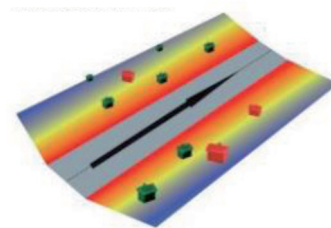


Método para evaluar el impacto del ruido del transporte rodado en el marco del análisis del ciclo de vida



A METHOD TO ASSESS THE IMPACT OF ROAD TRANSPORT NOISE WITHIN THE FRAMEWORK OF LIFE CYCLE ASSESSMENT

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5804> | Recibido: 27/03/2013 • Aceptado: 07/10/2013

Enrique Moliner*, Rosario Vidal*, Vicente Franco*, Daniel Garraín**

*UNIVERSITAT JAUME I. Dpto. Ingeniería Mecánica y Construcción. Avda. Sos Baynat, s/n - 12071 Castellón. Tfno: +34 964 729252. kike.moliner@gmail.com

**CENTRO DE INVESTIGACIONES ENERGÉTICAS, MEDIOAMBIENTALES Y TECNOLÓGICAS. Dpto. de Energía. Avda. Complutense, 22 - 28040 Madrid.

ABSTRACT

• Life Cycle Assessment (LCA) is a widely used tool for assessing the environmental impacts of a product or service throughout its life cycle. This includes transportation, which causes various environmental problems such as noise. Noise has special characteristics (dependence on local factors, lack of linear additivity of emissions, etc.) which complicate the assessment of its impact. The lack of data on noise has been an additional problem. However, the recent publication of the strategic noise maps offers the opportunity to overcome these limitations.

This paper provides a method to assess the impact of noise from road transport and integrate it into the LCA. This method overcomes the methodological limitations of previous studies and uses data from the noise maps to perform the assessments. The health impacts due to noise are quantified in DALYs (disability-adjusted life years), thus allowing the comparison and aggregation of noise with other pollutants harmful to health.

The paper includes a case study where the proposed method is used to calculate the noise impact caused by a heavy vehicle that travels one kilometre on three different roads. The noise impact is compared with the health impacts due to fuel consumption and air emissions from the heavy vehicle. Through the case study, the need for specific noise impact assessments for each particular case is justified, while the validity of the proposed method to perform such assessments in an effective way is demonstrated. The results also show that noise has significant relevance in comparison to other impact categories typically assessed in LCA, which justifies its inclusion as a usual impact category.

• Keywords: LCA, noise, road transport, health impact, DALY, strategic noise maps.

RESUMEN

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta ampliamente utilizada para evaluar los impactos ambientales de un producto o servicio durante todo su ciclo de vida. Esto incluye el transporte, que causa diversos problemas ambientales entre los que se encuentra el ruido. El ruido tiene ciertas particularidades (dependencia de factores locales, imposibilidad de agregar linealmente sus emisiones, etc.) que dificultan la evaluación de su impacto. La escasez de datos sobre ruido ha supuesto un inconveniente añadido. Sin embargo, la publicación reciente de los mapas estratégicos de ruido ofrece la oportunidad de superar estas limitaciones.

Este artículo proporciona un método para evaluar el impacto del ruido del transporte rodado e integrarlo en el ACV. Este método resuelve las limitaciones metodológicas observadas en otros trabajos previos y permite realizar las evaluaciones a partir de datos de los mapas de ruido. Los impactos del ruido sobre la salud se cuantifican en DALYs (años de vida ajustados por discapacidad), posibilitando la comparación y agregación del ruido con otros contaminantes nocivos para la salud.

El artículo incluye un caso de estudio donde el método propuesto se usa para calcular el impacto del ruido de un vehículo pesado que recorre un kilómetro por tres carreteras distintas. El impacto del ruido se compara con los impactos sobre la salud debidos al consumo de combustible y a las emisiones atmosféricas del vehículo pesado. A través del caso de estudio se justifica la necesidad de realizar evaluaciones específicas del impacto del ruido para cada caso particular y se demuestra la validez del método propuesto para realizar tales evaluaciones de manera eficaz. Los resultados también muestran que el ruido tiene una relevancia significativa en comparación con otras categorías de impacto evaluadas normalmente en el ACV, lo cual justifica su inclusión como categoría de impacto habitual.

Palabras Clave: ACV, ruido, transporte rodado, impacto sobre la salud, DALY, mapas estratégicos de ruido.

1. INTRODUCCIÓN

El transporte rodado es un elemento imprescindible para el desarrollo de la actividad industrial, pero también contribuye gravemente a la contaminación atmosférica, al cambio climático y al ruido ambiental. La evaluación de impacto de las emisiones atmosféricas de los automóviles tiene una base metodológica sólida, tanto en las evaluaciones de impacto ambiental como en el marco

del *Análisis del Ciclo de Vida* (ACV). En cambio, el ruido tiene ciertas particularidades (dependencia de factores locales, imposibilidad de agregar linealmente sus emisiones, etc.) que dificultan la evaluación de su impacto. Además, la escasez de datos sobre ruido ha supuesto un inconveniente añadido para su evaluación.

Con el fin de abordar el problema del ruido ambiental, la Directiva 2002/49/CE [1] establece una base común para evaluar y gestionar el ruido en toda la Unión Europea (UE). En este sentido, el uso de indicadores y métodos armonizados para la evaluación del ruido es clave. Según la Directiva 2002/49/CE, la exposición al ruido ambiental debe determinarse a través de mapas de ruido que incorporen los indicadores armonizados de los niveles de ruido: indicador del ruido día-tarde-noche (L_{den}) para evaluar molestias, e indicador de ruido nocturno (L_{night}) para evaluar alteraciones del sueño. Los Estados miembros de la UE han publicado mapas estratégicos de ruido para sus grandes ejes viarios. Aunque la Directiva 2002/49/CE se refiere a las molestias y a las alteraciones del sueño como indicadores de los efectos nocivos de la exposición al ruido, no proporciona métodos específicos para evaluar tales efectos.

En la última década ha habido contribuciones valiosas al

desarrollo metodológico de la evaluación de impacto del ruido del transporte rodado, sobre todo en el marco del ACV [2-7]. Müller-Wenk [2,3] fue pionero en desarrollar una metodología para estimar el impacto sobre la salud atribuible al ruido de una unidad de transporte adicional. Esta metodología fue útil para crear conciencia sobre la importancia del ruido como fuente de deterioro de la salud mundial, pero su aplicación práctica era limitada y asumía simplificaciones que conducían a sobrestimaciones de los impactos causados por el ruido del transporte [7]. Conscientes de estas limitaciones, Franco et al. [7] desarrollaron un método alternativo que incorpora un modelo avanzado de emisión de ruido del tráfico, aportando mayor precisión en el cálculo de los impactos. Este método se desarrolló de manera coherente con la Directiva 2002/49/CE [1], ya que utiliza datos de los mapas estratégicos de ruido para calcular los efectos del ruido sobre la salud en términos de personas con molestias. Sin embargo, el método de Franco et al. [7] también presenta ciertas limitaciones: no considera los efectos del ruido asociados a las alteraciones del sueño, y no convierte los efectos del ruido en sus correspondientes daños sobre la salud.

En este artículo se complementa el método de Franco et al. [7] con el cálculo de los efectos del ruido sobre la salud

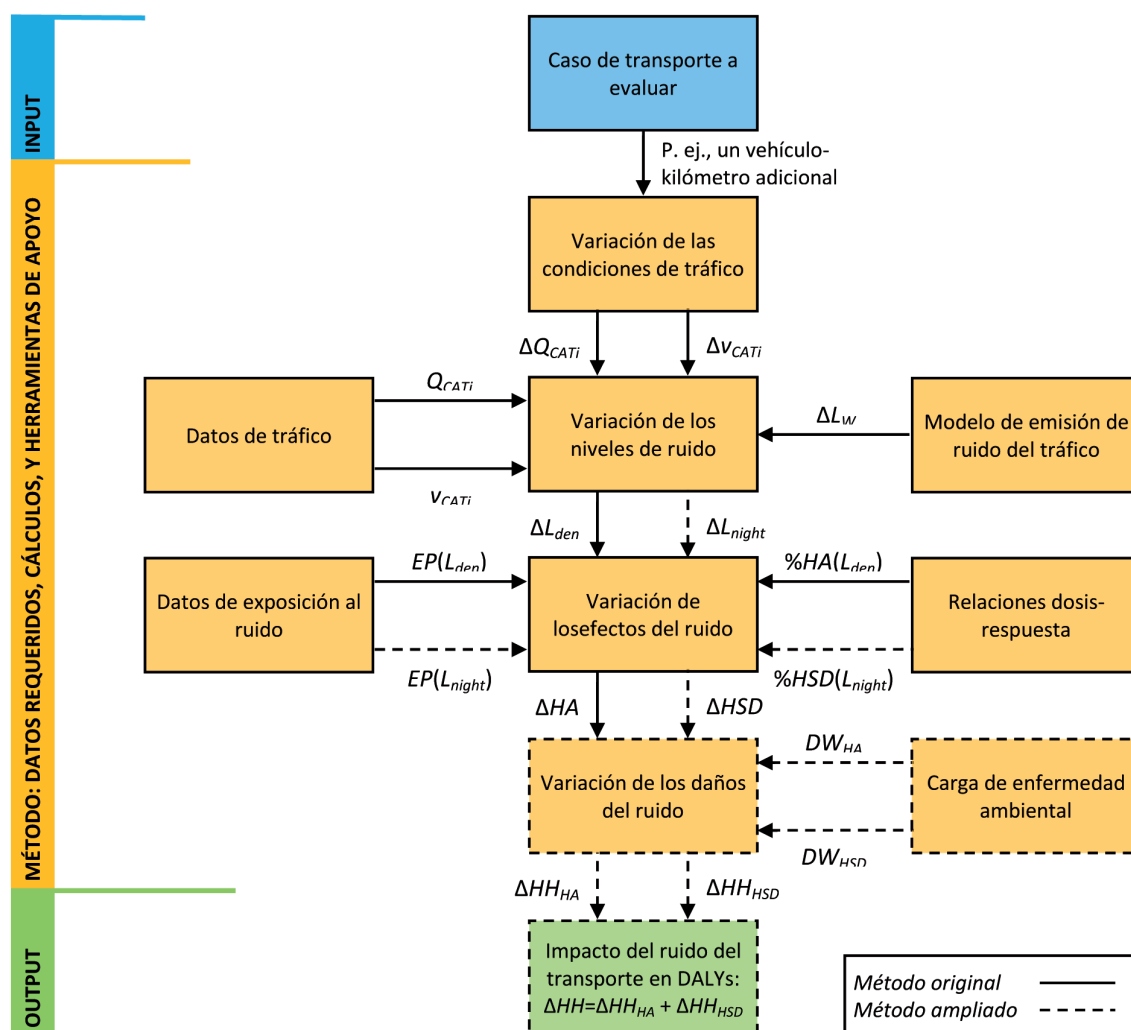


Fig. 1: Estructura del método

en términos de personas con alteraciones del sueño. Además, se amplía el método para cuantificar no sólo los efectos del ruido, sino también los daños sobre la salud correspondientes a tales efectos. Para ello, se incluye el cálculo de la carga de enfermedad ambiental asociada a las molestias y a las alteraciones del sueño, obteniéndose el impacto del ruido sobre la salud en DALYs (años de vida ajustados por discapacidad). El indicador DALY posibilita la comparación y agregación del impacto del ruido con el resto de impactos sobre la salud que se evalúan normalmente en el ACV. Para ilustrar la aplicación del método ampliado, se expone un caso de estudio que consiste en la evaluación del impacto sobre la salud causado por un vehículo pesado que recorre un kilómetro por tres carreteras distintas. En primer lugar, se usa el método propuesto para calcular el impacto sobre la salud causado por el ruido del vehículo pesado en cada una de las carreteras. En segundo lugar, se usa el método de evaluación de impacto ReCiPe [8] para calcular los impactos sobre la salud debidos al consumo de combustible y a las emisiones atmosféricas del vehículo pesado. Finalmente, se comparan los impactos del ruido con los impactos sobre la salud derivados del resto de contaminantes del vehículo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este artículo se propone un método completo para evaluar el impacto del ruido del transporte rodado sobre la salud. Este método usa datos de los mapas estratégicos de ruido para realizar los cálculos. Además, ha sido diseñado para su aplicación a diferentes escalas geográficas y para ser integrable en el ACV. La Fig. 1 muestra una representación esquemática del método completo, incluyendo los elementos del método original [7] y los elementos incorporados en este estudio.

2.1. VARIACIÓN DE LAS CONDICIONES DE TRÁFICO

Müller-Wenk [2,3] ideó un enfoque incremental para evaluar el impacto sobre la salud debido al ruido de una unidad de transporte adicional. El enfoque incremental calcula el impacto de dos escenarios: un escenario inicial, que refleja la situación actual del tráfico (flujo, composición y velocidad); y un escenario final, que se basa en el escenario inicial pero incluye un vehículo adicional que recorre una distancia determinada. La diferencia entre los impactos de ambos escenarios representa el impacto del ruido de ese número adicional de vehículo-kilómetros. Este enfoque ha sido reconocido por varios autores como la mejor opción para integrar la evaluación

de impacto del ruido del transporte en el ACV [4,6,7]. El método de Franco et al. [7] incorpora un modelo de emisión de ruido del tráfico que hace posible evaluar otras variaciones de las condiciones de tráfico aparte de los típicos incrementos del número de vehículo-kilómetros (p. ej., variaciones de flujo, composición o velocidad, o combinaciones de éstas).

2.2. VARIACIÓN DE LOS NIVELES DE RUIDO

El método propuesto utiliza los indicadores L_{den} y L_{night} para evaluar molestias y alteraciones del sueño. L_{den} es el indicador de ruido día-tarde-noche y representa el nivel sonoro medio a largo plazo ponderado A determinado a lo largo de todos los periodos día-tarde-noche (24 horas) de un año. L_{den} (en decibelios con ponderación A, dBA) se determina aplicando la siguiente ecuación [1]:

$$L_{den} = 10 \cdot \log \left(\frac{12}{24} \cdot 10^{\frac{L_{day}}{10}} + \frac{4}{24} \cdot 10^{\frac{L_{evening}+5}{10}} + \frac{8}{24} \cdot 10^{\frac{L_{night}+10}{10}} \right) \quad (1)$$

donde L_{day} , $L_{evening}$ y L_{night} son los indicadores de ruido diurno, vespertino y nocturno, y representan los niveles sonoros medios a largo plazo ponderados A determinados a lo largo de todos los periodos diurnos (12 horas), vespertinos (4 horas) y nocturnos (8 horas) de un año.

La exposición a los niveles de ruido L_{den} y L_{night} puede determinarse mediante cálculos o mediante mediciones. Los modelos de predicción de ruido son una valiosa alternativa a las mediciones *in situ*, ya que reducen tiempos y costes y permiten simular variaciones de las condiciones de tráfico [9]. Estos modelos requieren un modelado preciso de las fuentes de ruido y del entorno de propagación para calcular el nivel de potencia sonora emitido por las fuentes y el nivel de presión sonora en la posición de los receptores. El enfoque incremental permite ahorrar esfuerzos de modelado: dado que las variaciones del nivel de presión sonora se transmiten íntegramente a lo largo de todas las vías de propagación sonora [2,3], todos los receptores en el entorno de propagación experimentan un mismo aumento o disminución de los niveles de ruido una vez tiene lugar una variación de las condiciones de tráfico (Fig.2). Además, las variaciones del nivel de potencia sonora se traducen directamente en variaciones del nivel de presión sonora, por lo que no es necesario hacer distinción entre ambos niveles. Por lo tanto, las evaluaciones basadas en un enfoque incremental pueden realizarse sin necesidad de modelar la propagación sonora, requiriendo únicamente un modelo de emisión de ruido del tráfico para calcular la variación de los niveles de ruido [7].

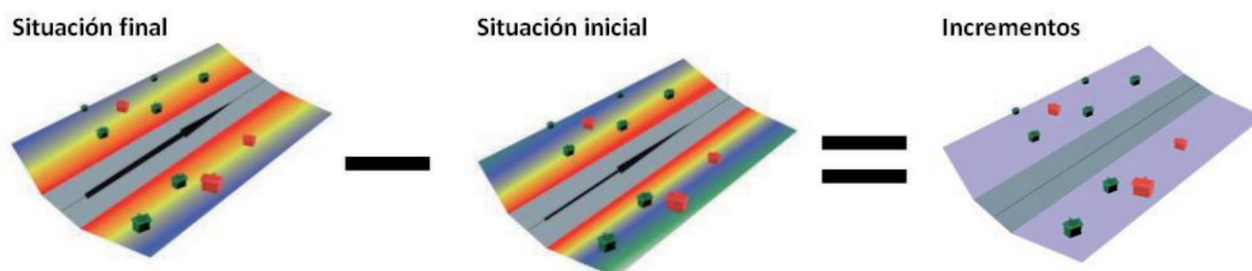


Fig. 2: Ilustración del enfoque incremental: para un determinado incremento de los niveles de emisión de ruido, los incrementos de los niveles de exposición al ruido son iguales para todos los receptores

El modelo de emisión de ruido del tráfico implementado en el método propuesto es un modelo de última generación desarrollado en el proyecto CNOSSOS-EU [10]. Este modelo proporciona el nivel de potencia sonora instantánea de un vehículo en función de su velocidad para distintas categorías de vehículos: vehículos ligeros (CAT1), vehículos medios (CAT2), vehículos pesados (CAT3), y vehículos de dos ruedas (CAT4). El nivel de emisión sonora de un flujo de vehículos circulando por un tramo de carretera se modela como una fuente lineal equivalente que emite la misma potencia sonora que todo el flujo de vehículos. El nivel de emisión sonora equivalente por unidad de longitud emitido por un flujo de vehículos de la misma categoría durante un período de tiempo T ($L_{W,T,CATi}$ en dBA/m) se calcula mediante la siguiente ecuación [10]:

$$L_{W,T,CATi} = L_{W,0,CATi} + 10 \cdot \log \left(\frac{Q_{CATi}}{1000 \cdot v_{CATi}} \right) \quad (2)$$

donde $L_{W,0,CATi}$ es el nivel de potencia sonora instantánea de un vehículo de la categoría i (en dBA), Q_{CATi} es el flujo de vehículos de la categoría i (en veh/h), y v_{CATi} es la velocidad media del flujo de vehículos de la categoría i (en km/h).

El nivel de emisión sonora total causado por una situación de tráfico determinada ($L_{W,T}$ en dBA/m) se calcula como la suma logarítmica de los niveles de emisión asociados a los flujos de las distintas categorías de vehículos [10]:

$$L_{W,T} = 10 \cdot \log \left(\sum_i 10^{\frac{L_{W,T,CATi}}{10}} \right) \quad (3)$$

Finalmente, la variación de los niveles de ruido día-tarde-noche y nocturno (ΔL_{den} and ΔL_{night}) debida a una variación de las condiciones de tráfico se calcula como la diferencia entre los niveles de emisión de ruido totales de las situaciones de tráfico inicial y final.

2.3. VARIACIÓN DE LOS EFECTOS DEL RUIDO

Para determinar los efectos del ruido sobre la salud de las personas expuestas, el método propuesto incorpora otros indicadores adicionales que se obtienen mediante relaciones dosis-respuesta. La Directiva 2002/49/CE [1] hace referencia a relaciones entre molestias y L_{den} y relaciones entre alteraciones del sueño y L_{night} , pero no especifica qué expresiones matemáticas deben usarse. No obstante, informes de la Comisión Europea [11,12] indican las expresiones matemáticas recomendadas para evaluar cada efecto del ruido. En concreto, las relaciones de Miedema y Oudshoorn [13] se aplican para estimar el porcentaje de personas altamente molestas (%HA), mientras que las relaciones de Miedema et al. [14] se aplican

para estimar el porcentaje de personas con graves alteraciones del sueño (%HSD). Ambas relaciones dosis-respuesta están definidas en función de los niveles de ruido en la fachada de las viviendas. Sus aproximaciones polinómicas se muestran en la Tabla 1.

Franco et al. [7] usan las aproximaciones polinómicas de las relaciones dosis-respuesta en combinación con datos de exposición al ruido para determinar la variación del número de personas altamente molestas (ΔHA) atribuible a una determinada variación de las condiciones de tráfico. Para calcular la variación de este efecto del ruido aplican la siguiente ecuación:

$$\Delta HA \cong \Delta L_{den} \cdot \sum_{L_{den}} \left(\frac{d\%HA(L_{den})}{dL_{den}} \cdot EP(L_{den}) \right) \quad (4)$$

donde ΔL_{den} es la variación del nivel de ruido día-tarde-noche atribuible a la variación de las condiciones de tráfico, $EP(L_{den})$ es el número de personas inicialmente expuestas a un intervalo de L_{den} de 5 dBA (55-60, 60-65, 65-70, 70-75, >75), y el término diferencial representa el incremento aproximado del porcentaje de personas altamente molestas con respecto al incremento de L_{den} en ese intervalo de 5 dBA (calculado en el punto medio del intervalo).

Análogamente, el método ampliado considera también la variación del número de personas con graves alteraciones del sueño (ΔHSD). La variación de este efecto del ruido se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta HSD \cong \Delta L_{night} \cdot \sum_{L_{night}} \left(\frac{d\%HSD(L_{night})}{dL_{night}} \cdot EP(L_{night}) \right) \quad (5)$$

donde ΔL_{night} es la variación del nivel de ruido nocturno atribuible a la variación de las condiciones de tráfico, $EP(L_{night})$ es el número de personas inicialmente expuestas a un intervalo de L_{night} de 5 dBA (50-55, 55-60, 60-65, 65-70, >70), y el término diferencial representa el incremento aproximado del porcentaje de personas con graves alteraciones del sueño con respecto al incremento de L_{night} en ese intervalo de 5 dBA (calculado en el punto medio del intervalo).

2.4. VARIACIÓN DE LOS DAÑOS DEL RUIDO

El método de Franco et al. [7] expresa el impacto del ruido como el número de personas afectadas por los efectos del ruido, pero no transforma tales efectos en sus daños sobre la salud. En este estudio se incluye el cálculo de la carga de enfermedad ambiental asociada a los efectos del ruido para evaluar el impacto del ruido en términos de daños sobre la salud. La Organización Mundial de la Salud [15] propone cuantificar la carga de enfermedad mediante el indicador DALY, que com-

Descriptor	Aproximación polinómica
Porcentaje de personas altamente molestas	$\%HA = 9,868 \cdot 10^{-4} \cdot (L_{den} - 42)^3 - 1,436 \cdot 10^{-2} \cdot (L_{den} - 42)^2 + 0,5118 \cdot (L_{den} - 42)$
Porcentaje de personas con graves alteraciones del sueño	$\%HSD = 0,01486 \cdot L_{night}^2 - 1,05 \cdot L_{night} + 20,8$

Tabla 1: Relaciones dosis-respuesta para molestias y alteraciones del sueño debidas al ruido del tráfico rodado

bina los años de vida perdidos por muerte prematura (YLL) y los años vividos con discapacidad (YLD) en una única medida:

$$DALY = YLL + YLD \quad (6)$$

En este estudio se consideran las molestias y las alteraciones del sueño como efectos nocivos del ruido, ya que entre ambos abarcan la mayor parte de la carga de enfermedad del ruido ambiental [15]. Puesto que las molestias y las alteraciones del sueño no causan mortalidad, la estimación de YLL puede omitirse. En cuanto a la discapacidad, la estimación de YLD se realiza aplicando la siguiente ecuación [15]:

$$YLD = I \cdot DW \cdot D \quad (7)$$

donde I es el número de casos incidentes, DW es un peso de discapacidad que refleja la gravedad de la enfermedad en una escala de cero (estado de salud ideal) a uno (estado de salud equivalente a la muerte), y D es la duración media de la discapacidad en años.

El método propuesto traduce cualquier variación de las condiciones de tráfico en variaciones de L_{den} y L_{night} y en variaciones del número de personas altamente molestas y del número de personas con graves alteraciones del sueño. Dado que L_{den} y L_{night} son niveles medios anuales y las molestias y las alteraciones del sueño suelen desaparecer cuando el ruido cesa, se considera que la duración de la discapacidad es de un año [15]. En base a las suposiciones anteriores, la fórmula básica para calcular los DALYs (que resulta de sustituir la Ec.7 en la Ec.6) se puede adaptar para calcular el impacto del ruido como la variación de los daños del ruido sobre la salud (ΔHH , en DALYs) según la siguiente ecuación:

$$\Delta HH = \Delta HH_{HA} + \Delta HH_{HSD} = \Delta HA \cdot DW_{HA} + \Delta HSD \cdot DW_{HSD} \quad (8)$$

donde ΔHH_{HA} y ΔHH_{HSD} son las variaciones de los daños del ruido sobre la salud asociadas a las altas molestias y a las graves alteraciones del sueño, ΔHA es la variación del número de personas altamente molestas (resultante de la Ec.4), ΔHSD es la variación del número de personas con graves alteraciones del sueño (resultante de la Ec.5), y DW_{HA} y DW_{HSD} son los pesos de discapacidad para las altas molestias y las graves alteraciones del sueño.

Los pesos de discapacidad usados en el método proceden de un estudio de la Organización Mundial de la Salud [15]. Estos pesos de discapacidad se muestran en la Tabla 2.

Estado de salud	Peso de discapacidad (DW)
Altas molestias	0,02
Graves alteraciones del sueño	0,07

Tabla 2: Pesos de discapacidad para molestias y alteraciones del sueño debidas al ruido ambiental

2.5. DATOS REQUERIDOS

Los datos requeridos por el método se clasifican en datos de tráfico y datos de exposición al ruido. Los datos de trá-

fico permiten calcular la variación de los niveles de ruido e incluyen flujos, velocidades y composición del tráfico (por categorías de vehículos). Los datos de exposición al ruido permiten calcular la variación de los efectos del ruido y consisten en distribuciones de frecuencias de las personas expuestas al ruido del tráfico según intervalos de 5 dBA de L_{den} y L_{night} en la fachada más expuesta de las viviendas. Todos estos datos están disponibles al público en los mapas estratégicos de ruido que los Estados miembros de la UE han elaborado para sus grandes ejes viarios en cumplimiento de la Directiva 2002/49/CE [1]. La información de los mapas de ruido publicada hasta ahora por la Comisión Europea puede consultarse en Report-Net-EIONET¹ y en NOISE².

3. CASO DE ESTUDIO Y RESULTADOS

En este artículo se presenta un caso de estudio con el fin de mostrar la aplicación del método propuesto para realizar evaluaciones de impacto del ruido del transporte rodado a partir de datos de los mapas estratégicos de ruido. En este caso se emplean datos de los mapas de ruido de tres autopistas españolas (Fig.3). Los mapas de ruido de esas autopistas corresponden al año 2006 [16] y se obtuvieron del SICA³. Los datos de tráfico y de exposición al ruido (Tablas 3 y 4) se usan para evaluar el impacto del ruido de un vehículo pesado que recorre un kilómetro por cada una de esas autopistas. De este modo, el impacto del ruido sobre la salud debido a un vehículo-kilómetro adicional al año se calcula en DALYs.

En el caso de estudio también se compara el impacto del ruido del vehículo pesado adicional con los impactos sobre la



Fig. 3: Carreteras objeto de estudio

¹ Reportnet-EIONET (European Environment Information and Observation Network): <http://cdr.eionet.europa.eu>

² NOISE (Noise Observation and Information Service for Europe): <http://noise.eionet.europa.eu>

³ SICA (Sistema de Información sobre Contaminación Acústica): <http://sicaweb.cedex.es>

Carretera	Longitud (km)	Período	Condiciones de tráfico			
			Vehículos ligeros (CAT1)		Vehículos pesados (CAT3)	
			Flujo (veh/h)	Velocidad (km/h)	Flujo (veh/h)	Velocidad (km/h)
AP-7 Norte	221,5	Día	1.079	120	362	100
		Tarde	799	120	477	100
		Noche	179	120	156	100
AP-7 Sur	147,6	Día	1.295	120	434	100
		Tarde	959	120	572	100
		Noche	150	120	131	100
AP-4	93,4	Día	1.266	120	157	100
		Tarde	1.203	120	134	100
		Noche	159	120	68	100

Tabla 3: Datos de tráfico [16]

Carretera	Número de personas expuestas al ruido por kilómetro de carretera									
	Niveles de ruido L_{den} por intervalos de 5 dBA					Niveles de ruido L_{night} por intervalos de 5 dBA				
	55-60	60-65	65-70	70-75	>75	50-55	55-60	60-65	65-70	>70
AP-7 Norte	90,29	26,19	4,06	0,45	0,00	54,18	11,74	1,35	0,00	0,00
AP-7 Sur	226,96	54,88	10,16	1,36	0,00	88,75	18,29	2,71	0,00	0,00
AP-4	61,03	13,92	2,14	0,00	0,00	25,70	6,42	0,00	0,00	0,00

Tabla 4: Datos de exposición al ruido [16]

salud debidos a otros contaminantes del mismo vehículo. Para ello, se modela un vehículo pesado medio de acuerdo a la flota de vehículos en las autopistas españolas durante el año 2005 [17]. Además, se realiza un inventario de consumo de combustible y emisiones atmosféricas del vehículo pesado en base a la guía europea de inventarios de emisiones atmosféricas [18], y se aplica el método de evaluación de impacto ReCiPe [8] para calcular los correspondientes impactos sobre la salud en DALYs. Finalmente, se comparan y se agregan estos últimos impactos con el impacto obtenido previamente para el ruido.

3.1. EVALUACIÓN DE IMPACTO DEL RUIDO

Los datos de los mapas de ruido se han usado para evaluar el impacto del ruido debido a la adición de un vehículo pesado sobre el flujo anual de tráfico existente en cada una de las autopistas investigadas. La adición del vehículo pesado se ha distribuido entre los distintos periodos del día de forma proporcional al flujo de vehículos pesados que circulan por cada autopista en cada período. Las variaciones de los niveles de ruido atribuibles al vehículo pesado adicional se han calculado mediante el modelo CNOSSOS-EU [10]. En la Fig.4 se muestran las variaciones de los niveles de ruido L_{den} y L_{night} cau-

sadas por un vehículo-kilómetro adicional al año, junto con el número total de personas inicialmente expuestas a cada uno de estos niveles. En la Fig.5 se muestran las variaciones de los daños del ruido sobre la salud derivadas de las variaciones

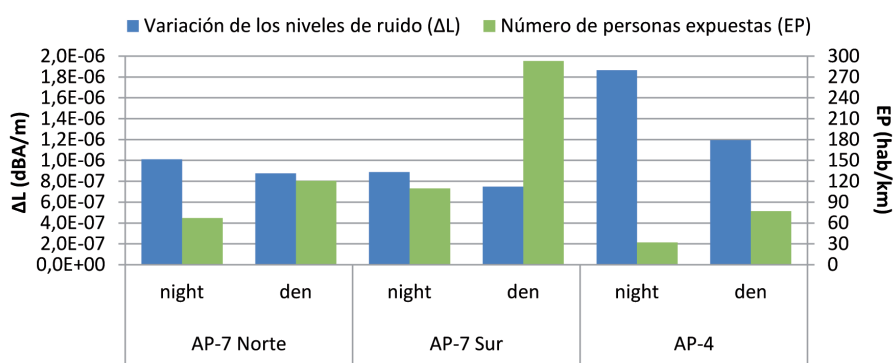


Fig. 4: Variaciones de los niveles de ruido L_{den} y L_{night} y número total de personas inicialmente expuestas a $L_{den} > 55$ dBA y $L_{night} > 50$ dBA

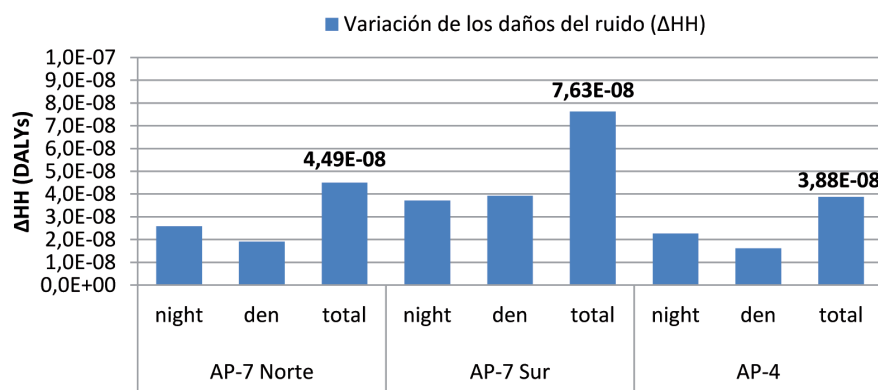


Fig. 5: Variaciones de los daños del ruido sobre la salud

de los niveles de ruido. Estos resultados distinguen entre daños asociados a las altas molestias (período día-tarde-noche), daños asociados a las graves alteraciones del sueño (período nocturno), y daños totales (como suma de los daños asociados a las altas molestias y a las graves alteraciones del sueño). Las variaciones de los daños totales del ruido corresponden al impacto total del ruido de un vehículo-kilómetro adicional.

3.2. EVALUACIÓN DE OTROS IMPACTOS SOBRE LA SALUD

En la Tabla 5 se muestra el inventario de consumo de combustible y emisiones atmosféricas para un vehículo pesado medio circulando a 100 km/h. Los datos de inventario se han usado como entrada del método ReCiPe [8] para calcular los impactos sobre la salud asociados al consumo de combustible y a las emisiones atmosféricas de un vehículo-kilómetro. Estos impactos se muestran en la Tabla 6, donde también se incluyen los impactos del ruido calculados previamente (Fig.5).

Carga ambiental	Cantidad
Consumo de diésel (g/km)	180,23
CO ₂ (kg/km)	0,60
CO (g/km)	1,17
NO _x (g/km)	5,90
PM _{2,5} (g/km)	0,18
NMVOC (g/km)	0,22
CH ₄ (mg/km)	45,16
N ₂ O (mg/km)	13,13
NH ₃ (mg/km)	3,00
Cd (mg/km)	0,01
Cu (mg/km)	1,70
Cr (mg/km)	0,05
Ni (mg/km)	0,07
Se (mg/km)	0,01
Zn (mg/km)	1,00
PAH (µg/km)	241,86
Dioxinas (pg/km)	3,00
Furanos (pg/km)	7,90

Tabla 5: Inventario de cargas ambientales para un vehículo pesado medio en autopistas españolas

3.3. INTEGRACIÓN DEL IMPACTO DEL RUIDO CON OTROS IMPACTOS SOBRE LA SALUD

Finalmente, el impacto del ruido sobre la salud debido a un vehículo pesado adicional se ha integrado con el resto de impactos sobre la salud causados por ese mismo vehículo. En la Tabla 6 se muestran los impactos sobre la salud causados por un vehículo-kilómetro adicional, distinguiendo varias categorías de impacto entre las que se incluye el ruido. Todos los impactos correspondientes a las distintas categorías de impacto están expresados en DALYs, de modo que es posible compararlos entre sí y agregarlos para obtener el impacto total sobre la salud. Los porcentajes mostrados en la Tabla 6 representan la contribución del ruido al impacto total en cada una de las carreteras evaluadas.

Categoría de impacto	Daños sobre la salud humana (DALYs)
Cambio climático	9,76E-07
Reducción de la capa de ozono	2,21E-10
Toxicidad humana	1,58E-08
Formación de oxidantes fotoquímicos	2,66E-10
Formación de materia particulada	4,54E-07
Radiación ionizante	2,08E-10
Ruido	
AP-7 Norte	4,49E-08 (3,01%)
AP-7 Sur	7,63E-08 (5,01%)
AP-4	3,88E-08 (2,61%)
Daños sobre la salud humana (impacto total)	
AP-7 Norte	1,49E-06
AP-7 Sur	1,52E-06
AP-4	1,49E-06

Tabla 6: Impactos sobre la salud de un vehículo-kilómetro adicional

4. DISCUSIÓN

El impacto del ruido del transporte rodado depende de factores locales como son las condiciones de tráfico y la densidad de población próxima a la carretera. Consecuentemente, el impacto del ruido de un vehículo pesado adicional es distinto en cada una de las carreteras evaluadas en el caso de estudio (Fig.5). El impacto total del ruido de un vehículo-kilómetro adicional varía entre 3,88E-08 y 7,63E-08 DALYs según la carretera. Estas diferencias son atribuibles a las variaciones de los niveles iniciales de ruido y al número de personas expuestas al ruido, que son específicos para cada carretera (Fig.4 y 5). Las mayores variaciones de los niveles de ruido (que suceden en la AP-4) son compensadas por niveles reducidos de población expuesta, dando lugar al impacto de ruido más bajo de entre las tres carreteras evaluadas. Por el contrario, las menores variaciones de los niveles de ruido (que suceden en la AP-7 Sur) están asociadas a niveles elevados de población expuesta, resultando en el impacto de ruido más alto. Las diferencias serían aún mayores si se compararan carreteras con condiciones de tráfico y de población expuesta muy disímiles, en las que no se produjeran efectos compensatorios (p. ej., carreteras con mucho tráfico y poca población expuesta frente a carreteras con poco tráfico y mucha población expuesta). La extrapolación de los resultados obtenidos para una carretera particular a otras carreteras puede conducir a estimaciones erróneas de los impactos del ruido. Por esta razón, se recomienda realizar evaluaciones específicas del impacto del ruido para cada caso particular. El método propuesto permite realizar tales evaluaciones de forma sencilla y eficaz a partir de datos de los mapas estratégicos de ruido.

El impacto del ruido se ha cuantificado en DALYs, posibilitando así su comparación e integración con otros impactos del transporte sobre la salud, como aquellos debidos al consumo de combustible y a las emisiones atmosféricas Tabla 6.

El impacto del ruido ha supuesto entre el 2,61 y el 5,01% del impacto total. El ruido ha resultado ser la tercera categoría de impacto más significativa en términos de daños a la salud, únicamente superado por el cambio climático y la formación de materia particulada.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado un desarrollo más completo del método de evaluación de impacto del ruido del transporte rodado propuesto por Franco et al. [7]. El método original calcula el impacto del ruido sobre la salud como el número de personas altamente molestas. El método desarrollado en este estudio también evalúa los efectos nocivos del ruido, pero considerando no sólo las personas altamente molestas sino también las personas con graves alteraciones del sueño. El nuevo método es más coherente con la Directiva 2002/49/CE [1], ya que ésta exige la evaluación tanto de las molestias como de las alteraciones del sueño. Además, el nuevo método convierte ambos efectos del ruido en sus correspondientes daños sobre la salud en DALYs.

A través de un caso de estudio se ha expuesto la dependencia del impacto del ruido de ciertos factores locales y se ha justificado la necesidad de realizar evaluaciones de impacto específicas para cada carretera. Asimismo, se ha demostrado la validez del método propuesto para realizar tales evaluaciones de manera eficaz a partir de datos de los mapas estratégicos de ruido. En el caso de estudio se ha evaluado el impacto del ruido de un vehículo-kilómetro adicional, ya que ésta es la práctica más común en el ACV para evaluar el impacto del ruido del transporte. El indicador DALY nos ha permitido comparar e integrar el impacto del ruido con otros impactos del transporte rodado sobre la salud. La relevancia del impacto del ruido en comparación con las categorías de impacto que se evalúan normalmente en el ACV justifica la inclusión del ruido como categoría de impacto habitual.

El método propuesto permite evaluar variaciones de diversos parámetros del tráfico, como son flujo, composición y velocidad, así como cualquier combinación de variaciones de varios parámetros. Esto hace posible analizar diversos escenarios que pueden ser representativos de medidas potenciales para reducir el impacto del ruido (p. ej., disminuir el flujo y/o la velocidad del tráfico en una carretera).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] European Commission. Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise. Official Journal of the European Communities, 18.7.2002, L189, p. 12-25.
- [2] Müller-Wenk R. Attribution to road traffic of the impact of noise on health. Environmental Series No. 339. Berna: Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape, 2002. 68 p.
- [3] Müller-Wenk R. "A method to include in LCA road traffic noise and its health effects". The International Journal of Life Cycle Assessment. Marzo 2004. Vol. 9-2, p. 76-85. (<http://dx.doi.org/10.1007/BF02978566>)
- [4] Doka G. Ergänzung der Gewichtungsmethode für Ökobilanzen Umweltbelastungspunkte'97 zu Mobilitäts-UBP'97. Zürich: Doka Ökobilanzen, 2003. 61 p.
- [5] Nielsen PH, Laursen JE. "Integration of external noise nuisance from road and rail transportation in lifecycle assessment". En: Potting J, Hauschild M (eds.). Background for spatial differentiation in LCA impact assessment: The EDIP2003 methodology. Copenhagen: Danish Environmental Protection Agency, 2005. p. 278-293.
- [6] Althaus H-J, de Haan P, Scholz RW. "Traffic noise in LCA. Part 2: Analysis of existing methods and proposition of a new framework for consistent, context-sensitive LCI modeling of road transport noise emission". The International Journal of Life Cycle Assessment. Noviembre 2009. Vol. 14-7, p. 676-686. (<http://dx.doi.org/10.1007/s11367-009-0117-1>)
- [7] Franco V, Garraín D, Vidal R. "Methodological proposals for improved assessments of the impact of traffic noise upon human health". The International Journal of Life Cycle Assessment. Septiembre 2010. Vol. 15-8, p. 869-882. (<http://dx.doi.org/10.1007/s11367-010-0213-2>)
- [8] Goedkoop M, Heijungs R, Huijbregts M, et al. ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: Characterisation. Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 2009. 126 p. Disponible en: <http://www.lcia-recipe.net>.
- [9] Steele C. "A critical review of some traffic noise prediction models". Applied Acoustics. Marzo 2001. Vol. 62-3, p. 271-287. ([http://dx.doi.org/10.1016/S0003-682X\(00\)00030-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0003-682X(00)00030-X))
- [10] Kefalopoulos S, Paviotti M, Anfossio-Lédée F. Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU). To be used by the EU Member States for strategic noise mapping following adoption as specified in the Environmental Noise Directive 2002/49/EC. Luxemburgo: Publications Office of the European Union, 2012. 180 p. ISBN 978-92-79-25281-5.
- [11] European Commission. Position paper on dose response relationships between transportation noise and annoyance. Luxemburgo: Office for Official Publications of the European Communities, 2002. 24 p. ISBN: 92-894-3894-0.
- [12] European Commission. Position paper on dose-effect relationships for night time noise. European Commission Working Group on Health and Socio-Economic Aspects, 2004. 30 p. Disponible en: <http://ec.europa.eu/environment/noise/pdf/positionpaper.pdf>
- [13] Miedema HME, Oudshoorn CG. "Annoyance from transportation noise: relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals". Environmental Health Perspectives. Abril 2001. Vol. 109-4, p. 409-416. (<http://dx.doi.org/10.1289/ehp.01109409>)
- [14] Miedema HME, Passchier-Vermeer W, Vos H. Elements for a position paper on night-time transportation noise and sleep disturbance. TNO Inro report 2002-59. Delft: TNO, 2003. 62 p. ISBN: 90-6743-981-9.
- [15] World Health Organization. Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2011. 106 p. ISBN: 978-92-890-0229-5.
- [16] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Mapas estratégicos de ruido: Autopistas AP-7 y AP-4. Documento resumen. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2007. 60 p. Disponible en: <http://sicaweb.cedex.es>.
- [17] Ntziachristos L, Mellios G, Kouridis C, et al. European database of vehicle stock for the calculation and forecast of pollutant and greenhouse gases emissions with TREMOVE and COPERT. Laboratory of Applied Thermodynamics, Aristotle University of Thessaloniki, 2008. 260 p. Disponible en: http://www.emisia.com/docs/08.RE.0009.V2%20-%20Fleets_Final.pdf
- [18] European Environment Agency. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2009. Technical guidance to prepare national emission inventories. Luxemburgo: Office for Official Publications of the European Communities, 2009. 21 p. ISBN 978-92-9213-034-3.