de la red vial (por ejemplo, longitud del enlace, número de carriles, curvatura del enlace, disposición de intersecciones, número de intersecciones por kilómetro, límites de velocidad, tiempos de señalización o uso de tierra en carretera) proporcionan otra fuente útil de datos de tráfico (Grote et al. 2016).

Sin embargo, esos datos no siempre es posible usarlos. Las dificultades para disponer de estas informaciones tienen diferentes explicaciones. Frecuentemente, los datos necesarios se obtienen con una sola finalidad y después dejan de estar accesibles, perdiéndose a menudo, de manera que no permiten alimentar datos de base de modelizaciones posteriores. En otras ocasiones, los datos se restringen, total o parcialmente, a un solo ente o servicio sin que los demás usuarios potenciales, internos o externos, puedan participar de su información; es el caso de muchas encuestas cuyos resultados no se difunden o, como en el caso de las encuestas de movilidad, que permiten obtener las matrices origen destino, se restringe el acceso a los datos brutos.

Otras veces, los datos disponibles son insuficientes acudiéndose a simplificaciones o generalizaciones para su utilización tratando de reflejar con el modelo el mundo real en mayor medida, por ejemplo, los modelos tradicionales suponen que la demanda de tráfico entre un origen y un destino mantiene un valor constante, supuesto incumplido en casi todos los casos ya que la demanda es dinámica sin que exista un estado de equilibrio. En muchos casos, simplemente no existen los datos.

La llegada de las nuevas tecnológicas de la información al campo del transporte, especialmente en el modo carretero, tanto en las infraestructuras como en las operaciones aplicadas en vehículos y redes han mejorado los sistemas de gestión de tráfico, detección, reconocimiento, seguimiento y comunicaciones de los vehículos (en muchos casos haciendo posible el intercambio efectivo de datos a través de tecnologías inalámbricas entre vehículos, con la infraestructura vial y con otros usuarios de la carretera) introduciendo los denominados Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) que, no solo han permitido apoyar la gestión de movilidad urbana, sino también incrementar la cantidad y calidad de los datos de transporte (European Commission, 2018).

No obstante, Grote et al. (2016) ponen de manifiesto cómo, a pesar de los muchos avances registrados en los últimos tiempos, especialmente gracias al desarrollo de estas tecnologías nuevas, muchas de las fuentes de información y datos sobre tráfico urbano generados presentan limitaciones para su utilización ya sea porque su extensión en las redes (se trate de sensores o emisores instalados en el pavimento o en los soportes de señalización existentes o ad hoc) o en los vehículos (sensores y emisores para vehículos en movimiento) aún está lejos de generalizarse, bien porque la adquisición de los datos posibles representa importantes recursos o por ambas cosas. Por tanto, estos avances, costosos de implementar, presentan el inconveniente de una localización no generalizada, sin continuidad en la red, circunscrita a los puntos, tramos o áreas donde se instalan.

De igual manera, algunas tecnologías aún son claramente insuficientes debiéndose acudir a soluciones clásicas para lograr la información (ejemplos de ello son de los sensores bajo pavimento para detectar la presencia de un vehículo que solo reconocen el número de ruedas o el peso pero no otras características como la potencia o la antigüedad; las velocidades proporcionadas por los Sis-

temas Inteligentes de Transporte que aún son parciales por el tamaño de la muestra al ser pocos los vehículos con los dispositivos necesarios instalados que además si son vehículos privados pueden chocar con el derecho de propiedad al recuperar el dato; la generalización de los datos de un tramo ITS que se replica en toda una red, lo que puede no ser válido). Algunas manifestaciones del tráfico como la congestión, que repercute en la fluidez de las redes, aún no encuentran un tratamiento adecuado, cuando se contempla. Y como recuerda Smit (2008) la congestión altera la actividad de tráfico (VKT), la velocidad media, la composición del tráfico y la elección del propio modelo, elementos esenciales para una adecuada modelización.

➤ 5. La modelización de emisiones de tráfico.

Junto a los modelos de tráfico, construidos para el análisis del flujo de vehículos y/o su comportamiento, aunque subsidiariamente entren al cómputo de las emisiones, se han ido desarrollando nuevas modelizaciones en relación con las emisiones de tráfico. Estas tratan de incrementar la efectividad de las estimaciones de GEI para realizar los inventarios, evaluar y mejorar las estrategias de reducción de emisiones considerando que el transporte por carretera es en general la principal fuente de contaminación atmosférica en las zonas urbanas.

Como ya se ha señalado, las ciudades generan una cantidad desproporcionada de emisiones de tráfico motorizado en comparación con su tamaño geográfico, de manera que han de convertirse en un foco para los esfuerzos dirigidos mitigarlas considerando además que esas emisiones tienen efecto directo en los problemas de contaminación del aire no solo a escala local, sino también a nivel regional y global.

Como las emisiones son una función compleja de muchas variables, comúnmente se usan combinaciones multidisciplinarias de transporte y emisiones, con modelos a diferentes escalas, que van desde proyectos de carreteras locales a toda la zona urbana o regional, redes de transporte e incluso, inventarios de emisiones nacionales o mundiales (Smit, 2008).

Los modelos de emisiones de transporte son objeto de distintas clasificaciones. Esteves-Booth et al. (2002) dividen los tipos existentes de modelos de emisión vehicular para el arranque en caliente, en frío y las emisiones evaporativas en tres grupos principales: modelos de factores de emisión, modelos de velocidad promedio y modelos modales. Smit (2006) los clasifica con base en cuatro criterios: los parámetros del modelo, la forma en que se obtienen las leyes de emisión, la calidad de los datos de tráfico y la escala espacial.

Smit et al. (2008) clasificaron los modelos según la forma en que se incorpora el comportamiento de conducción, aumentando la complejidad del modelo con la cantidad de variables de entrada requeridas. Al respecto, el IPCC (2006) señala que los modelos pueden ser tan simples

como un multiplicador constante (p. ej. un factor de emisión) y ganar complejidad, como ocurre en los modelos de procesos complicados. Fallah et al., (2012) estructuran su clasificación conforme a los enfoques habituales para estimar las emisiones asociadas con el tránsito considerando los datos de entrada, la escala del estudio y el tipo de contaminantes considerados. Nocera et al., (2017) se inclinan por una clasificación en función del enfoque macro o micro que se recoja en el modelo. Combinando todos estos planteamientos, se realiza una clasificación donde el criterio principal es su escala siguiendo la pauta de los modelos de tráfico ya vistos.

5.1. Escala macro.

Los modelos a escala macro para el desarrollo de la actividad se calculan a nivel nacional, provincial, regional o urbano, conforme se recogen en el Cuadro 3. Esta perspectiva global no impide que algunos de ellos ganen concreción haciéndose más complejos y logrando mayor precisión, pero también incrementando la dificultad para aplicarlos.

Cuadro 3
Modelos de cálculo de emisiones de tráfico

Modelos Macro: a nivel nacional, provincial, regional o urbano				
Modelos	Ámbito de aplicación	Datos – variables más significativas	Características	Software – aplicación relevante
Basados en la cantidad de combustible	Nacionales.	Consumo de combustible (volumen de combustible vendido o consumido) – distintos tipos de vehículos.	Modelos más simples en su funcionamiento.	IPCC
De factores de emisión agregados	Nacionales y regionales.	<ul style="list-style-type: none"> • Factores de emisiones^a según tipo de vehículo² y modo de conducción (urbano, rural, autopista). • Tipo de carretera. • N^o de vehículos. • Distancia media recorrida. 	<ul style="list-style-type: none"> • Método de cálculo simple, que no requiere muchos datos de entrada. • Enfoque no exacto a microescala. 	NAEI HUGREL
De velocidad media del tráfico	Redes de carreteras. Ciudades y barrios.	<ul style="list-style-type: none"> • Factores de emisiones^a. • Distintos viajes a diferentes niveles de velocidad media. 	<ul style="list-style-type: none"> • Facilidad de aplicación. • Algunos problemas con la velocidad promedio y la resolución espacial. 	COPERT MOBILE

Basados en situaciones de tráfico promedio	Ciudades. Barrios.	<ul style="list-style-type: none"> • Factores de emisión^a, según tipo de vehículo^b, en diferentes situaciones de tráfico ('stop - parada - marcha', 'conducción en autopista de flujo libre'...). • Distancia media recorrida. • Tipo de carretera • Nivel de servicio. • Características del área. 	Datos que se pueden lograr a partir de modelos de tráfico	HBEFA ARTEMIS
De variables de tráfico	Barrios.	<ul style="list-style-type: none"> • Factores de emisión^a. • Variables de flujo de tráfico^c: velocidad media, densidad de tráfico, longitud de cola y ajustes de señal. 	Datos a partir de modelos de tráfico macroscópicos y microscópicos.	TEE
De ciclo variable		<ul style="list-style-type: none"> • Factores de emisión^d. • Diferentes variables de ciclo de conducción (tiempo de inactividad, velocidad media, energía cinética positiva) 	Requieren información detallada sobre los movimientos del vehículo, sólo accesible a partir de modelos de tráfico microscópicos o haciendo uso de GPS.	MEDIDA VERSIT+ ^(*)

Notas:

a. Medidos en masa de contaminante por unidad de distancia.

b. De acuerdo con el tamaño, el peso, los estándares europeos de emisiones – Euro Classes.

c. Variables que representan las características de la red por su influencia en la capacidad de movimiento del tráfico.

d. Medidos en g./vehículo/Km.

(*)De acuerdo con Nocera et al., VERSIT+ es un software que aplica modelos de regresión lineal múltiple, de modo que las emisiones son calculadas mediante esta técnica por mínimos cuadrados ponderados con información de pruebas con diferentes ciclos de conducción.

Fuente: Elaboración propia a partir de Nocera et al., 2016, Linton et al., 2015, Alkafoury et al., 2013 y Fallah, 2014.

5.1.1. Modelos basados en la cantidad de combustible.

Estos modelos (tipo IPCC) son los más simples en su funcionamiento. Usan datos de consumo de combustible (es decir, datos de venta o volumen de combustible) y/o actividad vehicular. Es posible estimar las emisiones a partir del combustible consumido (o representado por el combustible vendido) o bien la distancia recorrida por los vehículos. En general, el primer método (combustible vendido) es adecuado para el CO₂ y el segundo (distancia recorrida por tipo de vehículo y de carretera) es adecuado para el CH₄ y el N₂O (IPCC, 2006). Los modelos solo se pueden usar para inventarios a gran escala (Fallah et al., 2012, Baškovič y Knez 2013).

5.1.2. Modelos de factores de emisión.

Se trata de modelos (tipo NAEI) que también funcionan con un método de cálculo simple y no precisan muchos datos de entrada. La estimación de las emisiones se expresa mediante el uso de un factor de emisiones relacionado con un tipo de vehículo y un modo de conducción específico (es decir, urbano, rural o autopista). Los factores de emisión se derivan de los valores medios de mediciones repetidas durante un ciclo de conducción particular y, por lo general, se expresan en masa de contaminante por unidad de distancia. Los modelos de factores de emisión se utilizan comúnmente en el desarrollo de inventarios de emisiones nacionales y regionales. Este enfoque no es exacto a microescala, ya que los factores de emisión se basan en características de conducción promedio. (Fallah et al., 2012 y Smit et al. 2010).

5.1.3. Modelos que dependen de la velocidad promedio del tráfico.

Los modelos de velocidad promedio (tipo COPERT, MOBILE) se basan en funciones de emisión relacionadas con la velocidad, generadas por las mediciones de las tasas de emisión en una variedad de viajes a diferentes niveles de velocidad. Los factores de emisión se expresan en masa de contaminante por unidad de distancia. Estos modelos se usan a menudo en inventarios de emisiones en una escala de red de carreteras. Están entre los más utilizados por la facilidad para aplicarse, aunque presentan algunos problemas con la velocidad promedio y la resolución espacial (Nocera et al. 2017). Su uso a nivel de microescala es inapropiado, ya que generalmente no incluyen cambios en los modos operacionales (Fallah et al. 2012).

5.1.4. Modelos basados en situaciones de tráfico promedio.

Los modelos de situación del tráfico (tipo HBEFA, ARTEMIS), se determinan mediante el uso de factores de emisión para un tipo de vehículo a partir de descripciones de situaciones de tráfico particulares (como 'stop, parada y marcha', o 'conducción en autopista de flujo libre'). Estos modelos, donde los factores de emisión se expresan en masa de contaminante por unidad de distan-

cia, requieren datos kilómetros vehículo/recorridos por situación de conducción como entrada, que se pueden lograr a partir de modelos de tráfico (Smit et al. 2010, y Nocera et al. 2017).

5.1.5. Modelos de variables de tráfico.

Son modelos (tipo TEE), donde los factores de emisión medidos en masa de contaminante por unidad de distancia, se definen por variables de flujo de tráfico tales como velocidad media, densidad de tráfico, longitud de cola y ajustes de señal, la mayoría de los cuales pueden obtenerse en modelos de tráfico tanto macroscópicos como microscópicos. (Smit et al. 2010). La definición de ‘variable de tráfico’ recoge en este caso las características de la red por su influencia en la capacidad de movimiento del tráfico (Grote et al., 2016).

5.1.6. Modelos de ciclo variable.

Se trata de modelos (tipo MEDIDA, VERSIT+) en los que los factores de emisión se expresan generalmente en gramos por vehículo/kilómetro, siendo función de diferentes variables de ciclo de conducción (como tiempo de inactividad, velocidad media, energía cinética positiva) a alta resolución (segundos a minutos). Estos modelos generalmente requieren información detallada sobre los movimientos del vehículo (por ejemplo, datos instantáneos sobre velocidad, aceleración y pendiente de la carretera), que solo son accesibles a partir de modelos de tráfico microscópicos o, por ejemplo, con equipamiento de GPS (Smit et al. 2010).

5.2. Escala micro.

Los modelos de escala micro, que se resumen en el Cuadro 4, aportan mayor precisión sobre los consumos y emisiones en relación con cada tipo de vehículo y para distintos ciclos de conducción y otras muchas variables como la velocidad, la potencia del motor, la aceleración. etc. (Nocera et al. 2017). Los modelos de escala micro son esencialmente modelos modales de emisión con distintas variantes que operan a un mayor nivel de complejidad. Están diseñados para proporcionar una técnica de estimación a un nivel de *microescala*. Los factores de emisión se expresan generalmente en gramos por tipo de operación (modo). Se requieren amplias mediciones del vehículo o el motor para proporcionar datos de operación del vehículo, las emisiones y el consumo de combustible a una alta resolución de tiempo (generalmente de uno a varios segundos) (Smit et al. 2010). Proporcionan una estimación de emisiones más precisa a un nivel de microescala que los modelos de factor de emisión y los modelos de velocidad promedio.

Cuadro 4
Modelos de cálculo de emisiones de tráfico

Modelos Micro: a nivel de carretera, corredor, intersección, barrio				
<i>Modelos</i>	<i>Ámbito de aplicación</i>	<i>Datos – variables más significativas</i>	<i>Características básicas</i>	<i>Software – aplicación relevante</i>
Modales simples	Corredores. Secciones de carretera.	<ul style="list-style-type: none"> • Distintos tipos de vehículo según diferentes modos operativos • Nº de vehículos según tipología. • Tiempo de uso según modo operativo. 	Las emisiones totales se obtienen como media ponderada de las emisiones por tipo de vehículo y modo operativo.	UROPOL
De emisión instantánea	Intersecciones de área	<ul style="list-style-type: none"> • Masa • Energía • Eficiencia • Consumo de combustible • Condiciones de arrastre y resistencia al rodado. 	Extensiones complejas de los modelos modales sobre la base de las emisiones por tipo de vehículo y modo operativo. Tasas de emisión calculadas cada segundo.	MODEM(*) PHEM CMEM
Modales e instantáneos	Intersecciones de barrios.	<ul style="list-style-type: none"> • Datos del vehículo. • Ciclo de conducción. 	<ul style="list-style-type: none"> • Extensiones de los modelos de emisión instantánea. • Estimación de emisiones por características de los vehículos y tipo de conducción • Permiten análisis para escalas temporales y espaciales. 	VeTESS

(*) De acuerdo con Nocera et al., MODEM considera la aceleración, desaceleración, y circulación conjuntamente en una sola función. No se considera, en cambio, la inactividad. Input: patrón de conducción. Fuente: Elaboración propia a partir de Nocera et al., 2016, Linton et al., 2015, Alkafoury et al., 2013 y Fallah, 2014

5.2.1. Modelos modales simples.

Estos modelos (tipo UROPOL) categorizan los modos de operación del vehículo conforme a un número relativamente pequeño de modos operativos (estado estable, aceleración, desaceleración y modo inactivo). Para cada uno de estos modos, se supone que la tasa de emisión para una determinada categoría de vehículo y contaminante es fija. La emisión total de emisiones de un viaje, o de una sección

de carretera, se calcula ponderando cada tasa de emisión modal por tiempo transcurrido en ese modo operativo. (Boulter et al. 2007).

5.2.2. Modelos de emisión instantánea.

Son modelos tipo MODEM, PHEM, CMEM. Se trata de extensiones complejas de los modelos modales. Representan explícitamente el comportamiento de emisión del vehículo, cuyas tasas de emisión se calculan segundo a segundo a partir de masa, energía, eficiencia, consumo de combustible, arrastre y resistencia rodando (Nocera et al., 2017). MODEM ahora está relativamente anticuado en términos de su base de datos de emisiones subyacente y ha sido reemplazado en gran parte por PHEM.

5.2.3. Un enfoque de modelado instantáneo avanzado.

Este enfoque (tipo VeTESS) constituye una extensión de los modelos instantáneos. Se utiliza para estimar las emisiones de vehículos individuales en escalas de tiempo corto. Difícil de extender a toda la flota ya que, si bien se puede aplicar a varios vehículos, los parámetros del modelo dependen en gran medida del modelo de vehículo en cuestión, y el modelo se debe calibrar para cada vehículo con un dinamómetro del motor. La información requerida es costosa de recolectar (Mahmod y van Arem, 2008; Handford, 2014).

➡ 6. Limitaciones de los modelos de emisiones de tráfico.

La creciente aceleración del cambio climático hace necesaria la construcción de modelos que procuren resultados válidos y precisos, que permitan mejorar la situación de las emisiones tanto a escala internacional, nacional, regional y especialmente urbana, donde las autoridades locales se enfrentan a dificultades para cumplir las normas de calidad del aire y otros objetivos de política ambiental especialmente en relación con límites máximos nacionales de emisiones. Sin embargo, la confiabilidad de las emisiones calculadas del tráfico en la carretera no es del todo satisfactoria.

El IPCC (2006) señala como causas posibles de incertidumbre en relación con los modelos para estimar las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero el sesgo (falta de exactitud) y el error aleatorio (variación aleatoria por encima o por debajo de un valor medio), por diversos motivos:

- i. Los modelos como simplificación de los sistemas reales no son exactos, así que cabe la posibilidad de que la programación informática contenga errores o aproximaciones; de que la resolución del modelo no sea representativa, o bien, la cobertura espacial y temporal no resulte plenamente satisfactoria.

- ii. La interpolación es la aplicación de un modelo dentro de un rango de entradas para las que se entiende que el modelo se considera válido, en algunos casos, es posible que se produzca una «extrapolación oculta» cuando se evalúa el modelo sobre la base de las combinaciones de valores de sus entradas para las cuales no se realizó la validación,
- iii. La extrapolación (aplicación del modelo más allá del dominio para el cual se sabe que las predicciones del modelo son válidas) puede conducir a la incertidumbre, Las formulaciones alternativas del modelo pueden dar lugar a diferentes estimaciones;
- iv. Las entradas del modelo, entre ellas los datos de la actividad y los parámetros, son por lo general aproximativas sobre la base de la información limitada lo que genera incertidumbres adicionales, más allá de la formulación del modelo.
- v.

En este sentido, el propio IPCC (2006) señala, en relación con los datos, que la incertidumbre puede provenir de:

- i. La no disponibilidad de datos porque no los hay (la similitud, analogía, extrapolación o interpolación pueden generar sustitutos),
- ii. La falta de representatividad de los datos por la ausencia de correspondencia completa entre las condiciones vinculadas a los datos disponibles y las condiciones vinculadas a las emisiones/absorciones o a la actividad real (esta fuente de incertidumbre es difícil de cuantificar)
- iii. Un error de muestreo aleatorio estadístico asociado a datos que significan una muestra aleatoria de tamaño finito y suele depender de la varianza de la población de donde se extrae la muestra y del tamaño de la muestra en sí (cantidad de puntos de datos), si la muestra no es adecuada pueden influir enormemente en los datos y llevar a conclusiones incorrectas (el error muestral es cuantificable utilizando métodos estadísticos *frecuentistas*, también llamados clásicos, suponiendo que los datos son una muestra aleatoria representativa -Frey, 2007-)
- iv. La generación de informes o clasificaciones erróneos, ya sea por una definición incompleta, o poco clara, o bien errónea, de una emisión o absorción, lo que suele derivar en sesgo.
- v. Los datos faltantes cuando, aun intentando efectuar las mediciones, no se encontró valor alguno o no se detectó, lo que puede acabar en sesgo o error aleatorio (en los casos en que los valores medidos se sitúan por debajo de un límite de detección, cabe estimar un límite superior sobre la incertidumbre).

Fallah (2014) recoge algunas de las fuentes más frecuentes de incertidumbre en los modelos de emisión de transporte asociada tanto a errores externos (están asociados a la entrada de variables del modelo) y a errores internos (asociados con errores en la entrada de variables internas del modelo de emisión en sí como factores de emisión). Entre los errores externos recoge las condiciones ambientales, los parámetros con variación temporal (como la temperatura), la composición de la flota de vehículos, el kilometraje del vehículo, los datos de tráfico, los métodos de estimación de emisiones basados en emisiones de estado estable que ignoran el funcionamiento transitorio del vehículo que caracteriza la operación del vehículo en el mundo real (para algunos modelos de emisión).

Entre los errores internos destaca los relacionados con los factores de emisión. Al respecto, sobre la base de las estimaciones de la AEA (2012) cabe señalar que la incertidumbre asociada a los factores de emisión de CO₂ del transporte es baja, ya que el contenido de carbono de los combustibles utilizados es bien conocido, aunque, para los gases no CO₂, los factores de emisión dependen de un amplio rango de factores contribuyentes entre los que se incluyen el tamaño del motor, la edad del vehículo, la velocidad y si el vehículo tiene o no un catalizador de 3 vías. Por lo tanto, la incertidumbre sobre los factores de emisión es alta, aunque la generada por la contribución a las emisiones totales es mucho menor.

Esta incertidumbre cabe elevarla considerando otros factores que influyen en las emisiones no siempre bien recogidos en las modelaciones como es el caso de la congestión. Grote et al. (2016) señalan que la congestión degrada las condiciones de tráfico por causa de aumento de ralentización, aceleración y frenado lo que influye fuertemente en las emisiones de CO₂ tanto como los viajeros / kilómetro recorridos, la categoría del vehículo y su velocidad y, sin embargo, no suele incluirse explícitamente en los modelos o, cuando se hace, se recurre a supuestos por lo general poco realistas.

Otros factores con influencia en las emisiones son, entre otros, el comportamiento del conductor y las estrategias de cambio de marchas; la pendiente del camino; la carga útil; el comienzo en frío; la temperatura ambiente; el aumento de la edad del vehículo o la falta de mantenimiento; el uso de auxiliares; y los vehículos que usan transmisiones o combustibles alternativos, muchos de ellos no siempre incluidos en los modelos, aunque su influencia ciertamente sea menor (Grote et al. 2016).

Por otra parte, la incertidumbre existente se agranda al considerar la aplicación de estos modelos en países en desarrollo o simplemente países menos desarrollados ya que son modelos pensados para los países avanzados, donde la disponibilidad de datos específicos resulta sensiblemente mayor. Las grandes diferencias existentes entre los sistemas de transporte, ciudades, economías, tecnología de los países desarrollados y los países en desarrollo pueden dar lugar resultados erróneos. Incluso, cuando existen adaptaciones de un modelo para países en desarrollo caso por

ejemplo del IVE (Emisión de Vehículos Internacionales) sus similitudes con los modelos de EE. UU son evidentes en cuanto a complejidad y requisitos de datos de entrada, muy difíciles de capturar en contextos no avanzados. La aplicación de estos modelos cuyo factor de emisión o la tasa básica de emisiones se basan en los Estados Unidos y Europa, viene a mejorar el error en las emisiones estimadas para el país en desarrollo (Alkafoury et al. 2013).

Por último, se ha de señalar que no resulta fácil comprobar la precisión general de los modelos de emisión del tráfico rodado (validación del modelo), debido a que los valores de emisión “verdaderos” son desconocidos y por tanto no es posible una constatación directa de los resultados a través de su medida, ya que esto requeriría constantes mediciones de emisiones para todos los vehículos en el área y el período en cuestión, de manera que solo la validación parcial del modelo es factible como señalan Smit et al., (2010) para quienes existen otras dificultades añadidas para la validación como la variación natural en las emisiones de tráfico o las características cambiantes de la flota que se modifican continuamente en el tiempo o bien la inexistencia de datos empíricos que se presenta en algunas situaciones.

En la revisión de la literatura llevada a cabo por estos autores analizando un total de 50 documentos e informes que contenían información sobre la validación del modelo y los resultados, se pone de manifiesto que los estudios de validación disponibles se limitaban a modelos específicos (o versiones de modelos) y situaciones específicas. Aunque algunos estudios que informaban sobre los resultados del modelado señalaban que estaban cerca de los valores observados, la mayoría de ellos ponían de manifiesto que los errores en las predicciones de emisiones podían ser bastante sustanciales tanto por errores internos como por errores externos, los primeros asociados con el modelo de emisión en sí (factores de emisión) y los segundos por errores en la entrada de variables del modelo (diferentes según sean estudios de validación a nivel de ruta o a nivel del área). Se concluye que la validación de los modelos de emisión de tráfico es difícil y solo está disponible información limitada, debiéndose incrementar la precisión del modelo y la calidad de los datos de entrada para mejorar la precisión de las predicciones de emisiones (Smit et al. 2010).

Bibliografía y fuentes documentales

- AEA (2012). Transport GHG Inventory summary Factsheet, UK GHG Inventory (UNFCCC coverage), en la red consultado 24-1-2018, https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/48420/1225-ghg-inventory-summary-factsheet-transport.pdf
- Agence Française de Développement (2015). La mobilité urbaine émettrice de solutions contre le dérèglement climatique, CODATU, Novembre. En la red, http://www.codatu.org/wp-content/uploads/climat_FR_V_ecran1.pdf.
- Alkafoury A., Bady M., Aly M. y Negm AM (2013). “Emissions modeling for road transportation in urban areas: state-of-art review”, 23rd International Conference on Environmental Protection is a Must, May 11-13, Alejandría. En la red, https://www.researchgate.net/publication/239729900_Emissions_Modeling_for_Road_Transportation_in_Urban_Areas_State-of-Art_Review
- Alonso, W. (1968). Predicting best with imperfect data, *Journal of the American Institute of Planners*, Vol. 34, No 4, 248-255.
- Anable, J., Martino, Ch., Tran, M., y Eyre, N. (2012). Modelling transport energy demand: A socio-technical approach, *Energy Policy* 41, 125–138, en la red. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.08.020>
- Bailey B. (1995): Atmospheric process evaluation of mobile source emissions, College of Engineering, Centre for Environmental Research and Technology (CE-CERT), University of California, Riverside, CA.
- Blanquart, C. (2013). Prendre en compte l'ensemble des problématiques lié au transport de marchandises, Espace Science et Société, junio, INSTITUT FRANCAIS DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DES TRANSPORTS, DE L'AMENAGEMENT ET DES RESEAUX, IFSTTAR, en la red, <http://www.ifsttar.fr/accueil/>.
- Baškovič, K. y Knez, M. (2013). A review of vehicular emission models, The International Conference on Logistics & Sustainable Transport 2013, 13–15 June Celje, Slovenia. <https://explore.researchgate.net/display/support/Research>
- Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems, *Proc Natl Acad Sci USA*, May 14; 99 (Suppl 3): 7280–7287. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC128598/>.
- Bongardt, D., Eichhorst, U., Dünnebeil, F. y Reinhard, C. (2016). Monitoring Greenhouse Gas Emissions of Transport Activities in Chinese Cities. A Step-by-Step Guide to Data Collection. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Final Report, Beijing, China. Consultado en la red 3-11-2017 http://transferproject.org/wp-content/uploads/2016/04/Monitoring-Greenhouse-Gas-Emissions_final.pdf.
- Boulter, P.G., Mc Crae, I.S., Barlow, T.J., (2007). A review of instantaneous emission models for road vehicles. En la red: <http://docs.niwa.co.nz/library/public/PPR267>.
- Campos, M.T. (2013): Diseño de una Metodología para la Estimación de Consumo Energético y Emisiones Contaminantes en Flotas de Transporte por Carretera. Escuela Superior de Ingenieros Universidad de Sevilla, Proyecto Fin de Carrera, 20 de mayo, Sevilla.
- Cillero, A., Martinelli, G. y Bouzada, P. (2008). Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por autobús y autocar, Monografías EnerTrans, nº 13. Madrid.
- Colvile, R.N., Hutchinson, E.J., Mindell, J.S. y Warren, R.F., (2001). The transport sector as a source of air pollution. *Atmospheric Environment* 35, 1537-1565. http://discovery.ucl.ac.uk/894/1/Millennium_rvw_final_october.pdf.
- Costa, M. y J. M. Baldasano (1996) Development of a Source Emission Model for Atmospheric Pollutants in the Barcelona Area. *Atmospheric Environment*, 30A, 2: 309-318.
- Departamento de Medio Ambiente y Política Territorial, Gobierno Vasco, (2013). 7 metodologías para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero. Departamento de Medio Ambiente y Política Territorial, Gobierno Vasco - Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental, Bilbao.
- Desjardins X. y Llorente M. (2009). Quelle contribution de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire à l'atténuation du changement climatique?, PUCA-PREBAT, Rapport juin, Paris.

- Dünnebeil, F., Knörr, W., Heidt, C., Heuer, C., y Lambrecht, U. (2017). Balancing Transport Greenhouse Gas Emissions in Cities – A Review of Practices in Germany. Transport Demand Management in Beijing, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH and the Beijing Transportation Research Center (BTRC). Final Report, October, Beijing, China. Consultado en la red 3-11-2017
<https://thepep.unece.org/sites/default/files/2017-06/Balancing%20Transport%20GHG%20in%20cities%20-%20a%20review%20of%20Practices%20in%20germany%20-%20Final%20Report.pdf>.
- Echenique M.H, Flowerdew A.D, Hunt J.D, Mayo T.R, Skidmore I.J, y Simmonds D.C (1990). The MEPLAN models of Bilbao, Leeds and Dortmund. *Transport Reviews* Vol. 10, Iss. 4, 1990, pp 309–322.
- Edelenbosch, OY, McCollum, DL, van Vuuren, DP, Bertram, C. Carrara, S. Daly, H. Fujimori, S. Kitous, A., Kyle, P., Broin, E O., Karkatsoulis, P. y Sano, F. (2016). Decomposing passenger transport futures: Comparing results of global integrated assessment models, en la red, consultado 10-1-2018.
<http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2016-post-print-decomposing-passenger-transport-futures-comparing-results-of-global-integrated-assessment-models.pdf>.
- Esteves-Booth, A., Muneer, T., Kubie, J. y Kirby, H. (2002). “A review of vehicular emission models and driving cycles,” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 216, August 2002, pp. 777-797.
- European Commission (2018). Sistemas de transporte inteligentes, MOVILIDAD Y TRANSPORTE, en la red, Última actualización: 22/01, https://ec.europa.eu/transport/themes/its_en.
- Fallah, M. (2014). Modélisation de l’impact du trafic routier sur la pollution de l’air et des eaux de ruissellement, Thèse de doctorat de l’Université Paris-Est, Paris.
- Fallah, M., André, M., Bonhomme, C. y Seigneur, C. (2012). Coupling Traffic, Pollutant Emission, Air and Water Quality Models: Technical Review and Perspectives, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 48, pp. 1794-1804.
- Frey, H.C. (2007). Quantification of Uncertainty in Emission Factors and Inventories, 16th Annual International Emission Inventory Conference – Emission Inventories: “Integration, Analysis and Communications”, en la red 24-1-2018. <https://www3.epa.gov/ttnchie1/conference/ei16/session5/frey.pdf>.
- Gendre, P. (coord.) (2008). Mutualisation des données transport, opportunité de référentiels pour l’information multimodale, CETE Méditerranée, febrero. En la red. <http://www.cete-mediterranee.fr/tt13/www/IMG/pdf/ref-imm-transp.pdf>.
- Grote, M., Williams, I., Preston, J., y Kemp, S. (2016). Including congestion effects in urban road traffic CO2 emissions modelling: Do Local Government Authorities have the right options? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 43: 95-106.
- Handford, D. (2014). Development and Applications of an Emissions Micro-Simulation Tool for Transportation Infrastructure Design, Tesis doctoral, Department of Mechanical Engineering University of Alberta.
- Hickman J., Hassel D., Joumard R., Samaras Z. y Sorenson S. (2003). Environnement, energy and transport. Written material extended version by EU-PORTAL, transport teaching material, based on MEET and COST program. En la red. http://www.eltis.org/sites/eltis/files/kt5_wm_en_pdf_ext_5.pdf.
- ICCT (2018). About the program, International Council on Clean Transportation. Consultado en la red 3-1-2018. <https://www.theicct.org/transportation-roadmap>.
- IPCC (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, Intergovernmental Panel on Climate Change, en la red, www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html.
- IPCC (2006). “Chapter 3: Mobile Combustion”. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendía L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan, pág. 3.1-3.78.
- Joumard, R. (1998). Methods of estimation of atmospheric emissions from transport: European scientist network /and scientific state-of-the-art. Action COST 319, INRETS.
- Kim, SH, Edmonds, JA, Lurz, J., Smith, S.J. y M. Wise (2006). “The ObjECTS Framework for Integrated Assessment: Hybrid Modeling of Transportation”. *Energy Journal* 27: 63-91.
- Liu, R. (2005). The DRACULA dynamic network microsimulation model, International Symposium on Transport Simulation, August 2002, Yokohama, and in *Simulation Approaches in Transportation Analysis: Recent Advanced and Challenges* (ed. Kitamura y Kuwahara), pp 23-56, Springer, en la red. https://www.researchgate.net/profile/Ronghui_Liu/publication/227115698_The_DRACULA_Dynamic_Network_Microsimulation_Model/links/0deec532838bd877e9000000.pdf.

- Linton, C., Grant-Muller, S. y Gale, W.F. (2015). Approaches and Techniques for Modelling CO2 Emissions from Road Transport, *Transport Reviews*, 35:4, 533-553, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01441647.2015.1030004>.
- López, J.M. y Sánchez, J. (2008). Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por coche y camión, *Monografías EnerTrans*, nº 12. Madrid.
- Lovric, M. y Raveau, S. (dirs) (2017) Behavioral models for land use, mobility and energy and resource use, en la red, consultado 22-12-2017. <https://its.mit.edu/behavioral-models>.
- Mahmod, M.M., y van Arem, B. (2008). A simulation framework for the impacts of an integrated road-vehicle system on local air quality, TRAIL Research School, Delft, October, en la red. <https://pdfs.semanticscholar.org/2833/684283a5f27df20c29fd90973838150b4b3d.pdf>.
- Medda, F. y Boarnett, M. G. (2005). An Analysis of the Effects of Urban Land Use on Transportation, en: Donaghy, K., Poppelreuter, S. and Rudinger, G. (eds.) *Social dimensions of sustainable transport, Transatlantic perspectives*. Ashgate, London, pp. 127-143.
- MEDDE (2012). Information CO2 des prestations de transports. Application de l'article L1431-3 du code des transports. Guide méthodologique, MEDDE (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie) à l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), Paris.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE (2016). Guía para el cálculo de la huella de carbono y para la elaboración de un plan de mejora de una organización, Oficina Española de Cambio Climático. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Versión 3, octubre, Madrid.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, GOBIERNO DE CHILE (2011). Informe País. Informe sobre el estado de medio ambiente 2011, MMA, Santiago de Chile, en la red http://www.mma.gob.cl/1304/articles-52016_Capitulo_1.pdf.
- MINISTERE DE LA REGION DE BRUXELLES-CAPITALE (1998). Ministry of the Region of Brussels-Capital (1998) Plan IRIS - Plan Régional de Déplacements, Regional Mobility Plan, Ministère de la Région de Bruxelles-Capitale. Bruxelles.
- Morlán, I. (2010). Modelo de Dinámica de Sistemas para la implantación de Tecnologías de la Información en la Gestión Estratégica Universitaria, Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco, San Sebastián.
- Nocera, S., Basso, M., y Caballero, F. (2017). Micro and Macro modelling approaches for the evaluation of the carbon impacts of transportation, *Transportation Research Procedia* 24, 146-154.
- Oficina Catalana del Cambio Climático, Generalitat de Catalunya (2011): Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Versión 2011. Oficina Catalana del Cambio Climático, Departament de Territori i Sostenibilitat, Barcelona.
- Ortuzar, J. D. y Willumsen, L. G. (2011). *Modelling transport*, 4th. Edition, John Wiley, Sons Ltd. Chichester, West Sussex.
- PPMC (2016). Transports décarbonés: une dynamique de transformation cap sur l'objectif de Paris: feuille de route mondiale pour un transport au service d'une économie « zéro émission nette », PPMC (Paris Process on Mobility and Climate) pour le compte de l'équipe du Global Climate Action Agenda Transport, en la red <http://www.ppmc-transport.org/wp-content/uploads/2016/11/An-actionable-Vision-of-Transport-Decarbonization-FR.pdf>.
- Racero, J., Escámez, J., Bada, M. y Martín, C. (2008). Diagnóstico energética y medioambiental debida al transporte, CONAMA9 Del 1 al 5 de diciembre, Palacio Municipal de Congresos del Campo de Las Naciones, Madrid.
- RARE-ADEME (2011). Observation des consommations énergétiques et émissions de CO2 du secteur des transports au niveau regional, Agence de l' Environnement et de la Maîtrise de l' Energie y la Réseau des Agences Régionales de l'Energie, Junio, Paris.
- Rios Prado, R. (2015). Modelo de transporte de mercancías para la planificación de sistemas multimodales. Tesis doctoral, Universidade Da Coruña. http://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/16357/Rios_Prado_Rosa_TD_2015.pdf?sequence=4.
- Roads and Maritime Services, NSW (2013). Traffic Modelling Guidelines, NSW Roads & Maritime Services (RMS), en la red <http://www.rms.nsw.gov.au/business-industry/partners-suppliers/documents/technical-manuals/modellingguidelines.pdf>.
- Roca, J. (2003). La delimitación de la ciudad: ¿una cuestión imposible?, *Ciudad y Territorio. Estudios Territoriales*, XXXV, nº 135, pp. 17-36.

- Samaras, Z., Negrenti, E., Keller, M. y Joumard, R. (1999). 'Inventorying tools for road transport', en Joumard, R. (editor): *Methods of estimation of atmospheric emissions from transport: network and state-of-the-art*, INRETS report N° LTE 9901, action COST 319 final report. March. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01253787/document>.
- Scapecchi, P. (2010). *L'Évaluation des coûts macroéconomiques des politiques de réduction des émissions de gaz a effet de serre*, Les Cahiers de la DG Trésor – n° 2010-05 – Octobre, Paris.
- Schäfer, A. (2012). *Introducing behavioral change in transportation into Energy/Economy/Environment models*. Draft Report for "Green Development" Knowledge Assessment of the World Bank, University of Cambridge, UK.
- Schipper, L., Fabian, H, y Leather, J, (2009). *Transport and Carbon Dioxide Emissions: Forecasts, Options Analysis, and Evaluation*, Asian Development Bank Sustainable Development Working Paper Series, 9, diciembre, Manila, Philippines, en la red: <http://www.indiaenvironmentportal.org.in/files/Transport-CO2-Emissions.pdf>.
- Schönduwe, R, y Lennert, F. (2016): *Future mobility and decarbonisation. Visioning transport futures. Pathways to decarbonisation in transport scenarios*. Executive summary, Stiftung-mercator, Essen, Germany, https://www.innoz.de/sites/default/files/future_mobility_and_decarbonisation_executive_summary.pdf.
- Smit, R., (2006). *An Examination of Congestion in Road Traffic Emission Models and their Application to Urban Road Networks*. Thesis submitted for Doctor of Philosophy, Griffith University, Brisbane, Australia.
- Smit, R., Brown, A.L., y Chan, Y.C., (2008). *Do air pollution emissions and fuel consumption models for roadways include the effects of congestion in the roadway traffic flow?* *Environmental Modelling and Software* 23 (10), 1262-1270.
- Smit, R (2008). *Errors in model predictions of NOx traffic emissions at road level – impacts of input data quality*, *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, Vol 116, pp. 255-269. <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/AIR08/AIR08027FU1.pdf>.
- Smit, R., Ntziachristos, L. y Boulter, P. (2010). *Validation of road vehicle and traffic emission models. A review and meta-analysis*. *Atmospheric Environment*, 44, 2943 -2953.
- Stern, E. y Richardson, H. (2005). *A New Research Agenda for Modelling Travel Choice and Behaviour*, en: Donaghy, K., Poppelreuter, S. y Rudinger, G. (eds.) *Social dimensions of sustainable transport: Transatlantic perspectives*. Ashgate, London, pp. 144-163.
- Thaller, C, Niemann, F., Dahmenc, B., Clausend, U., y Leerkamp, B. (2017). *Describing and explaining urban freight transport by System Dynamic*, *Transportation Research Procedia* 25, 1075–1094.
- Thunis, P., Degraeuwe, B., Cuvelier, K., Guevara, M., Tarrason, L. y Clappier A. (2016). *A novel approach to screen and compare emission inventories*, *Air Qual Atmos Health*. 2016; 9: 325–333. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4865527/>.
- Trépanier, M.- P. y Coelho, L.C. (2017). *Facteurs et méthodes de calcul d'émissions de gaz à effet de serre, CIRRELT-2017-08*, février, en la red, <https://www.cirrelt.ca/DocumentsTravail/CIRRELT-2017-08.pdf>
- Waisman, H., Guivarch, C., y Lecocq, F. (2013). *The transportation sector and low-carbon growth pathways: introducing urban, infrastructure and spatial determinants of mobility*. *Climate Policy*, Taylor & Francis, 13 (1), pp.106-129.
- Wang J., Lu H., Peng H. (2008). *System Dynamics Model of Urban Transportation System and Its Application*. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 8 (3), pp. 83-89.
- Weigel, B., Southworth F y Meyer, M. (2009). *Calculators for Estimating Greenhouse Gas Emissions from Public Transit Agency Vehicle Fleet Operations*, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, pp. 125-133.
- Weyant, J. (2017). *Some Contributions of Integrated Assessment Models of Global Climate Change*, *Review of Environmental Economics and Policy*, Volume 11, Issue 1, 1 January, pp. 115–137, <https://doi.org/10.1093/reep/rew018>.
- Willumsen, L. (1985). *Modelos simplificados de transporte urbano*, *Revista EURE*, N° 33, en la red <http://eure.cl/index.php/eure/article/viewFile/970/81>.
- World Resources Institute, ICLEI y C40 (2014). *Protocolo Global para Inventarios de Emisión de Gases de Efecto Invernadero a Escala Comunitaria. Estándar de contabilidad y de reporte para las ciudades*. World Resources Institute, ICLEI y C40. USA. En la red http://c40-production-images.s3.amazonaws.com/other_uploads/images/1016_GPC_Full_MASTER_v6_ESXM-02-02_FINALpdf.original.pdf?1486373653.

Números anteriores:



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo №1
Enero-Febrero 2011
Una interpretación sobre el bajo crecimiento económico en México
Isaac Leobardo Sánchez Juárez



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo № 2
Marzo-Abril 2011
Análisis exploratorio de datos espaciales de la segregación urbana en Ciudad Juárez
Jaime García de La Rosa



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo № 3
Mayo-Junio 2011
Diagnóstico y perspectivas del sector terciario en las regiones mexicanas
Rosa María García Almada



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo № 4
julio-Agosto 2011
Desarrollo y pobreza en México. Los índices IDH y FGT en la primera década del siglo XXI
Mynna Límás Hernández



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo №5
Septiembre-Octubre 2011
Las transferencias intergubernamentales y el tamaño del gobierno federal
Raúl Alberto Ponce Rodríguez



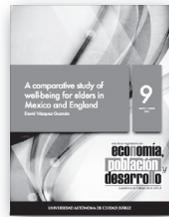
Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo №6
Noviembre-Diciembre 2011
El sector servicios en las ciudades fronterizas del norte de México
José Luis Manzanares Rivera



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo №7
Enero-Febrero 2012
Desplazamientos forzados: migración e inseguridad en Ciudad Juárez, Chihuahua
María del Socorro Velázquez Vargas



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo №7
Enero-Febrero 2012
Economía y desarrollo en Chihuahua, México. Una propuesta de análisis regional
Jorge Arturo Meza Moreno



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo № 9
Mayo - Junio 2012
A comparative study of well-being for elders in Mexico and England
David Vázquez Guzmán



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo № 10
Julio - Agosto 2012
Political competition and the (in)effectiveness of redistribution in a federation
Ikuho Kochi y Raúl Alberto Ponce



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo № 11
Septiembre - Octubre 2012
Análisis y determinantes de la productividad legislativa en México (2009-2012)
Bárbara Briones Martínez



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo № 12
Noviembre - Diciembre 2012
Agricultura orgánica y desarrollo: un análisis comparativo entre países de América Latina
Sofía Boza Martínez



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo № 13
Enero - Febrero 2013
Dinámicas demográficas y crisis socioeconómica en Ciudad Juárez, México, 2000-2010
Wilebaldo Martínez Toyos



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo № 14
Marzo - Abril 2013
Capital social y desarrollo industrial. El caso de Prato, Italia
Pablo Galaso Reca



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo № 15
Marzo - Junio 2013
Política industrial activa como estrategia para el crecimiento de la economía mexicana
Isaac Leobardo Sánchez Juárez



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo № 16
Julio - Agosto 2013
Desarrollo local y organización productiva en el noroeste de Uruguay
Adrián Rodríguez Miranda



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo № 17
Septiembre - Octubre 2013
Vulnerabilidad social y vivienda en Sonora, México
Jesús Enriquez Acosta y Sarah Bernal Salazar



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo № 18
Noviembre - Diciembre 2013
Cheques de política monetaria en México: una aplicación del modelo SVAR, 1995-2012
Adelido García-Andrés y Leonardo Torre Cepeda



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo № 19
Enero - Febrero 2014
Iniciar, planear y motorizar
Pablo Martín Urquiza y Juan Ignacio Sánchez Gutiérrez



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo № 20
Marzo - Junio 2014
Beneficio económico y turismo evocativo. El caso de las termas en Michoacán, México
Carlos Francisco Ortiz Paniagua y Georgina Jatzire Arévalo Pacheco



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo № 21
Mayo - Junio 2014
Crisis inmobiliaria, recesión y endeudamiento masivo, 2002-2011
Miguel Ángel Rivera Ríos



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo № 22
Julio - Agosto 2014
Ficciones en el comercio interregional: una aproximación basada en datos municipales
Jorge Díaz Lanchas y Carlos Llano Verduras



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo № 23
Septiembre - Octubre 2014
Formando microempresas: los servicios de desarrollo de negocio para reforzar el impacto de los microcréditos
Olga Biosca Arturiano



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo № 24
Noviembre - Diciembre 2014
El crecimiento de las regiones y el paradigma del desarrollo divergente. Un marco teórico
Luis Enrique Gutiérrez Casas



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo № 25
Enero - Febrero 2015
Progressivity and decomposition of VAT in the Mexican border, 2014
Luis Huesca Reynosa, Arturo Robles Valencia y Abdelkrim Arsar



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo № 26
Marzo - Abril 2015
Capital Social y desempeño empresarial: la industria metalmeccánica en Ciudad Juárez, México
Ramón Jiménez Castañeda y Gabriela Sánchez Bazán



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo № 27
Mayo-Junio 2015
La curva de Phillips para la economía cubana. Un análisis empírico
Malena Portal Boza, Damián Feito Madrigal y Sergio Valdés Pasarón



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo № 28
Julio - Agosto 2015
Género, migración y ruralidad en Chile.
Maruja Cortés y Sofía Boza



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo № 29
Septiembre - Octubre 2015
Aceleración de la urbanización global y movilidad sostenible
Maruja Cortés y Sofía Boza



Economía, población y desarrollo.
Cuadernos de trabajo № 30
Noviembre - Diciembre 2015
The asymmetric effects of monetary policy on housing across the level of development
Jorge Rafael Figueroa Eleas, Pablo Martín Urbano y Juan Ignacio Sánchez Gutiérrez

Números anteriores:



Economía, población y desarrollo
Cuadernos de trabajo No 31
Enero - Febrero 2016
A composite leading cycle indicator for Uruguay
Pablo Galasso Reza y Sandra Rodríguez López



Economía, población y desarrollo
Cuadernos de trabajo No 32
Marzo - Abril 2016
Increased trade openness, productivity, employment and wages: a difference-in-differences approach
Silvia Adriana Pichoffi Geronazzo



Economía, población y desarrollo
Cuadernos de trabajo No 33
Mayo - Junio 2016
Competitividad local en el norte de México: el caso de la zona metropolitana de Monterrey
Carlos Gómez Díaz de León y Gustavo Hernández Martínez



Economía, población y desarrollo
Cuadernos de trabajo No 34
Julio - Agosto 2016
El desarrollo local y los sistemas de encadenamientos productivos en el sur de Tlaxcala, México
María del Pilar Jiménez Márquez



Economía, población y desarrollo
Cuadernos de trabajo No 35
Septiembre - Octubre 2016
Características y determinantes de la informalidad laboral en México
Enrique Cuevas Rodríguez, Hugo Antolin de la Torre Ruiz y Saúl Oswaldo Regla Dávila



Economía, población y desarrollo
Cuadernos de trabajo No 36
Noviembre - Diciembre 2016
Desarrollo regional y terciarización: los casos de Guanajuato y Querétaro, México
Jordy Micheli Thirion



Economía, población y desarrollo
Cuadernos de trabajo No 37
Enero - Febrero 2017
Sostenibilidad de pequeños productores en Tlaxcala, Puebla y Oaxaca, México
Tzatzil Isela Bustamante Lara, Benjamin Carrera Chávez y Rita Schwentesius Rindermann



Economía, población y desarrollo
Cuadernos de trabajo No 38
Marzo - Abril 2017
Estructura regional y polarización económica-poblacional en el centro de México
Alejandra Berenice Trejo Nieto



Economía, población y desarrollo
Cuadernos de trabajo No 39
Mayo - Junio 2017
Orígenes del neoestructuralismo latinoamericano
Carlos Mallorquin Suzarte



Economía, población y desarrollo
Cuadernos de trabajo No 40
Julio - Agosto 2017
Crecimiento económico en México y manufactura global
Alfredo Erguiz Espinal y Roberto Ramírez Rodríguez



Economía, población y desarrollo
Cuadernos de trabajo No 41
Septiembre - Octubre 2017
Neoliberalización, turismo y socioeconomía en Baja California Sur, México
Mannuel Angeles, Alba E. Gámez y Ricardo Bórquez



Economía, población y desarrollo
Cuadernos de trabajo No 42
Noviembre - Diciembre 2017
Las microempresas y la reducción de la pobreza en Jalisco, México
María Alejandra Santos Huerta y Leo Guzmán Anaya



Economía, población y desarrollo
Cuadernos de trabajo No 43
Enero - Febrero 2018
Las zonas económicas especiales en el suroeste de México y el desarrollo regional
José Manuel Orozco Plascencia



Economía, población y desarrollo
Cuadernos de trabajo No 44
Marzo - Abril 2018
Relocalización de la industria manufacturera en México en la apertura comercial 1980-2014
Jorge Rafael Figueroa Elenes, Tomás Arroyo Parra y Aneliss Aragón Jiménez



Economía, población y desarrollo
Cuadernos de trabajo No 45
Mayo - Junio 2018
Agencia y Pobreza en la población económicamente activa mexicana
María Teresa Herrera Rendón Nebel y Miguel Ángel Díaz Carreño



Economía, población y desarrollo
Cuadernos de trabajo No 46
Julio - Agosto 2018
Reestructuración industrial y empleo en Baja California, México (1989-2014)
Martín Ramírez Urquidí, Juan Antonio Meza Fregoso y Luis Armando Becerra Pérez



Economía, población y desarrollo
Cuadernos de trabajo No 47
Septiembre - Octubre 2018
Ciencia, tecnología e innovación en México: un análisis de la política pública
Claudia Díaz Pérez y Moisés Alejandro Alarcón Osuna



Economía, población y desarrollo
Cuadernos de trabajo No 48
Noviembre - Diciembre 2018
Los límites del crecimiento económico en la frontera norte de México
Luis Enrique Gutiérrez Casas



Economía, población y desarrollo
Cuadernos de trabajo No 49
Enero - Febrero 2019
La era de Trump y sus impactos en la frontera norte de México
Dirección General Noroeste
Varios autores



Economía, población y desarrollo
Cuadernos de trabajo No 50
Marzo - Abril 2019
Diversificación productiva y especializaciones sectoriales en Chile
Ignacio Rodríguez Rodríguez Paulina Sanluz Martínez



Economía, población y desarrollo
Cuadernos de trabajo No 51
Mayo - Junio 2019
Impacto de la homologación del IVA en el consumo de los hogares de Baja California, Baja California Sur y Quintana Roo, México
Rolando Israel Valdez Ramírez y Emilio Hernández Gómez



Economía, población y desarrollo
Cuadernos de trabajo No 52
Julio - Agosto 2019
Las remesas internacionales del PIAT y su impacto en el capital humano
Román Sánchez Dávila Lidia Carvajal Gutiérrez y Oswaldo García Salgado



Economía, población y desarrollo
Cuadernos de trabajo No 53
Septiembre - Octubre 2019
How economics forged power
Carlos Mallorquin

➤ Normas Editoriales

I. Para el documento general:

Tipo de letra: Times New Roman.

Tamaño: 11 puntos.

Interlineado: 1.5 espacios.

Títulos y subtítulos:

El texto principal en 11 puntos. Títulos 12 puntos (en resaltado). Subtítulos 11 puntos. Cada título y subtítulo deberá numerarse bajo el siguiente orden: 1, 1.1, 2, 2.1, 2.2...

La extensión máxima de los cuadernos de trabajo será de 40 cuartillas.

La primera vez que se emplee una sigla en el texto se especificará primero su equivalencia completa y después la sigla.

II. Hoja de presentación:

Título:

14 puntos, centrado, resaltado.

Nombre de autor(es):

12 puntos

Resumen y abstract:

Debe incluir resumen en español y abstract (diez puntos), no mayor a 250 palabras

Palabras clave:

Incluir entre tres y cinco palabras clave, en español e inglés

Referencia del autor o autores:

Institución de adscripción, grado académico y líneas-grupos de investigación que desarrolla y a los que pertenece.

III. Sistema de referencia de citas:

Harvard-APA

Las citas bibliográficas en el texto deberán incluir entre paréntesis sólo el apellido del autor, la fecha de publicación y el número de página; por ejemplo: (Quilodrán, 2001: 33).

IV. Notación en sección de bibliografía y fuentes de información:

Se deberá incluir al final del texto. Toda referencia deberá estar mencionada en el texto o notas de pie de página.

Cada referencia iniciará con el primer apellido o los apellidos, luego el nombre del autor, y después, entre paréntesis, el año de publicación seguido de un punto. Ejemplos:

Se deberá incluir al final del texto. Toda referencia deberá estar mencionada en el texto o notas de pie de página.

Cada referencia iniciará con el primer apellido o los apellidos, luego el nombre del autor, y después, entre paréntesis, el año de publicación seguido de un punto. Ejemplos:

Artículo:

Ros, Jaime (2008). "La desaceleración del crecimiento económico en México desde 1982", en Trimestre Económico, vol. 75, núm. 299, pp. 537-560.

Libro:

Villarreal, René (2005). Industrialización, competitividad y desequilibrio externo en México.

Un enfoque macroindustrial y financiero (1929-2010), México, Fondo de Cultura Económica.

Capítulo de libro:

Castillo, Manuel Ángel (2003). “La política de inmigración en México: un breve recuento”, en Manuel Ángel Castillo, Alfredo Lattes y Jorge Santibáñez (coords.), Migración y fronteras, Tijuana, El Colegio de la Frontera Norte / Asociación Latinoamericana de Sociología / El Colegio de México, pp. 425-451.

V. Notas de pie de página:

Se utilizarán para hacer indicaciones complementarias, aclaraciones o ampliación de una explicación. La notas de pie de página en Times New Roman, 10 puntos.

VI. Tipología de imágenes dentro del texto:

Cuadro

Gráfica

Diagrama

Mapa

Figura

Todas las imágenes deben ser numeradas y mencionadas dentro del texto. A toda imagen debe incluirse la fuente.

Las indicaciones de la imagen: tipo y número de imagen, título de imagen y fuente se escriben en 10 puntos. En el texto poner como imagen los mapas, figuras, gráficas y diagramas –con el ánimo de no perder el formato realizado por el autor.

VII. Ecuaciones y fórmulas:

Si se utilizan ecuaciones o fórmulas deberá utilizarse el editor de ecuaciones de Word y numerarse.

VIII. Envío de trabajos

Los trabajos deben ser enviados a la dirección de correo: lgtz@uacj.mx. Con el Dr. Luis Enrique Gutierrez Casas, editor de esta publicación.

La aceptación de cada colaboración dependerá de la evaluación de dos dictaminadores especialistas en la materia que se conservarán en el anonimato, al igual que el autor (autores) para efectos de la misma.

➤ Editorial Guidelines

I. For General Document:

Font type: Times New Roman.

Size: font size 11.

Paragraph: 1.5 line spacing.

Titles and subtitles: Main text font size 11. Titles font size 12 (Bold). Subtitles font size 11.

Each title and subtitle should be numbered in the following order: 1, 1.1, 2, 2.1, 2.2...

The maximum length of the workbooks will be 40 pages.

The first time an abbreviation is used in the text will be specified first complete equivalence and then stands.

II. Front cover:

Title:

Font size 14, centered, Bold.

Author name(s):

Font size 12.

Abstract:

It should include abstract in Spanish and abstract (font size 10), no more than 250 words.

Keywords:

Include three to five keywords, in Spanish and English.

Reference of author:

Institution of affiliation, academic degree and line-developed by research groups and belonging.

III. Bibliographical appointment system:

Harvard-APA

Citations in the text should include between parentheses only the author's name, publication date and page number, for example:

(Quilodrán, 2001: 33).

IV. Notation about Bibliography section and Information fonts:

Should be included at the end of the text. All references must be mentioned in the text or footnotes page.

Each reference starts with the first name or last name, then the name of the author, and then, in parentheses, the year of publication followed by a period. Examples:

Article:

Ros, Jaime (2008). "La desaceleración del crecimiento económico en México desde 1982", en Trimestre Económico, vol. 75, núm. 299, pp. 537-560.

Book:

Villarreal, René (2005). Industrialización, competitividad y desequilibrio externo en México. Un enfoque macroindustrial y financiero (1929-2010), México, Fondo de Cultura Económica.

Book chapter:

Castillo, Manuel Ángel (2003). "La política de inmigración en México: un breve recuento", en Manuel Ángel Castillo, Alfredo Lattes y Jorge Santibáñez (coords.), Migración y fronteras, Tijuana, El Colegio de la Frontera Norte / Asociación Latinoamericana de Sociología / El Colegio de México, pp. 425-451.

V. Footnotes:

Must be used to make additional indications, clarification or expansion of an explanation. The footnotes must be in Times New Roman, font size 10.

VI. Image typology inside text:

Picture
Graph
Diagram
Map
Figure

All images must be numbered and mentioned in the text, should include the source image. The indications of the image: type and number of image, image title and source are written in 10 font size. In the text set as image maps, figures, graphs and charts-with the intention of not losing the formatting by the author.

VII. Equations and Formulae:

When using equations or formulas should be used in Microsoft Word equation editor and numbered.

VIII. Paper sending

Entries must be sent to the email address: lgtz@uacj.mx. With Dr. Luis Enrique Gutiérrez Casas, editor of this publication.

Acceptance of each collaboration will depend on the evaluation of two examiners skilled in the art to be kept anonymous, like the author(s) for the same purposes.



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA DE
CIUDAD JUÁREZ



Publicacion afiliada a la

**Red
Iberoamericana
de Estudios
del Desarrollo**

Esta obra se editó y terminó de imprimir en
Ciudad Juárez, Chihuahua, México

estudios regionales en
**economía,
población
y
desarrollo**

cuadernos de trabajo de la UACJ



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA DE
CIUDAD JUÁREZ

**Cuadernos de Trabajo de la Universidad Autónoma
de Ciudad Juárez, número 54, noviembre - diciembre de 2019**

Director y editor

Dr. Luis Enrique Gutiérrez Casas

Comité editorial

Sección internacional

Dra. Sofía Boza Martínez (Universidad de Chile, Chile)
Dra. Olga Biosca Artiñano (Glasgow Caledonian University, Reino Unido)
Dra. Ángeles Sánchez Díez (Universidad Autónoma de Madrid, España)
Dr. Thomas Fullerton Mankin (University of Texas at El Paso, Estados Unidos)
Dr. Adrián Rodríguez Miranda (Universidad de la República, Uruguay)
Dra. Ikuho Kochi (Kanazawa University, Japón)

Sección local

(Universidad Autónoma de Ciudad Juárez)

Dra. Myrna Limas Hernández
Dra. Rosa María García Almada
Dr. Raúl Alberto Ponce Rodríguez
Dr. Isaac Leobardo Sánchez Juárez
Dr. Héctor Alonso Barajas Bustillos
Dr. Juan Carlos Medina Guirado

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
Cuadernos de Estudios Regionales en
Economía, Población y Desarrollo
ISSN 2007-3739
Cuerpo Académico de Estudios Regionales en
Economía, Población y Desarrollo

Edición impresa:

ISSN 2007-3739

Edición digital:

No. de reserva 04-2019-050218151500



UACJ CUERPOS
ACADÉMICOS

www.estudiosregionales.mx



Publicación afiliada a la Red Iberoamericana de
Estudios del Desarrollo

© Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
Avenida Plutarco Elías Calles #1210, Fovissste Chamizal
Ciudad Juárez, Chih., México.
www.uacj.mx