



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

***Recopilación de las  
principales herramientas e  
indicadores en la relación  
tráfico-emisiones***

---

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Civil.

**Autor**

David Agüera Garre

**Directora**

Pilar Jiménez Gómez



**Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y  
de Ingeniería de Minas.**

Cartagena, 2017

## Índice

1. INTRODUCCIÓN .....	5
2. MARCO DE REFERENCIA .....	6
2.1 CONCEPTO DE MOVILIDAD SOSTENIBLE Y SU RELACIÓN CON EL TRANSPORTE .....	6
2.2 EFECTOS EXTERNOS DEL TRANSPORTE .....	8
2.2.1 Movilidad de viajeros .....	10
2.2.2 Transporte de mercancías.....	13
2.3 IMPACTOS DEL TRANSPORTE URBANO EN ESPAÑA EN RELACIÓN A LA MOVILIDAD SOSTENIBLE .....	14
2.3.1 Consumo energético .....	14
2.3.2 Emisiones.....	15
2.3.3 Ruido .....	16
2.3.4 Accidentes .....	16
2.3.5 Congestión.....	16
2.3.6 Consumo de espacio .....	16
2.3.7 Exclusión social y justicia social.....	17
2.3.8 Salud.....	17
2.3.9 Costes externos .....	17
2.4 CALIDAD DEL AIRE Y SU RELACIÓN CON LAS EMISIONES EN EL TRANSPORTE .....	18
2.4.1 Emisiones.....	19
2.4.2 Diferencias entre motores diésel-gasolina.....	27
2.5 PLAN DE MOVILIDAD SOSTENIBLE .....	28
3. ESTUDIO DE EMISIONES .....	31
3.1 METODOLOGÍA NTZIACHRISTOS AND SAMARAS (2000) – COPERT III.....	33
3.1.1 Emisiones en caliente.....	33
3.1.2 Emisiones en frío .....	35
3.1.2.1 Información adicional requerida para las emisiones en frío.....	36
3.1.2.2 Relación entre factores de emisión en frío y en caliente.....	38
3.1.3 Emisiones evaporativas .....	44
3.1.3.1 Emisiones evaporativas diurnas .....	45
3.1.3.2 Desagregación espacial de las emisiones evaporativas diurnas .....	46
3.1.3.3 Información adicional requerida.....	48
3.1.3.4 Emisiones evaporativas por detención .....	49

3.1.3.5 Desagregación espacial de las emisiones evaporativas por detención .....	50
3.1.3.6 Información adicional requerida .....	51
3.1.3.7 Emisiones evaporativas por recorrido .....	52
3.1.3.8 Desagregación espacial de las emisiones evaporativas por recorrido.....	54
3.1.3.9 Información adicional requerida .....	55
3.2 METODOLOGÍA AGENCIA EUROPEA DE MEDIO AMBIENTE (2009) – COPERT IV .....	56
3.2.1 Emisiones en caliente .....	58
3.2.1.1 Cálculo IMD por tramos .....	59
3.2.1.2 Desagregación temporal .....	60
3.2.1.3 Desagregación espacial .....	61
3.2.2 Emisiones en frío .....	61
3.2.2.1 Parámetro $\beta d$ .....	62
3.2.3 Emisiones evaporativas .....	63
3.2.3.1 Emisiones evaporativas diurnas .....	64
3.2.3.2 Emisiones evaporativas por detención .....	65
3.2.3.3 Emisiones evaporativas por recorrido .....	66
3.2.4 Emisiones de desgaste .....	68
3.2.4.1 Emisiones de desgaste de frenos .....	69
3.2.4.2 Emisiones por desgaste de neumáticos .....	69
3.2.4.3 Emisiones por abrasión de pavimento .....	70
3.2.5 Resuspension.....	70
3.3 METODOLOGÍA CORINE AIRE .....	71
3.3.1 Emisiones de CO, NO <sub>x</sub> , COV, CH <sub>4</sub> y PST.....	73
3.3.2 Emisiones de HAP y DIOX .....	73
3.3.3 Emisiones de N <sub>2</sub> O y NH <sub>3</sub> .....	74
3.3.4 Emisiones de SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> y metales pesados .....	74
3.3.5 Emisiones de COVNM por evaporación .....	76
3.3.6 Emisiones de partículas en suspensión, HAP y metales pesados por desgaste de neumáticos y frenos .....	80
3.3.7 Emisiones de partículas en suspensión por abrasión del pavimento .....	82
3.4 COMPARATIVA DE METODOLOGÍAS .....	82
3.5 OTRAS HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS.....	83
4. CONCLUSIÓN .....	85
5. BIBLIOGRAFÍA .....	90

## Índice de figuras

Figura 1. Círculo vicioso de la movilidad insostenible. Fuente: Glosario de Movilidad Sostenible	7
Figura 2. Ciclo de movilidad urbana. Fuente: Guía PMUS 2006.....	10
Figura 3. Volumen del transporte de mercancías y el PIB en España, Cataluña y Unión Europea en base 2000. Fuente: IDESCAT. ....	13
Figura 4. Antigüedad del parque de camiones de reparto. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Guía PMUS 2006. ....	14
Figura 5. Densidad de población y consumo anual de energía por habitante. Fuente: Guía PMUS 2006.....	15
Figura 6. Emisiones del sector transporte. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Guía PMUS 2006.....	16
Figura 7. Costes medios externos por medios de transporte de pasajeros. Fuente: Guía PMUS 2006.....	17
Figura 8. Boina de contaminación sobre Madrid (Noviembre 2016). Fuente: El País. ....	19
Figura 9. Evolución de las emisiones de CO <sub>2</sub> en España. Fuente: CNMC.....	21
Figura 10. Evolución de las emisiones de CH <sub>4</sub> y N <sub>2</sub> O en España. Fuente CNMC. ....	22
Figura 11. Evolución de las emisiones de CO en España. Fuente: CNMC. ....	23
Figura 12. Evolución de las emisiones de COVNM y NO <sub>x</sub> en España. Fuente: CNMC. ....	24
Figura 13. Evolución de las emisiones de NH <sub>3</sub> y SO <sub>2</sub> en España. Fuente CNMC. ....	25
Figura 14. Dieselización del parque de vehículos ligeros. Fuente: Calidad del aire urbano, salud y tráfico rodado.....	27
Figura 15. Esquema metodológico del inventario de emisiones del tráfico rodado. Fuente: Inventario de emisiones atmosféricas del tráfico rodado en España.....	32
Figura 16. Evolución del parámetro $\beta$ en función de la temperatura del aire para una longitud de trayecto de 6.31 km. Fuente: Inventario de emisiones atmosféricas del tráfico rodado en España. ....	37
Figura 17. Relación entre los factores de emisión en frío y en caliente para CO. Fuente: Inventario de emisiones atmosféricas debidas al tráfico rodado en España.....	40
Figura 18. Relación entre los factores de emisión en frío y en caliente para NO <sub>x</sub> . Fuente: Inventario de emisiones atmosféricas debidas al tráfico rodado en España.....	41
Figura 19. Relación entre los factores de emisión en frío y en caliente para COV. Fuente: Inventario de emisiones atmosféricas debidas al tráfico rodado en España.....	41
Figura 20. Relación entre los factores de emisión en frío y en caliente para Consumo de Combustible. Fuente: Inventario de emisiones atmosféricas debidas al tráfico rodado en España. ....	42
Figura 21. Variación del término FE (frío/caliente) - 1 para el cálculo de las emisiones en frío. Fuente: Inventario de emisiones atmosféricas del tráfico rodado en España.....	43
Figura 22. Diagrama de flujo de las emisiones producidas por el transporte por carretera. Fuente: Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos por tráfico rodado en España en el año 2009.....	57
Figura 23. Contaminantes considerados en el tráfico rodado. Fuente: Inventario Nacional de Emisiones MAPAMA (2012) .....	72

## Índice de tablas

Tabla 1. Impactos negativos del transporte. Fuente: Elaboración propia con datos del Proyecto Innpronta.....	9
Tabla 2. Datos de movilidad en España por tamaños de municipio. Fuente: MOVILIA.....	11
Tabla 3. Antigüedad del parque de vehículos en España. Fuente: DGT.....	12
Tabla 4. Costes e impactos del transporte y su relación con el reparto modal. Fuente: Guía PMUS 2006.....	12
Tabla 5. Consumo total de energía primaria por sectores. Fuente: Guía PMUS 2006. ....	14
Tabla 6. Evolución del número de ciudades españolas en función de su tamaño. Fuente: Guía PMUS 2006.....	29
Tabla 7. Medidas propuestas en un PMUS en relación a su área de intervención. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Guía PMUS 2006.....	30
Tabla 8. Fracción másica según tamaño de partícula. ....	69
Tabla 9. Pautas de conducción. Fuente: Inventario Nacional de Emisiones MAPAMA (2012)...	72
Tabla 10. Comparativa de metodologías. Fuente: Elaboración propia.....	83

## **1. INTRODUCCIÓN**

En el contexto de inquietudes de la ciudadanía, el medio ambiente es un elemento que va consiguiendo concentrar cada vez con mayor profundidad el interés permanente de la población, tanto por su influencia en la calidad de vida, como por el progresivo conocimiento de los importantes impactos que puede tener sobre la preservación del planeta para futuras generaciones.

Es evidente que el foco mediático en los últimos años, por su novedad y también por su potencial de evolución negativa y, en un plazo no muy lejano, quizá irreversible se centra en el cambio climático y sus conceptos asociados: el Protocolo de Kioto, las emisiones de gases de efecto invernadero, y también el comercio de emisiones.

El impacto realmente global del cambio climático obliga a un acuerdo de perspectiva planetaria para encarar su mitigación, adaptación y posible solución. Es con toda probabilidad el primer problema totalmente universal a resolver por la humanidad, la del siglo XXI, y la de cualquier período anterior.

Los trabajos para encontrar un camino de diálogo y compromiso por grandes emisores actuales, como Estados Unidos, China o India, así como el cumplimiento serio y trascendente de los países ya comprometidos con la reducción de emisiones es uno de los grandes trabajos de esta época.

También el cambio climático ha permitido, prácticamente por vez primera, otorgar un claro valor de mercado a una externalidad sin precio, ni valor en la economía convencional, como son los derechos de emisión de CO<sub>2</sub>, sentando un precedente de gran interés en el contexto del desarrollo futuro.

En el presente trabajo vamos a comenzar exponiendo una visión general de la relación del transporte con el concepto de Movilidad Sostenible, incidiendo en los impactos nocivos del transporte urbano en la calidad ambiental de las ciudades.

A continuación pasaremos a estudiar tres metodologías diferentes utilizadas por organismos públicos nacionales e internacionales para el cálculo de emisiones de vehículos con el objetivo de recopilar los resultados en un inventario y comparando alguno de sus aspectos más relevantes.

Para finalizar, analizaremos las distintas iniciativas que están tomando las capitales europeas para luchar contra los efectos perjudiciales que ocasionan las emisiones y mencionaremos posibles medidas que podrían llegar a implantarse en el futuro.

## **2. MARCO DE REFERENCIA**

### **2.1 CONCEPTO DE MOVILIDAD SOSTENIBLE Y SU RELACIÓN CON EL TRANSPORTE**

La movilidad junto con las redes de transporte son los rasgos más característicos de las sociedades modernas tanto por su consumo de recursos (combustibles fósiles o espacio geográfico) como por la influencia que ejercen sobre el medio ambiente y la sociedad de tal forma que la movilidad se ha convertido en uno de los principales focos de tensión y desigualdad del mundo contemporáneo.

Existen distintas definiciones de la movilidad sostenible. Según el World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) es aquella que es capaz de satisfacer las necesidades de la sociedad de moverse libremente, acceder, comunicarse, comercializar o establecer relaciones sin sacrificar otros valores humanos o ecológicos básicos actuales o del futuro. Es decir sin comprometer el bienestar de las generaciones futuras.

El concepto de movilidad sostenible intenta hoy en día desplazar el enfoque que consideraba al transporte una necesidad para conseguir crecimiento económico hacia otro en el que éste debe estar basado en la realidad y riesgos que pueden derivarse de un crecimiento sin freno. Así pues, esta idea ha tenido una severa influencia en la actitud de los responsables políticos (actualmente se le da importancia a conceptos como la protección del medio ambiente que los anteriores planificadores no solían contemplar).

A pesar de este logro, los programas de movilidad sostenible aplicados hasta ahora han producido unos modestos resultados:

- La expansión del transporte sigue ligada al crecimiento económico.
- Los modos de transporte dominantes (carretera y aéreo) son los más contaminantes.
- Reticencia de las Administraciones Públicas a la inversión en nuevas infraestructuras respetuosas con el medio ambiente por su coste.
- Fuerte influencia de los sectores del automóvil y la industria aeronáutica frente a los representantes del ferrocarril y el transporte marítimo.

En el mundo actual, los sistemas económicos se caracterizan por encontrarse permanentemente presionados para reducir los costes y a contar con medios de transporte capaces de mover mercancías y viajeros en estrictos plazos de tiempo pero con la suficiente fiabilidad y conveniencia y no caer en el ciclo de movilidad insostenible, mostrado en la figura 1. La opinión pública está influyendo cada vez más en la política de transporte de todos los países pues se muestra altamente preocupada por el medio ambiente de tal forma que dicho transporte empieza a verse en función de su repercusión ambiental y social (especialmente importante en las zonas rurales más desfavorecidas).

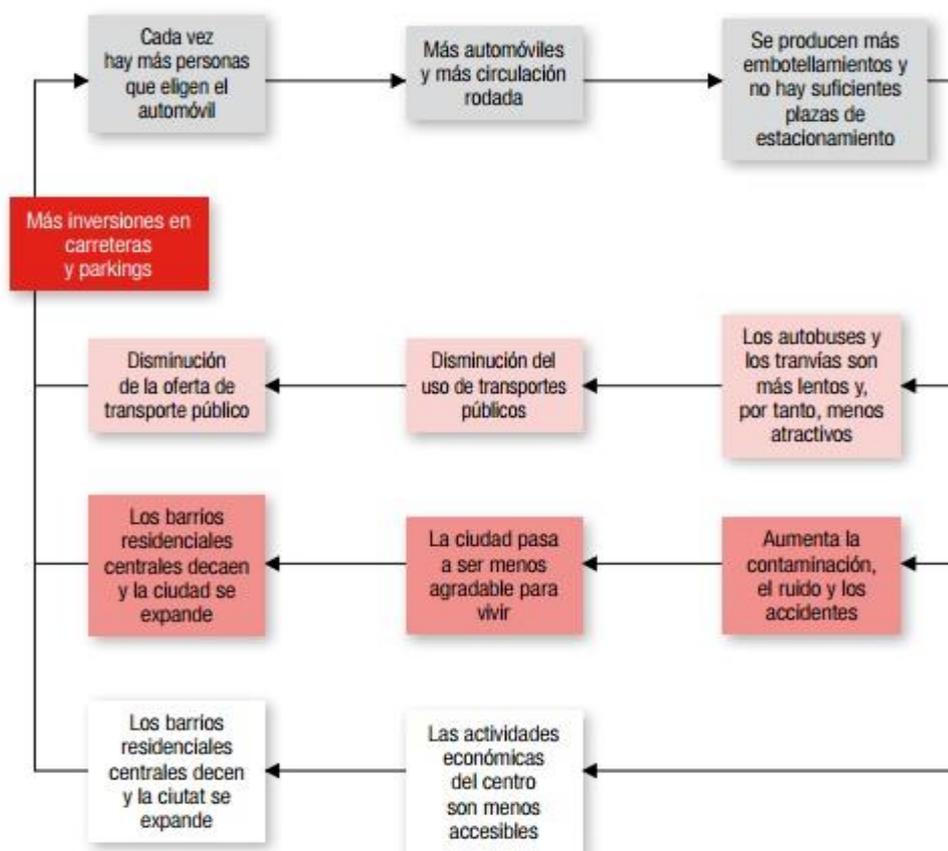


Figura 1. Círculo vicioso de la movilidad insostenible. Fuente: Glosario de Movilidad Sostenible

El sector del transporte no puede regirse por ninguna de los tres grandes principios que deberían regir toda política enfocada hacia la sostenibilidad (Daly, 1990) los cuales son:

1. Los recursos se usarán de acuerdo a sus tasas de regeneración
2. Los recursos no renovables se usarán con mayor rapidez que la puesta a disposición de los sustitutos.
3. Las emisiones contaminantes no superarán la capacidad de asimilación natural del medio ambiente.

Y es que los sistemas de transporte no solo consumen ingentes cantidades de recursos materiales (toneladas de acero, hormigón, plástico, metales) si no que es el abanderado en uso de productos derivados de petróleo en el mundo (un 60% de todos los fabricados) y dicho petróleo representa el 98% de todo el combustible utilizado por estos. Estos datos demuestran que muchas medidas impuestas para promover el uso de otras fuentes de energía para el transporte han caído en saco roto.

Esta gran dependencia del petróleo tiene importantes consecuencias, ya sea de carácter político-económico pues muchas regiones productoras son muy inestables o bien consecuencias ambientales pues provoca una gran contaminación, focalizada esta última en tres grandes problemas que atañen al planeta entero:

1. **Contaminación del aire:** Causada por el monóxido de carbono (CO), los hidrocarburos de mala combustión, el plomo y especialmente el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).
2. **Contaminación por ruido:** Provocando daños psicológicos y fisiológicos a los seres humanos.
3. **Contaminación del agua:** Consecuencia de la infiltración de combustibles en aeropuertos, garajes, gasolineras...

Se hace necesario por tanto que los cambios que requiere el insostenible modelo actual de transporte deben basarse en una nueva visión, elaborada con criterios teóricos y empíricos dirigidos a la creación de sistemas de transporte sostenibles y estos, que siga un camino multimodal.

Un sistema de transporte es más adecuado y robusto cuando se dispone de diversos modos de transporte optativos para el traslado de personas o mercancías. Un sistema de transporte que depende de solo uno o dos modos de transporte es mucho más propicio a la ineficiencia, las perturbaciones y el fallo del sistema que otro multimodal.

Los últimos años han puesto de manifiesto que un sistema en el que los distintos medios de transporte no están integrados ni coordinados ya no basta para satisfacer las necesidades de un país y además impone grandes costes sociales y ambientales a la población. Los nuevos sistemas deberán estar caracterizados por:

- Conexiones eficientes y que sigan la elección de los pasajeros.
- Coordinación entre modos de transporte y organismos estatales públicos y privados.
- Beneficioso para jóvenes y mayores por igual.
- Estimulante para la economía a la vez que respetuoso con el desarrollo sostenible.

En Estados Unidos se han logrado grandes avances en el transporte de mercancías y en Europa en el de pasajeros pero queda aún mucho por hacer para que los sistemas multimodales de transporte sean operativos en todos los países.

Sin embargo, un sistema multimodal, no es sinónimo de sostenibilidad. La elaboración y aplicación de análisis de los distintos modos de transporte y su entorno permiten comprobar las virtudes y defectos de cada uno y las maneras para paliar estos últimos, permitiendo un sistema intermodal sostenible.

El mayor problema que presenta la implantación de este tipo de sistemas es la falta de conocimiento que se tiene alrededor de ellos, y la falta de personal con los conocimientos técnicos requeridos para contribuir a planificar, ordenar y hacerlos funcionar. La mayor parte de la instrucción relativa al transporte en los países desarrollados sigue teniendo una orientación modal y en los países en desarrollo, es mucho peor.

## 2.2 EFECTOS EXTERNOS DEL TRANSPORTE

El transporte desempeña una función decisiva en la vida de las ciudades y sus áreas de influencia. Así pues, la continua expansión de ciudades con baja densidad urbana solo

es posible si una gran parte de la población tiene los medios económicos necesarios para acceder a un automóvil. En contraste, en ciudades muy densas es importante conocer la cantidad de recorridos que se efectuarán sin automóvil pues será la mayoría.

Esta movilidad urbana produce impactos negativos o “*costes externos*” tales como: congestión, contaminación atmosférica y acústica, accidentes, contribución al efecto invernadero, etc. Todos ellos en contra del desarrollo sostenible. Es para minimizar lo máximo posible estos efectos donde se hacen necesarias las políticas de movilidad sostenible.

En la Unión Europea más del 60% de la población reside en áreas urbanas donde se genera el 85% del PIB. Su desarrollo y correcto funcionamiento exige que sus habitantes puedan desplazarse para cubrir sus necesidades. De acuerdo con el “*Green Paper de 2007*” la congestión en las ciudades europeas cuesta alrededor de un 1% del PIB (unos mil quinientos millones de euros al año). El tráfico urbano es además responsable del 40% de las emisiones de CO<sub>2</sub> y uno de cada tres accidentes ocurre en entornos urbanos.

Todos estos impactos negativos y sus consecuencias (resumidos en la Tabla 1) son fuertes obstáculos para que nuestras ciudades consigan un desarrollo sostenible.

<b>IMPACTO</b>	<b>CONSECUENCIAS</b>
<b>Congestión</b>	Pérdidas de tiempo
<b>Accidentes</b>	Costes médicos. Capital humano. Costes administrativos y de gestión del sistema.
<b>Ruido</b>	Daños sobre la salud humana y el entorno
<b>Contaminación atmosférica</b>	Daños a la salud humana, naturaleza y edificios.
<b>G.E.I.</b>	Riesgo para las generaciones futuras, costes de prevención y daños futuros al entorno.

*Tabla 1. Impactos negativos del transporte. Fuente: Elaboración propia con datos del Proyecto Innpronta.*

La evolución de la movilidad urbana en los últimos años se refleja en la Figura 2:

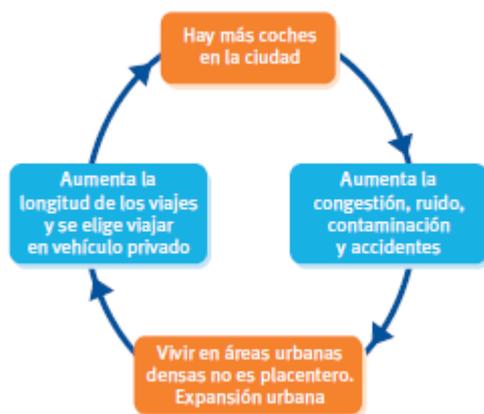


Figura 2. Ciclo de movilidad urbana. Fuente: Guía PMUS 2006.

Este ciclo ha provocado un aumento de la movilidad urbana en nuestro país, duplicándose el transporte urbano de viajeros en el período (1990-1999) y aumentando el de mercancías un 15% y además, en consonancia con los datos europeos, el 41% de la población española vive en municipios de más de 100.000 habitantes y un 11.4% en municipios entre 50.000 y 100.000.

La preocupación por estos efectos nocivos comenzó a gestarse a nivel colectivo en la conferencia de la ONU en 1972 en Estocolmo. Aquí se definieron las bases de la sostenibilidad y las tres dimensiones de las que se compone: economía, sociedad y medio ambiente. Desde entonces, estos principios se han convertido en fundamentales para los gestores públicos y uno de los grandes desafíos a los que se enfrentan las ciudades para solucionar los problemas de movilidad y acceso.

Se hace por tanto fundamental alcanzar una movilidad sostenible en las ciudades, entendida esta según la definición del Consejo de la Unión Europea como aquella que:

- **Es asequible:** Funciona de forma justa y eficiente y ofrece posibilidad de elección entre distintos medios de transporte.
- **Garantiza las necesidades:** Permitiendo su acceso tanto individual como colectivamente de manera equitativa, segura y de acuerdo con la salud y el ecosistema.
- **Limita los desechos:** No se producen más emisiones ni residuos que los que el planeta puede absorber. Usa en la medida de lo posible las energías renovables y minimiza el impacto del ruido y sobre el suelo.

Desde que la ONU proclamó que los ciudadanos y las instituciones tienen el deber de velar por un desarrollo sostenible las ciudades han ido incorporando objetivos de sostenibilidad en sus estrategias de movilidad.

### 2.2.1 Movilidad de viajeros

La encuesta de movilidad llevada a cabo en España en el año 2007 por el Ministerio de Fomento desveló que el tiempo medio diario de desplazamientos es de entre 54 y 79 minutos según el tamaño del municipio y que la duración media de los desplazamientos en transporte público es casi el doble que en vehículo privado además de que el número de viajes por persona y día ronda

los 3 viajes. Los motivos de dichos desplazamientos son bastante homogéneos en todo el territorio nacional pues la mitad de los viajes se deben a “movilidad obligada” (estudios y trabajo) frente a otros de “movilidad no obligada” (ocio, compras y otros).

Datos de movilidad en España por tamaños de municipio					
		Tamaño del municipio			
		Menos de 10.000 hab.	Entre 10.000 y 50.000 hab.	Entre 50.000 y 500.000 hab.	Más de 500.000 hab.
Número de desplazamientos diarios por persona y día		2,8	2,9	3,0	2,8
Duración del desplazamiento	Transporte público (min.)	43,5	39,8	36,3	35,8
	Coche (min.)	20,1	19,3	21,1	26,3
Ratio medio de tiempo de desplazamiento: TP/coche		2,2	2,1	1,7	1,4
Tiempo dedicado a desplazarse: min./persona y día		64,0	63,9	73,2	81,1
Motivo del desplazamiento	Trabajo y estudios (%)	55,1	54,7	52,2	51,1
	Ocio (%)	5,3	5,6	6,5	6,9
	Compras y otros (%)	39,7	39,7	41,3	42,0
Reparto modal de los desplazamientos	En coche (%)	55,1	57,2	45,8	35,7
	En transporte público (%)	5,6	7,1	12,9	26,6

Tabla 2. Datos de movilidad en España por tamaños de municipio. Fuente: MOVILIA.

De la tabla anterior y comparando los municipios de menos de 10 mil habitantes con los de más de 500 mil, comprobamos que el nº de desplazamientos diarios es muy homogéneo (2,8 despl./pers./día) y que la duración del desplazamiento además es casi el doble en transporte público que en coche. A pesar de ello el tiempo de los desplazamientos en transporte público decrece conforme aumenta el tamaño del municipio, mientras que en coche es directamente proporcional a dicho tamaño.

Los motivos más usuales de desplazamiento son generalmente trabajo o estudios, aunque según la temporada, también son importantes los trayectos por motivos de compras.

Además en relación al reparto modal de desplazamientos, en los municipios pequeños debido a su poca congestión es más importante el transporte en coche y en los grandes se dan más situaciones de congestión y existen sistemas muy eficientes de transporte urbano, por eso la población elige esta última alternativa mucho más y se iguala casi a la que se desplaza en coche.

En las últimas décadas la combinación del fenómeno de la migración hacia la periferia urbana donde el transporte público no puede prestar un servicio tan eficiente como en el centro de la ciudad y el continuo crecimiento de la tasa de motorización (se ha duplicado en los últimos 20 años mientras que la población ha crecido un 11%) hacen presagiar una futura racionalización del uso del vehículo privado para poder conseguir un sistema de transporte sostenible.

El número medio de turismos por hogar en 2011 era de 1,284 según datos del Ministerio de Medio Ambiente. Igualmente, según la DGT, en 2012 la relación entre población y parque de vehículos era de 675 vehículos por cada 1.000 habitantes, aunque particularizado para turismos se obtenía un ratio de 480.

Sin embargo, a la vista de la Tabla 3, se comprueba que su renovación es insuficiente. Casi la cuarta parte de los turismos son anteriores a 1990, y en el caso de motocicletas este porcentaje aumenta hasta el 45%. Por este motivo uno de los principales objetivos marcados para la mejora de la eficiencia energética es la renovación del parque automovilístico.

Antigüedad del parque de vehículos en España, 2003						
Año de matriculación	Autobuses	%	Turismos	%	Motocicletas	%
Antes de 1990	16.841	30,1	4.472.554	23,9	675.708	44,6
1990-1994	10.657	19,0	3.693.974	19,8	354.632	23,4
1995-1999	15.412	27,5	5.060.060	27,1	215.296	14,2
2000-2003	13.083	23,4	5.461.732	29,2	267.890	17,7
<b>TOTAL</b>	<b>55.993</b>	<b>100,0</b>	<b>18.688.320</b>	<b>100,0</b>	<b>1.513.526</b>	<b>100,0</b>

Tabla 3. Antigüedad del parque de vehículos en España. Fuente: DGT.

Por otra parte la densidad de las ciudades es uno de los factores explicativos de los costes y consumos de energía más importantes en los desplazamientos urbanos. Se ha demostrado que las ciudades más densas consumen menos para garantizar la movilidad de sus habitantes pues muchos trayectos no se realizan en automóvil.

El principal coste económico del vehículo privado frente al transporte público es el precio de los combustibles pues son productos derivados del petróleo y esto ha motivado la mayor venta de vehículos diésel (más contaminantes) frente a los de gasolina pues el precio del primero es menor.

En la Tabla 4 mostramos cómo las ciudades reducen los costes del transporte si se aumenta el uso de transporte público y viceversa:

Ciudad	Porcentaje de uso del transporte público sobre el total de viajes		Costes del transporte para la comunidad (% del PIB)	
	1995	2001	1995	2001
Ginebra	18,8	21,7	10,2	9,4
Londres	23,9	26,8	8,5	7,5
Madrid	27,2	30,2	12	10,4
París	27,1	27,5	6,8	6,7
Viena	43,2	46,6	6,9	6,6

Tabla 4. Costes e impactos del transporte y su relación con el reparto modal. Fuente: Guía PMUS 2006.

La eficiencia energética del autobús o del ferrocarril es entre 3-5 veces mayor que el del coche o el avión por pasajero/km en plena carga. Es el metro el medio motorizado más eficiente en términos de consumo energético (con 1L de carburante, se podría transportar un viajero 48 km en metro, 39.5km en autobús pero solo 18.6km en coche).

## 2.2.2 Transporte de mercancías

El transporte de mercancías está vinculado a la economía y sus parámetros como puede ser el PIB, tal y como muestra la Figura 3 con referencia a España, Cataluña y la Unión Europea:

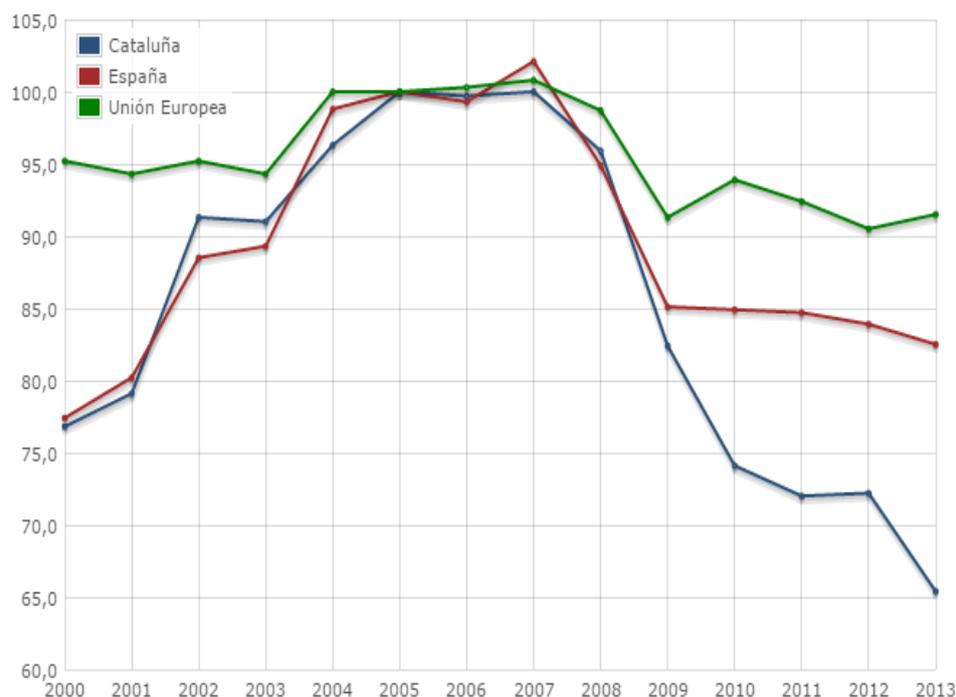


Figura 3. Volumen del transporte de mercancías y el PIB en España, Cataluña y Unión Europea en base 2000. Fuente: IDESCAT.

Es de especial relevancia el transporte de mercancías dentro de la ciudad puesto que es necesaria para mantener la vitalidad de la misma al proveer a la ciudad.

Las operaciones de carga y descarga en la ciudad coinciden normalmente con las horas punta de tráfico y es casi imposible evitar su interferencia con el tráfico al estacionar los vehículos frente al establecimiento.

Dentro de la ciudad todas las mercancías deben moverse por carretera en una proporción de 8 vehículos de reparto por cada camión pesado. Dichos camiones de reparto aún hoy son en una proporción importante anteriores a 1990 como muestra la Figura 4.

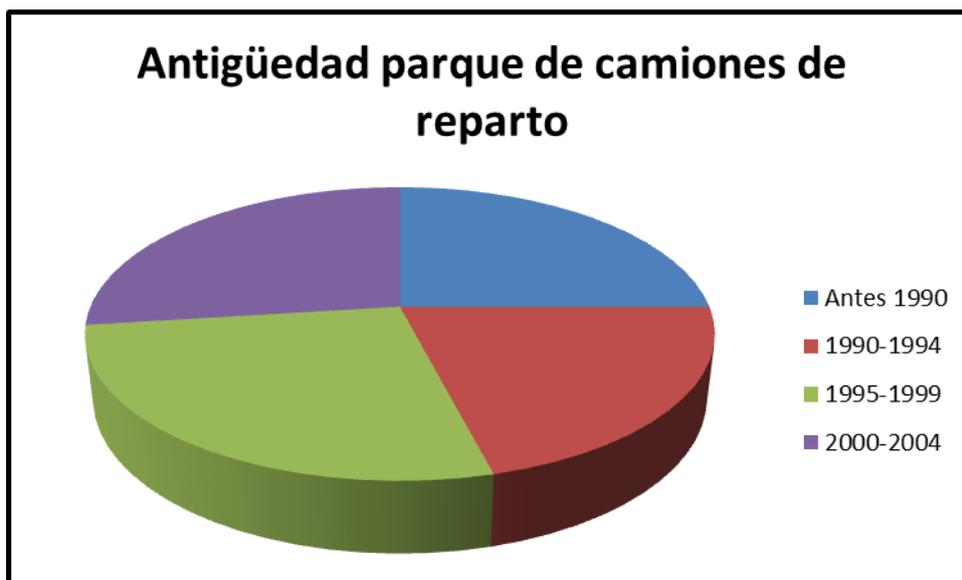


Figura 4. Antigüedad del parque de camiones de reparto. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Guía PMUS 2006.

En el ámbito urbano se consumen en España 1.470 litros de fuel (el equivalente a 3.9 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>), y el 43% de toda la energía destinada a transporte, lo cual nos da una dimensión del impacto que tiene el reparto de mercancías en la ciudad.

## 2.3 IMPACTOS DEL TRANSPORTE URBANO EN ESPAÑA EN RELACIÓN A LA MOVILIDAD SOSTENIBLE

Se puede medir el impacto del transporte a través de las siguientes categorías:

### 2.3.1 Consumo energético

En España aumentó el gasto energético relacionado con el transporte un 3.9% anual en la década 1990 – 2000 duplicándose en 2010. En los últimos años de estudio, dicho consumo incluso superó al de la industria tal y como muestra la Tabla 5:

Consumo total de energía primaria por sectores (en ktep) incluyendo consumos no energéticos							
	1990		2000		2004		Variación 1990-2004
	ktep	%	ktep	%	ktep	%	%
Industria	25.308	40,4	34.340	38,0	37.590	36,0	48,5
Transporte	22.716	36,2	32.272	35,8	37.828	36,2	66,5
Otros usos	14.695	23,4	23.654	26,2	29.019	27,8	97,5
<b>TOTAL</b>	<b>62.719</b>	<b>100,0</b>	<b>90.266</b>	<b>100,0</b>	<b>104.437</b>	<b>100,0</b>	<b>66,5</b>

Tabla 5. Consumo total de energía primaria por sectores. Fuente: Guía PMUS 2006.

Actualmente más del 98% de la energía consumida por el transporte tiene su origen en el petróleo, el cual es un escaso combustible fósil.

Es importante señalar que el consumo de combustible en el transporte urbano es inversamente proporcional a la densidad de nuestras ciudades. Así pues, es en las urbes menos densas donde el consumo es mayor como muestra la Figura 5:

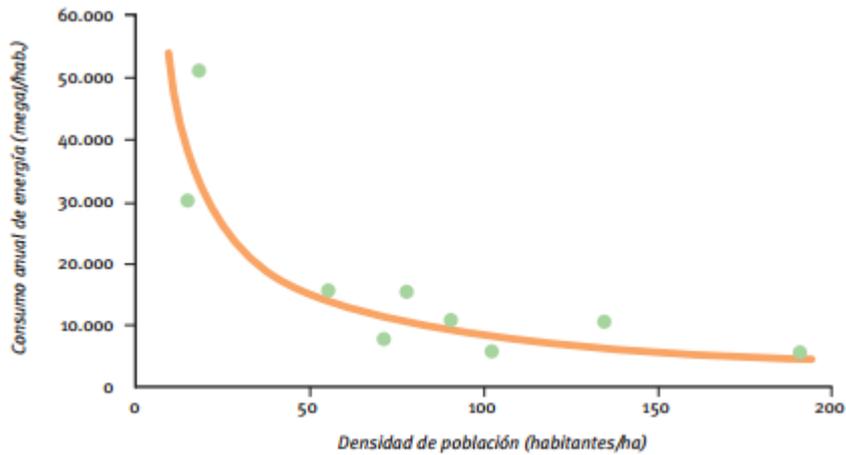


Figura 5. Densidad de población y consumo anual de energía por habitante. Fuente: Guía PMUS 2006.

### 2.3.2 Emisiones

Los vehículos se consideran una fuente de contaminación atmosférica local, urbana y regional. Las principales sustancias contaminantes que emiten son:

- Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)
- Monóxido de carbono (CO)
- Compuestos orgánicos volátiles (COV)
- Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) de las que el 80% son responsables los vehículos privados.
- Gases de efecto invernadero, en especial el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) del cual es responsable en un 40% el tráfico urbano y el transporte en general es responsable de un tercio de estas emisiones.

El tráfico urbano es culpable del 40% de las emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas del transporte, y si la tendencia no cambia, se espera que dicho porcentaje sea cada vez más grande (excediendo el 40% en 2010 en comparación a 1990), en contra de lo establecido en el protocolo de Kioto, que limita al 15% el aumento de las emisiones en España.

Un tercio de las emisiones totales de gases de efecto invernadero son debidas al sector transporte, y como muestra la figura 6, de dichas emisiones, la gran mayoría se deben al transporte por carretera. El resto de modalidades son insignificantes en comparación con el 91% del transporte por carretera y por tanto es el que más hay que estudiar para intentar mejorarlo y disminuir las emisiones.

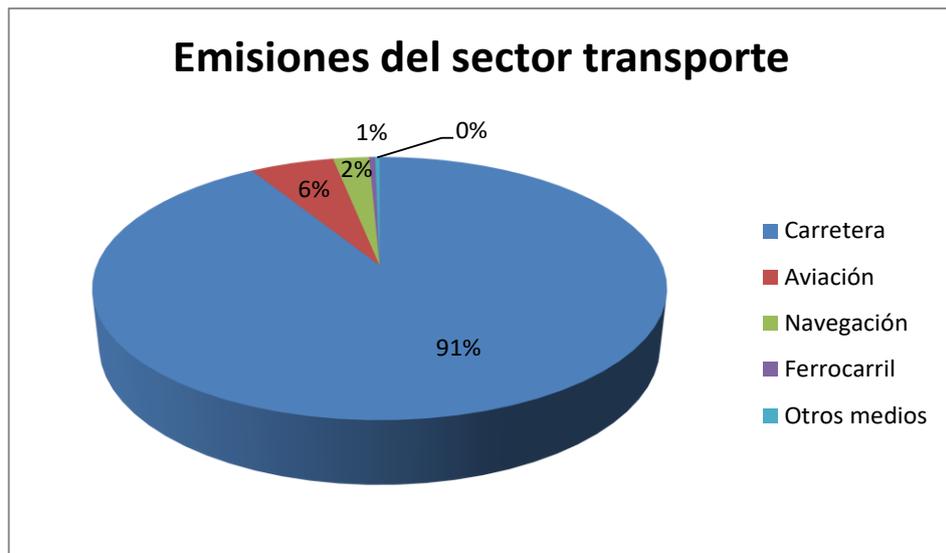


Figura 6. Emisiones del sector transporte. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Guía PMUS 2006.

### 2.3.3 Ruido

En la UE el 80% del ruido en las zonas urbanas está provocado por el tráfico de tal forma que unos 140 millones de personas están expuestas a niveles de ruido por encima de los 55dB(A) que recomienda la OMS. En España en particular, es un 74% la que se ve afectada.

### 2.3.4 Accidentes

De los 1.3 millones de accidentes de tráfico que se produjeron en la UE en el año 2002, dos tercios se dieron en zonas urbanas de los cuales 12.000 fueron mortales. Así pues los accidentes en los que se ven implicados peatones son la primera causa de muerte de la población entre 1 y 34 años según un estudio de MAPFRE. Y es que en el entorno urbano donde más se pone de manifiesto la vulnerabilidad de este colectivo puesto que 4 de cada diez víctimas mortales de accidente en zona urbana son peatones.

### 2.3.5 Congestión

Este impacto supone el 1% del PIB de la UE anual. En el caso español, solo la congestión de Madrid supone una pérdida de 1.200 millones de euros y en torno al 0.2% del PIB nacional.

### 2.3.6 Consumo de espacio

El medio de transporte que más espacio consume es el vehículo privado (hay que tener en cuenta el espacio necesario para estacionar durante el tiempo necesario). De media, un recorrido entre el domicilio y el trabajo consume 90 veces más espacio que el efectuado en metro y 20 más que en autobús o tranvía.

### 2.3.7 Exclusión social y justicia social

La accesibilidad también es importante para la equidad social pues todos los servicios esenciales deben ser accesibles para la población tanto si dispone de coche como si no. En España un 30% de los hogares carece de vehículo propio, lo que convierte a estos ciudadanos en cautivos del transporte público.

También hay que mencionar que la calidad del medio ambiente urbano difiere entre barrios pues hay algunos que sufren deterioro de la calidad del aire por todo el tráfico pesado que soportan mientras que otros se cierran a los no residentes. También se da el caso de que los residentes de las afueras tienen una menor oferta de transporte público que los del centro y además las tarifas suelen ser más elevadas.

### 2.3.8 Salud

La falta de ejercicio físico y el aumento de la contaminación atmosférica derivan consecuencias graves sobre la salud. En España, 16.000 muertes al año son causadas por dicha contaminación, muchas más que las fallecidas por accidentes de tráfico (1.688 víctimas mortales en 2014).

### 2.3.9 Costes externos

En el año 2000 estos supusieron en España 22.403 millones de euros (2% del PIB) solo en el transporte de viajeros y otros 33.489 millones de euros en el año 2003 para el transporte de mercancías. Los costes medios asociados al coche privado son más del doble de los de otros medios de transporte como evidencia la Figura 7:

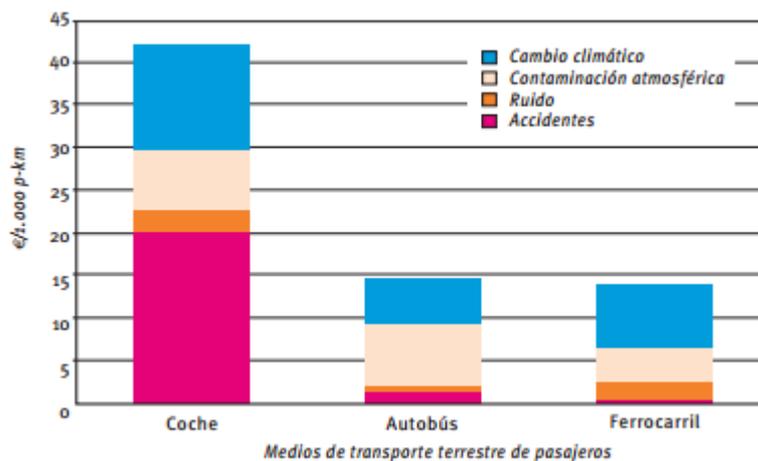


Figura 7. Costes medios externos por medios de transporte de pasajeros. Fuente: Guía PMUS 2006.

Estos datos evidencian que es el uso del vehículo privado el gran culpable de los costes de los accidentes de tráfico, pues supone la mitad del total de los costes que produce frente al ferrocarril, donde los accidentes son casi testimoniales (en España solo ha habido un accidente mortal en la red de alta velocidad entre 1992 y la fecha actual).

## **2.4 CALIDAD DEL AIRE Y SU RELACIÓN CON LAS EMISIONES EN EL TRANSPORTE**

El aire es esencial para la vida, tanto porque permite respirar a los organismos vivos, como porque su influencia en la Tierra hace que ésta sea habitable. La alteración de la composición de la atmósfera por causas humanas altera, por tanto, la calidad del aire (con sus repercusiones sobre los ecosistemas y la salud humana), a la vez que puede causar cambios en el clima por su influencia en el balance radiactivo terrestre.

En lo referente a la perturbación de la composición de la atmósfera se distinguen dos escalas:

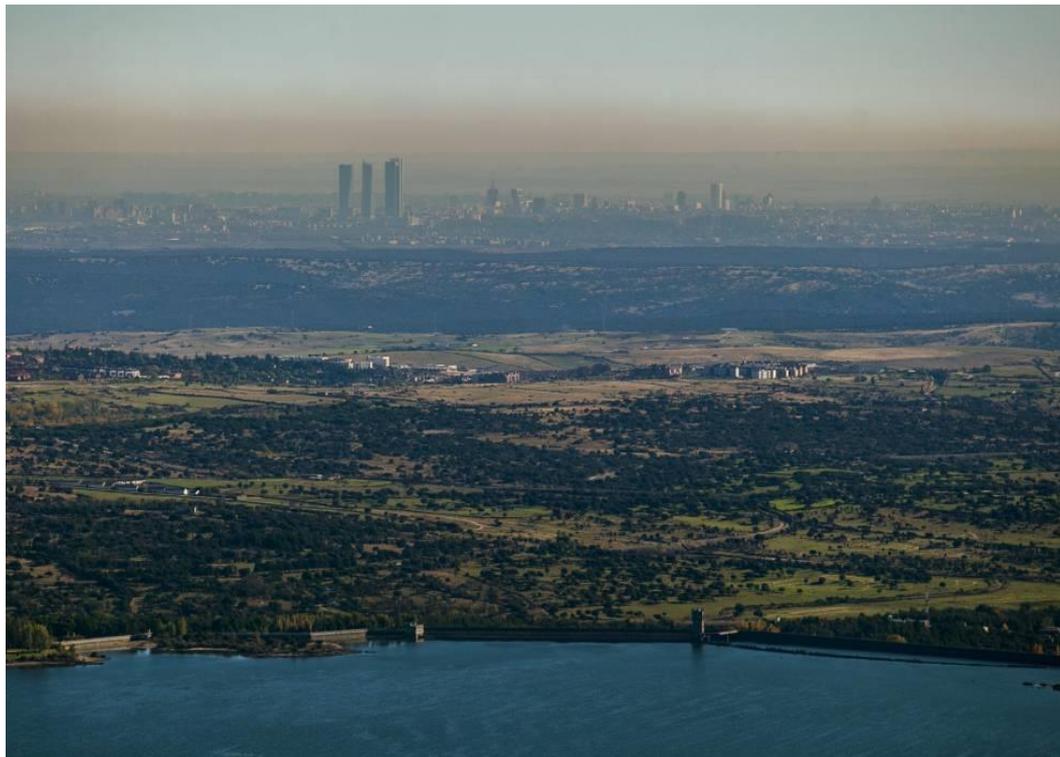
- a) A escalas local, regional y de larga distancia, el deterioro de la calidad del aire o el aporte de determinados contaminantes puede tener repercusiones negativas sobre ecosistemas, e incluso sobre la salud humana.
- b) A escala global o mundial el aporte de determinados contaminantes (caso de emisiones de gases de efecto invernadero o de aerosoles atmosféricos) o la destrucción de determinados componentes atmosféricos (caso de la destrucción del ozono estratosférico) pueden modificar el balance radiactivo terrestre y por ello inducir cambios en el clima.

Las causas de la contaminación del aire pueden ser naturales (emisiones volcánicas, biogénicas, desérticas, marinas) o antropogénicas (derivadas de la acción humana). Sin embargo, son estas últimas las que inciden más negativamente sobre la calidad del aire.

Existen un gran número de contaminantes atmosféricos con distintas repercusiones en la atmósfera. Entre ellos destacan el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), los óxidos de nitrógeno (NO y NO<sub>2</sub>), el ozono (O<sub>3</sub>, actúa positivamente en la estratosfera ya que reduce la radiación ultravioleta, pero en la troposfera tiene efectos negativos por su elevado poder oxidante), el amoníaco (NH<sub>3</sub>), el ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S), el material particulado atmosférico (o “partículas sólidas en suspensión”, incluyendo metales, compuestos inorgánicos secundarios y una gran cantidad de compuestos orgánicos, algunos persistentes) y un elevado número de compuestos orgánicos volátiles (COV). El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) siempre debe ser tratado de forma separada a los demás contaminantes pues sus efectos no se dejan sentir a nivel local o regional sino en su contribución planetaria al efecto invernadero y al calentamiento global de la atmósfera.

A la hora de considerar los niveles de emisiones de contaminantes atmosféricos en zonas urbanas españolas es necesario tener en cuenta, además, algunas peculiaridades

que este país presenta y pueden influir en las concentraciones de contaminantes atmosféricos. Así el diseño y arquitectura de las ciudades españolas difiere de la de otros países europeos, en cuanto a la mayor densidad de edificios de apartamentos y a la altura de éstos, lo que provoca un efecto de pantalla en las emisiones producidas por el tráfico. Ello dificulta la dispersión de contaminantes e incrementa marcadamente los niveles en aire ambiente respecto a otras estructuras urbanas europeas que se caracterizan por mayores espacios verdes, menor densidad y construcciones bajas, como puede comprobarse en la Imagen 1:



*Figura 8. Boina de contaminación sobre Madrid (Noviembre 2016). Fuente: El País.*

Otro fenómeno importante es la baja tasa de precipitación registrada, especialmente en el centro y sur de España, lo que impide el lavado atmosférico e influye en la importancia de procesos de resuspensión por el tráfico rodado del material particulado depositado en los firmes de carretera. Además la elevada radiación solar en los meses estivales aumenta los niveles de partículas, NO<sub>2</sub> y ozono. Estos incrementos se ven más acentuados por la baja capacidad dispersiva de la atmósfera en verano. Dicho de otra manera, las estructuras urbanas y el clima del sur de Europa hacen que la misma emisión del tráfico produzca un mayor impacto en los niveles de contaminantes en aire respecto al centro y norte de Europa.

#### **2.4.1 Emisiones**

Durante su vida útil, los vehículos emiten productos contaminantes a la atmósfera de cinco formas:

- 1) Emisiones de gases por el tubo de escape debido al funcionamiento del motor.
- 2) Emisiones de partículas sólidas o líquidas en el gas de escape.
- 3) Emisión de partículas de desgaste de componentes (frenos, embrague y neumáticos)
- 4) Gases de la gasolina (Muy controlados en la actualidad con sistemas de carbón activado).
- 5) Gases de carter del motor (recirculados al motor en la actualidad).

Los motores más predominantes son los de combustión interna debido a su mayor potencia específica, y los combustibles derivados del petróleo (gasolina y gasóleo) han sido los más usados, principalmente, por su disponibilidad y su elevada densidad de energía.

Un proceso de combustión ideal de un combustible formado de carbono, hidrógeno y oxígeno produciría solo dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) y oxígeno ( $\text{O}_2$ ), pero problemas asociados a la cinética de las reacciones químicas y ciertas dificultades para completar las reacciones de oxidación, hacen que también se produzcan otros componentes: monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), diversos compuestos orgánicos del combustible y ciertos compuestos sólidos y líquidos.

Un estudio llevado a cabo por la CNMC (Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia) analiza la evolución de las emisiones de los contaminantes antes mencionados divididos en los 3 grandes grupos más perjudiciales, como son los Gases de Efecto Invernadero (GEI), los gases precursores del ozono y los contaminantes acidificantes.

### **1) Evolución de las emisiones de GEI.**

Están compuestos fundamentalmente por las emisiones de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$ , calculados entre 1990 y 2012.

En cuanto a las emisiones de  $\text{CO}_2$  emitidas a la atmósfera por el transporte por carretera, se observa un incremento entre 1990 y 2007, año en el que se alcanza el máximo histórico registrado, con 97.540 kilotoneladas de  $\text{CO}_2$ . A partir de 2007, las emisiones de  $\text{CO}_2$  empiezan a descender progresivamente, alcanzando en 2012 niveles de emisión de  $\text{CO}_2$  similares a los del año 2000 (figura 9).

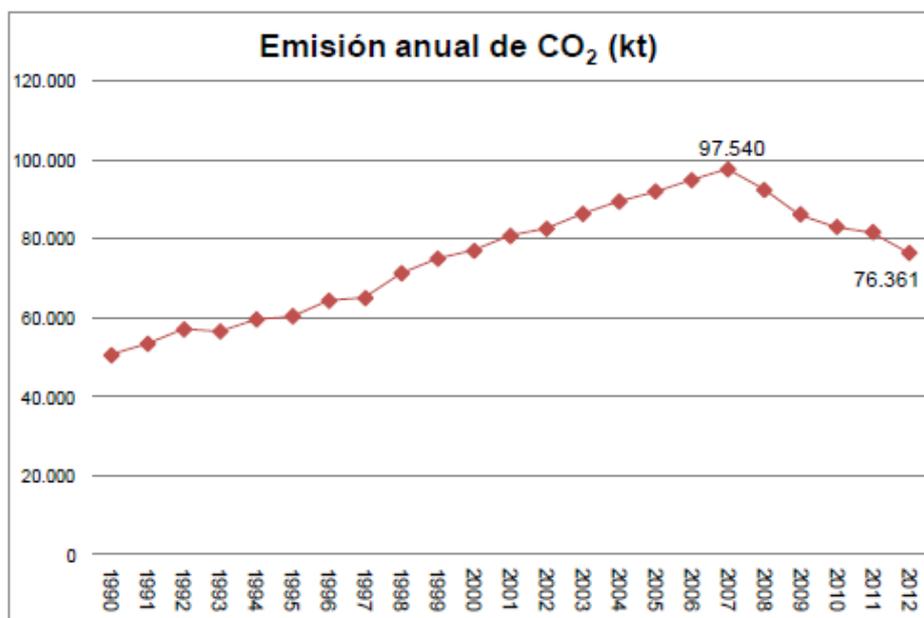


Figura 9. Evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> en España. Fuente: CNMC.

Las emisiones de CO<sub>2</sub>, así como las del resto de GEI, están directamente relacionadas con el consumo de productos petrolíferos, y por lo tanto, con la actividad socioeconómica del país. Entre 1990 y 2007, la tasa promedio de crecimiento del consumo de gasóleo fue del 8%, mientras que para el consumo de las gasolinas fue del -3%.

La dieselización del Parque Nacional de Vehículos y el incremento de la actividad económica e industrial de este período explican esta evolución. A partir de 2007, con el inicio de la crisis económica, se empiezan a registrar descensos en el consumo de los carburantes convencionales, que alcanzan caídas anuales históricas en 2012, con un -6.2% tanto en gasóleo, como en gasolina. Este descenso del consumo de tendencia en la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

En el caso de las emisiones de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y metano (CH<sub>4</sub>), su evolución es el reflejo directo de las mejoras tecnológicas en los vehículos, que han permitido reducir de manera gradual los factores de emisión. Entre 1990 y 2000 se produjo un incremento progresivo de las emisiones de N<sub>2</sub>O hasta alcanzar su valor máximo registrado en el año 2000 (figura 20), con 4.360 toneladas emitidas a la atmósfera. A partir de ese año empiezan a descender con una tasa promedio anual negativa del -2.5%.

El detonante de este descenso ha sido la prohibición en 2001 de la venta de gasolina con plomo en España. Esta medida se ha visto apoyada por los avances tecnológicos de los vehículos, como la instalación de catalizadores en los vehículos, que reducen la emisión de gases contaminantes procedentes de la combustión incompleta de los carburantes.

Estas mejoras tecnológicas de los vehículos responden a la concienciación medioambiental por parte de las empresas automovilísticas y a la implantación de las distintas normativas EURO, centradas en mejorar la eficiencia de los motores nuevos. La normativa EURO 6, especifica una disminución de la cantidad de  $N_2O$  autorizado emitido por los turismos de motor hasta los 60 miligramos por kilómetro (mg/km) en motores de gasolina y 80 mg/km en los motores diésel.

Respecto a las emisiones de  $CH_4$ , se observa un notable descenso desde el máximo registrado en 1992 hasta la actualidad (figura 10). Esta situación es consecuencia de las mejoras en la tecnología de los vehículos y la composición de los carburantes que, al ser de mejor calidad, al quemarse emiten menos emisiones de este gas.

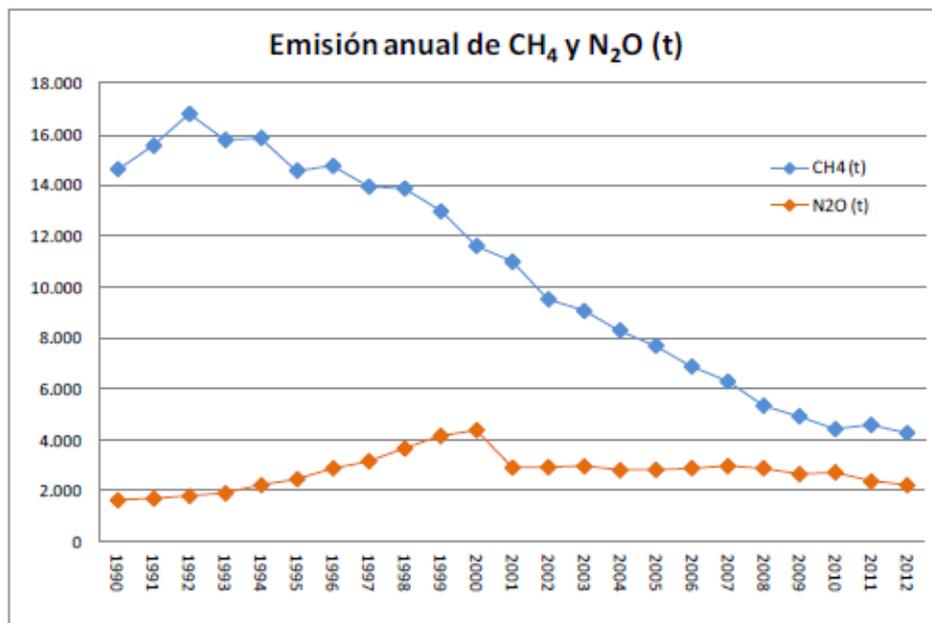


Figura 10. Evolución de las emisiones de  $CH_4$  y  $N_2O$  en España. Fuente CNMC.

## 2) Evolución de las emisiones de gases precursores del ozono troposférico

El CO procedente del transporte por carretera suponía a principios de los años 90 prácticamente la mitad de las emisiones de gases precursores del ozono troposférico. Le seguían el  $NO_x$  y los COVNM y con menor relevancia el  $CH_4$ .

Para el caso de las emisiones de CO, en 1992 se alcanzan los valores máximos registrados, debido a la gran proliferación de vehículos de gasolina hasta principios de los 90 y a la escasa normativa y concienciación medioambiental. La instalación de catalizadores en los vehículos se declara obligatoria en España desde 1993 para todos los motores de gasolina y desde 1997 para todos los diésel. Asimismo, la sonda lambda, un sensor que mide la concentración de oxígeno y por lo tanto, la riqueza de la combustión,

comienza a instalarse en los vehículos también durante estos años. Estos dos sucesos suponen un notable cambio en la tendencia de las emisiones de CO a partir de 1993, reduciéndolas considerablemente con una tasa de crecimiento anual del -10% hasta la actualidad (figura 11).

La renovación gradual del parque nacional de vehículos junto con los avances tecnológicos en los nuevos motores y sistemas de reducción de contaminantes ha contribuido a descender las emisiones de CO y a llegar a alcanzar mínimos históricos en la actualidad.

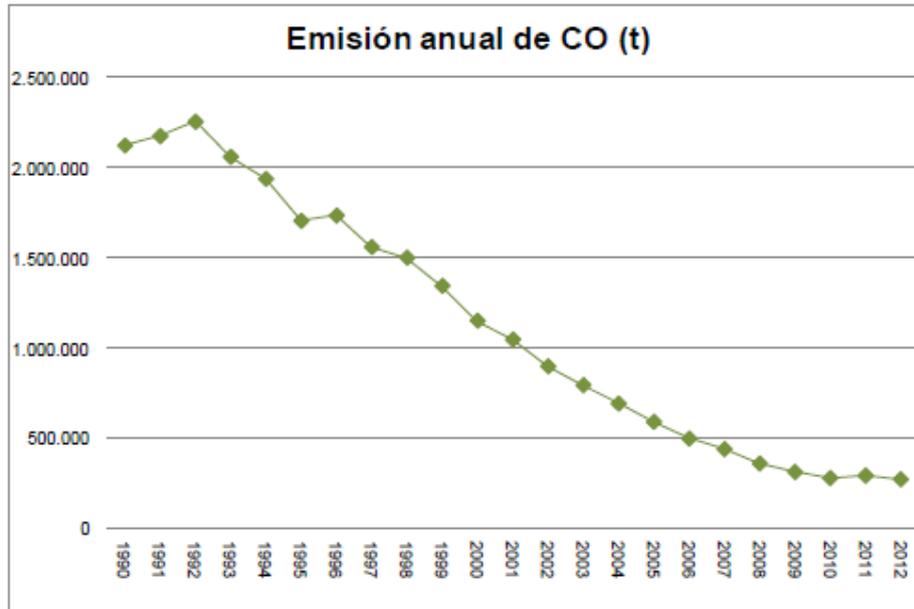


Figura 11. Evolución de las emisiones de CO en España. Fuente: CNMC.

En cuanto a las emisiones de NO<sub>x</sub>, su evolución temporal responde al mismo razonamiento que para el caso anterior. La obligatoriedad de la instalación de catalizadores supone descensos significativos en la emisión de NO<sub>x</sub> a la atmósfera (figura 12). La mejora en la tecnología y retirada de vehículos antiguos de gasolina del parque nacional y modernización del resto apoyan esta reducción. Entre las técnicas responsables de este descenso, resalta la reducción catalítica selectiva (SCR) en los motores diésel, que consiste en la inyección de urea (DEF o comercialmente conocida como AdBlue) en la salida de gases del motor, que reduce la emisión de NO<sub>x</sub> al neutralizar estos gases en nitrógeno atmosférico (N<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y vapor de agua (H<sub>2</sub>O), presentes todos de forma natural en la atmósfera.

Para el caso de las emisiones de COVNM, se observan descensos en los años de instalación obligatoria de catalizadores así como en 2001 (figura 12) por la prohibición de la venta de gasolina con plomo en España.

Las emisiones de CH<sub>4</sub> tienen una relevancia mínima en este apartado. Su evolución temporal se ha explicado en el apartado anterior y también debe su reducción a la mejora tecnológica de los vehículos y de los carburantes.

La reducción del consumo de los carburantes convencionales desde 2008, motivado por el descenso de la actividad socioeconómica, y la introducción de los biocarburantes en el mercado a partir de 2007 son condiciones también responsables de la reducción de las emisiones de estos gases en los últimos años.

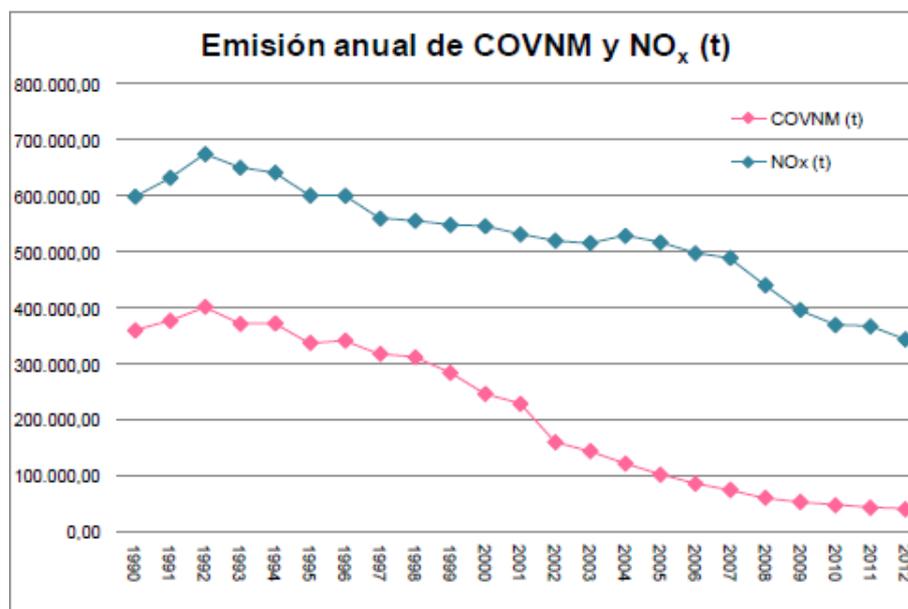


Figura 12. Evolución de las emisiones de COVNM y NO<sub>x</sub> en España. Fuente: CNMC.

### 3) Evolución de los contaminantes acidificantes

Respecto a los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), son contaminantes multiefecto y aparte de ser precursores del ozono troposférico, también actúan como sustancia acidificante. Suponen más de la mitad de las emisiones de gases acidificantes en peso. Su evolución y condicionantes, descritos en el apartado anterior, responden a las mejoras tecnológicas de los vehículos (entre ellas instalación obligatoria de catalizadores), a la renovación del parque de vehículos y la caída del consumo en los últimos años.

En cuanto a la evolución de las emisiones de SO<sub>2</sub> debidas al transporte por carretera, se observa un incremento desde 1990 hasta 1994, que alcanza su máximo histórico con 64.491 toneladas emitidas a la atmósfera. A partir de este año comienza un descenso vertiginoso hasta la actualidad, reduciéndose las emisiones de SO<sub>2</sub> con una tasa promedio anual negativa del -25%.

El principal motivo de este gran descenso consiste en la mejora de la calidad de los carburantes, limitando su contenido en azufre, así como la mejora tecnológica de los motores. En 2005, mediante la directiva europea 2003/17/CE, se instala en las estaciones de servicio la venta de gasóleo A y gasolina sin azufre (con un máximo de 10 mg por kilo de combustible), coexistiendo con los carburantes anteriores con un mayor contenido en azufre. Este suceso supone un descenso en las emisiones de SO<sub>2</sub> de un 477% en 2005 respecto al año anterior. En 2009, se implanta definitivamente este contenido en azufre para todos los carburantes convencionales, suponiendo un nuevo descenso de las emisiones de SO<sub>2</sub> hasta su estabilización en niveles mínimos históricos en los últimos años (figura 13).

Para el caso del amoníaco (NH<sub>3</sub>) se observa un incremento considerable de sus emisiones desde 1990 hasta 2002. A partir de entonces comienza un descenso progresivo y continuo, consecuencia de la mejora tecnológica de los nuevos vehículos (figura 13).

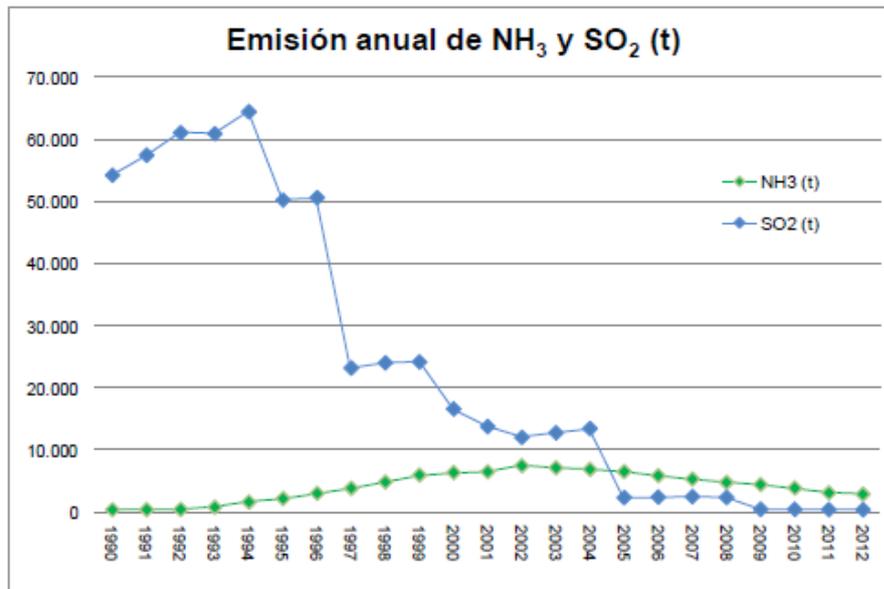


Figura 13. Evolución de las emisiones de NH<sub>3</sub> y SO<sub>2</sub> en España. Fuente CNMC.

Por lo general, los contaminantes que generan mayores emisiones son el CO y el NO<sub>x</sub>, seguidos en menor medida por el COVNM y el PM. El SO<sub>x</sub> y el NH<sub>3</sub> presentan emisiones poco significativas. A nivel de resultados por tipo de emisión, las emisiones en caliente son las que tienen mayor importancia, en especial en la emisión de CO y NO<sub>x</sub>. El segundo tipo de emisiones con más presencia son las evaporativas, aportando una parte significativa de las emisiones totales de COVNM. Las emisiones de desgaste y las de resuspensión contribuyen altamente en la producción de PM, equivalentes a las calientes. Las emisiones en frío son las que menos incidencia tienen.

Además, por tipo de vehículo, las emisiones de NO<sub>x</sub>, PM y SO<sub>x</sub> son substancialmente más elevadas en los vehículos gasoil que en los de gasolina. Este hecho es preocupante debido a que la tendencia de crecimiento de los vehículos diésel predomina respecto los de gasolina. Por otro lado, los vehículos de gasolina son responsables de la mayor parte de emisiones de COVNM y de CO. Aunque, gran parte de estas emisiones son producidas por vehículos muy antiguos con presencia poco significativa en el Parque de Vehículos español.

A nivel de distribución espacial de los contaminantes en España, las autovías, autopistas, vías de acceso a las principales ciudades y en especial los grandes núcleos urbanos son los puntos que presentan mayores emisiones. En especial, cabe destacar las ciudades de Madrid y Barcelona, donde en un espacio reducido se concentran elevadas cantidades de vehículos.

A nivel temporal, se destacan diferencias importantes durante el transcurso del día, en especial el fuerte incremento de las emisiones en las horas laborales respecto a las nocturnas. Estas diferencias también son significativas entre un día laborable y uno festivo, debido a que el patrón de desplazamientos de los ciudadanos es muy distinto.

Los sistemas de propulsión de los vehículos de carretera deben cumplir una serie de requisitos exigidos por los usuarios entre los que destacan hoy día los que tienen relación con el medio ambiente:

- Emitir cantidades progresivamente más bajas de productos que afectan a la calidad del aire urbano y a la contaminación regional y transfronteriza. Éstos son el monóxido de carbono (CO), los compuestos orgánicos volátiles (COV o HC), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y las partículas sólidas y líquidas (PM).
- Emitir la menor cantidad de gases de efecto invernadero, entre los que destaca en el caso de los motores el CO<sub>2</sub>, que es un gas producido en la combustión de cualquier producto orgánico que contenga carbono en su composición. La forma de reducirlo es reduciendo el consumo, utilizando carburantes con menor relación carbono/hidrógeno o utilizando carburantes de origen vivo en vez de fósil.

Ambos conceptos son diferentes y no acoplados, ya que muchas de las soluciones para reducir las emisiones contaminantes producen un aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Esto debe ser realizado además manteniendo unos niveles de seguridad y de conductibilidad del vehículo, con un precio competitivo y con buen nivel de confort, fiabilidad y durabilidad.

## 2.4.2 Diferencias entre motores diésel-gasolina

En Europa ha existido un incremento de las ventas de vehículos diésel, como se muestra en la figura 14, motivado por sus mejores prestaciones y por un precio ligeramente inferior del gasóleo en algunos países debido a menores impuestos. Por su tecnología de combustión, éstos motores son más contaminantes, pero consumen menos que los de encendido provocado (gasolina, GLP, gas natural o etanol), que son bastante menos contaminantes por el uso de catalizadores especiales.

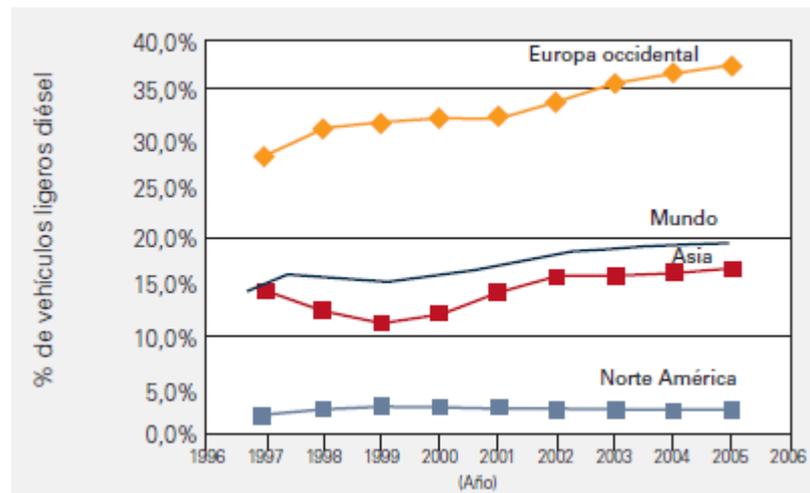


Figura 14. Dieselización del parque de vehículos ligeros. Fuente: Calidad del aire urbano, salud y tráfico rodado.

Las últimas tecnologías aplicadas a las mecánicas necesarias debido a la actualización de las normas de emisiones (la actual es la EURO 6) han permitido reducir significativamente éstas en vehículos diésel mayoritariamente, ya que emiten mayoritariamente  $\text{NO}_2$  y PM, que provoca una contaminación más visible que la producida por las emisiones de los motores de gasolina, ya que emiten menos  $\text{NO}_2$  y PM, pero por el contrario produce más cantidad de  $\text{CO}_2$  que aunque sea menos visible, provoca un aumento del efecto invernadero.

A pesar de todo se está llegando a un límite en el que existe la dificultad de seguir mejorando los motores diésel de manera óptima y viable a nivel económico por tanto no sería una opción errónea llevar a cabo un endurecimiento de los límites de emisiones procedentes de vehículos gasolina en la EURO 7 (de hecho se está estudiando dicha posibilidad), ya que con la actualización y renovación de las normativas, los límites que mayoritariamente se endurecían eran los de diésel.

Sin embargo cabe decir que estos últimos años con el empleo de la inyección directa (downsizing) y carga estratificada en motores de

gasolina, para reducir el consumo e intentar solventar esa diferencia eficiente que tenían en comparación con motores diésel, ha provocado que empiecen a aparecer problemas de emisiones en los motores de gasolina similares a los de motores diésel. Por tanto, dado este problema “inesperado” y el avance de sistemas anticontaminación de motores diésel, la realidad es que no existe una diferencia significativa entre las emisiones de un motor u otro.

## 2.5 PLAN DE MOVILIDAD SOSTENIBLE

Un Plan de Movilidad Sostenible, PMUS, es un conjunto de actuaciones cuyo objetivo es la implantación de formas de desplazamiento más sostenibles dentro de una ciudad, esto es, de medios de transporte que compatibilicen el crecimiento económico, la cohesión social y la defensa del medio ambiente ofreciendo así una mejor calidad de vida a los ciudadanos.

Se trata por tanto de ofrecer alternativas viables al vehículo privado y de concienciar a la ciudadanía sobre un uso responsable de éste.

Los PMUS poseen una visión integradora que los diferencia de los tradicionales planes de circulación. Las características principales de estos planes son:

- Actúan a nivel local o metropolitano garantizando la accesibilidad y la movilidad.
- Cubren todos los medios de transporte, personas y mercancías.
- Ligados a planes de las Administraciones Públicas para reducir los impactos negativos del transporte.
- Deben resolver el actual crecimiento de la congestión y plantear una planificación urbanística que tenga en cuenta la accesibilidad y la demanda de movilidad que generan las distintas áreas de actividad.

De esta forma, la implantación de un PMUS en un municipio se convierte en una de las más eficaces formas de paliar los efectos negativos de la movilidad urbana y sus consecuencias.

La Unión Europea insta a que todas las capitales de los Estados miembros así como las ciudades mayores de 100.000 habitantes elaboren un PMUS (aunque sería recomendable que todo municipio que preste servicio de transporte público lo implantara) con el fin de que dichos municipios puedan beneficiarse de las siguientes ventajas:

- Disminución de atascos y congestión.
- Disminución del nivel de ruido, contaminación atmosférica y accidentes.
- Disminución del consumo de combustibles fósiles promoviendo el uso de fuentes alternativas de energía.
- Reducción de los tiempos de viaje por una mejora de los servicios de transporte público.
- Recuperación de suelo por su menor dedicación a infraestructuras de transporte.
- Mejora de la accesibilidad a la red para las personas de movilidad reducida.
- Mejora de la salud de la población y de la calidad de vida.

La mayor parte de los impactos y problemas derivados de la movilidad urbana, se acentúan en las ciudades grandes (a partir de 100 mil habitantes), aunque a partir de 50 mil habitantes ya se considera que los problemas en relación a la movilidad urbana son considerables, ya que son ciudades que tienen obligación de prestar servicios de transporte público. Además con el paso del tiempo, la tendencia de las ciudades es ir aumentando su nº de habitantes y por tanto, como muestra la tabla 6, cada vez hay más ciudades con un tamaño superior a 50 mil habitantes.

Evolución del número de ciudades españolas en función de su tamaño							
Nº de habitantes	1960	1970	1981	1991	1995	2000	2005
> 500.000	3	4	6	6	6	6	6
250.000-500.000	4	4	11	12	10	9	10
100.000-250.000	19	30	33	38	37	37	42
50.000-100.000	32	33	48	51	55	60	71
<b>Suma</b>	<b>58</b>	<b>71</b>	<b>98</b>	<b>107</b>	<b>108</b>	<b>112</b>	<b>129</b>

Tabla 6. Evolución del número de ciudades españolas en función de su tamaño. Fuente: Guía PMUS 2006.

De entre todas las políticas de regulación que incluye un PMUS podemos destacar las siguientes:

- Control de acceso y del estacionamiento de los centros urbanos.
- Mejora de la oferta de transporte público.
- Desarrollo de políticas de integración tarifaria y de intermodalidad entre diferentes medios de transporte público.
- Creación de puntos de estacionamiento disuasorio en las estaciones de las afueras de las ciudades.
- Fomento de la movilidad a pie y en bicicleta así como una regulación más estricta del reparto de mercancías en la ciudad.
- Gestión de la movilidad relativa a los grandes centros atractores.

Algunas de estas medidas exceden las competencias propias de las Administraciones Locales por lo que es importante promover el consenso con el resto de AA.PP. y empresas que operan en la zona además de con la ciudadanía. Encontramos un resumen de las más importantes en la Tabla 7.

<b>Área de intervención</b>	<b>Medidas propuestas</b>
<b>1) Control y ordenación de tráfico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Reducción de la velocidad.</li> <li>· Prioridad en intersecciones para el transporte público.</li> <li>· Circunvalaciones</li> </ul>
<b>2) Limitación del aparcamiento para el vehículo privado</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Nuevas regulaciones de aparcamientos públicos y privados.</li> <li>· Aparcamientos disuasorios.</li> </ul>
<b>3) Potenciación del transporte público</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Intercambiadores.</li> <li>· Carriles bus y carriles VAO.</li> <li>· Mejoras den los sistemas de metro, tranvía, autobuses...</li> <li>· Sistemas tarifarios integrados.</li> <li>· Aplicación de nuevas tecnologías.</li> </ul>
<b>4) Recuperación calidad urbana</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Mejora de la red de itinerarios peatonales.</li> <li>· Red de itinerarios ciclistas.</li> <li>· Alquiler y aparcamientos de bicicletas.</li> </ul>
<b>5) Medidas específicas de gestión de la movilidad.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Transporte a demanda.</li> <li>· Promoción de viajes compartidos en coche.</li> <li>· Peaje urbano.</li> </ul>
<b>6) Personas de movilidad reducida</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Accesibilidad de la red viaria y las paradas y vehículos de transporte público.</li> </ul>
<b>7) Movilidad de mercancías</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Control circulación de vehículos pesados.</li> <li>· Limitación de horarios.</li> <li>· Centros de transporte.</li> </ul>
<b>8) Medidas para la integración de la movilidad en las políticas urbanas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Peatonalización.</li> <li>· Modelos urbanos orientados al transporte público en su planeamiento urbanístico.</li> <li>· Diseño de barrios amigables orientados al desarrollo sostenible.</li> </ul>
<b>9) Medidas para mejorar la calidad ambiental y el ahorro energético</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Uso de combustibles limpios en el transporte público.</li> <li>· Vehículos eléctricos para el reparto de mercancías.</li> <li>· Nueva fiscalidad sobre carburantes.</li> <li>· Carriles bici e itinerarios peatonales.</li> </ul>
<b>10) Mejora del transporte a grandes áreas atractoras</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Localización de centros atrectores.</li> <li>· Autobuses de empresa.</li> <li>· Servicios especiales de transporte público.</li> <li>· Teletrabajo.</li> <li>· Horarios alternativos.</li> <li>· Bonos de transporte de empresas</li> </ul>
<b>11) Medidas de seguridad</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Mejora de la señalización.</li> <li>· Mejora de intersecciones.</li> <li>· Separación de flujos.</li> </ul>

Tabla 7. Medidas propuestas en un PMUS en relación a su área de intervención. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Guía PMUS 2006.

### **3. ESTUDIO DE EMISIONES**

Un inventario de emisiones a la atmósfera es una compilación de emisiones estimadas de contaminantes atmosféricos, clasificadas atendiendo a distintas fuentes de emisión, entendiendo por tal todo proceso que introduzca productos que modifiquen la composición de la atmósfera.

Teniendo en cuenta los crecientes costes derivados del control de emisiones, se hace cada vez más importante elaborar estrategias de control para asegurar que los objetivos medioambientales perseguidos se logran eficientemente.

La investigación de los posibles impactos y costes de las diferentes medidas de reducción de emisiones posibles a aplicar requiere un conocimiento detallado de las fuentes de emisión, especialmente de los procesos que producen esas emisiones, de los factores de emisión relacionados con estos procesos y del grado de utilización de las técnicas de control. Así pues, la identificación de medidas eficientes de reducción de emisiones demanda inventarios de emisiones detallados que incluyan información acerca de la estructura y la actividad de las fuentes de emisión.

Existen dos enfoques metodológicos para la estimación de emisiones en el desarrollo de un inventario.

- Enfoque TOP-DOWN: En primer lugar, se estiman las emisiones totales para el área de estudio. A continuación, se efectúa una desagregación espacial, distribuyendo las emisiones totales, calculadas inicialmente, entre todas las celdas que contiene el dominio de estudio según parámetros que muestran la densidad de actividad.
- Enfoque BOTTOM-UP: Se estiman las emisiones para cada celda que conforma el área de estudio, mediante la aplicación de parámetros concretos que sean significativos para cada celda. Finalmente sumando las emisiones de todas las celdas se obtiene el valor total del área de estudio.

Los inventarios de emisiones se caracterizan principalmente por disponer de alta resolución espacial y temporal. Esto se consigue mediante un mallado del dominio de estudio dividiendo éste en celdas regulares (preferiblemente cuadradas o rectangulares). Su tamaño dependerá del grado de detalle que sea necesario. Para la localización de estas celdas es necesario que estén georreferenciadas, por lo que se requiere un sistema de coordenadas geográficas adecuado para el área de estudio. Las emisiones pueden calcularse por horas, día, mes y año dependiendo del grado de detalle de la información conseguida.

El método más común utilizado para la estimación de emisiones consiste en la combinación de dos factores: el factor de actividad (*FA*) y el factor de emisión (*FE*).

$$E_{i,j} = FA_{i,j} \cdot FE_{i,j} \quad (3.1)$$

El "FA" cuantifica el nivel de actividad humana  $i$  que produce emisiones del contaminante  $j$ . En cambio, el "FE" es un valor representativo que intenta relacionar la cantidad liberada a la atmósfera de un contaminante  $j$  debido a la actividad  $i$  y suele expresarse como peso del contaminante partido por distancia, duración o unidad de peso.

El factor de actividad representa un factor característico y representativo de dicha actividad, por ejemplo en el caso del sector del tráfico vehicular, la intensidad de circulación por un tramo de vía en concreto. El nivel de actividad  $i$  representa el tipo de vehículo que circula por el tramo o el tipo de vía del tramo considerado (urbano, carretera o autopistas y autovías). En lo que respecta a los contaminantes emitidos  $j$ , estos pueden ser  $\text{NO}_x$ , COV, CO, PST,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , y GEI ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$ ).

A medida que se van introduciendo nuevas variables y ecuaciones, el modelo de cálculo se va haciendo cada vez más complejo, aunque el concepto del modelo de cálculo seguirá siendo el mismo: relacionar una actividad con la emisión de contaminantes propios de cada actividad.

En resumen, la metodología del proceso de construcción de un inventario de emisiones podría esquematizarse según se representa en la figura 15:

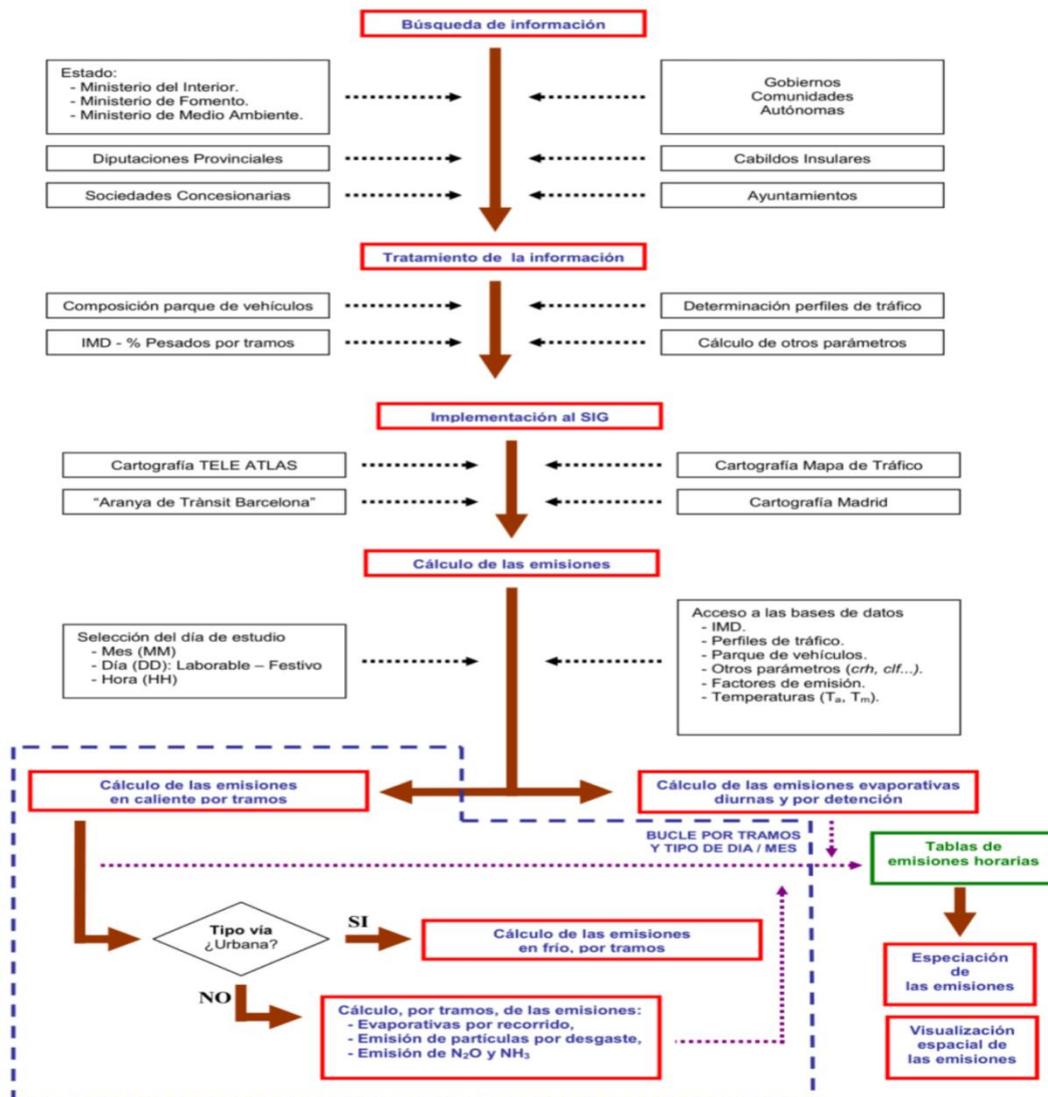


Figura 15. Esquema metodológico del inventario de emisiones del tráfico rodado. Fuente: Inventario de emisiones atmosféricas del tráfico rodado en España.

A continuación vamos a explicar y detallar distintas metodologías para el tratamiento de la información utilizada en el cálculo de emisiones.

### 3.1 METODOLOGÍA NTZIACHRISTOS AND SAMARAS (2000) – COPERT III

Se trata de una metodología muy utilizada para la realización de inventarios de emisiones que tratan diversos contaminantes distintos (y no uno concretamente como otros casos), como en el BCS-CNS (Barcelona Supercomputing Center- Centro Nacional de Supercomputación) o el Laboratorio de Modelización Ambiental (LMA) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) dirigido por el Doctor José M<sup>a</sup> Baldasano.

Las emisiones globales generadas por el tráfico rodado son el resultado de la suma de las emisiones producidas en las diferentes condiciones térmicas de funcionamiento del motor, conocidas como emisiones en caliente, en frío y evaporativas.

- **Emisiones en caliente:** Las emisiones en caliente son aquellas que provienen del tubo de escape de los vehículos, cuando los motores alcanzan una estabilidad en su temperatura de funcionamiento; es decir, cuando la temperatura del agua de refrigeración es superior a 70°C.
- **Emisiones en frío:** Las emisiones en frío son aquellas que provienen del tubo de escape de los vehículos antes de que el agua de refrigeración del motor haya alcanzado los 70°C.
- **Emisiones evaporativas:** Aquellas emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) que proceden de la evaporación del combustible (esencialmente de la gasolina) desde otros dispositivos diferentes del tubo de escape (tanque de almacenamiento de combustible y cárter, principalmente).

Por tanto, las emisiones del tráfico rodado, para cada tipo de contaminante, son el resultado de la ecuación 3.2:

$$E^{Totales} = E^{Caliente} + E^{Frío} + E^{Evaporativas} \quad (3.2)$$

Los contaminantes cubiertos por el modelo de cálculo son NO<sub>x</sub>, COV, CO, PST (por combustión, por desgaste de neumáticos, por abrasión de pavimento y por frenado), SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O.

#### 3.1.1 Emisiones en caliente

La emisión horaria en caliente, por unidad de tiempo (hora “t<sub>h</sub>”) y unidad de espacio (celda “k”), para un tramo de vía “r” y el contaminante “i” se valora mediante la ecuación 3.3:

$$E_r^{i,c}(k, t_h) = E_r^{i,c}(k, h) = \left(\frac{Crh}{100}\right) \times \sum_{j=1}^n Clf \times Crd \times IMD_{rj}(k) \times L_r(k) \times F_j^{i,c}(v_r) \quad (3.3)$$

Los parámetros que intervienen en la ecuación son:

- k: Unidad de espacio, celda.
- t: Unidad de tiempo (hora del día).
- i: Tipo de contaminante (NO<sub>x</sub>, COV, CO, PST, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>).
- r: Tramo de vía (urbana, carretera convencional, autopista) en la celda "k".
- j: Categoría del vehículo (según el tipo de vehículo, peso, antigüedad, cilindrada).
- n: Número de tipos de vehículos (j = 1,..., n) que circulan por el tramo de vía "r" por unidad de tiempo.

El término o resultado obtenido de la aplicación de esta ecuación es:

$E_r^{i,c}(k, h)$ : Emisión en caliente del contaminante "i" por unidad de tiempo (hora t<sub>h</sub>) unidad de espacio (celda "k") debido al tráfico en el tramo de vía "r".  
Unidad [g/hora].

Los datos necesarios son los siguientes:

$Crh$ : Porcentaje de la IMD en la hora "t<sub>n</sub>" con respecto a la IMD total.

$F_j^{i,c}(v_r)$ : Factor de emisión en caliente del contaminante "i" para el vehículo de categoría "j". Depende del promedio de velocidad de circulación del vehículo por el tramo de vía "r". Unidad [g/km].

$v_r$ : Promedio de velocidad de circulación en el tramo de vía "r". Unidad [km/h].

$L_r(k)$ : Longitud del tramo de vía "r" en la celda "k". Unidad [km].

$IMD_{rj}(k)$ : Intensidad Media Diaria (en base anual) del tráfico de vehículos de la categoría "j" que circulan por el tramo de vía "r" incluida en la unidad de espacio "k". Unidad [vehículos/día].

$Crd$ : Relación entre la IMD diaria y la IMD anual.

$Clf$ : Coeficiente de tráfico diario (relación entre IMD en día laborable o en día festivo).

La emisión diaria en caliente, por unidad de tiempo "t" y unidad de espacio (celda "k"), para un tramo de vía "r" y el contaminante "i" se valora mediante la ecuación 3.4:

$$E_r^{i,c}(k, t) = E_r^{i,c}(k, d) = \sum_{j=1}^n Clf \times Crd \times IMD_{rj}(k) \times L_r(k) \times F_j^{i,c}(v_r) \quad (3.4)$$

Se hace distinción entre días laborables y días festivos.

La emisión mensual en caliente, por unidad de tiempo “t” y unidad de espacio (celda “k”), para un tramo de vía “r” y el contaminante “i” se valora mediante la ecuación 3.5:

$$E_r^{i,c}(k, m) = \sum_{d=1}^{dfest} E_r^{i,c}(k, festivo) + \sum_{d=1}^{dlab} E_r^{i,c}(k, laborable) \quad (3.5)$$

Es el resultado de la suma de emisiones diarias a lo largo de un mes (teniendo en cuenta los días festivos y laborables).

La emisión anual se puede calcular mediante la ecuación 3.6:

$$E_r^{i,c}(k, a) = \sum_{m=1}^{12} E_r^{i,c}(k, mensual) \quad (3.6)$$

### 3.1.2 Emisiones en frío

Las emisiones en frío se pueden producir en cualquier tipo de vía aunque se presentan mayoritariamente en vías urbanas.

La emisión horaria en frío, por unidad de tiempo “t<sub>h</sub>” y unidad de espacio (celda “k”), para un tramo de vía “r” y el contaminante “i” se valora mediante la ecuación 3.7:

$$E_r^{i,f}(k, t_h) = E_r^{i,f}(k, h) = \sum_{j=1}^n E_r^{i,c}(k, h) \times \beta(L_{viaje}, T_a) \times \left( \frac{F^{i,f}}{F^{i,c}}(T_a) - 1 \right) \quad (3.7)$$

Los parámetros que intervienen son:

- k: Unidad de espacio, celda.
- t<sub>h</sub>: Unidad de tiempo, hora del día (0, 1, ..., 23).
- i: Tipo de contaminante (NO<sub>x</sub>, COV, CO, SO<sub>2</sub>, PST, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>).
- r: Tramo de vía (urbana únicamente) en la celda “k”.
- j: Categoría del vehículo (según tipo de vehículo, peso, antigüedad y cilindrada).
- n: Número de tipos de vehículos (j = 1, ..., n) que circulan por el tramo de vía “r” por unidad de tiempo.

El término resultante es:

$E_r^{i,f}(k, t_h)$ : Emisión en frío del contaminante “i” por unidad de tiempo (t<sub>h</sub>) y unidad de espacio (celda “k”) debido al tráfico por el tramo de vía “r” que se encuentra en la celda “k”. Unidad [g/día]

Los datos necesarios son los siguientes:

$T_a$ : Temperatura del aire. Unidad [°C].

$L_{viaje}$  : Longitud media de un viaje por vía urbana.

$\beta(L_{viaje}, T_a)$  : Porcentaje del trayecto urbano transcurrido en frío. Se determina en función de la longitud media de un viaje por vía urbana  $L_{viaje}$  y de la temperatura del aire  $T_a$ .

$\frac{F_j^{i,f}}{F_j^{i,c}}(T_a)$  : Relación entre el factor de emisión en frío y el factor de emisión en caliente, del contaminante “i”, para el vehículo de categoría “j”. Depende de la temperatura del aire  $T_a$ . Unidad [g/km].

$E_r^{i,c}(k, h)$  : Emisión horaria en caliente, del contaminante “i” en el tramo de vía “r” contenido en la celda “k”.

La emisión diaria en frío, por unidad de tiempo “t” y unidad de espacio (celda “k”), para un tramo de vía “r” y el contaminante “i” se valora mediante la ecuación 3.8:

$$E_r^{i,f}(k, \text{festivo-laborable}) = \sum_{h=1}^{24} E_r^{i,f}(k, h) \quad (3.8)$$

La unidad temporal hace distinción entre días laborables y festivos y el término resultante será el resultado de la suma de todas las emisiones horarias del día estudiado.

La emisión mensual en frío se valora mediante la ecuación 3.9:

$$E_r^{i,f}(k, \text{mensual}) = \sum_{d=1}^{df} E_r^{i,f}(k, \text{festivo}) + \sum_{d=1}^{dl} E_r^{i,f}(k, \text{laborable}) \quad (3.9)$$

Es el resultado de la suma de emisiones diarias a lo largo de un mes (teniendo en cuenta los días festivos y laborables).

La emisión anual en frío se valora mediante la ecuación 3.10:

$$E_r^{i,f}(k, \text{anual}) = \sum_{m=1}^{12} E_r^{i,f}(k, \text{mensual}) \quad (3.10)$$

### 3.1.2.1 Información adicional requerida para las emisiones en frío

En el cálculo de las emisiones en frío es necesario conocer los siguientes parámetros:

- Porcentaje del trayecto (urbano) recorrido con el motor en frío:

$$\beta(L_{viaje}, T_a)$$

- La relación entre los factores de emisión en frío y en caliente:

$$\frac{F_j^{i,f}}{F_j^{i,c}}(T_a)$$

El parámetro  $\beta$  (Cold Mileage Percentage) equivale al porcentaje del trayecto (urbano) recorrido con el motor en frío y depende esencialmente de la longitud media del trayecto ( $L_{\text{viaje}}$ ) y de la temperatura del aire ( $T_a$ ). Es necesario conocer  $L_{\text{viaje}}$  y  $T_a$ . La determinación del parámetro  $\beta$  se realiza mediante la ecuación 3.11:

$$\beta(L_{\text{viaje}}, T_a) = 0.6474 - (0.02545 \times L_{\text{viaje}}) - (0.00974 - (0.000385 \times L_{\text{viaje}})) \times T_a \quad (3.11)$$

La longitud media del trayecto  $L_{\text{viaje}}$  ha sido estimada en el caso de España, en 6.31 km por el grupo de trabajo CORINAIR.

Así pues, la evolución del parámetro  $\beta$  según la temperatura del aire  $T_a$  se puede observar en la figura 16:

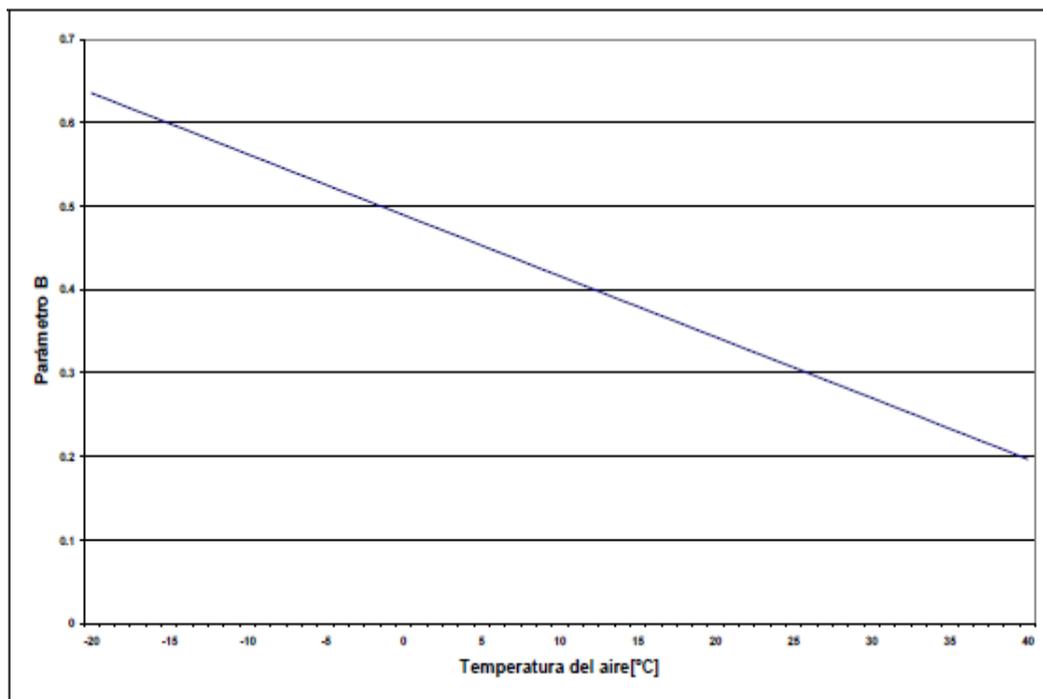


Figura 16. Evolución del parámetro  $\beta$  en función de la temperatura del aire para una longitud de trayecto de 6.31 km. Fuente: Inventario de emisiones atmosféricas del tráfico rodado en España.

A la vista de la figura anterior, comprobamos que cuanto mayor es la temperatura del aire menor es el porcentaje de recorrido en frío. En España y en invierno, con una temperatura media de 8°C, aproximadamente un 43% del recorrido típico diario se desarrolla en frío. En cambio, en verano, para una temperatura media de 22°C, alrededor del 33% del recorrido típico diario será en frío.

La variabilidad del parámetro  $\beta$  es importante de cara al cálculo de las emisiones en frío, ya que teniendo en cuenta que las emisiones en frío se producen esencialmente en las vías urbanas, es necesario conocer la distribución horaria de los perfiles de temperatura mensual, sobretodo en grandes ciudades como Barcelona o Madrid.

### 3.1.2.2 Relación entre factores de emisión en frío y en caliente

Según la Agencia Europea de Medioambiente, la relación entre los factores de emisión en frío y en caliente depende tanto del tipo de vehículo como del tipo de contaminante tal y como se puede observar a continuación:

- Monóxido de Carbono, CO:

$$\text{Turismos gasolina sin catalizador: } \frac{F^{CO,f}}{F^{CO,c}}(T_a) = 3.7 - 0.09 \times T_a$$

$$\text{Turismos gasolina con catalizador: } \frac{F^{CO,f}}{F^{CO,c}}(T_a) = 9.04 - 0.09 \times T_a$$

$$\text{Turismos diésel: } \frac{F^{CO,f}}{F^{CO,c}}(T_a) = 1.9 - 0.03 \times T_a$$

- Óxidos de Nitrógeno, NO<sub>x</sub>:

$$\text{Turismo gasolina sin catalizador: } \frac{F^{NO_x,f}}{F^{NO_x,c}}(T_a) = 1.14 - 0.006 \times T_a$$

$$\text{Turismos gasolina con catalizador: } \frac{F^{NO_x,f}}{F^{NO_x,c}}(T_a) = 3.66 - 0.006 \times T_a$$

$$\text{Turismos diésel: } \frac{F^{NO_x,f}}{F^{NO_x,c}}(T_a) = 1.3 - 0.013 \times T_a$$

- Compuestos Orgánicos Volátiles, COV:

$$\text{Turismos gasolina sin catalizador: } \frac{F^{COV,f}}{F^{COV,c}}(T_a) = 2.8 - 0.06 \times T_a$$

$$\text{Turismos gasolina con catalizador: } \frac{F^{COV,f}}{F^{COV,c}}(T_a) = 12.59 - 0.06 \times T_a$$

Turismos diésel:

$$\text{-Si } T_a < 29^\circ\text{C, entonces } \frac{F^{COV,f}}{F^{COV,c}}(T_a) = 3.1 - 0.09 \times T_a$$

$$\text{-Si } T_a > 29^\circ\text{C, entonces } \frac{F^{COV,f}}{F^{COV,c}}(T_a) = 0.5$$

- Consumo de combustible, CC:

$$\text{Turismos gasolina sin catalizador: } \frac{F^{CC,f}}{F^{CC,c}}(T_a) = 1.47 - 0.009 \times T_a$$

$$\text{Turismos gasolina con catalizador: } \frac{F^{CC,f}}{F^{CC,c}}(T_a) = 1.47 - 0.009 \times T_a$$

Turismos diésel: 
$$\frac{F^{CC,f}}{F^{CC,c}}(T_a) = 1.34 - 0.008 \times T_a$$

- Partículas, PST:

Turismos diésel:

-Si  $T_a < 26^\circ\text{C}$ , entonces 
$$\frac{F^{PST,f}}{F^{PST,c}}(T_{aire,h}) = 3.1 - 0.1 \times T_a$$

-Si  $T_a > 26^\circ\text{C}$ , entonces 
$$\frac{F^{PST,f}}{F^{PST,c}} = 0.5$$

Este nivel de detalle en la información de turismos se debe a que, en vías urbanas, el parque de vehículos está compuesto mayoritariamente por turismos. En este caso, además de los turismos se consideran también las furgonetas o vehículos comerciales ligeros (carga útil < 3.5 t).

De acuerdo a las anteriores funciones expresadas, las mayores relaciones entre factores de emisión en frío y en caliente se presentan para los turismos gasolina equipados con catalizador especialmente para los contaminantes CO, NO<sub>x</sub>, COV, y PST. Sin embargo, la relación para el caso del consumo de combustible tiene similar comportamiento para los tres grupos de vehículos analizados.

Otras consideraciones con respecto a la relación entre los factores de emisión en frío y caliente son:

- 1) En la actualidad, la metodología para estimar la relación entre factores de emisión en frío y factores de emisión en caliente en el caso de vehículos comerciales pesados (carga útil > 3.5 t), principalmente autobuses y camiones de transporte o distribución de mercancías, no está muy desarrollada.

Así pues, la estimación de las emisiones en frío para autobuses y camiones se basará en una relación entre factores en frío y en caliente más genérica que no distingue según el tipo de combustible o la antigüedad del vehículo.

- Monóxido de Carbono, CO:

$$\frac{F^{CO,f}}{F^{CO,c}}(T_a) = 4 - 0.1 \times T_a$$

- Óxidos de Nitrógeno, NO<sub>x</sub>:

$$\frac{F^{NO_x,f}}{F^{NO_x,c}}(T_a) = 1.1 - 0.006 \times T_a$$

- Compuestos Orgánicos Volátiles, COV:

$$\frac{F^{COV,f}}{F^{COV,c}}(T_a) = 2.73 - 0.047 \times T_a$$

- 2) Las emisiones en frío de Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>) y Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) se valoran utilizando las relaciones de consumo de combustible.
- 3) Las emisiones en frío de Metano (CH<sub>4</sub>) se estiman utilizando las mismas funciones de relaciones de factores de emisión para los COV.
- 4) Las emisiones en frío de Monóxido de Dinitrógeno (N<sub>2</sub>O) se estiman utilizando las mismas funciones de relaciones de factores de emisión para los NO<sub>x</sub>.

A partir de las ecuaciones que definen las relaciones entre factores de emisión en frío y en caliente, se puede representar su evolución en función de la temperatura (figuras 17, 18, 19 y 20).

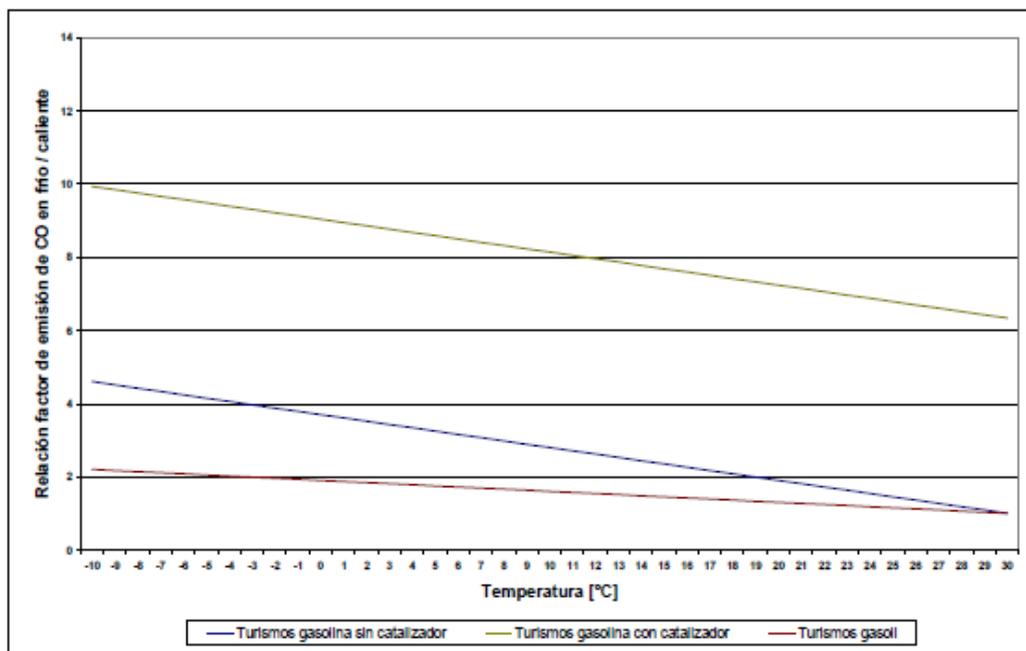


Figura 17. Relación entre los factores de emisión en frío y en caliente para CO. Fuente: Inventario de emisiones atmosféricas debidas al tráfico rodado en España.

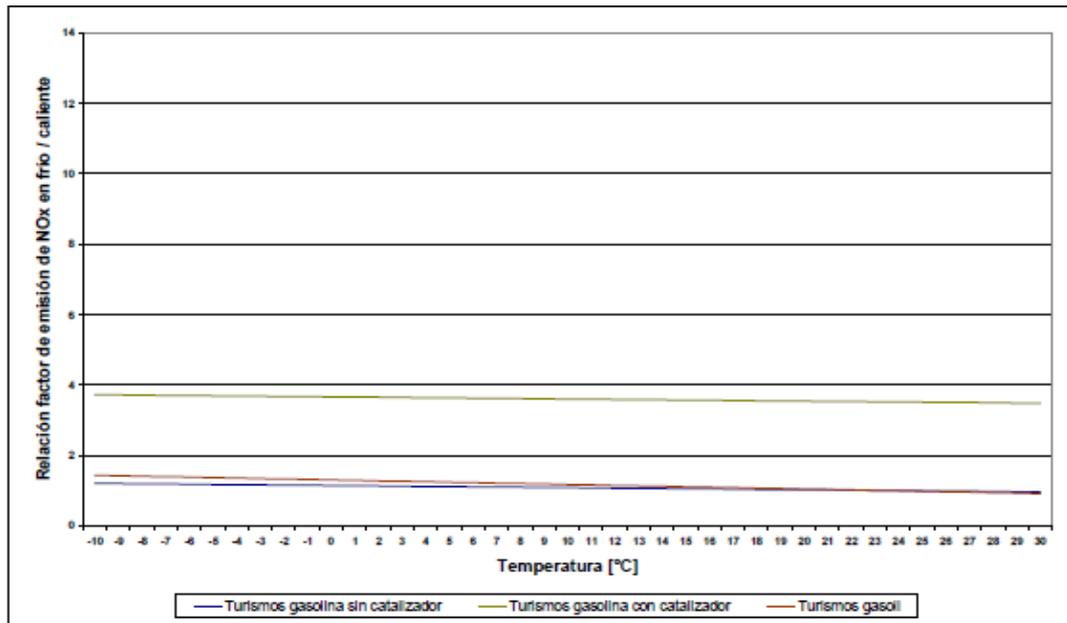


Figura 18. Relación entre los factores de emisión en frío y en caliente para NO<sub>x</sub>. Fuente: Inventario de emisiones atmosféricas debidas al tráfico rodado en España.

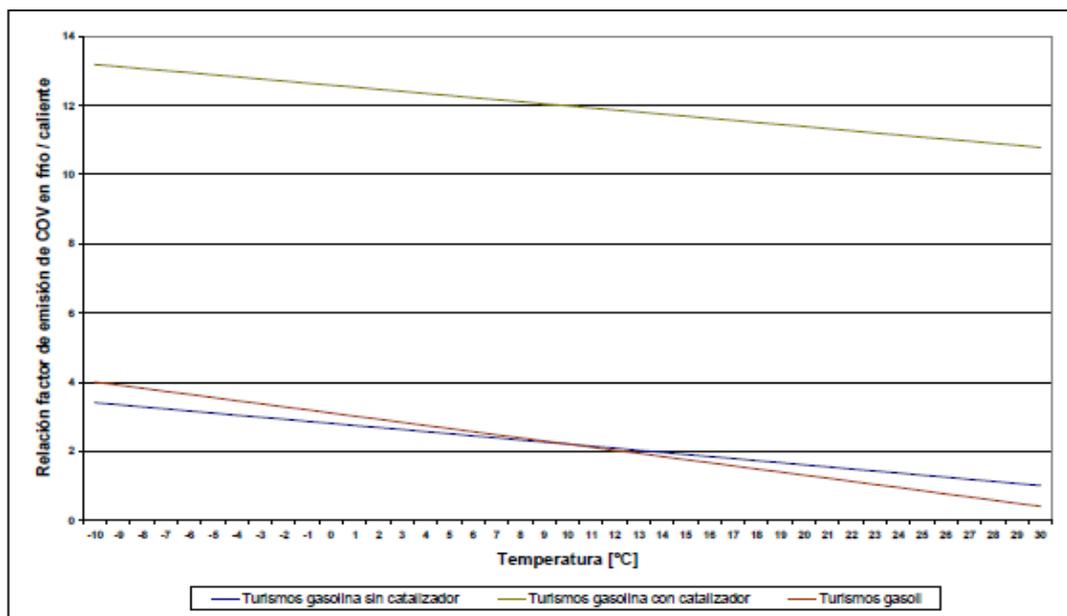


Figura 19. Relación entre los factores de emisión en frío y en caliente para COV. Fuente: Inventario de emisiones atmosféricas debidas al tráfico rodado en España.

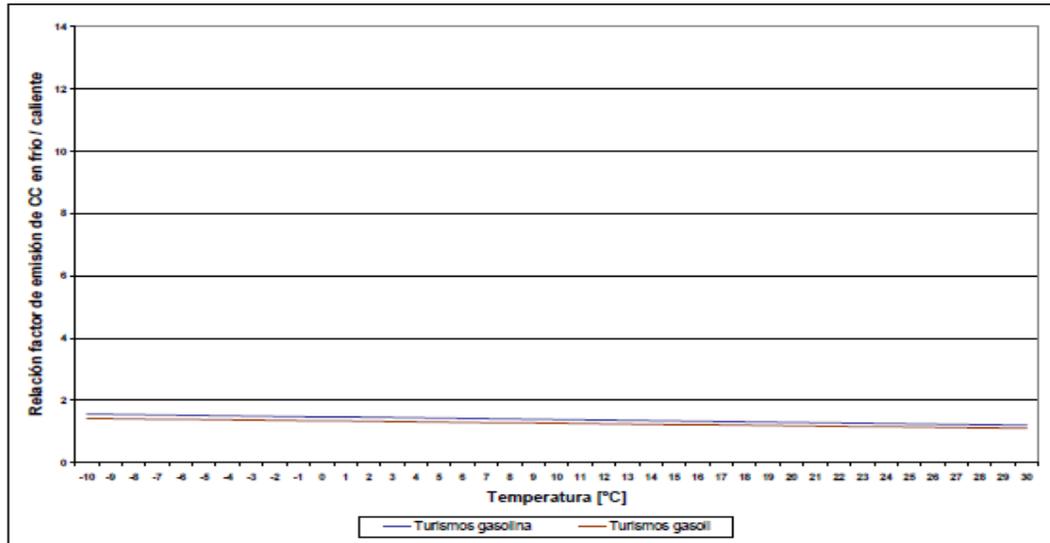


Figura 20. Relación entre los factores de emisión en frío y en caliente para Consumo de Combustible.  
Fuente: Inventario de emisiones atmosféricas debidas al tráfico rodado en España.

El cálculo de las emisiones en frío implica la valoración del término  $\left[ \frac{F^{i,f}}{F^{i,c}} (T_a) - 1 \right]$ ,

por ello la figura 21 indica la variación de este término en función de la temperatura.

Esta vez el rango de temperaturas a escoger sería el intervalo de -10°C hasta 40°C de manera que se pueda apreciar mejor el comportamiento de cada función para situaciones en las que la temperatura ambiente es muy elevada, como suele ocurrir en verano.

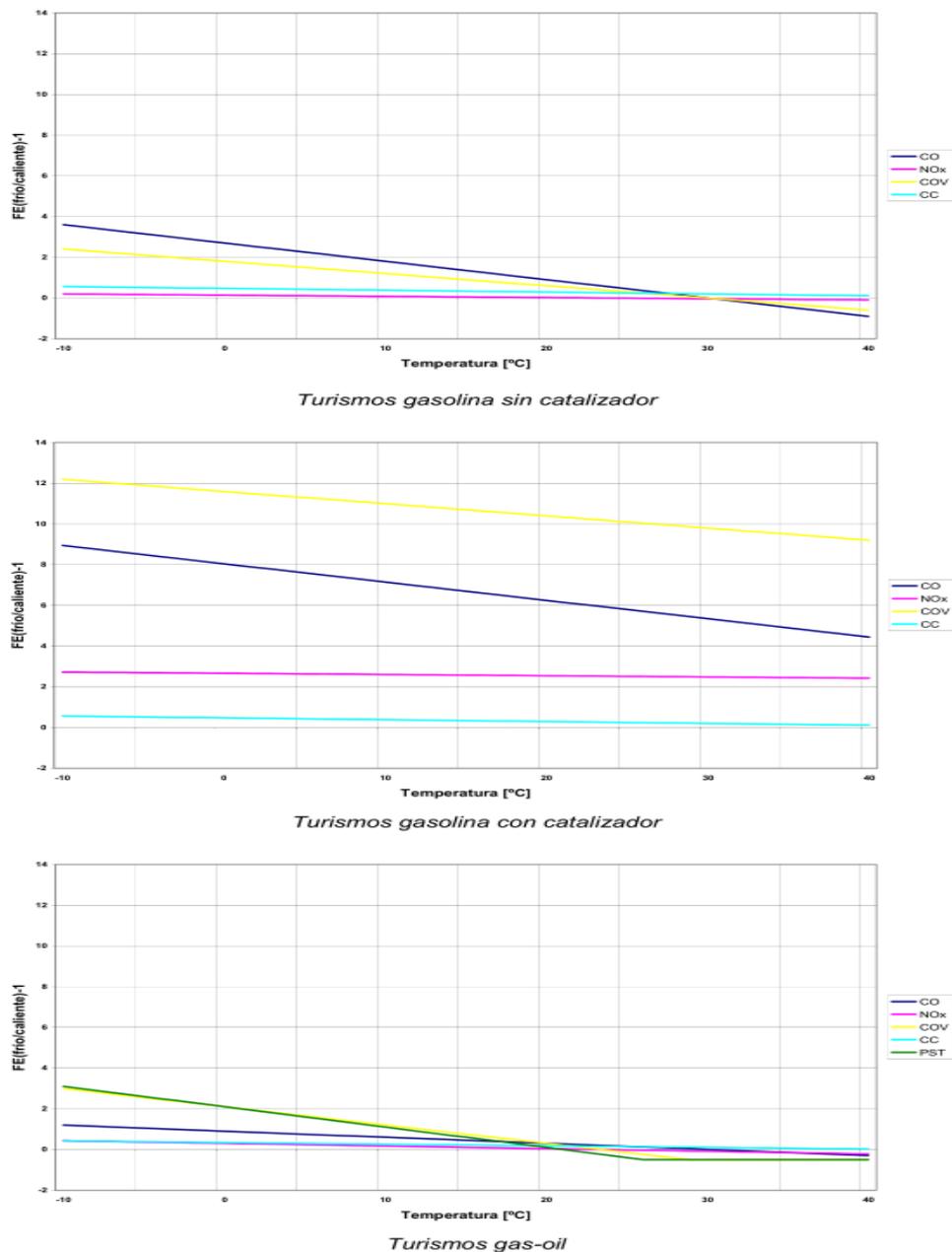


Figura 21. Variación del término FE (frío/caliente) - 1 para el cálculo de las emisiones en frío. Fuente: Inventario de emisiones atmosféricas del tráfico rodado en España.

A la vista de la figura 21, se deduce que en los turismos gasolina sin catalizador, este término es negativo para temperaturas superiores a 27°C. Además, las emisiones en frío de CO, NO<sub>x</sub> y COV para temperaturas superiores a ésta son negativas. Esta situación se repite con los turismos diésel. Para los turismos gasolina con catalizador, este término es siempre positivo en el intervalo de temperatura considerado.

Para temperaturas superiores a 27°C, las emisiones en caliente, obtenidas con los factores de emisión, son mayores a las emisiones verdaderas. El signo negativo de las emisiones en frío busca corregir los potenciales valores elevados de estas emisiones en caliente. Las emisiones en frío en estos rangos de temperatura deben tomarse con el

signo que proporciona el modelo de cálculo ya que es una medida correctora para el cálculo de las emisiones totales.

### **3.1.3 Emisiones evaporativas**

Las emisiones evaporativas están constituidas esencialmente por emisiones de COV que se pueden generar mediante tres mecanismos:

#### **1) Emisiones diurnas:**

Las emisiones evaporativas diurnas se producen por la variación diaria de la temperatura ambiente y se asocian a la expansión del vapor del combustible al interior del tanque de almacenamiento, a medida que se incrementa la temperatura con las horas del día.

Si no existe un dispositivo de control, el vapor del combustible va a parar a la atmósfera.

Durante la noche, cuando desciende la temperatura, el vapor del combustible se contrae y se produce el ingreso de aire fresco al interior del tanque, disminuyendo la concentración de COV en fase gaseosa y produciéndose por tanto una evaporación adicional.

#### **2) Emisiones por detención:**

Las emisiones evaporativas por detención se producen después del apagado del motor. El calor residual del motor y del tubo de escape produce un incremento de la temperatura del combustible inmovilizado.

La cámara del carburador es una de las principales fuentes de generación de este tipo de emisiones.

Se distinguen las emisiones por detención tibia y las emisiones por detención caliente.

#### **3) Emisiones durante el recorrido:**

Las emisiones evaporativas durante el recorrido se generan por la emisión de vapor de combustible desde el tanque de almacenamiento cuando el vehículo está en movimiento.

Se distinguen del mismo modo, las emisiones por recorrido en tibio y las emisiones por recorrido en caliente.

### 3.1.3.1 Emisiones evaporativas diurnas

Las emisiones diurnas diarias totales se calculan mediante la ecuación 3.12:

$$E_{veh}^{evap,d}(t) = E_{veh}^{evap,d}(diaria) = N_{veh} \times e_{veh}^d(T_{max}, T_{min}, RVP) \quad (3.12)$$

Los parámetros que intervienen son:

veh: Categoría de vehículos que producen emisiones evaporativas diurnas (turismos gasolina controlados, turismos gasolina no controlados, motocicletas).

El término resultante es:

$E_{veh}^{evap,d}(diaria)$ : Emisión evaporativa diurna total de COV por unidad de tiempo (t = 1 día) producida por los vehículos de la categoría "veh". Unidad [g/día].

Los datos necesarios son:

$N_{veh}$ : Número de vehículos de la categoría "veh" que producen emisiones evaporativas diurnas.

$e_{veh}^d$ : Factor de emisión para pérdidas diurnas de COV de los vehículos de tipo "veh". Es una función de la temperatura ambiental máxima ( $T_{max}$ ), de la temperatura ambiental mínima ( $T_{min}$ ) y de la volatilidad de la gasolina (medida por su Presión de Vapor Reid "RVP"). Unidad [g/día x vehículo].

Las emisiones horarias totales se estiman mediante la ecuación 3.13:

$$E_{veh}^{evap,d}(t) = E_{veh}^{evap,d}(horaria) = \frac{T_{a,h}}{T_{a,M}} \times \frac{E_{veh}^{evap,d}(diaria)}{24} \quad (3.23)$$

Los parámetros que intervienen son:

veh: Categoría de vehículos que producen emisiones evaporativas diurnas (turismos gasolina controlados, turismos gasolina no controlados, motocicletas).

h: Hora del día.

Los datos necesarios son:

$T_{a,h}$ : Temperatura ambiente de la hora h. Unidad [°C].

$T_{a,M}$ : Temperatura ambiente promedio diaria. Unidad [°C].

El término resultante es la emisión evaporativa diurna total de COV por unidad de tiempo (t = hora) producida por los vehículos de la categoría "veh". Unidad [g/hora].

La emisión evaporativa diurna mensual se valora mediante la ecuación 3.14:

$$E_{veh}^{evap,d}(\text{mensual}) = \sum_{d=1}^{df} E_{veh}^{evap,d}(\text{festivo}) + \sum_{d=1}^{dl} E_{veh}^{evap,d}(\text{laborable}) \quad (3.34)$$

Es el resultado de la suma de emisiones diarias a lo largo de un mes (teniendo en cuenta los días festivos y laborables).

La emisión evaporativa diurna anual se valora mediante la ecuación 3.15:

$$E_{veh}^{evap,d}(\text{anual}) = \sum_{m=1}^{12} E_{veh}^{evap,d}(\text{mensual}) \quad (3.45)$$

### 3.1.3.2 Desagregación espacial de las emisiones evaporativas diurnas

Hasta ahora, la estimación de las emisiones de contaminantes, en frío y en caliente, se realizaba para cada celda, lo cual proporcionaba una distribución espacial de las emisiones.

Sin embargo, la estimación de las emisiones evaporativas diurnas se realiza de manera global, para el conjunto de la zona de estudio. Por tanto, con el objetivo de distribuir las emisiones evaporativas por la malla de celdas que cubren la zona de estudio habrá que seguir las siguientes desagregaciones:

#### 1) Desagregación por tipo de vehículo (según nueva clasificación "j")

A partir de la emisión evaporativa diurna horaria, se ha de desagregar la emisión por tipo de vehículo según la ecuación 3.16:

$$E_j^{evap,d}(\text{horaria}) = \frac{\sum_{r=1}^{nr} IMH_{jr}}{\sum_{j=1}^{nj} \sum_{r=1}^{nr} IMH_{jr}} \times E_{veh}^{evap,d}(\text{horaria}) \quad (3.56)$$

Los parámetros que intervienen son:

j: Categoría de vehículo (según tipo, peso, antigüedad y cilindrada).

nj: Número de vehículos de la categoría j que producen emisiones evaporativas diurnas.

r: Tramo de vía (urbana, carretera convencional, autovía-autopista) en la celda "k".

nr: Número total de tramos de la red vial de análisis.

Los datos necesarios son:

$IMH_{jr}$  : Intensidad Media Horaria de los vehículos tipo “j” en el tramo de vía “r”.

$E_{veh}^{evap,d} (horaria)$  : Emisión evaporativa diurna total de COV por unidad de tiempo (t = hora) producida por los vehículos de la categoría “veh”.

El término resultante es:

$E_j^{evap,d} (horaria)$  : Emisión evaporativa diurna horaria de los vehículos de tipo “j”. Unidad [g/hora].

La desagregación por tipo de vehículo según la unidad de tiempo: diaria, mensual y anual se realiza de la misma manera sustituyendo únicamente

$E_{veh}^{evap,d} (horaria)$  por  $E_{veh}^{evap,d} (diaria)$ ,  $E_{veh}^{evap,d} (mensual)$  y

$E_{veh}^{evap,d} (anual)$  respectivamente.

## 2) Desagregación espacial

Una vez establecida la emisión evaporativa diurna horaria de los vehículos tipo “j”, se efectúa la desagregación espacial utilizando la densidad poblacional mediante la ecuación 3.17:

$$E^{evap,d} (k, t) = E^{evap,d} (k, horaria) = \sum_{j=1}^n \frac{P_k}{Pob} \times E_j^{evap,d} (horaria) \quad (3.67)$$

Los parámetros que intervienen son:

k: Unidad de espacio, celda.

j: Categoría de vehículo considerado en la estimación de las emisiones evaporativas diurnas.

n: Número de categorías de vehículos.

Los datos necesarios son:

$P_k$ : Población asignada a la celda “k”.

$Pob$ : Población total.

El término resultante es:

$E_j^{evap,d} (horaria)$  : Emisión evaporativa diurna horaria de COV por unidad de tiempo (t = hora) y unidad de espacio (celda k).  
Unidad [g/hora].

La desagregación espacial de las emisiones evaporativas diurnas, diaria, mensual y anual se realiza de la misma manera sustituyendo únicamente

$E_j^{evap,d}$  (horaria) por  $E_j^{evap,d}$  (diaria),  $E_j^{evap,d}$  (mensual) y  $E_j^{evap,d}$  (anual) respectivamente.

### 3.1.3.3 Información adicional requerida

La valoración de las emisiones evaporativas diurnas considera únicamente cuatro categorías de vehículos: turismos gasolina (anteriores a la categoría EURO I y posteriores a ella), ciclomotores y motocicletas.

Para el cálculo del factor de emisión diurna de COV, dentro de los turismos de gasolina, se hace una diferenciación en dos subgrupos:

- Turismos de gasolina con emisiones diarias no controladas. Este subgrupo incluye a todos los turismos que preceden a la categoría EURO I, es decir, turismos gasolina sin catalizador, turismos gasolina con catalizador de oxidación y catalizador de tres vías.
- Turismos de gasolina con emisiones diurnas controladas. Este subgrupo está compuesto por la categoría EURO I en adelante.

El factor de emisión para el primer subgrupo se puede determinar a partir de la ecuación 3.18:

$$FE_{COV}^{diurna} = 9.1 \times \exp(0.0158 \times (RVP - 61.2)) + 0.0574 \times (T_{\min} - 22.5) + 0.0614 \times (T_{\max} - T_{\min} - 11.7) \quad (3.78)$$

Donde:

$FE_{COV}^{diurna}$  : Factor de emisión diurna de COV. Unidad [g/veh x día].

$T_{\max}$  : Temperatura ambiente máxima en base mensual. Unidad [°C].

$T_{\min}$  : Temperatura ambiente mínima en base mensual. Unidad [°C].

RVP: Volatilidad de la gasolina (Presión de Vapor Reid). Unidad [kPa].

En el caso del factor de emisión para el segundo subgrupo, se asume que la eficiencia de los canister (cartucho de carbón activado) alcanza un 80%. Es decir, el factor de emisión será igual a 0.2 veces el factor de los vehículos no controlados.

Respecto a los ciclomotores, se asume que el factor de emisión diurna será un 20% del factor de emisión de los vehículos no controlados.

A su vez, con respecto a las motocicletas, se asume que el factor de emisión diaria será un 40% del factor de emisión de los vehículos no controlados.

La mayoría de las emisiones evaporativas se producen en vías urbanas, por tanto será muy importante disponer de los datos de temperatura media máxima y mínima en valores mensuales de las ciudades.

En relación a la presión de vapor RVP, se establecen unos intervalos que varían según la época del año. Se dividen los meses en 2 períodos, Verano (1 Mayo – 30 Septiembre) que la RVP adopta valores comprendidos entre 45 y 60 kPa, e Invierno (1 Octubre – 30 Abril) que adopta valores comprendidos entre 50 y 80 kPa.

### 3.1.3.4 Emisiones evaporativas por detención

Las emisiones evaporativas diarias por detención se pueden estimar mediante la ecuación 3.19:

$$E_{veh}^{evap,s}(t) = E_{veh}^{evap,s}(diaria) = N_m \times X_m (p \times e_{veh}^{s,hot}(T_a, RVP) + w \times e_{veh}^{s,warm}(T_a, RVP)) \quad (3.89)$$

El parámetro que interviene es “veh” y está definido en el punto 3.1.3.1 Emisiones evaporativas diurnas

Los datos necesarios son:

$N_m$  : Número de vehículos de la categoría “veh” que producen emisiones evaporativas por detención.

$p$  : Fracción de viajes que terminan su desplazamiento con el motor en caliente.

$w$  : Fracción de viajes que terminan su desplazamiento con el motor en frío o tibio  
( $p + w = 1$ )

$X_m$  : Número promedio de viajes al año que efectúa cada vehículo de la categoría “veh”.

$e_{veh}^{s,hot}(T_a, RVP)$  : Factor de emisión por detención en caliente de los vehículos de tipo “veh”. Es una función de la temperatura ambiente  $T_a$  y de la volatilidad de la gasolina RVP. Unidad [g/día x viaje].

$e_{veh}^{s,warm}(T_a, RVP)$  : Factor de emisión por detención tibio de los vehículos de tipo “veh”. Es una función de la temperatura ambiente  $T_a$  y de la volatilidad de la gasolina RVP. Unidad [g/día x viaje].

El término resultante es:

$E_j^{evap,s}(diaria)$  : Emisión evaporativa diaria de COV por detención producida por los vehículos de la categoría “veh”. Unidad [g/día].

Las emisiones horarias totales se estiman mediante la ecuación 3.20:

$$E_{veh}^{evap,s}(t) = E_{veh}^{evap,s}(horaria) = \frac{T_{a,h}}{T_{a,M}} \times \frac{E_{veh}^{evap,s}(diaria)}{24} \quad (3.20)$$

Los parámetros que intervienen son “veh” y “h” (hora del día).

Los datos necesarios son:

$T_{a,h}$  : Temperatura ambiente de la hora h. Unidad [°C].

$T_{a,M}$  : Temperatura ambiente promedio diaria. Unidad [°C]

El término resultante es:

$E_{veh}^{evap,s}(horaria)$ : Emisión evaporativa total de COV por detención por unidad de tiempo (t = hora) producida por los vehículos de la categoría “veh”.  
Unidad [g/hora].

La emisión evaporativa mensual por detención se valora mediante la ecuación 3.21:

$$E_{veh}^{evap,s}(mensual) = \sum_{d=1}^{df} E_{veh}^{evap,s}(festivo) + \sum_{d=1}^{dl} E_{veh}^{evap,s}(laborable) \quad (3.21)$$

Es el resultado de la suma de emisiones diarias a lo largo de un mes (teniendo en cuenta los días festivos y laborables).

La emisión evaporativa anual por detención se valora mediante la ecuación 3.22:

$$E_{veh}^{evap,s}(anual) = \sum_{m=1}^{12} E_{veh}^{evap,s}(mensual) \quad (3.22)$$

### 3.1.3.5 Desagregación espacial de las emisiones evaporativas por detención

La desagregación espacial de las emisiones evaporativas por detención sigue el mismo procedimiento que con las emisiones evaporativas diurnas.

#### 1) Desagregación por tipo de vehículo (según nueva clasificación “j”)

A partir de la emisión evaporativa horaria por detención, se ha de desagregar la emisión por tipo de vehículo según la ecuación 3.23:

$$E_j^{evap,s}(horaria) = \frac{\sum_{r=1}^{nr} IMH_{jr}}{\sum_{j=1}^{nj} \sum_{r=1}^{nr} IMH_{jr}} \times E_{veh}^{evap,s}(horaria) \quad (3.23)$$

La desagregación por tipo de vehículo según la unidad de tiempo: diaria, mensual y anual se realiza de la misma manera sustituyendo únicamente  $E_{veh}^{evap,s}(horaria)$  por  $E_{veh}^{evap,s}$  (diaria),  $E_{veh}^{evap,s}$  (mensual) y  $E_{veh}^{evap,s}$  (anual) respectivamente.

## 2) Desagregación espacial

Una vez establecida la emisión evaporativa horaria por detención de los vehículos tipo “j”, efectúa la desagregación espacial utilizando la densidad poblacional mediante la ecuación 3.24:

$$E^{evap,s}(k,t) = E^{evap,s}(k, horaria) = \sum_{j=1}^n \frac{P_k}{Pob} \times E_j^{evap,s}(horaria) \quad (3.24)$$

La desagregación espacial de las emisiones evaporativas por detención, diaria, mensual y anual se realiza de la misma manera sustituyendo únicamente  $E_j^{evap,s}(horaria)$  por  $E_j^{evap,s}$  (diaria),  $E_j^{evap,s}$  (mensual) y  $E_j^{evap,s}$  (anual) respectivamente.

### 3.1.3.6 Información adicional requerida

En la determinación de las emisiones evaporativas por detención se considera nuevamente las siguientes categorías de vehículos: turismos de gasolina incontrolados, turismos de gasolina controlados, ciclomotores y motocicletas.

A partir de las siguientes ecuaciones se pueden calcular los diferentes factores de emisiones evaporativas por detención:

#### 1) Detención en frío-tibio

Turismos de gasolina incontrolados:

$$FE = Exp \left( -1.644 + 0.01993 \times RVP + 0.07521 \times \left( \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) \right) \quad (3.25)$$

Turismos de gasolina controlados:

$$FE = 0.2 \times Exp \left( -2.41 + 0.02302 \times RVP + 0.09408 \times \left( \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) \right) \quad (3.26)$$

Ciclomotores:

$$FE = 0.2 \times Exp \left( -1.644 + 0.01993 \times RVP + 0.07521 \times \left( \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) \right) \quad (3.27)$$

Motocicletas:

$$FE = 0.4 \times \text{Exp} \left( -2.41 + 0.02302 \times RVP + 0.09408 \times \left( \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right) \right) \quad (3.28)$$

2) Detención en caliente

Turismos de gasolina incontrolados

$$FE = 3.0042 \times \text{Exp}(0.02 \times RVP) \quad (3.29)$$

Turismos de gasolina controlados

$$FE = 0.3 \times \text{Exp} \left( -2.41 + 0.02302 \times RVP + 0.09408 \times \left( \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right) \right) \quad (3.30)$$

Ciclomotores

$$FE = 0.2 \times 3.0042 \times \text{Exp}(0.02 \times RVP) \quad (3.31)$$

Motocicletas

$$FE = 0.4 \times 3.0042 \times \text{Exp}(0.02 \times RVP) \quad (3.32)$$

El análisis dimensional de los factores de emisión muestra que la unidad correspondiente es [g/viaje], por lo tanto es necesario conocer el número promedio de viajes para cada una de las cuatro categorías de vehículo.

La longitud media de viaje considerada es 6.31 km (como en apartados anteriores). Según el ICAEN, los turismos de gasolina recorren anualmente 8.700 km de promedio, mientras que las motocicletas o ciclomotores recorren unos 3.500 km.

Entonces, el promedio de viajes al año para turismos de gasolina, ciclomotores y motocicletas se puede obtener de la siguiente manera:

$$X_{\text{Gasolina}}^{\text{Turismos}} = \frac{8.700}{366 \times 6,31} \cong 3,77 \quad (3.33)$$

$$X_{\text{Ciclomotores}}^{\text{Motocicletas}} = \frac{3.500}{366 \times 6,31} \cong 1,52 \quad (3.34)$$

La presión de vapor Reid estará en el valor medio de los intervalos ofrecidos en el punto **3.1.3.3**.

### 3.1.3.7 Emisiones evaporativas por recorrido

Las emisiones evaporativas horarias por recorrido se pueden determinar mediante la ecuación 3.35:

$$E_r^{evap,rec}(k, t) = E_r^{evap,rec}(k, horaria) = \sum_{j=1}^n Crh \times Clf \times Crd \times IMD_{rj}(k) \times L_r(k) \times F_j^{evap,rec} \quad (3.35)$$

Los parámetros que intervienen son:

$k$  : Unidad de espacio, celda.

$j$  : Categoría de vehículo.

$n$  : Número de tipos de vehículos que circulan por la vía urbana que se encuentra en la celda “ $k$ ”.

$r$  : Tramo de vía (tipo urbana, carretera convencional, autovía o autopista) en la celda “ $k$ ”.

Los datos necesarios son:

$Crh$  : Fracción de la intensidad de tráfico vehicular durante la hora “ $t_n$ ” con respecto a la IMD.

$Clf$  : Coeficiente de tráfico diario en día laborable o festivo.

$Crd$  : Relación entre la intensidad de tráfico diario con respecto a la IMD anual.

$IMD_{rj}(k)$  : Intensidad media diaria de tráfico de vehículos de la categoría “ $j$ ” que circula por el tramo de vía “ $r$ ”.

$L_r(k)$  : Longitud del tramo de vía “ $r$ ” en la celda “ $k$ ”.

$F_j^{evap,rec}$  : Factor de emisión evaporativa por recorrido por unidad de tiempo de la categoría de vehículos “ $j$ ”.

La emisión evaporativa diaria por recorrido, por unidad de tiempo ( $t = \text{día}$ ) y unidad de espacio (celda “ $k$ ”) para un tramo de vía “ $r$ ” se valora mediante la ecuación 3.36:

$$E_r^{evap,rec}(k, festivo-laborable) = \sum_{h=1}^{24} E_r^{evap,rec}(k, horaria) \quad (3.36)$$

El dato necesario es:

$E_r^{evap,rec}(k, horaria)$  : Emisión evaporativa de COV por recorrido, por unidad de tiempo ( $t = \text{hora}$ ) y unidad de espacio (celda “ $k$ ”). Unidad [g/día].

El término resultante es:

$E_r^{evap,rec}(k, diaria)$  : Emisión evaporativa de COV por recorrido, por unidad de tiempo ( $t = \text{día}$ ) y unidad de espacio (celda “ $k$ ”). Unidad [g/día].

La emisión evaporativa mensual por recorrido se valora mediante la ecuación 3.37:

$$E_r^{evap,rec}(k, mensual) = \sum_{d=1}^{df} E_r^{evap,rec}(k, festivo) + \sum_{d=1}^{dl} E_r^{evap,rec}(k, laborable) \quad (3.37)$$

Es el resultado de la suma de emisiones diarias a lo largo de un mes (teniendo en cuenta los días festivos y laborables).

La emisión evaporativa anual por detención se valora mediante la ecuación 3.38:

$$E_r^{evap,rec}(k, anual) = \sum_{m=1}^{12} E_r^{evap,rec}(k, mensual) \quad (3.38)$$

### 3.1.3.8 Desagregación espacial de las emisiones evaporativas por recorrido

La desagregación espacial de las emisiones evaporativas por recorrido sigue el mismo procedimiento que con las emisiones evaporativas diurnas o por detención.

#### 1) Desagregación por tipo de vehículo (según nueva clasificación “j”)

A partir de la emisión horaria por recorrido, se ha de desagregar la emisión por tipo de vehículo según la ecuación: 3.39:

$$E_j^{evap,rec}(horaria) = \frac{\sum_{r=1}^{nr} IMH_{jr}}{\sum_{j=1}^{nj} \sum_{r=1}^{nr} IMH_{jr}} \times E_{veh}^{evap,rec}(horaria) \quad (3.39)$$

La desagregación por tipo de vehículo según la unidad de tiempo: diaria, mensual y anual se realiza de la misma manera sustituyendo únicamente

$E_{veh}^{evap,rec}(horaria)$  por  $E_{veh}^{evap,rec}(diaria)$ ,  $E_{veh}^{evap,rec}(mensual)$  y

$E_{veh}^{evap,rec}(anual)$  respectivamente.

#### 2) Desagregación espacial

Una vez establecida la emisión evaporativa horaria por recorrido de los vehículos tipo “j”, efectúa la desagregación espacial utilizando la densidad poblacional mediante la ecuación 3.40:

$$E^{evap,rec}(k, t) = E^{evap,rec}(k, horaria) = \sum_{j=1}^n \frac{P_k}{Pob} \times E_j^{evap,rec}(horaria) \quad (3.40)$$

La desagregación espacial de las emisiones evaporativas por detención, diaria, mensual y anual se realiza de la misma manera sustituyendo

únicamente  $E_j^{evap,rec}(horaria)$  por  $E_j^{evap,rec}(diaria)$ ,  $E_j^{evap,rec}(mensual)$  y

$E_j^{evap,rec}(anual)$  respectivamente.

### 3.1.3.9 Información adicional requerida

Los factores de emisión para las emisiones evaporativas por recorrido se establecen mediante la ecuación 3.41:

$$F_j^{evap,rec} = X_j \times \left( (p \times e_j^{rec,hot}(T_a, RVP)) + (w \times e_j^{rec,warm}(T_a, RVP)) \right) \quad (3.41)$$

El término resultante es:

$F_j^{evap,rec}$  : Factor de emisión evaporativa por recorrido por unidad de tiempo de la categoría de vehículo "j". Unidad [g/km].

Los datos necesarios son:

$p$  : Fracción de viajes que terminan su desplazamiento con el motor en caliente.

$w$  : Fracción de viajes que terminan su desplazamiento con el motor en frío o tibio  
( $p + w = 1$ ).

$X_j$  : Número promedio de viajes al año que efectúa cada vehículo de la categoría "j".

$e_j^{rec,hot}(T_a, RVP)$  : Factor de emisión por recorrido en caliente de los vehículos de tipo "j". Es una función de la temperatura ambiente  $T_a$  y de la volatilidad de la gasolina RVP. Unidad [g/km].

$e_j^{rec,warm}(T_a, RVP)$  : Factor de emisión por recorrido en frío-tibio de los vehículos de tipo "j". Es una función de la temperatura ambiente  $T_a$  y de la volatilidad de la gasolina RVP. Unidad [g/km].

Las expresiones para determinar los factores de emisión por recorrido en caliente o en frío son las siguientes, distinguiendo nuevamente según las cuatro categorías de vehículo consideras.

#### 3) Recorrido en frío-tibio

Turismos de gasolina incontrolados:

$$FE = 0.1 \times \text{Exp} \left( -5.967 + 0.04259 \times RVP + 0.1773 \times \left( \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right) \right) \quad (3.42)$$

Turismos de gasolina controlados:

$$FE = 0.01 \times \text{Exp} \left( -5.967 + 0.04259 \times RVP + 0.1773 \times \left( \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right) \right) \quad (3.43)$$

Ciclomotores:

$$FE = 0.02 \times \text{Exp} \left( -1.644 + 0.01993 \times RVP + 0.07521 \times \left( \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right) \right) \quad (3.44)$$

Motocicletas:

$$FE = 0.04 \times \text{Exp} \left( -1.644 + 0.01993 \times RVP + 0.07521 \times \left( \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right) \right) \quad (3.45)$$

4) Recorrido en caliente

Turismos de gasolina incontrolados

$$FE = 0.136 \times \text{Exp} \left( -5.967 + 0.04259 \times RVP + 0.1773 \times \left( \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right) \right) \quad (3.46)$$

Turismos de gasolina controlados

$$FE = 0.0136 \times \text{Exp} \left( -5.967 + 0.04259 \times RVP + 0.1773 \times \left( \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right) \right) \quad (3.47)$$

Ciclomotores

$$FE = 0.0272 \times \text{Exp} \left( -5.967 + 0.04259 \times RVP + 0.1773 \times \left( \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right) \right) \quad (3.48)$$

Motocicletas

$$FE = 0.0544 \times \text{Exp} \left( -5.967 + 0.04259 \times RVP + 0.1773 \times \left( \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right) \right) \quad (3.49)$$

Estos factores de emisión dan valores en [g/km].

La presión de vapor Reid estará en el valor medio de los intervalos ofrecidos en el punto **3.1.3.3**.

### **3.2 METODOLOGÍA AGENCIA EUROPEA DE MEDIO AMBIENTE (2009) – COPERT IV**

El software COPERT IV (2009) se trata de un software que utiliza una metodología basada en el anterior método usado en el software COPERT III (2004) aunque hace una clasificación más detallada de las emisiones. Su desarrollo está coordinado por la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA). Se usa especialmente en Europa para el cálculo de emisiones de contaminantes primarios y gases de efecto invernadero provenientes del tráfico rodado.

Esta metodología clasifica el total de emisiones por tráfico rodado en cuatro grandes categorías, que a su vez se dividen en otros subgrupos:

**1) Emisiones del tubo de escape**

- En caliente
- En frío

**2) Emisiones evaporativas**

- Evaporativas diurnas
- Evaporativas por detención
- Evaporativas por recorrido

**3) Emisiones por desgaste**

- Emisiones por desgaste de neumáticos
- Emisiones debidas a los frenos
- Emisiones por abrasión de pavimento

**4) Resuspensión**

Las emisiones totales se calculan mediante la suma de todos los tipos de emisiones.

$$E_{Totales} = E_{calientes} + E_{frío} + E_{evaporativas} + E_{desgaste} + E_{resuspensión} \quad (3.50)$$

Cada tipo de emisión tiene asociada una ecuación con unos factores emisión que varían según los distintos tipos de vehículos existentes y las vías por los que circulan.

Las emisiones según este modelo podrían esquematizarse según la figura 22:

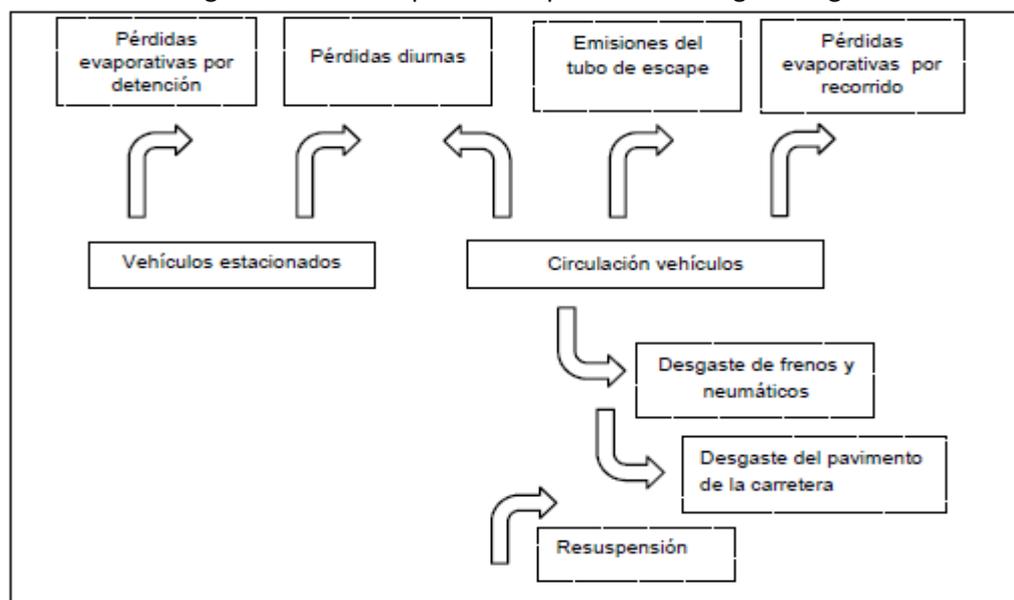


Figura 22. Diagrama de flujo de las emisiones producidas por el transporte por carretera. Fuente: Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos por tráfico rodado en España en el año 2009

A continuación se muestran los índices empleados para las ecuaciones expresadas en los apartados que siguen:

$k$  : Número de celda de la malla base.

$i$  : Tipo de contaminante primario emitido.

$j$  : Categoría de vehículo según la Agencia Ambiental Europea (EEA, 2009).

$tv$  : Tipo de vehículo [ligeros, pesados, motos].

$r$  : Tramo de carretera de la celda ( $k$ ).

$h$  : Hora [0...23].

$d$  : Día [1...7].

$m$  : Mes [1...12].

$p$  : Provincia (correspondiente a las provincias de España)

### 3.2.1 Emisiones en caliente

Estas emisiones son producidas por todas las tipologías de vehículos impulsadas con un motor de combustión interna, y se contemplan en los tres tipos de vías: urbanas, carreteras y autovías/autopistas. Los contaminantes emitidos considerados son: [NO<sub>x</sub>, PM, COV, CO, NH<sub>3</sub>, SO<sub>x</sub>].

La emisión horaria ( $h$ ) en caliente del contaminante  $i$ , de un determinado día  $d$  de un mes en concreto  $m$ , para el tramo de vía  $r$  de la celda  $k$ , se puede calcular con la ecuación 3.51:

$$E_{CALIENTES;i,r,d,m}(k, h) = \sum_{j=1}^n CM_{r,m,d} \times CD_{r,d} \times DH_{r,h} \times IMD_{r,j}(k) \times L_r(k) \times e_{CALIENTE;i,j}(v_r) \quad (3.51)$$

La emisión diaria en caliente del contaminante  $i$ , en el día  $d$ , para el tramo de carretera  $r$  de la celda  $k$  se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$E_{CALIENTES;i,r}(k, d) = \sum_{h=0}^{h=23} E_{calientes;i,r}(k, h) \quad (3.52)$$

La emisión mensual de un mes en concreto  $m$ , en caliente del contaminante  $i$ , para la celda  $k$  se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$E_{CALIENTES;i,r}(k, m) = \sum_{d=1}^{d=dm_m} E_{calientes;i,r}(k, d) \quad (3.53)$$

La emisión anual en caliente del contaminante  $i$ , para la celda  $k$  se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$E_{CALIENTES;i,r}(k, \text{año}) = \sum_{m=1}^{m=12} E_{calientes;i,r}(k, m) \quad (3.54)$$

Donde:

$IMD_{r,j(k)}$  : Intensidad media diaria de circulación vehículos de la categoría j del tramo de vía r en la celda k [veh/día].

$L_{k,t}(k)$  : Longitud del tramo r en la celda k recorrido por cada vehículo [km/veh].

$e_{CALIENTE;i,j}(v_r)$  : Factor de emisión en caliente del contaminante i, del vehículo de la categoría j, dependiendo de la velocidad media de circulación del tramo ( $v_r$ ) . [g/km].

$CM_{r,m,d}$  : Factor de corrección temporal mensual de IMD del mes m, para el tramo de vía r, que depende del tipo de día d.

$CD_{r,d}$  : Factor de corrección temporal diario de IMD del día d, para el tramo de vía r.

$DH_{r,h}$  : Factor de desagregación temporal horario de IMD para el tramo de vía r.

$dm_m$  : Número de días de un mes m.

$n$  : Número de categorías de vehículos j.

### 3.2.1.1 Cálculo IMD por tramos

La información recopilada de la IMD representa el valor de la intensidad media diaria de todos los vehículos que circulan por un tramo r en concreto ( $IMD_r(k)$ ) . Sin embargo, para seguir las indicaciones de la metodología escogida es necesario conocer la IMD de cada categoría de vehículo j que circula por el tramo r. Es decir por cada tramo habrá n IMDs distintas correspondientes al número de categorías j seleccionadas.

La composición del parque vehicular aparte de estar dividido entre las n categorías, también está distribuido de forma porcentual para cada tipo de vehículo  $tv$ , es decir en ligeros, pesados y motos. Por este motivo, bastará con conocer el porcentaje de cada tipo de vehículos  $tv$  que circulan por el tramo r para conocer finalmente cual es la composición del parque en cada tramo r. Por este motivo, conociendo el valor del IMD total y el valor de porcentaje cada tipo de vehículo  $tv$  (ligeros, pesados y motos) de cada tramo r, se conseguirá el número de vehículos de cada categoría j que circulan por cada tramo r.

Por tanto para calcular la IMD de cada categoría de vehículo para cada tramo se aplicará la siguiente ecuación:

$$IMD_{r,j}(k) = IMD_r(k) \times p_{j,r}(k, p) \quad (3.55)$$

Donde:

$IMD_r(k)$ : Intensidad media diaria de todos los vehículos que circulan por el tramo r (Este valor es el que se obtiene directamente de una estación de aforo).

$p_{j,r}(k, p)$ : Porcentaje de vehículos de la categoría j que circulan por el tramo r de la celda k, que depende de la composición del parque vehicular de la provincia p.

La composición del parque vehicular se escoge de la siguiente manera:

- Por celda: según a la provincia a la que pertenezca.
- Por tipo de vía del tramo: cada provincia tiene asociados dos parques vehiculares distintos: uno para carreteras convencionales y el otro para autopistas y autovías.

Por tanto para conocer la composición del parque vehicular de un tramo r se buscara a que provincia pertenece la celda y posteriormente cuál es el tipo de vía al que pertenece el tramo. Una vez escogida la composición del parque vehicular por un tramo r, para conocer el porcentaje exacto de vehículos de una categoría j en concreto, se debe aplicar la siguiente expresión:

$$p_{j,r}(k) = tipoVeh_{tv} \times catVeh_{tv,j}(p) \quad (3.56)$$

Donde:

$p_{j,r}(k)$ : Porcentaje de vehículos de la categoría j que circulan por el tramo r de la celda k.

$tipoVeh_{tv}$ : Porcentaje de vehículos de tipo tv, que circulan por el tramo r de la celda k.

$catVeh_{tv,j}$ : Porcentaje de vehículos del tipo tv de la categoría j, de la composición del parque vehicular de la provincia p para el tipo de vía del tramo r de la celda k.

### 3.2.1.2 Desagregación temporal

La ecuación inicial para el cálculo de emisiones da resultados diarios, debido a que el valor de la intensidad de circulación de los vehículos, es un valor medio diario.

Por tanto para saber las emisiones horarias basta con aplicar el factor  $DH_{r,h,d}$ . Éste representa el porcentaje del valor total de IMD que se asigna a cada hora. Sin embargo, no todos los días son iguales en lo que respecta a circulación de vehículos. Los días laborables, tienen una circulación mayor que los festivos en algunas vías, y en otras sucede un patrón totalmente opuesto, y lo mismo pasa con los meses de invierno o verano. Por tanto es necesaria la aplicación de factores para corregir el valor de la IMD dependiendo del día de la semana que sea o bien el mes.

### 3.2.1.3 Desagregación espacial

En este caso no es necesario hacer ninguna desagregación espacial de las emisiones, ya que el valor de la IMD es por cada tramo  $r$  de cada celda  $k$ . Su cálculo ya es por tramo de carretera perteneciente a una celda  $k$ .

### 3.2.2 Emisiones en frío

Estas emisiones tienen lugar sobre todo en conducciones urbanas, debido a que en carreteras convencionales y autopistas/autovías el número de paradas y arrancadas es muy limitado salvo condiciones extraordinarias (atascos, accidentes... etc). A pesar que se producen en todos los vehículos impulsados con un motor de combustión interna, solo se han desarrollado factores de emisión para turismos gasolina, turismos diésel y los vehículos que usan como carburante gases licuados del petróleo. Se asume que los vehículos de carga ligera se pueden asemejar en este caso a los turismos de pasajeros, según el tipo de carburante. Los contaminantes emitidos considerados son:  $\text{NO}_x$ , PM, COV, CO,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_x$

La emisión horaria en frío del contaminante  $i$ , en la hora  $h$ , de un determinado día  $d$  de un mes concreto  $m$ , para el tramo de vía  $r$  de la celda  $k$  se puede calcular con la siguiente expresión:

$$E_r^{i, \text{frío}}(k, h) = \sum_{i=j}^n CM_{r,m,d} \times CD_{r,d} \times DH_{r,h} \times E_{\text{CALIENTES};i,r}(k, h) \times \beta_d(L_{\text{viaje}}, T_a) \times \left( \frac{e_{i,j}^{\text{frío}}(T_a, v_r)}{e_{i,j}^{\text{caliente}}} - 1 \right) \quad (3.57)$$

La emisión diaria en frío del contaminante  $i$ , en el día  $d$ , para la celda  $k$  se puede calcular con la siguiente expresión:

$$E_r^{i, \text{frío}}(k, d) = \sum_{h=0}^{h=23} E_r^{i, \text{frío}}(k, h) \quad (3.58)$$

La emisión mensual de un mes en concreto  $m$ , en frío del contaminante  $i$ , para la celda  $k$  se puede calcular con la siguiente expresión:

$$E_r^{i, \text{frío}}(k, m) = \sum_{d=1}^{d=dm} E_r^{i, \text{frío}}(k, d) \quad (3.59)$$

La emisión anual en frío del contaminante  $i$ , para la celda  $k$  se puede calcular con la siguiente expresión:

$$E_r^{i, \text{frío}}(k, \text{año}) = \sum_{m=1}^{m=12} E_r^{i, \text{frío}}(k, m) \quad (3.60)$$

Donde:

$E_{CALIENTES_{i,r}}(k, h)$ : Emisión del tubo de escape en caliente del contaminante  $i$ , en la hora  $h$  y en la celda  $k$ , de los vehículos que circulan por el tramo de vía  $r$ .

$\frac{e_{i,j}^{frío}}{e_{i,j}^{caliente}}(T_a, v_r)$ : Relación del factor de emisión en frío y en caliente del contaminante  $i$ , del vehículo de la categoría  $j$ , dependiendo de la temperatura ambiente ( $T_a$ ) y la  $v_r$ . [g/km].

$\beta_d(L_{viaje}, T_a)$ : Fracción de kilometraje recorrida con el motor en frío, dependiendo de la longitud media de viaje ( $L_{viaje}$ ) y de la temperatura ambiente ( $T_a$ ).

La desagregación horaria es la misma que para las emisiones en caliente, y la espacial no es necesario hacerla (como en el caso de emisiones en caliente).

### 3.2.2.1 Parámetro $\beta_d$

Representa la fracción de kilometraje recorrido con el motor en frío y se expresa con la siguiente ecuación:

$$\beta_d = 0.674 - 0.0245 \times l_{trip} - (0.00974 - 0.000385 \times l_{trip}) \times T_{a;d} \quad (3.61)$$

Depende principalmente de la temperatura ambiente  $T_a$  y del patrón de uso del vehículo, en particular de la longitud media de viaje ( $l_{trip}$ ).

#### ➤ Temperatura ambiente

$T_{a;d}$ : Temperatura ambiente [°C].

Estos datos se consiguen por medio del modelo meteorológico WRF, en el sistema de pronóstico diario de calidad del aire. Los valores de temperaturas se extraen por celda y dependen de la provincia a la que ésta pertenece.

#### ➤ Longitud media de viaje

$l_{trip}$ : Longitud media de viaje en vías urbanas.

La estimación de esta distancia para España es 6.31 km. Este parámetro solo se tiene en cuenta para vías urbanas puesto que las emisiones en frío sólo se compatibilizan para este tipo de vías.

A partir de la ecuación del parámetro  $\beta_d$  podemos apreciar que a temperaturas más bajas, mayor será este parámetro y en consecuencia mayor el porcentaje de kilómetros por viaje que se recorren en frío.

También es muy importante que los datos de temperatura sean muy precisos ya que incide de manera notable en la variabilidad del parámetro.

### 3.2.3 Emisiones evaporativas

La expresión para la estimación de las emisiones evaporativas en la celda k, para la hora h de todos los vehículos se muestra a continuación:

$$E_{\text{evaporativas}}(k, h) = \sum_{j=1}^{j=n} N_{j,p} \times (E_{\text{diurnas},j,p}(k, h) + HS_{j,p}(k, h) + RL_{j,p}(k, h)) \quad (3.62)$$

La expresión para la estimación de las emisiones evaporativas en la celda k, para el día d se muestra a continuación:

$$E_{\text{evaporativas}}(k, d) = \sum_{h=0}^{h=23} E_{\text{evaporativas}}(k, h) \quad (3.63)$$

La expresión para las estimación de las emisiones evaporativas en la celda k, para el mes m se muestra a continuación:

$$E_{\text{evaporativas}}(k, m) = \sum_{d=1}^{d=dm_m} E_{\text{evaporativas}}(k, d) \quad (3.64)$$

La expresión anual para la estimación de las emisiones evaporativas en la celda k se puede calcular con la siguiente expresión:

$$E_{\text{evaporativas}}(k, \text{año}) = \sum_{m=1}^{m=12} E_{\text{evaporativas}}(k, m) \quad (3.65)$$

Donde:

$E_{\text{evaporativas}}(k, h)$ : Emisiones evaporativas totales en la hora h y en la celda k.

$N_j$ : Número de vehículos de la categoría j. (Valores que se pueden obtener del Observatorio Nacional de la Seguridad Vial).

$E_{\text{diurnas},j,p}(k, h)$ : Emisiones evaporativas diurnas en la hora h y en la celda k, de los vehículos de la categoría j.

$HS_{j,p}$ : Emisiones evaporativas por detención en la hora h y en la celda k, de los vehículos de la categoría j.

$RL_{j,p}$  : Emisiones evaporativas por recorrido en la hora h y en la celda k, de los vehículos de la categoría j.

$dm_m$  : Número de días de un mes m.

$n$  : Número de categorías de vehículos j.

### 3.2.3.1 Emisiones evaporativas diurnas

Se producen durante las horas de luz solar y a causa de la variación de la temperatura ambiente. El vapor del combustible producido al interior del depósito se expande a medida que transcurre el día, y si no existe ningún dispositivo de control se desprende al exterior. Las emisiones debidas a fugas y a penetración del combustible también contribuyen a las emisiones diurnas.

La expresión para la estimación de las emisiones diurnas en la celda k, para la hora h de todos los vehículos se muestra a continuación.

$$E_{diurnas,j}(k,h) = C_{RAD_H}(k,p) \times C_{Pop,p}(k) \times e_{dj} \quad (3.66)$$

$E_{diurnas,r}(k,h)$  : Emisiones evaporativas diurnas en la hora h y en la celda k, de los vehículos de la categoría j [g/día].

$C_{RAD_H}(k,p)$  : Factor horario según radiación solar de la celda k.

$C_{Pop}(k,p)$  : Valor de población de la celda k de la provincia p.

$e_{d,j}$  : Promedio de emisiones diurnas del vehículo de categoría j [g/día].

#### Desagregación horaria:

Las emisiones evaporativas diurnas vienen dadas por una constante ( $e_{d,j}$ ), que expresa los gramos por día que emite cada vehículo de una determinada categoría j. Para poder conocer las emisiones cada hora es necesario aplicar algún factor que permita desagregar estas emisiones. En este caso, las emisiones de este tipo no dependen del tráfico, siendo así, es necesario encontrar otro parámetro que permita distribuir de temporalmente estas emisiones. Debido a que sólo se producen en las horas de sol y dependen principalmente de la variación de temperaturas, un buen parámetro para su desagregación horaria es la radiación solar. Las horas con más radiación solar son las que presentaran temperaturas más altas, generando mayores variaciones de temperaturas y por tanto mayores emisiones diurnas.

#### Desagregación espacial:

Debido a que se requieren las emisiones por celda k, es preciso un parámetro con el que se pueda llevar a cabo esta tarea. En este caso se ha tomado el valor de la población, puesto que es un valor conocido por celda.

La desagregación se efectuará con el porcentaje de población de cada celda:

$$C_{Pob_p}(k) = \frac{Pob_p(k)}{\sum_{k=1}^{kp} Pob_p(k)} \quad (3.67)$$

Donde:

$Pob_p(k)$  : Valor de población de la celda k en la provincia p.

$kp$  : Número de celdas de la provincia p.

### 3.2.3.2 Emisiones evaporativas por detención

Se producen cuando el motor del vehículo se apaga. El calor residual proveniente del motor y del tubo de escape hace incrementar la temperatura del carburante.

Se distinguen emisiones por detención templadas y emisiones por detención en caliente.

La expresión para la estimación de las emisiones por detención en la celda k, para la hora h se muestra a continuación:

$$HS_j(k, h) = \frac{1}{24} \times C_{Pob_p}(k) \left[ x_j \times \left( c_j \times \left( pc(T_a) \times e_{s,hot,c_j} + (1 - pc(T_a)) \times e_{s,warm,c_j} \right) + (1 - c_j) \times e_{s,hot,fi_j} \right) \right] \quad (3.68)$$

Donde:

$HS_j$  : Emisiones evaporativas por detención en la hora h y en la celda k, de los vehículos de la categoría j [g/km].

$C_{Pob_p}(k)$  : Factor de desagregación espacial por población de la celda k de la provincia p.

$x_j$  : Media de viajes por vehículo durante un año [viajes/día].

Según el ICAEN el kilometraje medio de los turismos gasolina es de 8700 km y el de las motocicletas de 3500 km. No se disponen de datos para los turismos de carga ligera, por este motivo se asumen los mismos datos que para los turismos.

$$x_{vehiculos\_carga\_ligera\_gasolina}^{turismos} = \frac{8700}{365 \times 6.31} = 1.77$$

$$x_{motocicletas} = \frac{3500}{365 \times 6.31} = 1.52$$

$c_j$  : Fracción de vehículos gasolina equipados con carburador i/o un sistema de retorno de carburante.

$c = 0.99$  pre-EURO I (turismos y vehículos de carga ligera)

- c=0 post-EURO I (tuvimos y vehículos de carga ligera)
- c=1 Hasta EURO I incluido (motocicletas)
- c=0.2 EURO II (motocicletas)
- c=0 EURO III (motocicletas)

$pc(T_a)$ : Fracción de viajes acabados con el motor en caliente, que depende de la temperatura ambiente de cada hora  $h$ , y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$pc = 1 - \beta_d$$

$e_{s,hot,c_j}$ : Factor de emisión en caliente por detención de los vehículos gasolina de categoría  $j$  equipados con carburador o sistema de retorno de fuel [g/procedimiento].

$e_{s,warm,c_j}$ : Factor de emisión en frío y templado por detención de los vehículos gasolina de la categoría  $j$  equipados con carburador o sistema de retorno de fuel [g/procedimiento].

$e_{s,hot,fi_j}$ : Factor de emisión en caliente por detención de los vehículos gasolina de categoría  $j$  equipados con sistemas de inyección y sistemas de no retorno de fuel [g/procedimiento].

#### Desagregación horaria

No es necesaria ninguna desagregación horaria debido a que los valores de la temperatura se obtienen de cada hora y para cada celda. Simplemente hace falta un factor de conversión de día a hora, ya que los factores de emisión son por día, así que se divide toda la ecuación por 24.

#### Desagregación espacial

Los valores de las temperaturas que intervienen en el cálculo de las emisiones se calculan por celda, sin embargo los factores de emisión son totales. Por este motivo, se requiere una desagregación, y en este caso es por población (como en el caso de emisiones diurnas).

### **3.2.3.3 Emisiones evaporativas por recorrido**

Son producto del vapor generado en el depósito de combustible durante el funcionamiento del vehículo. Se distinguen emisiones por detención templadas y en caliente.

$$RL_j = \frac{1}{24} \times C_{km\_rec_p}(k) \left[ x_j \times \left( c_j \times \left( pc(T_a) \times e_{r,calientes,c_j} + (1 - pc(T_a)) \times e_{r,templadas,c_j} \right) + (1 - c_j) \times e_{r,calientes,fi_j} \right) \right] \quad (3.69)$$

Donde:

$C_{km\_rec_p}$  : Factor de desagregación espacial según kilómetros recorridos.

$x$  : Media de viajes por vehículo durante un año [viajes/día].

$c$  : Fracción de vehículos gasolina equipados con carburador i/o un sistema de retorno de carburante.

$c=0.99$  pre-EURO I (turismos y vehículos de carga ligera)

$c=0$  post-EURO I (tuvimos y vehículos de carga ligera)

$c=1$  Hasta EURO I incluido (motocicletas)

$c=0.2$  EURO II (motocicletas)

$c=0$  EURO III (motocicletas)

$e_{r,calientes,c}$  : Factor de emisión en frío y templado por recorrido de los vehículos gasolina de la categoría  $k$  equipados con carburador o sistema de retorno de fuel [g/procedimiento].

$e_{r,templadas,c_k}$  : Factor de emisión en caliente por recorrido de los vehículos gasolina de categoría  $k$  equipados con sistemas de inyección y sistemas de no retorno de fuel [g/procedimiento].

$e_{r,calientes,fi_k}$  : Factor de emisión en frío y templado por recorrido de los vehículos gasolina de la categoría  $k$  equipados con carburador o sistema de retorno de fuel [g/procedimiento].

$pc(T_a)$  : Fracción de viajes acabados con el motor en caliente.

$$pc = 1 - \beta_d$$

### Desagregación horaria

No se requiere ninguna desagregación horaria ya que los valores de temperatura se obtienen de cada hora y para cada celda. Solo es necesario un factor de conversión de día a hora como el caso de las evaporativas por detención.

### Desagregación espacial

En este caso, la desagregación se hace por kilómetros recorridos por celda, pues que son las emisiones producidas por los vehículos que circulan.

$$C_{km\_recorridos_p} = \frac{IMD_{r,j}(k) \times L_r(k)}{\sum_{k=1}^{k=kp} IMD_{r,j}(k) \times L_r(k)} \quad (3.70)$$

Donde:

$IMD_{r,j}(k)$ : Intensidad media diaria de circulación vehículos de la categoría j del tramo de vía r en la celda k [veh/día]. Se calcula mediante la ecuación 3.55.

$L_r(k)$ : Longitud del tramo r en la celda k recorrido por cada vehículo [km/veh].

$kp$ : Número de celdas de la provincia p.

### 3.2.4 Emisiones de desgaste

Estas emisiones producen material particulado producido por el desgaste de los frenos, los neumáticos, y la abrasión del pavimento de la carretera.

La expresión para la estimación de las emisiones producidas por desgaste, en el tramo r, de la celda k para la hora h de un día específico de un mes m se muestra a continuación:

$$E_{DESGASTE}^{i,r,d,m}(k,h) = E_{DESGASTE_{FRENOS}}^{i,r,d,m}(k,h) + E_{DESGASTE_{NEUMÁTICOS}}^{i,r,d,m}(k,h) + E_{ABRASIÓN_{CARRETERA}}^{i,r,d,m}(k,h) \quad (3.71)$$

La expresión para la estimación de las emisiones producidas por desgaste, en el tramo r, de la celda k para la hora h de un día específico de un mes m se muestra a continuación:

$$E_{DESGASTE}^{i,r,d,m}(k,d) = \sum_{h=1}^{h=24} E_{DESGASTE}^{i,r,d,m}(k,h) \quad (3.72)$$

La expresión para la estimación de las emisiones producidas por desgaste, en el tramo r, de la celda k para la hora h de un día específico de un mes m se muestra a continuación:

$$E_{DESGASTE}^{i,r,d,m}(k,m) = \sum_{d=1}^{d=dm} E_{DESGASTE}^{i,r,d,m}(k,d) \quad (3.73)$$

La expresión para la estimación de las emisiones producidas por desgaste, en el tramo r, de la celda k para la hora h de un día específico de un mes m se muestra a continuación:

$$E_{DESGASTE}^{i,r,d,m}(k, \text{anual}) = \sum_{m=1}^{m=12} E_{DESGASTE}^{i,r,d,m}(k,m) \quad (3.74)$$

### 3.2.4.1 Emisiones de desgaste de frenos

La emisión horaria de desgaste de frenos de un determinado día  $d$  de un mes en concreto  $m$ , para el tramo de vía  $r$  de la celda  $k$ , se puede calcular con la siguiente expresión:

$$E_{DESGASTE_{FRENOS}}^{i,r,d,m}(k, h) = \sum_{j=1}^{j=n} CM_{r,m} \times CD_{r,d} \times DH_{r,h} \times IMD_{j,t}(k) \times L_t(k) \times FE_{PM;k} \times f_{s;i} \quad (3.75)$$

Donde:

$IMD_{r,j}(k)$ : Intensidad media diaria de circulación de vehículos de la categoría  $j$  del tramo de vía  $r$  en la celda  $k$  [veh/día]. Se calcula mediante la ecuación 3.55.

$L_{k,t}(k)$ : Longitud del tramo  $r$  en la celda  $k$  recorrida por cada vehículo [km/veh].

$FE_{PM}$ : Factor de emisión de PM para desgaste de frenos, por cada vehículo de la categoría  $k$ , que circula por el tipo de vía  $r$  [g/km].

$f_{s;i}$ : Fracción másica  $i$  de PM (cuyos valores se encuentran en la tabla 8):

Clase de tamaño de partícula (i)	$f_{s;i}$
PM	1
PM <sub>10</sub>	0.6
PM <sub>2.5</sub>	0.42
PM <sub>1</sub>	0.06
PM <sub>0.1</sub>	0.048

Tabla 8. Fracción másica según tamaño de partícula.  
Fuente: Inventario de emisiones en España 2009

$CM_{r,m,d}$ : Factor de corrección temporal mensual de IMD del mes  $m$ , para el tramo de vía  $r$ , que depende del tipo de día  $d$ .

$CD_{r,d}$ : Factor de corrección temporal diario de IMD del día  $d$ , para el tramo de vía  $r$ .

$DH_{r,h}$ : Factor de desagregación temporal de IMD para el tramo de vía  $r$ .

$n$ : Número de categorías de vehículos  $j$ .

### 3.2.4.2 Emisiones por desgaste de neumáticos

La emisión horaria de desgaste de neumáticos de un determinado día  $d$  de un mes en concreto  $m$ , para el tramo de vía  $r$  de la celda  $k$ , se puede calcular con la siguiente expresión:

$$E_{DESGASTE_{NEUMÁTICOS}}^{i,k,t}(k, h) = \sum_{d=1}^{d=365} IMD_{k,t} \times L_{k,t} \times FE_{PM;k} \times f_{s;i} \quad (3.76)$$

Los parámetros están descritos en el apartado anterior de emisiones por desgaste de frenos (La única diferencia será que el factor de emisión será para desgaste de neumáticos, como es obvio).

### 3.2.4.3 Emisiones por abrasión de pavimento

La emisión horaria de desgaste de frenos de un determinado día  $d$  de un mes en concreto  $m$ , para el tramo de vía  $r$  de la celda  $k$ , se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$E_{ABRASIÓN_{CARRETERA}}^{i,k,t} = \sum_{d=1}^{d=365} IMD_{k,t} \times L_{k,t} \times FE_{PM;k} \times f_{s;i} \quad (3.77)$$

Los parámetros están descritos en el apartado de emisiones por desgaste de frenos (La única diferencia será que el factor de emisión será para abrasión de pavimento).

La desagregación temporal es la misma que para las emisiones en caliente y en frío, y no es necesario ningún tipo de desagregación espacial ya que las emisiones se calculan por cada tramo de vía perteneciente a una celda  $k$ .

### 3.2.5 Resuspension

Estas emisiones provienen de todos los tipos de vehículos, puesto que su generación es consecuencia de la suspensión de material particulado acumulado en las carreteras debido a la circulación de los vehículos.

La expresión para la estimación de las emisiones de resuspensión en la hora  $h$ , de un determinado día  $d$  de un mes concreto  $m$ , para el tramo de vía  $r$  de la celda  $k$ , se puede calcular con la siguiente expresión:

$$E_{Re.suspensión_r}(k, h) = CM_{r,m} \times CD_{r,d} \times DH_{r,h} \sum_{j=1}^{j=n} IMD_{r,j}(k) \times L_r(k) \times FE_j \quad (3.78)$$

La expresión para la estimación de las emisiones de resuspensión, para el día  $d$ , en el tramo de vía  $r$  de la celda  $k$  se muestra a continuación:

$$E_{Re.suspensión_r}(k, d) = \sum_{h=1}^{h=24} E_{Re.suspensión_r}(k, h) \quad (3.79)$$

La expresión para la estimación de las emisiones de resuspensión, para el mes  $m$ , en el tramo de vía  $r$  de la celda  $k$  se muestra a continuación:

$$E_{Re.suspensión_r}(k, m) = \sum_{d=1}^{d=dm} E_{Re.suspensión_r}(k, d) \quad (3.80)$$

La expresión para la estimación de las emisiones anuales de resuspensión en la celda k para el tramo r, de todos los vehículos se muestra a continuación:

$$E_{\text{Re.suspensión}_r}(k, \text{año}) = \sum_{m=1}^{m=12} E_{\text{Re.suspensión}_r}(k, m) \quad (3.81)$$

La desagregación temporal es la misma que para las emisiones en caliente y en frío, y no es necesario ningún tipo de desagregación espacial ya que las emisiones se calculan por cada tramo de vía perteneciente a una celda k.

### 3.3 METODOLOGÍA CORINE AIRE

Se trata de una metodología basada en el informe de la Agencia Europea de Medio Ambiente: “COPERT IV Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport” ya explicado anteriormente, y es usada por el Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA) para elaborar sus inventarios de emisiones a la atmósfera, en concreto para el grupo 07 de la nomenclatura SNAP, relacionado con las emisiones de contaminantes debidas al tráfico de vehículos automóviles cuya finalidad principal es el transporte de viajeros o mercancías (excluyendo vehículos que puedan clasificarse preferentemente como maquinaria de uso industrial o agroforestal).

Esta manera de calcular presenta alguna particularidad con respecto a las dos metodologías, ya que realiza la clasificación según tipos de contaminantes y no según tipos de emisiones, como los anteriores.

La lista de contaminantes a calcular está representada en la figura 23:

CONTAMINANTE	DESCRIPCIÓN
NO <sub>x</sub> (NO y NO <sub>2</sub> )	Óxidos de nitrógeno expresados en masa de NO <sub>2</sub>
N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso
SO <sub>x</sub> (SO y SO <sub>2</sub> )	Óxidos de azufre expresados en masa de SO <sub>2</sub>
CH <sub>4</sub>	Metano
COVNM	Compuestos orgánicos volátiles a excepción del metano (COV – CH <sub>4</sub> )
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
NH <sub>3</sub>	Amoníaco
Pb	Plomo
As	Arsénico
Cd	Cadmio
Cu	Cobre
Cr	Cromo
Hg	Mercurio
Se	Selenio
Ni	Níquel
Zn	Zinc
Dioxinas	Dioxinas y furanos
HAP	Hidrocarburos aromáticos policíclicos
PST	Partículas en suspensión totales
PM10	Partículas en suspensión de diámetro aerodinámico <= que 10µ
PM2.5	Partículas en suspensión de diámetro aerodinámico <= que 2,5µ

Figura 23. Contaminantes considerados en el tráfico rodado. Fuente: Inventario Nacional de Emisiones MAPAMA (2012)

La velocidad a la que se efectúan los recorridos influye en la cantidad de contaminante que se emite, por lo tanto, se califican los recorridos en función de la velocidad definiendo tres pautas de conducción: interurbana, rural y urbana, sin que exista una norma estricta para la elección de las velocidades representativas de cada pauta.

En el inventario español se ha considerado distinguir entre categorías de vehículos a la hora de adjudicar las velocidades medias, de modo que queden reflejadas las diferentes características de la conducción según la clase de los vehículos considerados y se obtenga así una mejor estimación del consumo de carburantes y de los factores de emisión por contaminante. En la tabla 9 se presentan los valores de las velocidades utilizadas en el cálculo para las categorías de vehículos: turismos, vehículos de carga ligeros, motocicletas y ciclomotores.

CATEGORÍA	VELOCIDAD (km/h) SEGÚN PAUTA DE CONDUCCIÓN		
	INTERURBANA	RURAL	URBANA
CICLOMOTORES	NO APLICABLE	NO APLICABLE	25
LIGEROS	100	65	25
MOTOCICLETAS	105	65	25
TURISMOS	105	65	25

Tabla 9. Pautas de conducción. Fuente: Inventario Nacional de Emisiones MAPAMA (2012)

Dependiendo del método de estimación de las emisiones se pueden clasificar los contaminantes en varios grupos:

- a) El formado por el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), los compuestos orgánicos volátiles (COV), el metano (CH<sub>4</sub>) y las partículas en suspensión (PST, PM10 y PM2.5).

- b) El formado por los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y las dioxinas y furanos (DIOX).
- c) El formado por el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), y el amoníaco (NH<sub>3</sub>).
- d) El formado por el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y los metales pesados: plomo (Pb), arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg), selenio (Se), cobre (Cu), níquel (Ni) y zinc (Zn).
- e) El formado por las emisiones de compuestos orgánicos volátiles a excepción del metano (COVNM) debidas a la evaporación de gasolina.
- f) Estimación de la emisión de metales pesados, HAP y partículas en suspensión debido al desgaste de neumáticos y frenos.
- g) Grupo compuesto por las partículas en suspensión emitidas por abrasión del pavimento.

### 3.3.1 Emisiones de CO, NO<sub>x</sub>, COV, CH<sub>4</sub> y PST

En este tipo de emisiones de contaminantes se distinguen dos posibles regímenes de funcionamiento del motor: en frío y en caliente. Las fórmulas tanto para emisiones en frío como para caliente están descritas en los anteriores métodos (el COPERT IV es más reciente y actualizado).

Una vez se calculen estas emisiones, para hallar las totales, basta con sumar las emisiones en frío con las emisiones en caliente y las obtendremos.

### 3.3.2 Emisiones de HAP y DIOX

Para el grupo de contaminantes formado por los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y las dioxinas y furanos (DIOX) el cálculo de las emisiones totales se realiza directamente por medio de la aplicación de los correspondientes factores de emisión en la siguiente fórmula:

$$E_{i,j}^T = e_{i,j}^T \times R_i \quad (3.82)$$

Donde:

$E_{i,j}^T$  : Son las emisiones totales del contaminante j producidas por los vehículos de la clase i.

$e_{i,j}^T = f(v)$  : Es una función de la velocidad que devuelve la masa de contaminante j por unidad de longitud recorrida, emitida por los vehículos de la clase i.

$R_i$  : Es el recorrido total de los vehículos de la clase  $i$  en la unidad de tiempo (normalmente longitud/año).

### 3.3.3 Emisiones de $N_2O$ y $NH_3$

Para el cálculo del óxido nitroso y el amoníaco se dividen los vehículos entre los anteriores a la normativa EURO I y los posteriores a ella. En las normativas anteriores a la EURO I, se mantienen las mismas ecuaciones y parámetros siguiendo las formulas del método general del producto de los factores de emisión y de actividad.

Las ecuaciones para las normativas EURO I y posteriores tienen una forma distinta en la que se refleja la dependencia de la emisión respecto de las características de los combustibles empleados, además de estimar las emisiones diferenciales debidas a la circulación con el motor frío en todas las clases de vehículos excepto los pesados de mercancías o pasajeros.

Para los vehículos de gasolina, excepto las motocicletas y los pesados, las ecuaciones tienen la forma siguiente:

$$E_{i,j}^{F|C} = e_{i,j,S}^{F|C} \times (a_{i,j,S} \times RA_i + b_{i,j,S}) \quad (3.83)$$

Donde:

$E_{i,j}^{F|C}$  : Son las emisiones del contaminante  $j$  (en frío o en caliente F|C) producidas por los vehículos de la clase  $i$ .

$e_{i,j,S}^{F|C}$  : Es la masa del contaminante  $j$  por unidad de longitud recorrida, emitida por los vehículos de la clase  $i$ , circulando con el motor en frío o en caliente (superíndice F o C), y consumiendo combustible con contenido de azufre  $S$ .

$RA_i$  : Es el recorrido acumulado de cada vehículo de la clase  $i$ .

$a_{i,j,S}$  y  $b_{i,j,S}$  : Son parámetros de la función que dependen de la clase de vehículo, el contaminante y el contenido en azufre del combustible.

### 3.3.4 Emisiones de $SO_2$ , $CO_2$ y metales pesados

Las emisiones de los contaminantes de este grupo dependen básicamente de la composición y cantidad de carburante utilizado y, en un segundo término, de las condiciones de circulación del vehículo.

Se considera que la totalidad de los metales pesados contenidos en el carburante es emitida a la atmósfera (con la sola excepción del plomo del que se emite únicamente un 75%), así como la totalidad del azufre y del carbono, los cuales contribuyen a la formación de  $SO_2$  y  $CO_2$  respectivamente.

La fórmula general de cálculo de la emisión de metales pesados es la siguiente:

$$E_{f,j}^T = e_{f,j}^T \times k_{f,j} \times Q_f \quad (3.84)$$

Donde:

$E_{f,j}^T$  : Son las emisiones totales del metal pesado j producidas por el consumo del carburante f.

$e_{f,j}^T$  : Es la proporción del metal pesado j, del total contenido en el carburante f, que se emite a la atmósfera.

$k_{f,j}$  : Es la fracción de la masa total del carburante f que corresponde al metal pesado j.

$Q_f$  : Es el consumo total del carburante f.

Además en la versión 9.0 de COPERT IV se actualizan los factores de emisión de los metales pesados sobre la base de los nuevos estudios disponibles al respecto. Los nuevos factores incluyen también emisiones debidas al uso de lubricantes.

La fórmula para el SO<sub>2</sub> es semejante a la de los metales pesados sólo que es preciso tener en cuenta el proceso de combinación del azufre con el oxígeno; la fórmula es:

$$E_{f,SO_2}^T = 2k_{f,S} \times Q_f \quad (3.85)$$

Donde:

$E_{f,SO_2}^T$  : Son las emisiones totales de SO<sub>2</sub> producidas por el consumo del carburante f.

$k_{f,S}$  : Es la fracción de la masa total del carburante f que corresponde al azufre.

$Q_f$  : Es el consumo total del carburante f.

En cuanto al CO<sub>2</sub>, es preciso distinguir entre las emisiones inmediatas, es decir, las producidas en el punto de salida de los gases, y las emisiones finales u obtenidas bajo el supuesto de que en última instancia todo el contenido de carbono del carburante terminará combinándose con oxígeno para formar CO<sub>2</sub> (excepto que se especifique lo contrario la referencia a las emisiones de CO<sub>2</sub> será como emisiones finales, de acuerdo con la metodología del Panel Intergubernamental de la ONU sobre el Cambio Climático (IPCC) y de CORINAIR)

La fórmula de cálculo de las emisiones finales es:

$$E_{f,CO_2}^F = 44.011 \frac{Q_f}{12.011 + 1.008r_{H/C} + 16r_{O/C}} \quad (3.86)$$

Donde:

$E_{f,CO_2}^F$  : Son las emisiones finales de CO<sub>2</sub> producidas por el consumo del carburante f.

$Q_f$  : Es el consumo total del carburante f.

$r_{H/C}$  : Es la relación entre el número de átomos de hidrógeno y carbono en el carburante f (1.8 para la gasolina y 2 para el gasóleo).

$r_{O/C}$  : Es la relación entre el número de átomos de oxígeno y carbono en el carburante f (0 para la gasolina y el gasóleo).

Las emisiones inmediatas se calculan restando de las finales las emisiones de los otros contaminantes compuestos de carbono. La fórmula general es:

$$E_{f,CO_2}^I = E_{f,CO_2}^F - 44.011 \left[ \frac{E_{f,CO}}{28.011} + \frac{E_{f,COV}}{13.85} + \frac{E_{f,CE(PST)}}{12.011} + \frac{E_{f,OM(PST)}}{13.85} \right] \quad (3.87)$$

Donde:

$E_{f,CO_2}^I$  : Son las emisiones inmediatas de CO<sub>2</sub> producidas por el consumo del carburante f.

$E_{f,CO_2}^F$  : Tiene el significado anterior.

$E_{f,CO}, E_{f,COV}$  : Emisiones de CO y COV.

$E_{f,CE(PST)}, E_{f,OM(PST)}$  : Son las emisiones de carbono elemental y masa orgánica contenidos en las partículas en suspensión emitidas, respectivamente.

Adicionalmente, se han calculado las emisiones de CO<sub>2</sub> debidas al uso de lubricantes conforme a la actualización 9.0 del software COPERT IV. A la hora de implementar la metodología se han considerado los vehículos de 12 años o más como vehículos antiguos y los vehículos de 11 años o menos como vehículos nuevos y se ha considerado que los consumos de lubricantes de los turismos de GLP y de los autobuses de gas natural son asimilables a los de los turismos de gasolina y autobuses de gasóleo respectivamente.

### 3.3.5 Emisiones de COVNM por evaporación

La evaporación de compuestos orgánicos volátiles excepto metano se produce en alguna de las siguientes circunstancias.

- a) Pérdidas diurnas.
- b) Pérdidas en los procedimientos de encendido y apagado del motor.
- c) Pérdidas en recorrido

Expresadas en gramos por unidad de tiempo las emisiones por evaporación totales serán la suma de las emisiones totales de los grupos anteriores.

Factores de emisión

Al igual que en el caso de las emisiones en frío, las emisiones por evaporación se producen por toda clase de vehículos, pautas de conducción y carburantes, pero sólo se dispone de estimadores razonables de los factores de emisión para los turismos, vehículos ligeros, ciclomotores y motocicletas, que utilizan gasolina para la propulsión. Para esta clase de vehículos, las emisiones de cada una de las categorías anteriores se estiman de la siguiente manera:

- a) Las emisiones generadas en las pérdidas diurnas son una función de la temperatura ambiente y del depósito de combustible, de la volatilidad del carburante, del tamaño del depósito de combustible y grado de llenado, y del tamaño del canister (en el caso de vehículos dotados de sistema de control de la evaporación).

La fórmula general de cálculo para un período k de estancia en aparcamiento de vehículos carentes de sistema de control de las pérdidas por evaporación es:

$$e_{COVNM}^D = m_{\text{tank}}(T_{1,k}, T_{2,k}) + m_{\text{perm}}(T_{1,k}, T_{2,k}) \quad (3.88)$$

Donde:

$e_{COVNM}^D$  : Es la masa de COVNM emitida en un período de aparcamiento k por cada vehículo sin sistema de control de evaporación expresada en gramos.

$m_{\text{tank}}(T_{1,k}, T_{2,k})$  : Es una función de la temperatura mínima ( $T_{1,k}$ ) y máxima ( $T_{2,k}$ ) del depósito de combustible durante un período de aparcamiento en el que la temperatura aumenta (único caso en el que es válida la función), dados el tamaño del depósito, su grado de llenado y la volatilidad del combustible; la expresión de esta función es:

$$m_{\text{tank}}(T_{1,k}, T_{2,k}) = (1 - h)V_{\text{tank}} \left[ (0.025e^{0.0205vp}) (e^{0.0716T_{2,k}} - e^{0.0716T_{1,k}}) \right] \quad (3.89)$$

Dónde:

$h$  : Es el nivel de llenado del depósito en tanto por uno.

$V_{\text{tank}}$  : Es el volumen (litros) del depósito y los sistemas de alimentación y control de vapor.

$vp$  : Es la presión de vapor del combustible (kPa).

$T_{1,k}$  : Es la temperatura mínima (°C) del depósito a lo largo del período de aparcamiento k.

$T_{2,k}$  : Es la temperatura máxima (°) del depósito a lo largo del período de aparcamiento k.

$m_{perm}(T_{1,k}, T_{2,k})$  : Es también una función de la temperatura mínima y máxima del depósito de combustible y la volatilidad del combustible, que devuelve las emisiones de COVNM debidas a permeación en los circuitos de alimentación y cuya expresión (g/hora) para una hora de aparcamiento en particular es:

$$m_{perm}(T) = e^{0.004vp} (6.1656E - 6T^{2.5} + 0.0206) \quad (3.90)$$

Obteniéndose las emisiones totales del período k por suma de las emisiones habidas en cada hora.

En cuanto a los vehículos con sistema de control de las pérdidas por evaporación, el cálculo de las emisiones tiene en cuenta la capacidad de adsorción del sistema de control según el recorrido acumulado del vehículo; la fórmula general de cálculo para un período k de estancia en aparcamiento toma la forma:

$$e_{COVNM}^D = m_{break}(T_{1,k}, T_{2,k}) + m_{perm}(T_{1,k}, T_{2,k}) \quad (3.91)$$

Donde  $m_{break}(T_{1,k}, T_{2,k})$  representa la cantidad de vapor generada durante el período de aparcamiento y no adsorbida por el canister; de acuerdo con la metodología, la ganancia de peso del canister durante la carga con el vapor generado por el combustible se describe por medio de la ecuación:

$$m_{ads} = m_{load} - e^{(a+bsm_{load})} \quad (3.92)$$

Donde:

$a = -11 - 0.015vp + 0.065T$ ,  $b = 0.115 - 0.00015vp + 0.0001T$  y s indica el tamaño del canister (2 = pequeño, 1 = medio, 0.5 = grande).

La cantidad de vapor cargada al inicio del periodo de aparcamiento es calculada asumiendo que el peso del canister al inicio del periodo de aparcamiento es una función del recorrido acumulado por el vehículo desde su matriculación de la forma:

$$m_{ads}^i = \left(\frac{1}{s}\right) [8.13 \ln(RA) - 22.92] \quad (3.93)$$

La carga de vapor inicial del canister,  $m_{load}^i$ , será la que verifique

$m_{ads}^i = m_{load}^i - e^{(a+bsm_{load}^i)}$ , la carga final,  $m_{load}^f$ , será la inicial más la generada a

lo largo del período de aparcamiento, es decir,  $m_{load}^f = m_{load}^i + m_{tan k} (T_{1,k}, T_{2,k})$ ,  
y la cantidad de vapor adsorbido por el sistema de control a lo largo del  
período:  $m_{break} (T_{1,k}, T_{2,k}) = e^{(a+bsm_{load}^f)} - e^{(a+bsm_{load}^i)}$

- b) Las emisiones generadas en las pérdidas por evaporación al apagar el motor se calculan, para vehículos con sistema de inyección y sin sistema de retorno del combustible, por medio de la ecuación:

$$e_{s,hot,fi} = m_{perm} (T_{1,k} + 11) \quad (3.94)$$

Donde  $e_{s,hot,fi}$  es el factor de emisión medio de COVNM en gramos/operación y  $m_{perm} (T_{1,k} + 11)$  tiene el significado explicado en el punto anterior; los 11 grados añadidos a la temperatura inicial representan la diferencia entre la temperatura ambiente y la del combustible en el circuito de alimentación.

Cuando los vehículos están equipados con carburador o con sistemas de retorno del combustible, el funcionamiento del motor produce un incremento significativo de la temperatura del combustible en el depósito o en el carburador en su caso. Por ello, a las emisiones debidas a la permeación o fugas, es preciso añadir las generadas por la evaporación en tanque, que, a su vez, dependen del equipamiento o no del canister en el vehículo. En tales casos los factores de emisión por operación vienen dados, para vehículos de carga ligeros y turismos, cuando el vehículo lleva canister incorporado por:

$$e_{s,hot,c} = m_{break} (T_{1,k}, T_{1,k} + 6) + e_{s,hot,fi}$$

$$e_{s,warm,c} = m_{break} (T_{1,k}, T_{1,k} + 4.5) + e_{s,hot,fi}$$

Y para los que no llevan canister:

$$e_{s,hot,c} = m_{tan k} (T_{1,k}, T_{1,k} + 6) + e_{s,hot,fi}$$

$$e_{s,warm,c} = m_{tan k} (T_{1,k}, T_{1,k} + 4.5) + e_{s,hot,fi}$$

Donde las constantes 6 y 4.5, añadidas a la temperatura, reflejan el incremento estimado de la temperatura del combustible en el tanque y en el circuito de alimentación cuando el apagado se realiza en caliente o en frío respectivamente.

Cuando se trata de los ciclomotores y motocicletas los factores medios de apagado en frío y en caliente se expresan por:

Con canister:

$$e_{s,hot,fi} = m_{break} (T_{1,k}, T_{1,k} + 1.5)$$

$$e_{s,hot,c} = m_{break} (T_{1,k}, T_{1,k} + 3.5)$$

Sin canister:

$$e_{s,hot,fi} = m_{\text{tank}}(T_{1,k}, T_{1,k} + 1.5)$$

$$e_{s,hot,c} = m_{\text{tank}}(T_{1,k}, T_{1,k} + 3.5)$$

- c) Las emisiones por evaporación generadas durante la marcha del vehículo son especialmente significativas en períodos en los que la temperatura ambiente es elevada. Al igual que en las emisiones por apagado del motor en los vehículos con motor de inyección y sin sistema de retorno del combustible la temperatura del combustible en el depósito no está afectada por el funcionamiento del motor y por tanto las emisiones sólo son debidas a la permeación o a las fugas de combustible; en este caso las emisiones se expresan en gramos/viaje por medio de la fórmula:

$$e_{r,hot,fi} = t_{\text{viaje}} \times m_{\text{perm}}(T_{2,k} + 15) \quad (3.95)$$

Donde  $t_{\text{viaje}}$  es la duración media de los viajes expresada en horas.

En los vehículos equipados con canister y carburador o sistemas de retorno del combustible el vapor generado durante la marcha en el depósito de combustible no produce emisiones significativas dado que el canister se purga con aire a intervalos de tiempo, de modo que puede considerarse que las emisiones están bien descritas por medio de la ecuación anterior, correspondiente a los vehículos de inyección sin sistema de retorno del combustible, es decir  $e_{r,hot,c} = e_{r,warm,c} = e_{r,hot,fi}$ . Por el contrario en los vehículos sin canister el vapor generado en el depósito debido a los incrementos de temperatura contribuye, además de la permeación y las fugas, a las pérdidas en recorrido; en este caso es preciso añadir la evaporación en depósito, descrita por la función  $m_{\text{tank}}$ , a la ecuación anterior, es decir:

$$e_{r,hot,c} = m_{\text{tank}}(T_{2,k}, T_{2,k} + 5) + e_{r,hot,fi}$$

$$e_{r,warm,c} = m_{\text{tank}}(T_{2,k}, T_{2,k} + 1) + e_{r,hot,fi}$$

En el caso de los ciclomotores y motocicletas las ecuaciones se transforman en:  $e_{r,hot,fi} = m_{\text{break}}(T_{2,k}, T_{2,k} + 1)$  y  $e_{r,hot,c} = m_{\text{break}}(T_{2,k}, T_{2,k} + 2.5)$  para los que cuentan con motor de inyección o carburador, respectivamente, y canister, y en:  $e_{r,hot,fi} = m_{\text{tank}}(T_{2,k}, T_{2,k} + 1)$  y  $e_{r,hot,c} = m_{\text{tank}}(T_{2,k}, T_{2,k} + 2.5)$  para los que no disponen de canister.

### 3.3.6 Emisiones de partículas en suspensión, HAP y metales pesados por desgaste de neumáticos y frenos

Para la estimación de emisiones en este grupo la metodología general ha consistido en la aplicación de un factor de emisión, discriminado por fuente emisora, a la longitud recorrida, según la expresión:

$$E_{i,j} = e_{i,j} \times f_{i,j} \times R_i \quad (3.96)$$

Donde:

$E_{i,j}$  : Representa a las emisiones del contaminante j (unidades de masa del factor de emisión) producidas por los vehículos de la clase i.

$e_{i,j}$  : Es la masa del contaminante j por unidad de longitud recorrida, emitida por los vehículos de la clase i.

$f_j = g(v)$  : Es un factor corrector de la carga de masa por unidad de longitud en función de la velocidad v.

$R_i$  : Es el recorrido total de los vehículos de la clase i en la unidad de tiempo (normalmente el año).

A continuación se describen las especificaciones contempladas en la determinación del factor según el tipo de fuente emisora:

1) Estimación de  $e_{i,j}$  por desgaste de neumáticos y de frenos:

Para ambas fuentes de emisión, se reseña el tratamiento particular seguido con los vehículos pesados por el cual el factor se estima a partir del propio de turismos:

$$e_{P,j}^N = \frac{\#Ejes}{2} \times f' \times e_{T,j}^N \quad (3.97)$$

$$e_{P,j}^F = 3.13 \times f'' \times e_{T,j}^F \quad (3.98)$$

Donde:

$e_{P,j}^N$  y  $e_{T,j}^N$  : son las masas de contaminante j por unidad de longitud emitidas por desgaste de neumáticos en pesados y turismos, respectivamente.

$f'$  : Es un factor de corrección por desgaste de neumáticos basado en el nivel de carga del vehículo. La corrección viene determinada por el ratio de carga respecto de su capacidad total (NC) a partir de la siguiente ecuación lineal:

$$f' = 1.41 + 1.38NC$$

$e_{P,j}^F$  y  $e_{T,j}^F$  : son las masas de contaminante j por unidad de longitud emitidas por desgaste de frenos en pesados y turismos, respectivamente.

$f''$  : Es un factor de corrección por desgaste de frenos basado en el nivel de carga del vehículo. La corrección viene determinada por el ratio de carga respecto de su capacidad total (NC) a partir de la siguiente ecuación lineal:

$$f'' = 1 + 0.79NC$$

Por un proceso de asimilación este procedimiento para la determinación de  $e_{i,j}$  se ha aplicado también a las clases de autocares y autobuses.

2) Estimación de  $f_j = g(v)$ :

Este factor corrector, que afecta al desgaste de neumáticos y frenos, está en función de la velocidad media del vehículo en el trayecto y del tipo de desgaste contemplado. Las ecuaciones, definidas por tramos, para cada una de las dos fuentes emisoras son:

$$f_j^N \begin{cases} 1.39 & \text{si } v < 40 \text{ km/h} \\ -0.00974v + 1.78 & \text{si } 40 \text{ km/h} \leq v \leq 90 \text{ km/h} \\ 0.902 & \text{si } v > 90 \text{ km/h} \end{cases}$$

$$f_j^F \begin{cases} 1.67 & \text{si } v < 40 \text{ km/h} \\ -0.0270v + 2.75 & \text{si } 40 \text{ km/h} \leq v \leq 90 \text{ km/h} \\ 0.185 & \text{si } v > 90 \text{ km/h} \end{cases}$$

Donde:

$f_j^N$  y  $f_j^F$  son los factores de corrección por nivel de carga para desgaste de neumáticos y frenos, respectivamente.

### 3.3.7 Emisiones de partículas en suspensión por abrasión del pavimento

La estimación de metales emitidos por abrasión del pavimento se calcula a partir del recorrido realizado aplicando:

$$E_{i,j} = e_{i,j} \times R_i \quad (3.99)$$

Donde:

$E_{i,j}$  : Son las emisiones totales del contaminante j producidas por los vehículos de la clase i.

$e_{i,j}$  : Es el factor de emisión del contaminante j por unidad de longitud recorrida, emitida por los vehículos de la clase i. En este caso no está expresado en función de la velocidad.

$R_i$  : Es el recorrido total de los vehículos de la clase i.

### 3.4 COMPARATIVA DE METODOLOGÍAS

Tras el estudio de estas tres metodologías, procedemos a realizar una comparación de los aspectos más significativos de cada una de ellas, los cuales quedan recogidos en la tabla 10.

METODOLOGÍA	COPERT III (2000)	COPERT IV (2009)	CORINE AIRE (2012)
<b>Grupo de emisión</b>	Emisiones en caliente, en frío y evaporativas (que a su vez se subdividen en diurnas, por detención y por recorrido).	Emisiones del tubo de escape (en caliente y en frío), emisiones evaporativas (diurnas, por detención y por recorrido), emisiones por desgaste (por desgaste de neumáticos, debidas a los frenos y por abrasión de pavimento) y por resuspensión.	Realiza la clasificación según tipos de contaminantes y no según tipos de emisiones. Se dividen en 7 grupos de contaminantes.
<b>Contaminantes medidos</b>	NO <sub>x</sub> , COVNM, CO, PST, SO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O	NO <sub>x</sub> , PM, COVNM, CO, NH <sub>3</sub> , SO <sub>x</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , Metales pesados (Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Se, Zn)	NO <sub>x</sub> , PM, COVNM, CO, NH <sub>3</sub> , SO <sub>x</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , Metales pesados (Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Se, Zn, As, Hg), Dioxinas, furanos, HAP, PST
<b>Datos necesarios para su cálculo</b>	Registro de IMD, distribución temporal de IMD y distribución temporal del Parque Nacional de Vehículos	Registro de IMD, distribución temporal de IMD y distribución temporal del Parque Nacional de Vehículos	Registro de IMD, distribución temporal de IMD, distribución temporal del Parque Nacional de Vehículos, consumo de carburante y temperatura del depósito de combustible
<b>Tipo de combustible analizado</b>	Gasolina y diésel	Gasolina, diésel, híbrido y GLP	Gasolina, diésel, híbrido y GLP

Tabla 10. Comparativa de metodologías. Fuente: Elaboración propia.

Tras la comparativa realizada, podemos comprobar la progresiva mejora que se ha ido implementando a medida que:

-La concienciación y la información disponible sobre el estado del medio ambiente ha aumentado enormemente como consecuencia de la mayor percepción de los efectos de la contaminación y el cambio climático.

-Aparición de nuevos combustibles a tener en cuenta aunque sus emisiones sean mucho menores que los clásicos gasolina-diésel.

-Mejora en los sistemas de expulsión de gases de los vehículos gracias al avance de las normativas cada vez más restrictivas en materia de emisiones (EURO 6 actual, y EURO 7 en proceso de redacción)

-Avance de los softwares y las nuevas tecnologías que permiten un análisis más veraz de los datos recopilados para la realización de inventarios de emisiones.

### 3.5 OTRAS HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS

De entre todas las herramientas disponibles en el mercado, vamos a comentar brevemente, por ser consideradas relevantes desde el punto de vista de la modelización de emisiones, las siguientes 10 herramientas cuya utilización puede ser un buen complemento a las 3 metodologías previamente descritas.

- **SMOKE (Sparse Matrix Operator Kernel Emissions)**: es un sistema de procesado de emisiones horarias de un amplio número de contaminantes (incluyendo partículas y compuestos tóxicos) en una malla para servir de entrada a una extensa variedad de modelos de calidad del aire. SMOKE puede tratar emisiones de focos puntuales, de área, biogénicos y móviles (en carretera y fuera de carretera). Usa el sistema de emisiones biogénicas BEIS2 y BEIS3 y tiene incorporado el modelo de emisiones en carretera MOBILE6.
- **MOBILE6**: es software para modelizar las emisiones producidas por vehículos. Es un modelo de factor de emisiones de HC, CO, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, PM y compuestos tóxicos emitidos por coches, camiones, motocicletas bajo condiciones diversas.
- **CAMO (Cellular Automata Model)**: es un modelo de simulación del tráfico vehicular para entornos urbanos de gran precisión desarrollado por la Universidad Politécnica de Madrid, y que se fundamenta en los modelos autómatas celulares. Permite generar emisiones en un entorno urbano con gran detalle para poder ser utilizadas con sistemas CFD (MIMO).
- **HERMES**: Modelo de emisiones desarrollado por la Universidad Politécnica de Cataluña y el BSC-CNS que permite obtener emisiones de un amplio número de contaminantes con una alta resolución espacial (1 km<sup>2</sup>) y temporal (1 hora) muy necesaria para su uso con los modelos de dispersión. Ha sido utilizado para calcular emisiones de alta resolución en toda la Península Ibérica y Baleares. Es una parte del sistema de predicción de la calidad del aire en España (CALIOPE).
- **EMIMO**: Este modelo ha sido desarrollado por el Grupo de Modelos y Software para el Medio Ambiente de la Facultad de Informática de la Universidad Politécnica de Madrid. Sucesor del modelo EMIMA (EMissions Madrid), desarrollado en el año 1995.
- **EMIHUE2003**: Modelo de emisiones desarrollado por la Fundación CEAM que incluye las emisiones tanto de origen biogénico como antropogénico, con una resolución temporal horaria y una resolución espacial de orden de 1 km. Ha sido utilizado para estimar las emisiones en el entorno de Huelva-Sevilla. Especialmente diseñado para servir de entrada a un modelo fotoquímico de última generación.
- **MACTRA y MICTRA**: Modelos de estimación de emisiones por tráfico rodado con aproximaciones Top-Down (Mactra) y Bottom-Up (Micra).
- **EPS2/EPS3 (Emission Processing System v2 y v3)**: Las herramientas EPS fueron desarrolladas y mantenidas con el objetivo de generar los inventarios de emisiones necesarios para alimentar los modelos fotoquímicos de la US-EPA (United State Environmental Protection Agency), inicialmente para el modelo UAM (Urban Airshed Model).

El modelo EPS realiza básicamente las siguientes tareas:

- Normaliza los formatos de las fuentes de emisión asociadas a un territorio.
- Integra las emisiones de los distintos tipos de fuentes: antropogénicas, biogénicas, fuentes móviles y fuentes extensas.
- Distribuye las emisiones sobre una retícula regular en función de los algoritmos de distribución creados a partir de características asociadas al territorio: infraestructuras de transporte y comunicación, distribución de la población, usos del suelo.

La ejecución del modelo EPS da como resultado un único archivo que contiene las emisiones asociadas a cada especie contaminante distribuidas, tanto espacialmente como temporalmente, en el territorio y período considerado. Dicho archivo puede ser utilizado como fuentes de datos de entrada para distintos modelos fotoquímicos.

Desde el punto de vista operacional las versiones 2 y 3 de EPS son idénticas, si bien EPS3 amplía el número de contaminantes que pueden ser procesados

- **EMME/2 (Transportation Planning System)**: es un modelo de tráfico rodado que dispone de un módulo específico para el cálculo de las emisiones asociadas al tráfico. Permite obtener la composición del tráfico para distintos períodos horarios y días tipo a lo largo del año, por ejemplo, laborables-festivos, invierno-verano. Además, permite analizar el efecto futuro de los proyectos de carreteras en el área de estudio.

Los datos principales de entrada al modelo son:

- La red viaria del área de estudio.
- La distribución del parque de vehículos según distintas categorías.
- Aforos de tráfico.
- Matrices de desplazamiento de la población.
- Factores de emisión para cada contaminante, tipo de vehículo y condiciones de movilidad y operación.

A partir de los datos de entrada el modelo calcula las emisiones de contaminantes debidas al tráfico distribuidas espacialmente sobre una retícula regular.

- **MECHANICAL RESUSPENSION (MECH)**: El programa desarrollado por la EPA (Agencia de Protección Ambiental de EEUU) permite calcular las emisiones fugitivas de polvo en gramos por segundo en carreteras pavimentadas, no pavimentadas, en el manejo de materiales, operaciones de construcción y demolición. Se puede utilizar el programa usando parámetros conocidos (características de las carreteras, vehículos, de material tratado o de las condiciones de demolición o construcción).

## **4. CONCLUSIÓN**

Con el presente estudio se ha pretendido dar un enfoque general acerca de un tema de vital importancia en la salud y que en contraposición está muy poco desarrollado en la mayoría del

mundo, como es la contaminación generada por las emisiones del tráfico rodado. La mejor manera para controlar y poner medidas que contrarresten estas emisiones, es sin duda establecer unos indicadores o herramientas que nos permitan valorar y visualizar su cuantía.

Para ello se han descrito 3 metodologías muy extendidas a nivel nacional e internacional utilizadas para realizar inventarios de emisiones, que es la mejor manera de clasificar éstas últimas. Las 3 metodologías son:

- **Metodología Ntziachristos and Samaras – COPERT III (2000)**
- **Metodología Agencia Europea de Medio Ambiente – COPERT IV (2009)**
- **Metodología CORINE AIRE (2012)**

De las metodologías analizadas, la primera es la más antigua de las 3 y unas de las pioneras en el campo de los inventarios de emisiones y clasifica las emisiones en 3 grandes grupos (en caliente, en frío y evaporativas). No se tuvieron en cuenta la presencia de vehículos con motores GLP ni híbridos. En los años posteriores poco a poco se vio la necesidad de ir renovando e intensificando los controles a dichas emisiones y de valorar más componentes contaminantes en los inventarios. Por estos motivos surgió el software COPERT IV que introdujo las emisiones por metales pesados y mejoró las ya implementadas en el COPERT III a las que añadió las emisiones por desgaste y por resuspensión.

El método CORINE AIRE está basado mayoritariamente en el COPERT IV aunque introdujo algún cambio en cuanto a la manera de clasificar las emisiones, ya que en vez de clasificarlas por tipos de emisiones, lo hace por tipos de contaminantes, que por su metodología de estimación se introducen en el mismo grupo. Todos los contaminantes evaluados se clasifican en 7 grupos explicados en el estudio de emisiones. Además introduce nuevos contaminantes como las dioxinas, furanos, HAP, y algún metal pesado más como el Arsénico y el Mercurio.

Ante la creciente preocupación que este tema está levantando en los últimos años en la población y las autoridades políticas y sanitarias se están elaborando nuevos planes de actuación y lucha contra las emisiones de contaminantes basados siempre en criterios científicos.

Un ejemplo de ello son las estadísticas del Parque Nacional de Vehículos, del que se puede extraer la conclusión de que sigue siendo motivo de preocupación las emisiones debidas al tráfico por carretera, especialmente en las grandes zonas urbanas (Madrid y Barcelona) dónde los niveles de calidad del aire se ven severamente afectados. En consecuencia, actualmente se están impulsando políticas para la reducción de éstas tanto a nivel español como a nivel europeo. Prueba de ello, a nivel español, es el “Plan Nacional de mejora de calidad del aire” o más comúnmente “Plan AIRE” del año 2013, dentro del cual se recogen las medidas específicas para el tráfico urbano. A nivel europeo el marco regulatorio viene definido por las normas Euro, actualmente en vigor la Euro VI (desde el año 2014), que destaca por una reducción importante en los vehículos diésel de NO<sub>x</sub> y PM y la Directiva 2015/1480/CE a nivel de calidad del aire.

Todo ello pone de manifiesto la necesidad por parte de las autoridades competentes, de impulsar el uso de vehículos con tecnologías más limpias, renovando así el parque vehicular. No obstante, el mayor problema es el uso de combustibles fósiles, los cuales generan los contaminantes que son más nocivos a la salud humana y empeoran la calidad del aire. Es por ello, que se requieren medidas urgentes y eficientes para minorar la emisión de contaminantes debidos al proceso de combustión de los motores de los vehículos, así como la implantación de sistemas más eficaces de control de emisión de vapores producidos por los combustibles o bien promover la limpieza de las carreteras, especialmente urbanas, para evitar la resuspensión del material particulado desde el suelo.

En el continente europeo esta lucha contra las emisiones ha llevado a que las grandes capitales establezcan distintas políticas anticontaminación, algunas de ellas son las siguientes:

- **Madrid:** Presenta 4 posibles escenarios según el nivel de contaminación existente:
  - Escenario 1: Limitación a 70 km/h en la M30 y en los accesos.
  - Escenario 2: Se prohíbe aparcar en las plazas SER (Servicio de Estacionamiento Regulado) a los vehículos de no residentes, con excepción de residentes en su barrio, pequeños autónomos, certificados en el SER, personas con movilidad reducida, vehículos con “cero emisiones” y servicios esenciales.
  - Escenario 3: Se permite circular a los vehículos de matrícula par los días pares y de matrícula impar los impares en el interior de la M30, con excepción de motocicletas y triciclos, ciclomotores y bicicletas, transporte público colectivo, vehículos con 3 o más pasajeros, limpios y taxis.
  - Escenario 4: Se limita el 50% de la circulación en el interior de la M30 y en la M30, con excepción de taxis con pasajeros y eco taxis, motocicletas, triciclos, ciclomotores y bicicletas, transporte público colectivo, vehículos con 3 o más pasajeros y vehículos limpios.
- **Berlín:** La capital Alemana prohíbe desde 2008 la entrada en la zona centro a todos los vehículos que no tengan el certificado de vehículos de bajas emisiones. A este distintivo se le conoce como 'la pegatina verde'.
- **Londres:** La capital británica aplica una tasa de congestión que consiste en un cargo a los vehículos que se mueven en la zona de peaje de lunes a viernes en horario laboral, es decir, entre las 7:00h y las 18:00h. En cambio, no se paga ni los fines de semana, ni el día de Navidad ni el de año nuevo. El resto de días la tasa es de 12 libras al día por acceder al centro. Pero hay rebajas para quien quiera abonar antes la cantidad: 10 libras para el que lo haga el día antes y 9 si se registra en el sistema de autopago.

La policía basa el sistema de cobro mediante el reconocimiento de matrículas. Además están exentos de pago los vehículos con 9 o más asientos, las motos y los vehículos de

recuperación de carretera. En cambio los residentes en el centro de la capital inglesa tienen un descuento del 90%.

- **Roma:** En Roma sólo se deja pasar al centro de la ciudad a residentes y trabajadores si pagan una cuota anual y a personas con algún tipo de discapacidad. En cambio, gratis solo pueden circular motos y ciclomotores. La zona restringida es de 4,2 kilómetros cuadrados y está vigente de lunes a viernes de 6.30 a 18h y de 14h a 18 horas el sábado.
- **París:** En París se paga para aparcar en todas las zonas de la ciudad. Pagan tanto residentes como visitantes, que pueden hacerlo un máximo de dos horas antes de cambiar su coche. Esto ha provocado que el precio de las plazas de garaje se hayan incrementado en el centro de la ciudad hasta un 75%.

Además el ayuntamiento parisino destina carriles especiales sólo para autobuses con el fin de que éstos aumenten su velocidad hasta un 15%. Desde hace año y medio hay en funcionamiento un sistema de alquiler de vehículos pequeños similar al que existe para las bicicletas. En días de tráfico restringido en el centro, el transporte público es gratis.

- **Estocolmo:** La capital sueca fue la primera en limitar el tráfico rodado en 1996. La cosa se fue perfeccionando porque desde 2007 -previo referéndum a los ciudadanos-, todas las entradas y salidas del centro de Estocolmo están vigiladas de puntos de control automáticos que funcionan con un sistema de reconocimiento de matrícula.

Todos los vehículos que entren en el área de pago deben pagar entre 1 y 2 euros entre las 6:30h y las 18:30h. Según el tipo de vehículo, el importe máximo es de 6,5 euros. Este sistema es conocido como el Impuesto de congestión de Estocolmo y todo lo que se recaude a través de la misma se destina a nuevas vías.

Además de estas medidas, con vistas al futuro otros países están apostando por políticas para intentar cortar de raíz el problema de las altas emisiones provocadas por el tráfico, como puede ser Noruega, cuya legislación va a prohibir a partir del año 2025 la venta de coches tanto diésel como gasolina apostando claramente por una movilidad más sostenible.

Tras todo el estudio llevado a cabo he llegado a la conclusión de que es muy difícil reducir considerablemente las emisiones en ciudades tan grandes como las anteriormente citadas a pesar de las numerosas medidas que ya están implantadas de una manera que deje satisfecho a todas las partes (gobiernos y habitantes), por tanto la única manera viable que veo es seguir fomentando planes como el PIVE para la renovación del parque vehicular, seguir endureciendo progresivamente la legislación en materia de emisiones de los motores diésel y los gasolina (aunque particularmente en los diésel se antoja ya bastante complicado) y sus impuestos, y ya conforme se vaya avanzando con los motores eléctricos, en el momento que sea viable su implantación de carácter general, comenzar a elaborar planes con unos años de margen para

prohibir totalmente el uso de vehículos diesel y gasolina (No todos a la vez sino en un plan por años según matrículas, empezando por los más antiguos y acabando más tarde por los más modernos). Además todo esto sería inútil sin una mejora considerable del transporte público y de que se fomente adecuadamente con parkings para bicis, estaciones intermodales, aparcamientos disuasorios... etc.

## **5. BIBLIOGRAFÍA**

Benoiston Lao, E. (2006). Inventario de emisiones atmosféricas debidas al tráfico rodado en España, con alta resolución espacial y temporal, para su aplicación en modelos de calidad del aire.

Ferrer Codony, G. (2012). Inventario de las emisiones de contaminantes atmosféricos por tráfico rodado en España en el año 2009.

MAPAMA. (2012). Inventarios Nacionales de Emisiones a la Atmósfera 1990-2012. Volumen 2: Análisis por Actividades SNAP

Gómez, M. P. DATOS DE ENTRADA A LOS MODELOS: INVENTARIOS DE EMISIONES.

Sala, Á. G., Hitos, V. M., Collado, F. M., & Manzano, J. V. Estudio de herramientas adecuadas para medir las emisiones de gases de efecto invernadero municipales.

CIEMAT. "Modelización de la Contaminación Atmosférica". <http://mca-retemca.ciemat.es/MCAportal/>.

Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia. (2013) ESTUDIO SOBRE LAS EMISIONES DERIVADAS DEL CONSUMO DE CARBURANTES EN EL TRANSPORTE POR CARRETERA EN ESPAÑA.

IDAE, P. (2006). Guía práctica para la elaboración e implantación de planes de movilidad urbana sostenible. *Madrid, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.*

Querol, X., Alastuey, A., Moreno, T., Viana, M., Casanova, J., Perez, L., ... & Kunzli, N. (2006). Calidad del aire urbano, salud y tráfico rodado. *Fundación Gas Natural: Barcelona.*

Ferri, M., Villalonga, A., París, A. (2009). Glosario de movilidad sostenible.

Calidad del aire y Salud. Ecodes. "Monográfico Ciudad y Transporte".

Madrid, O. S. C. (2010). Movilidad urbana sostenible: un reto energético y ambiental.

Alonso, A., Monzón, A. (2013). "Indicadores para medir la eficiencia de la gestión de los sistemas de transporte en las ciudades". Proyecto Innponta.

Giorgi, L. (2003). "Movilidad sostenible". Nº176 Revista Internacional Ciencias Sociales.