

PROBLEMÁTICA DEL CÁLCULO DEL IMPACTO A GRAN ESCALA DEL RUIDO DEL TRÁFICO SOBRE LA SALUD HUMANA

Franco, V.^(p); Garraín, D.; Vidal, R.; Moliner, E.

Abstract

Several difficulties arise in the inclusion of traffic noise as an impact category within the Life Cycle Assessment (LCA) methodology. First of all, traffic noise -unlike other pollutants typically studied in LCA- is not a material emission. Furthermore, its evaluation is routinely performed locally (as noise reception values), with large scale impacts going largely unnoticed.

The study of state-of-the-art vehicle noise emission models may improve our ability to accurately predict noise levels and their associated impacts upon human health, thereby overcoming the shortcomings in the interpretation of the results given by dated models. In this work, an explanation is provided of the simplifications and assumptions which allow us to relate the noise emission of a single vehicle to the noise level increment perceived by its potential receivers, thereby providing the basis for a large-scale noise impact assessment.

Keywords: Noise, Road Traffic, LCA, model

Resumen

La inclusión del ruido del tráfico como categoría de impacto en la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) presenta varias dificultades. Por una parte, a diferencia de los contaminantes normalmente estudiados en el ACV, el ruido del tráfico no es una emisión material. Además, su evaluación se realiza habitualmente de forma local (en inmisión) y su impacto a gran escala suele pasar desapercibido.

El estudio de los modelos avanzados de emisión sonora de vehículos más recientes puede servir para mejorar la capacidad de predecir los niveles de ruido y su impacto sobre la salud humana, superando los inconvenientes en la interpretación de resultados previos provenientes de modelos anticuados. En este trabajo se explican las simplificaciones y los supuestos que permiten relacionar la emisión sonora puntual de un vehículo con el incremento asociado en los niveles sonoros percibidos por los receptores potenciales, llegando así a un modelo de evaluación del impacto a gran escala.

Palabras clave: Ruido, Tráfico, ACV, modelo

1. Introducción

El ruido es una forma de contaminación que afecta (en mayor o menor grado; ya sea de forma puntual o continuada) a la práctica totalidad de la población mundial. Los efectos adversos sobre la salud humana asociados a niveles de ruido elevados incluyen trastornos auditivos, deficiencias en la comunicación oral, dolor, perturbación del sueño, incremento del estrés, efectos sobre el sistema circulatorio y daños en el equilibrio, entre otros [1]. Estos impactos han sido ampliamente documentados en numerosos estudios. Ejemplos típicos de este tipo de trabajos son los estudios sobre la relación entre la pérdida auditiva de los trabajadores y el ruido ocupacional, o sobre los trastornos del sueño y otras molestias en la vecindad de aeropuertos. Una característica común de este tipo de trabajos es que la mayor

parte de ellos son suscitados por situaciones sonoras anormales (por fortuna, la mayor parte de la población no trabaja expuesta a ruidos peligrosos, ni vive dentro de la huella sonora de un aeropuerto) en las que el impacto del ruido sobre las personas se hace especialmente patente.

Una de las principales fuentes de ruido en el ambiente exterior -tanto por la magnitud de las emisiones como por su amplia distribución geográfica- es el tráfico rodado de vehículos a motor. De forma progresiva, el ruido del tráfico se ha convertido en un elemento común del "paisaje sonoro" cuya presencia, salvo en casos extremos, se acepta sin queja.

No obstante, el ruido es un contaminante cuyos efectos a gran escala pueden y deben ser cuantificados. Para ello, la inclusión efectiva del ruido del tráfico como categoría de impacto en la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) sería de utilidad, por cuanto permitiría realizar análisis medioambientales de productos y procesos de forma más completa al tratar las emisiones sonoras y valorar sus impactos de forma análoga a como se evalúan, por ejemplo, las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, esta integración metodológica presenta varias dificultades. Por una parte, a diferencia de los contaminantes normalmente estudiados en el ACV, el ruido del tráfico no es una emisión material. Además, su evaluación se realiza habitualmente de forma local (en inmisión, con medidas sonométricas puntuales) y su impacto a gran escala es difícil de precisar, puesto que depende de aspectos fisiológicos y psicológicos del sujeto receptor que no siempre son fáciles de identificar y cuantificar.

El estudio de los modelos avanzados de emisión sonora de vehículos más recientes puede servir para mejorar la capacidad de predecir los niveles de ruido y su impacto sobre la salud humana, superando los inconvenientes en la interpretación de resultados previos provenientes de modelos anticuados. En este trabajo se explican las simplificaciones y los supuestos que permiten relacionar la emisión sonora puntual de un vehículo con el incremento asociado en los niveles sonoros percibidos por los receptores potenciales, llegando así a un modelo de evaluación del impacto a gran escala.

2. Problemática general de la inclusión del ruido en la metodología del ACV

Una de las herramientas más ampliamente aceptada por la comunidad científica para evaluar el impacto medioambiental es el Análisis del Ciclo de Vida (ACV o del inglés LCA, *Life-Cycle Assessment*). El ACV [2] es un procedimiento objetivo de evaluación de cargas energéticas y ambientales correspondientes a un proceso o a una actividad, que se efectúa identificando los flujos de materiales y de energía utilizada, y las emisiones liberadas al ambiente natural. Esta evaluación se realiza en el ciclo de vida completo del proceso o actividad, abarcando desde la extracción y tratamiento de la materia prima, la fabricación, el transporte, la distribución, el uso, el reciclado y la reutilización hasta la eliminación final. Mediante este proceso analítico, la composición y las cantidades de contaminantes generados y de recursos consumidos pueden valorarse en términos de sus impactos al medio ambiente. Al adoptar un enfoque amplio, esta metodología permite atribuir los impactos medioambientales de una forma más justa.

La inclusión del ruido como categoría de impacto en la metodología del Análisis de Ciclo de Vida presenta varios problemas que han impedido hasta la fecha la plena integración de esta forma de contaminación en la citada metodología. Por una parte, a diferencia de los contaminantes normalmente estudiados en el ACV, el ruido del tráfico no es una emisión material. Esta característica, unida a su carácter localizado (temporal y espacial) induce a una percepción falsamente reducida de su impacto que desincentiva la investigación al respecto.

Las evaluaciones del ruido ambiental se realizan para fines tales como la elaboración de mapas de ruido o la comprobación de la conformidad con los límites legales. Estas tareas se llevan a cabo habitualmente de forma local (a pequeña escala), seleccionando un número reducido de puntos que se consideran significativos y en los cuales se realizan medidas sonométricas de duración limitada. Las normas de la serie ISO 1996 [3] describen procedimientos que permiten evaluar los índices de ruido a largo plazo de una o varias fuentes sonoras. Estas normas recogen las condiciones en las que deben realizarse las medidas de ruido para asegurar su representatividad -características de la instrumentación, calibración, localización y número de puntos de medida, posición del micrófono, selección de los intervalos de tiempo y duración y espaciado de las mediciones- y son una referencia básica para la elaboración de mapas de ruido. En el texto de estas normas se propone el nivel sonoro continuo equivalente con ponderación frecuencial A para un periodo ($L_{Aeq,T}$) como el indicador básico para la evaluación del ruido, al cual se pueden aplicar penalizaciones (correcciones al alza) si se detecta la presencia de tonos puros (zumbidos, silbidos) o componentes impulsivas (martilleo, explosiones) en las señales sonoras estudiadas. Una vez obtenidos los niveles sonoros en cada punto, es posible elaborar mapas de ruido mediante programas informáticos comerciales que interpolan los valores entre los puntos de medida y, según su grado de sofisticación, son capaces de aplicar modelos de propagación del sonido en función de características físicas del terreno (presencia de barreras, elevaciones, atenuación atmosférica, etc.).

Este tipo de procedimiento, si bien es apto para evaluar el ruido de tráfico a escala reducida (estudio de vías o intersecciones especialmente conflictivas), no es adecuado para evaluar el impacto del ruido a gran escala. Esto se debe fundamentalmente al elevado coste asociado a la realización de las medidas sonométricas, pero también a la incapacidad para predecir las variaciones en los niveles de ruido asociadas a cambios en las características del tráfico. Desde el punto de vista del ACV, estas limitaciones conducen al abandono de las medidas sonométricas a favor de la adopción de modelos de emisión del ruido del tráfico que van en función, entre otros parámetros, de la velocidad media de los vehículos y del flujo de tráfico en los tramos de vía considerados.

El estudio de los modelos avanzados de emisión sonora de vehículos más recientes puede servir para mejorar la capacidad de predecir los niveles de ruido y su impacto sobre la salud humana, superando los inconvenientes en la interpretación de resultados previos provenientes de modelos anticuados. En este estudio se explican las simplificaciones y los supuestos que permiten relacionar la emisión sonora puntual de un vehículo con el incremento asociado en los niveles sonoros percibidos por los receptores potenciales, llegando así a un modelo de evaluación del impacto a gran escala.

3. El modelo IMAGINE de emisión de ruido de vehículos

En el desarrollo de IMAGINE estuvieron implicadas 27 empresas o instituciones de 13 países (Holanda, Italia, España, Reino Unido, Hungría, Francia, Alemania, Suiza, Bélgica, Noruega, Suecia y Polonia). El objetivo de IMAGINA era mejorar la metodología de realización de los mapas de ruido definidos en la Directiva Europea y, al mismo tiempo, abordar algunos aspectos concernientes a la explotación de los mapas de ruido y a la definición de planes de acción. Los campos de investigación sobre los que se trabajó fueron, por un lado, el estudio de la emisión de los focos de ruido de aeronaves, tráfico, ferrocarril e industria, y por otro lado, la forma de mejorar la explotación de los mapas de ruido utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Además, se estudiaron las posibilidades de actuar en la gestión del tráfico como elemento clave en el establecimiento de planes de actuación para reducir el impacto del ruido en nuestro entorno.

3.1. Características principales del modelo **IMAGINE** de emisión de ruido del tráfico

El modelo de emisión de ruido del tráfico que se va a considerar es el del proyecto **IMAGINE** [4]. La metodología básica para la obtención de este modelo comprendió los siguientes pasos:

- Un procedimiento exhaustivo de medida de ruido orientado a caracterizar el nivel de potencia sonora de un vehículo individual en función de su velocidad.
- Distinción entre el ruido de rodadura y el ruido de propulsión.
- Definición geométrica de las fuentes de emisión de cada tipo de vehículo y distribución de la potencia sonora entre las fuentes.
- Definición de categorías y subcategorías de vehículos representativas.
- Determinación de la superficie (tipo de asfalto) de referencia.

El modelo de emisión de ruido de tráfico **IMAGINE** tiene las siguientes características generales:

- Permite calcular el ruido emitido de forma instantánea por un vehículo individual. Este ruido está expresado en términos de nivel de potencia sonora.
- Cada vehículo es representado por dos fuentes de emisión puntuales con una potencia sonora asociada. El ruido de rodadura (debido al contacto entre los neumáticos y el firme) y el ruido asociado a la propulsión del vehículo (funcionamiento del motor, escape, transmisión, etc.) se reparten entre estas dos fuentes.
- El modelo proporciona los valores medios de emisión de ruido en función de la velocidad para cada uno de los tipos de vehículo definidos. Para permitir la adaptación del modelo a las particularidades geográficas de los distintos países europeos, se proponen varios factores correctores en función de las características ambientales, de la vía o del parque automovilístico.

La ejecución del proyecto **IMAGINE** incluía un amplio estudio para medir y caracterizar la emisión de ruido en función de la velocidad de los tipos de vehículo más comunes en distintas condiciones de circulación. Los participantes en el proyecto aportaron datos de emisión de ruido del tráfico obtenidos mediante mediciones sonométricas. Los datos para relacionar el ruido de propulsión con la velocidad se registraron con la ayuda de sistemas de medida montados sobre vehículos que realizaban ciclos de conducción representativos, tanto en vías públicas como en circuito cerrado. El ruido de rodadura se caracterizó sobre la base de estudios del comportamiento acústico de diferentes tipos de neumáticos sobre pavimentos con distintos grados de porosidad y rugosidad en pistas de pruebas preparadas a tal efecto. La aportación de fabricantes de vehículos y neumáticos ayudó a completar un amplio retrato de la emisión del ruido de vehículos, cuyo tratamiento estadístico permitió llegar a un modelo estandarizado de emisión.

El resultado principal de esta caracterización son los coeficientes A_p , B_p , A_r y B_r (pormenorizados para cada una de las bandas de tercio de octava normalizadas) para cuatro tipos o categorías de vehículo representativos del parque europeo de vehículos (véase Tabla 1).

Categoría	Nombre	Descripción
1	Vehículos ligeros (<i>light motor vehicles</i>)	Turismos, vehículos de reparto < 3500 kg, vehículos todoterreno, remolques incluidos.
2	Vehículos medios (<i>medium-heavy vehicles</i>)	Vehículos de reparto > 3500 kg, autobuses, autocaravanas, etc. con dos ejes.
3	Vehículos pesados (<i>heavy vehicles</i>)	Camiones pesados, autobuses y caravanas con tres o más ejes.
4	Motocicletas (<i>powered two-wheelers</i>)	4a. Ciclomotores, triciclos o quads de 50 cc. 4b. Motocicletas, triciclos o quads > 50 cc.

Tabla 1. Clases de vehículos identificadas en el proyecto IMAGINE.

Las ecuaciones principales del modelo IMAGINE adoptan la siguiente forma, ampliamente aceptada para la modelización del ruido de vehículos:

- para el ruido de rodadura:

$$L_{WR}[dB] = A_R + B_R \cdot \log_{10} \left(\frac{v}{v_{ref}} \right) \quad (1)$$

- para el ruido de propulsión:

$$L_{WP}[dB] = A_P + B_P \cdot \log_{10} \left(\frac{v - v_{ref}}{v_{ref}} \right) \quad (2)$$

Donde v es la velocidad del vehículo considerado y v_{ref} es la velocidad de referencia (70 kilómetros por hora). Aplicando los coeficientes A_p , B_p , A_r y B_r a las ecuaciones (1) y (2), es posible obtener el nivel de potencia sonora emitida por un vehículo en función de su velocidad.

De forma similar, en el modelo IMAGINE se proponen varios tipos de correcciones para los niveles básicos de emisión, que se explican a continuación.

Correcciones regionales

Las diferencias entre las flotas de vehículos de regiones diferentes de Europa pueden ser muy notables. El modelo IMAGINE incorpora correcciones sobre los niveles básicos de emisión que permiten adaptar el modelo a las características del parque automovilístico de la región de aplicación. Estas correcciones son las siguientes [5]:

- por tipo de motor (sólo para la categoría 1; permite modelar la proporción de motores de ciclo Otto/ Diesel).
- por anchura media de los neumáticos (sólo para la categoría 1).
- por tipo de neumáticos (de verano, de invierno, con tacos).
- por antigüedad del vehículo (sólo para la categoría 1).
- por porcentaje de vehículos con modificaciones ilegales del escape (todas las categorías).
- por porcentaje de furgonetas de reparto (vehículos comerciales ligeros) que forman parte de la categoría 1.
- por número de ejes (sólo para vehículos pesados; categoría 3).

Otras correcciones

- por efecto de la temperatura. El ruido de rodadura tiende a aumentar a medida que disminuye la temperatura ambiental debido a la mayor rigidez de los neumáticos.
- por presencia de humedad en la calzada. El ruido de rodadura aumenta cuando hay presencia de humedad en la calzada debido a efectos aerodinámicos en la superficie de contacto neumático/pavimento.
- por aceleración/deceleración instantánea de los vehículos. Esta corrección está relacionada con la corrección propuesta por el efecto de la pendiente ascendente o descendente de las vías.
- por tipo de superficie. El tipo de superficie (porosidad, rugosidad) afecta de forma significativa a la producción de ruido de un vehículo. Como es de esperar, esta corrección afecta sólo al ruido de rodadura, si bien algunas superficies porosas pueden incidir sobre el ruido de propulsión al absorber parte de éste.

En la práctica, el sistema de correcciones regionales a los resultados permite modelar las características de la flota de vehículos asociada a la zona geográfica para la cual se desea modelar el impacto a gran escala.

3.2. Aplicación del modelo IMAGINE a gran escala

Estos valores se utilizaron para construir el modelo de emisión de ruido del tráfico adaptado a nuestro propósito. Como se desprende de las ecuaciones anteriores, los valores $A_{i,m}$ representan, para cada categoría de vehículo m , la emisión de ruido (de propulsión o de rodadura, según corresponda) a la velocidad de referencia del modelo (70 km/h), mientras que los valores $B_{i,m}$ representan la tasa de variación en la producción de ruido en función de las desviaciones respecto de la velocidad de referencia.

El modelo de emisión de ruido descrito previamente proporciona el nivel de potencia sonora instantánea emitido por un vehículo en una posición determinada, en función de la categoría del vehículo, su velocidad y otros parámetros. Para calcular la emisión de ruido de un flujo de vehículos en un tramo de vía se necesita traducir este nivel instantáneo de un vehículo a un nivel de presión sonora equivalente L_{eq} , que es el nivel de presión sonora medio en la posición del receptor a lo largo de un periodo de tiempo determinado.

Aplicación del modelo a un flujo de vehículos

Suponiendo un flujo de vehículos continuo en el tramo con una velocidad media v , en cada instante existirán Q/v vehículos por unidad de longitud en el tramo, siendo Q el número de vehículos que pasan por unidad de tiempo. De esta forma, es posible integrar a lo largo del

tramo para expresar la emisión de ruido del flujo de vehículos como una fuente lineal equivalente, que posee el nivel de potencia sonora por unidad de longitud (en dB por metro) expresado en la siguiente ecuación:

$$L_{W, \text{linea, eq.}} = L_{W,0} + 10 \cdot \log\left(\frac{Q}{v}\right) \quad (3)$$

En la ecuación anterior, $L_{W,0}$ representa el nivel de potencia sonora instantáneo (sea debido a la propulsión o a la rodadura) obtenido previamente, Q se expresa en vehículos por segundo y v en metros por segundo.

Usando la ecuación anterior, se calculan las fuentes lineales equivalentes para diferentes grupos de vehículos (por ejemplo, por tipo de vehículo o por velocidad media). Las correcciones sobre los niveles básicos se pueden incluir fácilmente definiendo adecuadamente los flujos de vehículos asociados a cada subtipo de vehículo. Una vez calculados todos los niveles de emisión de las fuentes, se puede calcular el nivel de emisión resultante de la suma de las fuentes por simple adición energética.

Datos de entrada al modelo. Precisión

En modelos a gran escala, la exactitud de los datos de velocidad tiene más importancia que la de los datos de flujo de vehículos [5]. Se estima que los límites de velocidad establecidos por tramo de vía son una aproximación suficiente de la velocidad media de los vehículos de la categoría 1 (turismos), pudiéndose establecer correcciones al alza o a la baja para el resto de vehículos. En estudios a menor escala, sin embargo, las velocidades medias deberían validarse experimentalmente para los tramos de vía estudiados.

En la elaboración de mapas de ruido, generalmente se recomienda obviar las situaciones de aceleración/deceleración que se producen habitualmente en las intersecciones entre varias vías o por el cambio de límites de velocidad en una misma vía. Por esta razón, se obvia la corrección del nivel de potencia sonora debida a la aceleración instantánea de los vehículos en la evaluación a gran escala.

El flujo de tráfico en las proximidades de las intersecciones es complejo de modelar. En los modelos macroscópicos, la presencia de las intersecciones puede ignorarse aceptando la pequeña desviación de los resultados que esto produce en las zonas más próximas a la intersección.

3. Modelo incremental. Metodología de Müller-Wenk

3.1. Introducción

El trabajo del profesor Müller-Wenk [6,7,8] es la referencia más significativa en el desarrollo del impacto medioambiental del ruido originado por el transporte, especialmente el asociado al tráfico rodado de vehículos. Este investigador ha conseguido desarrollar una metodología basada en la cadena causa-efecto que relaciona de forma efectiva el ruido emitido por un vehículo con el impacto que éste causa sobre la salud de las personas. La cuantificación de estos impactos se hace en términos de la unidad de medida DALY (Disability Adjusted Life Years).

El modelo utilizado por Müller-Wenk es el desarrollado por SAEFL – *Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape*- [9], en el que el nivel de ruido de la carretera L_{Aeq} es la suma de la contribución del ruido de los coches (vehículos ligeros) LE1 y el ruido de los camiones (vehículos pesados) LE2. Este nivel de ruido aumenta con el volumen de tráfico

(N1 y N2) y con la velocidad media de cada tipo de vehículo (V1 y V2). También toma en consideración el efecto de la pendiente de la carretera i , según las ecuaciones siguientes:

$$L_{Aeq} = 10 \cdot \log(10^{0,1 \cdot LE1} + 10^{0,1 \cdot LE2}) \quad (4)$$

donde:

$$LE1 = E1 + 10 \cdot \log N1 \quad (5)$$

$$LE2 = E2 + 10 \cdot \log N2 \quad (6)$$

$$E1 = \max[\{12,8 + 19,5 \cdot \log V1\}, \{45 + 0,8 \cdot (0,5 \cdot i - 2)\}] \quad (7)$$

$$E2 = \max[\{34 + 13,3 \cdot \log V2\}, \{56 + 0,6 \cdot (0,5 \cdot i - 1,5)\}] \quad (8)$$

En comparación con IMAGINE, se observa que se trata de un modelo relativamente simple, puesto que sólo distingue entre dos tipos de vehículos y únicamente propone una corrección debida a la inclinación de la calzada.

3.2. Planteamiento incremental

A pesar de las limitaciones evidentes impuestas modelo de ruido adoptado, la metodología de Müller-Wenk resulta muy ingeniosa desde el punto de vista conceptual, al permitir relacionar de forma efectiva el ruido atribuible a un vehículo con el impacto que éste produce sobre la población expuesta. La clave de este logro es, como se explica posteriormente, proceder al cálculo de los niveles de ruido de forma incremental. Esta estrategia es tremendamente útil en las evaluaciones de impacto a gran escala, por dos razones:

- Por propiedades del sonido, los incrementos en los niveles de ruido se transmiten íntegramente a lo largo de toda la trayectoria de propagación, permaneciendo inalterados por cambios en las condiciones de propagación (presencia de barreras, cambios en las condiciones meteorológicas, etc.).
- El incremento de la molestia del ruido (medido sobre el porcentaje de encuestados que dicen sentirse molestos o muy molestos a un determinado nivel de exposición al ruido) aumenta de forma aproximadamente lineal con el nivel equivalente de ruido, medido en decibelios.

$$\frac{d_{LAeq}}{dN1} = \frac{10 \cdot 10^{E1/10}}{\ln 10 \cdot (N1 \cdot 10^{E1/10} + N2 \cdot 10^{E2/10})} \quad (9)$$

Aplicando datos reales de flujos de tráfico en carreteras suizas a las ecuaciones anteriores del modelo SAEFL, Müller-Wenk calculó los incrementos en el nivel de ruido equivalente atribuibles al incremento de un coche (o camión, según el caso) en el flujo horario de vehículos de cada vía sometida a estudio. Dichos cálculos arrojaban resultados dispares, dando lugar a incrementos elevados allá donde el tráfico era menos denso y menores donde el paso de vehículos era más habitual. Después, realizó los cálculos de forma análoga pero suponiendo que, en lugar de ser fijo (de un vehículo), el aumento del flujo de tráfico era pequeño y proporcional al flujo preexistente. De esta forma, obtuvo unos resultados prácticamente idénticos para el incremento de L_{Aeq} en todos los tramos de vía estudiados. Se obtiene de esta forma el resultado más valioso de este trabajo, cuyo corolario podría ser el siguiente: "Incrementos iguales y proporcionales en el tráfico de tramos de vía distintos

producen incrementos similares en el nivel de ruido equivalente medido en decibelios en las proximidades de dichos tramos”.

La justificación matemática de este resultado proviene de asimilar el incremento del nivel del nivel de ruido equivalente en las proximidades de la vía atribuible a un coche a la derivada del nivel ruido atribuido a los coches (camiones) que circulan por la misma, según se recoge en la ecuación (10). Obsérvese que el aumento en el nivel de ruido es inversamente proporcional al flujo inicial de vehículos N1 (N2 para camiones).

$$\Delta L_{Aeq(N1+1coche)} \approx LE1' = (E1 + 10 \cdot \log(N1))' = \frac{10}{N1 \cdot \ln 10} \quad (10)$$

Después, según el autor, es posible obtener el nivel de ruido asociado a cualquier incremento en la media horaria de vehículos (sea o no un entero) multiplicando el aumento asociado a un vehículo por el número de vehículos en los que aumenta el tráfico. Puesto que este incremento se supone proporcional al flujo inicial, al realizar esta multiplicación se obtendría un aumento independiente del flujo de vehículos. Los resultados de los cálculos de Müller-Wenk apuntan en la dirección esperada, obteniéndose resultados prácticamente idénticos para aumentos proporcionales iguales. El autor atribuye la pequeña dispersión de los resultados a las diferencias en características de la vía (velocidad media de los vehículos y pendiente), y considera que la media de unos pocos resultados es un resultado aceptable siempre que los parámetros mencionados anteriormente se mantengan en un rango razonable.

En la metodología descrita anteriormente, el autor asimila el aumento del nivel de ruido equivalente L_{Aeq} (siendo éste la suma de los niveles asociados a cada uno de los dos tipos de vehículo) debido a un vehículo adicional a la derivada del nivel de ruido asociado a ese tipo de vehículo (véase ecuación 10). El autor considera que servirse de esta simplificación es aceptable en tanto que los incrementos (o decrementos) en el flujo de tráfico en cada vía son, habitualmente, pequeños y proporcionales al flujo preexistente, de tal forma que el error cometido al derivar puede considerarse despreciable (el procedimiento es una interpolación lineal entre dos puntos muy cercanos). Sin embargo, esta simplificación puede dejar de ser válida en muchos casos de evaluación a gran escala del ruido del tráfico [10]. Si tomamos la expresión de L_{Aeq} y la derivamos respecto del flujo de coches, obtenemos la ecuación (11).

$$\frac{dL_{Aeq}}{dN1} = \frac{10 \cdot 10^{E1/10}}{\ln 10 \cdot (N1 \cdot 10^{E1/10} + N2 \cdot 10^{E2/10})} \quad (11)$$

Se observa que, aunque esta expresión carezca de la elegancia del resultado del profesor Müller-Wenk, aporta más información sobre la manera en la que la escala logarítmica de los decibelios puede afectar a los resultados. Si en la ecuación (11), el valor de N1 es netamente superior al de N2 (circulan muchos más coches que camiones) y los niveles E1 y E2 (en decibelios) son similares, entonces la simplificación explicada en la ecuación (10) es perfectamente aceptable. En los datos empleados para la validación del modelo (y, en general, en cualquier situación de tráfico normal) se cumplían las condiciones antedichas, dando lugar a resultados coherentes. Las pequeñas variaciones que aparecen en los resultados de Müller-Wenk son debidas a la simplificación previa de considerar la ecuación (10) en lugar de la ecuación (11), sin que sean atribuibles a variaciones en la pendiente o la velocidad media de las vías [10]. En este sentido, merece la pena apuntar que, tras la derivación, el término dependiente de las características de la vía (E1) desaparece de la ecuación (10).

4. Conclusiones

La inclusión efectiva del ruido del tráfico como categoría de impacto en la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) presenta algunas dificultades debidas a las características especiales del ruido como contaminante. En el caso de la evaluación del impacto del ruido a gran escala, estas dificultades pueden sortearse empleando modelos avanzados de emisión de ruido del tráfico.

La aplicación de una estrategia de cálculo incremental permite obtener, para los principales modelos de emisión de ruido del tráfico y de forma muy precisa, el incremento de ruido asociado a variaciones en el flujo de un tipo de vehículos.

En el caso de poseer datos de calidad sobre los flujos de tráfico pormenorizados por tipo de vehículo, la aplicación de modelos como IMAGINE puede ayudar a mejorar la calidad y la fiabilidad de los cálculos.

Referencias

- [1] OMS "Guidelines for Community Noise", *Organización Mundial de la Salud*, Ginebra, 1999.
- [2] SETAC, "Guidelines for Life-Cycle Assessment: a Code of Practice", *Society of Environmental Toxicology and Chemistry*, 1993.
- [3] ISO 1996: 1987. "Description and measurement of environmental noise".
- [4] IMAGINE, "The noise emission model for European road traffic". Deliverable 11 of the Imagine Project (disponible en <http://www.imagine-project.org>), 2007.
- [5] IMAGINE, "Guidelines for the use of traffic models for noise mapping and noise action planning". Deliverable 7 of the IMAGINE project (disponible en <http://www.imagine-project.org>), 2007.
- [6] Müller-Wenk, R., "Life-cycle impact assessment of road transport noise", IWÖ Universität St. Gallen, Switzerland, 1999.
- [7] Müller-Wenk, R., "Attribution to road traffic of the impact of noise on health", Environmental series n. 339, SAEFL, Bern, Switzerland, 2002.
- [8] Müller-Wenk, R. "A method to include LCA road traffic noise and its health effects", *International Journal of Life Cycle Assessment* 9 (2), 2004, pp. 76-85.
- [9] SAEFL (BUWAL), "Strassenlärmmodell für überbaute Gebiete", SRU No.15, Bern, 1991.
- [10] GID. Grupo de Ingeniería del Diseño. Universitat Jaume I, "Estrategias de evaluación a gran escala del impacto ruido del tráfico sobre la salud humana. Indicadores orientados a la metodología de Análisis de Ciclo de Vida" (Informe interno), Castellón, 2008.

Agradecimientos

Este estudio es parte del proyecto con referencia C46/2006 titulado "Desarrollo de categorías de impacto aplicadas a materiales cerámicos usando la metodología del análisis del ciclo de vida", subvencionado por el Ministerio de Fomento de España.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Vicent Franco García
GID – Grupo de Ingeniería del Diseño.
Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción, Universitat Jaume I.
Av. Sos Baynat, s/n. E-12071 Castellón.
Tel. +34 964729252 Fax +34 964728106
e-mail: vicent.franco@uji.es
URL: <http://www.gid.uji.es>

Daniel Garraín Cordero.
GID – Grupo de Ingeniería del Diseño.
Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción, Universitat Jaume I.

Rosario Vidal Nadal.
GID – Grupo de Ingeniería del Diseño.
Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción, Universitat Jaume I.

Enrique Moliner Santistevé.
GID – Grupo de Ingeniería del Diseño.
Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción, Universitat Jaume I.