En cuanto a la velocidad de circulación de los convoyes, se dispone de los perfiles previstos en ambos sentidos teniendo en cuenta la presencia de paradas en el recorrido:

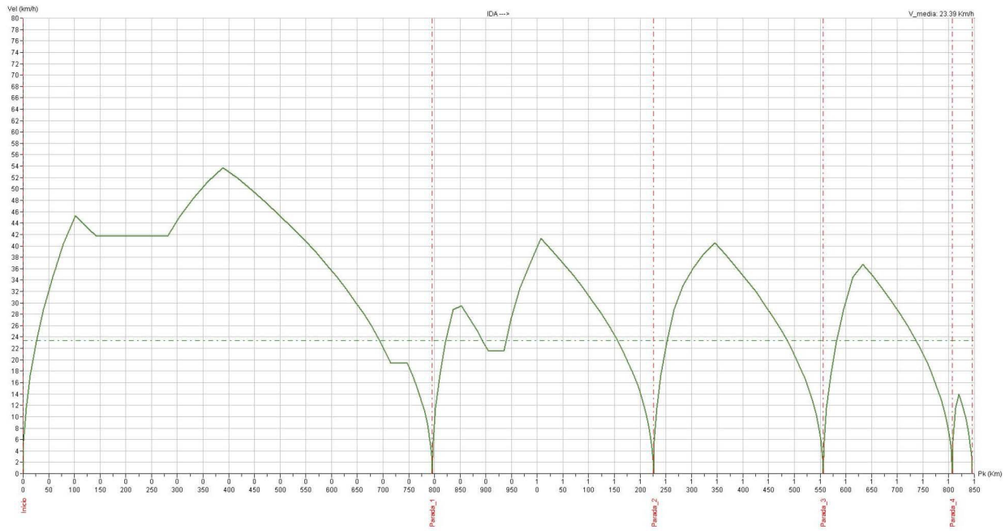


Figura 21: Perfil de velocidad – Sentido Hospital Civil

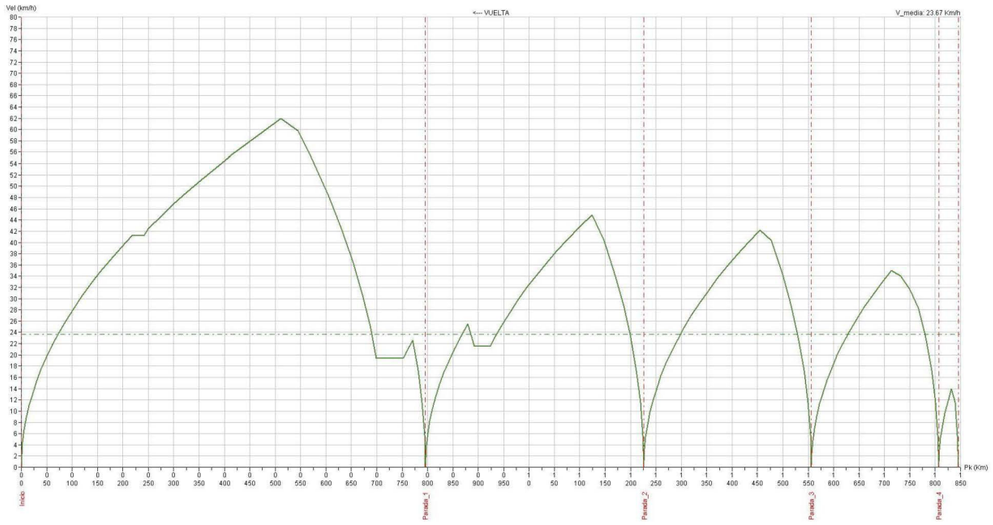


Figura 22: Perfil de velocidad – Sentido Guadalmedina

Tal como se aprecia en las figuras anteriores, durante la operación se esperan picos de velocidad de hasta **60 km/h** en el tramo bajo estudio (sentido Guadalmedina), si bien la velocidad media resultante es de unos 22 km/h. Para el caso concreto de este estudio se tramificará el recorrido con las velocidades exactas estimadas, para obtener tanto los niveles sonoros equivalentes (promedio de todas las circulaciones semanales) como los niveles máximos esperados en fachada de edificios afectados.

En cuanto a protección contra vibraciones en el tramo bajo estudio, los proyectistas han optado por un sistema de amortiguamiento basado en un sistema de vía embebido en losa de hormigón donde el carril está encamisado con un elemento amortiguador formado por una mezcla de granulado de neumático fuera de uso (NFUs) y una resina. Este sistema ha sido instalado con éxito en otros proyectos en desarrollo por la Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía.

• SECCION TIPO

• TIPOLOGIAS DEL SISTEMA MLG-VEP

TIPOLOGIAS	Rigidez (kN/m/mlvs)	Atenuación (dB)
Sistema MLG-BR + Manta MLG-ME01	< 15	> 20
Sistema MLG-BR	15-30	10 -12
Sistema MLG-MR	20 – 45	4 – 5
Sistema MLG-AR	> 35	-

Figura 23: Sección tipo de carril embebido en amortiguación

Según datos del propio fabricante, el sistema garantiza una atenuación de vibraciones de más de 20 dB en el rango de frecuencias entre 6,3 Hz y 20 kHz.

4.3.2 Actividad de construcción

En cuanto a la fase de construcción del nuevo eje ferroviario, el proyectista facilita un listado de equipamiento empleado en obras lineales de similares características:

Maquinaría de vía:

Equipos de soldadura.
Clavadoras.
Barrenadoras.
Taladros.
Tronzadoras.

Grupos electrógenos.
Dobladoras de carril.
Maquinaría de estructuras y arquitectura:
Pilotadora (uso no confirmado)
Pantalladora.
Grúas autopropulsadas.
Central de hormigonado convencional
Camiones hormigonera.
Cortadora y fresadora de firme
Sierra circular eléctrica.
Grupos de soldadura.
Convertidores y vibradores eléctricos.
Vibradores neumáticos.
Compresores de aire.
Martillo picador.
Carro perforador.
Hormigonera eléctrica.
Motobombas y bombas.
Extendedoras de asfalto
Barredoras y máquinas de pintar
Resto de herramientas manuales.
Maquinaría de movimiento de tierras:
Pala cargadora y retroexcavadora.
Tractores sobre cadenas.
Motoniveladoras
Compactadoras
Camiones basculantes y Dumpers.
Cubas de riego

Tabla 3: Maquinara de mayor relevancia a utilizar en el proyecto

La emisión sonora de la actividad de construcción es estimada en base a experiencias previas de CECOR en obras lineales similares, con información complementaria extraída de la base de datos del proyecto europeo IMAGINE.

5 MODELIZACIÓN ADOPTADA

5.1 Predicción de niveles de ruido

5.1.1 Metodología de simulación

Los trabajos de elaboración de un estudio acústico de una gran infraestructura de transporte se pueden subdividir en diferentes tareas que, cronológicamente, se enumeran del siguiente modo:

- Caracterización del entorno de estudio.
- Modelo de predicción acústica.
  - Dimensionamiento y justificación de medidas correctoras, en caso de que sea necesario.
- Validación del modelo mediante ensayos *in situ*.
- Generación de Mapas e implementación GIS.

5.1.1.1 Caracterización del entorno de estudio

El área de estudio se caracteriza para su simulación mediante la definición de los siguientes elementos geométricos: terreno, líneas de ferrocarril, carreteras, edificios y obstáculos. Estos elementos deben ser obtenidos de distintas fuentes de información e integrados en un solo modelo simplificado y constituyen el escenario de propagación de ruido, objeto del estudio. Los mapas de ruido y vibraciones en el estudio han sido calculados a una escala única de 1:2.500.

TERRENO

El terreno se modela a partir de la cartografía disponible a escala 1:2.500, y en 3D. Esta cartografía se complementa con datos públicos obtenidos desde el Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, ente que depende de la Consejería de Economía, Innovación y Ciencia de la Junta de Andalucía.

LÍNEAS DE FERROCARRIL Y CARRETERAS

La vía del ferrocarril en el modelo se simula como una única plataforma sobre la cual se sitúa la fuente de ruido, siendo caracterizada por el tráfico ferroviario. El ancho de la plataforma de la vía está definido por la línea particular en cada modelo. La plataforma de la vía se extiende desde el eje que figura en la cartografía y es adaptada al terreno. Los viaductos se modelan mediante un autoapantallamiento.

A partir de las visitas de inspección al área de estudio se ha evaluado la validez y adecuación de los documentos cartográficos disponibles a la situación real. Siempre que sea necesario se actualizan dichos documentos, incorporando a los mismos las edificaciones y otros elementos significativos que se detecten.

EDIFICACIÓN Y OTROS OBSTÁCULOS

Los edificios están definidos por su cota de la base y el número de plantas.

Toda la información relativa a la edificación (alturas de los edificios, áreas de los mismos, número de viviendas...) y usos del suelo de la zona de estudio se obtiene a partir de los datos cartográficos disponibles, de planos extraídos del

Plan General de Ordenación Urbana de Málaga y se completan con los datos proporcionados por la oficina del Catastro del Ministerio de Hacienda. Adicionalmente, se han efectuado visitas de campo para determinar con exactitud la altura y tipo de cada edificio.

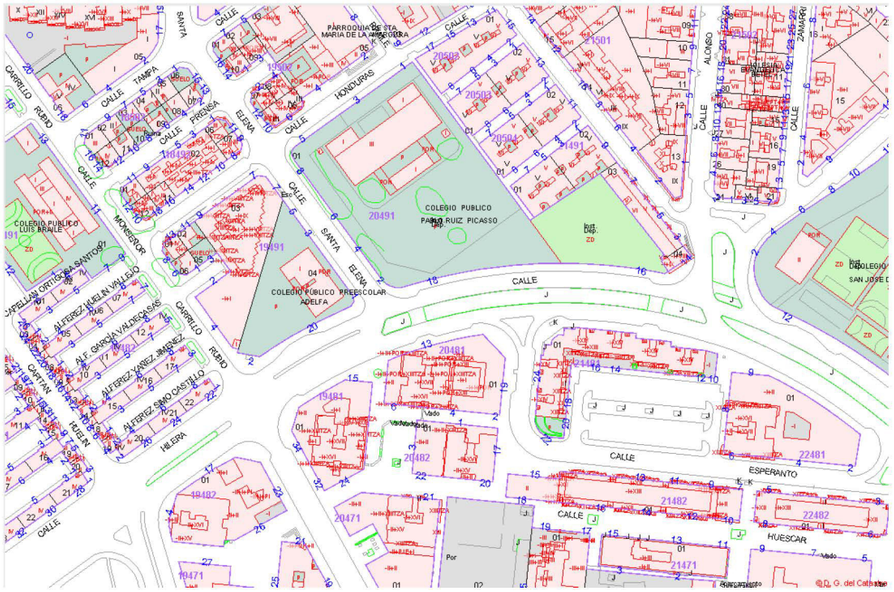


Figura 24: Servicio WMS del Catastro

En el cálculo se adoptan hipótesis de simplificación geométrica en los entornos en los cuales esté técnicamente justificado, como puede ser no considerar los edificios cuya área sea menor de 10 m^2 y altura menor de 2 m, las pantallas o barreras acústicas cuya longitud sea menor de 3 m y altura menor de 2 m o los terraplenes cuya altura sea inferior a 2 m. Esta simplificación se fundamenta en distintos estudios realizados en CECOR, considerando que los elementos de tan reducidas dimensiones no son representativos para los resultados de las simulaciones de ruido.

METEOROLOGÍA

Por defecto se tomará una temperatura de 15º C y una humedad relativa del 70%, similar a la climatología media de la ciudad de Málaga (según AEMET la temperatura media anual en Málaga es de 18ºC, y la humedad media es 66%).

Además se introduce el siguiente criterio en lo relativo a los porcentajes de ocurrencia de condiciones favorables a la propagación del ruido: período día: 50%, período tarde: 75% y período noche: 100%.

TRÁFICO RODADO

Los datos de tráfico están compuestos por el tipo de vehículo (porcentajes de vehículos ligeros y vehículos pesados para cada período del día), la velocidad media por cada período temporal del día y para cada tipo de vehículo, la intensidad media por cada período temporal del día y para cada tipo de vehículo y el tipo de flujo de tráfico (flujo continuo

fluido, flujo continuo en pulsos, flujo acelerado en pulsos, flujo decelerado en pulsos). Los datos de los que se parte para las simulaciones son los disponibles a la fecha de redacción del proyecto (ver apartado 4.3.1.1).

TRÁFICO FERROVIARIO

Los datos de tráfico ferroviario están formados por el tipo de trenes y sus características, el número y la velocidad media de circulación por cada período temporal del día y para cada tipo de vehículo, el tipo de travesía y balastro, las discontinuidades y estructuras. Los datos de los que se parte para las simulaciones son los disponibles a la fecha de redacción del proyecto (ver apartado 4.3.1.2).

ACTIVIDAD DE CONSTRUCCIÓN

Los datos referentes a la emisión acústica de la maquinaria de construcción han sido extraídos de la base de datos europea IMAGINE, y son contrastados mediante experiencias previas de CECOR en evaluaciones acústicas *in situ* de obras lineales similares. Los datos necesarios consisten en niveles de potencia acústica, tiempos de operación y ritmos de avance de la obra (éstos últimos estimados). Véase la metodología de simulación en el apartado 5.1.2.3.

5.1.2 Modelo de predicción acústica

Los datos obtenidos en la fase anterior han sido implementados en bases de datos vinculadas a elementos geométricos de cartografía (Sistema de Información Geográfica, GIS).

Desde estas bases de datos los datos son exportados al *software* dedicado para proceder al cálculo de los mapas de propagación acústica, y que también es empleado como herramienta de salida del cartografiado acústico. En concreto, para la implementación del cartografiado acústico se emplean las siguientes herramientas:

- *Software* **Datakustik Cadna A XL 4.2.04**. Predicción sonora en exteriores.
- *Software* de gestión de Sistema de Información Geográfica (GIS) **Esri ArcVIEW 10.0**.

La herramienta fundamental de cálculo será **Datakustik Cadna A**, *software* de simulación de propagación acústica en el ambiente exterior en tres dimensiones. El programa permite evaluar el nivel de ruido en un escenario generado por fuentes de ruido puntuales (es decir, cualquier actividad ruidosa que pueda ser modelada mediante su potencia acústica), de tráfico rodado, trenes o aeronaves, implementando los métodos estándares de cálculo establecidos legalmente en el Real Decreto 1513/2005. Los resultados son presentados como curvas isófonas en mapas horizontales o verticales.

A partir de los cálculos efectuados en el *software* anterior su implementación gráfica, tanto en formato papel como electrónico, se efectuará mediante la herramienta **Esri ArcVIEW**. Este programa facilita la edición y generación de mapas con las reseñas principales en el mapa.

En el Anexo II del Real Decreto 1513/2005 se establecen los métodos recomendados para la obtención de los índices de ruido aplicables para la cartografía acústica. Los niveles sonoros generados se refieren a un período normalizado de un año. Para el caso concreto de este estudio, los métodos a emplear serán:

- **Ruido de tráfico rodado**: modelo de cálculo nacional francés NMPB-Routes-96 (SETRA-CERTU-LCPC-CSTB) recogido en el *Arrêté du 5 mai 1995 relatif au bruit des infrastructures routières, Journal Officiel du 10 mai 1995, Article 6* y en la norma francesa XPS 31-133.
- **Ruido de tráfico ferroviario**: modelo de cálculo nacional de los Países Bajos publicado en el *Reken - en Meetvoorschrift Railverkeerslawaai '96, Ministerie Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 20 de noviembre de 1996 denominado SRM II o RML2.*
- **Ruido industrial**: modelo internacional recogido en la norma *ISO 9613-2:1996. Acoustics. Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2: General method of calculation.*

Estos modelos de cálculo se basan el trazado de rayos desde el foco emisor, dividido en pequeñas secciones que puedan ser consideradas emisores puntuales (*splitting*), hasta una red de receptores. El nivel sonoro en dichos receptores se calculará a partir de la potencia acústica de cada una de las fuentes sustrayendo diferentes términos de atenuación, que dependen de las propiedades del terreno, de factores meteorológicos y de la presencia de obstáculos en el camino de propagación.

La expresión general es la siguiente:

$$L_{Aeq} = L_W - A$$
$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{grd} + A_{bar} + A_{misc}$$

Ecuación 1

Donde:

- L_{Aeq}: representa el nivel continuo equivalente estimado en un receptor dado.
- A: atenuaciones que ocurren en el camino de propagación.
  - A_{div}: atenuación por divergencia geométrica. Ocurre por la dispersión de la potencia acústica en una mayor superficie de la onda esférica al aumentar la distancia. Su expresión es:

$$A_{div} = 20 \cdot \log_{10} d + 11$$

Ecuación 2

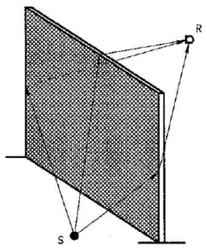
  - A_{atm}: atenuación por absorción acústica en el seno de la atmósfera. El coeficiente de absorción acústica por kilómetro (α_d) depende de la frecuencia, temperatura y humedad relativa:

Temperature	Relative humidity	Atmospheric attenuation coefficient α, dB/km							
		Nominal midband frequency, Hz							
°C	%	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
10	70	0,1	0,4	1,0	1,9	3,7	9,7	32,8	117
20	70	0,1	0,3	1,1	2,8	5,0	9,0	22,9	76,6
30	70	0,1	0,3	1,0	3,1	7,4	12,7	23,1	59,3
15	20	0,3	0,6	1,2	2,7	8,2	28,2	88,8	202
15	50	0,1	0,5	1,2	2,2	4,2	10,8	36,2	129
15	80	0,1	0,3	1,1	2,4	4,1	8,3	23,7	82,8

- A_{grd}: efecto de la absorción del suelo en el entorno del emisor y del receptor. Se introducirán los siguientes valores de absorción acústica en función del tipo de terreno, Según recomendaciones del *WG-AEN*.

Uso de suelo	Coeficiente de absorción (G)
Vegetación	1.0
Agropecuario	1.0
Parque o zona verde	1.0
Pavimentos	0.0
Suelo urbano	0.0
Suelo industrial	0.0
Superficies cubiertas de agua	0.0
Zonas residenciales de media / baja densidad	0.5

- A_{bar}: Atenuación por inserción de barreras acústicas (apantallamiento). Esta atenuación se basa en estimaciones de difracción en los bordes de la barrera. La expresión más empleada para estas estimaciones se basa la fórmula de *Maekawa*:



$$\delta = a + b - c$$

$$N = \frac{2 \cdot \delta}{\lambda} = \frac{2 \cdot f \cdot \delta}{c}$$

$$\Delta L = 5 + 20 \cdot \log \frac{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot N}}{tg\sqrt{2 \cdot \pi \cdot N}}$$

Ecuación 3

- A_{misc}: Otras atenuaciones (propagación a través de bosques, áreas edificadas…).

En cuanto a la potencia acústica de la fuente (L_W), se emplearán los modelos de cálculo recomendados para la emisión acústica de ferrocarriles y vías de transporte rodado. Se describen en los siguientes apartados.

5.1.2.1 Modelo de tráfico rodado

En el caso del ruido del tráfico rodado, el modelo requerido es el francés (NMPB), que se basa fundamentalmente en la estimación de la potencia sonora a partir del aforo y velocidad de circulación de la vía y la definición de un espectro de emisión normalizado[54] por cada vehículo que circule por ella. Dicha potencia se extrae de los siguientes ábacos:

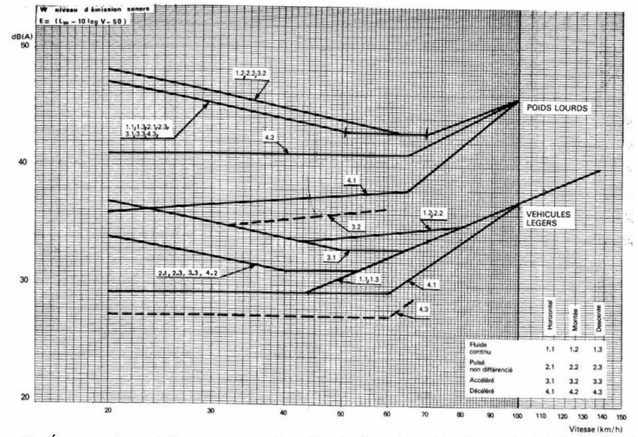


Figura 25: Ábacos de emisión sonora en función del tipo de vehículo y velocidad de circulación

El modelo divide la carretera (una fuente lineal) en secciones, asumiendo fuentes puntuales en cada una de ellas. Es importante seleccionar una distancia de sección adecuada, de tal forma que se eviten errores por diezmado:

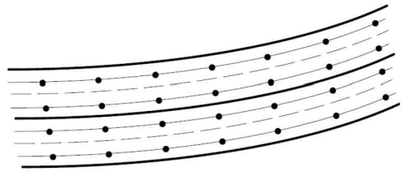


Figura 26: *Splitting* de carriles a fuentes puntuales

El último factor especialmente relevante consiste en la corrección de la emisión sonora debida al tipo de asfalto de la carretera. Según recomendación del *WG-AEN*, la emisión debe ser corregida por un factor que dependerá, de forma directa, de la rugosidad del asfalto tal como puede observarse en la siguiente tabla:

[54] *Guide du bruit des transports terrestres, fascicule prévision des niveaux sonores, CETUR 1980.*

Tipo de pavimento	Factor de corrección (dB)	
Adoquines irregulares	+4.8	
Adoquines regulares	+3.1	
Hormigón / Asfalto rugoso	+1.1	
Asfalto liso (valor de referencia)	0	
Asfalto drenante nuevo (< 5 años)	-2.7	(-1.7)*
Asfalto fonorreductor	-3.5	(-2.5)*

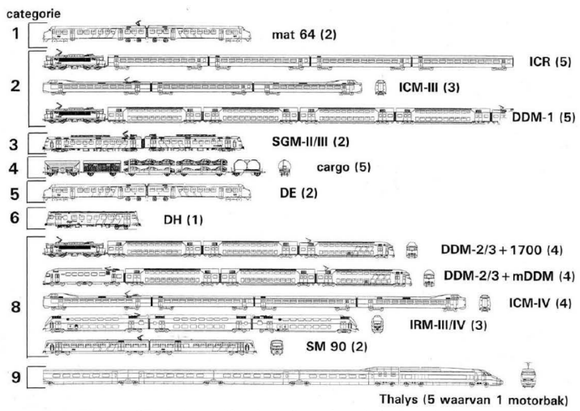
Tabla 4: Corrección del nivel de emisión por tipo de asfalto

**Entre paréntesis, valores de corrección para carreteras con velocidad de circulación máxima de 50 km/h*

5.1.2.2 Modelo de tráfico ferroviario

En el caso particular de los ferrocarriles, el modelo requerido es el holandés (SRMII o RML2), que estima la emisión sonora a partir del material rodante de dicho país. Por lo tanto, para su correcta aplicación deberá efectuarse una correspondencia entre las unidades de ferrocarril empleadas en el tramo bajo estudio (en su parte en superficie) y los tipos de ferrocarriles holandeses.

Para ello se empleará como base el documento Caracterización de la emisión acústica de los trenes utilizados en el sistema ferroviario español, redactado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) a petición de ADIF, complementando sus conclusiones con una batería de ensayos *in situ* sobre una unidad de pruebas del propio Metro de Málaga.



LARGO RECORRIDO (Denominación del producto comercial)	Frenos	Tipo de motor	Vmax (Km/h)	Número de coches	Categoria acústica
Alaris	100% DISCO	Eléctrico	220	3	9A
Altaria	100% DISCO	Eléctrico Diesel	220	Variable	9B
Alvia	100% DISCO	Eléctrico	220	4+2UT	8
Arco	100% DISCO	Eléctrico	200	4 coches	9A
Euromed	100% DISCO	Eléctrico	220	2M+8R	8
Intercity	100% DISCO	Eléctrico	160	Variable	8
Otros Talgos	100% DISCO	Eléctrico Diesel	180-200	Variable	8
Estrella (Asignación cualitativa)	90%DISCO 10%ZAPATA	Eléctrico Diesel	140-160	Variable	8
Diurno (Asignación cualitativa)	100%DISCO	Eléctrico	160	Variable	8
AVE	100%DISCO	Eléctrico	300	M - 8R -M	9B

Figura 27: Asignación de categorías de trenes holandeses a modelos de ferrocarril empleados por Adif en España

En el caso particular de este estudio, si bien el trazado evaluado se encuentra en fase de proyecto y, por lo tanto, no es posible una evaluación *in situ* del mismo, en experiencias anteriores de CECOR[55] se ha dispuesto de acceso al tramo de pruebas con que cuenta la entidad explotadora Metro Málaga en el barrio de Teatinos, cerca del campus universitario del mismo nombre.

Gracias a esta circunstancia, fue organizada una jornada de pruebas *in situ* para determinar con mayor precisión la asignación de categoría del material móvil a emplear en este proyecto en particular. Véanse detalles del proceso en el apartado 5.3.

Una vez asignada las categorías correspondientes de trenes holandeses para cada unidad de tren considerada, el modelo considera cinco alturas de fuente donde se tendrán en cuenta tanto el ruido de rodadura como el aerodinámico:

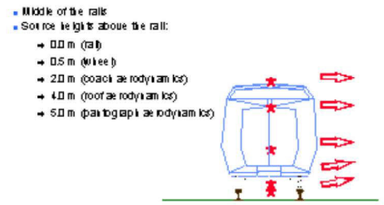


Figura 28: Alturas de fuente en modelo holandés

En todo caso, para completar la metodología de trabajo y solucionar imprecisiones de los datos de entrada a los modelos de cálculo, se han tenido en cuenta recomendaciones generales dictadas por el *WG-AEN*.

5.1.2.3 Modelo de ruido de construcción

En el estado del arte actual no existe un modelo estandarizado de evaluación de ruido de construcción de grandes infraestructuras lineales. Por lo tanto, para su implementación se define una metodología propia basada en las recomendaciones de la guía *Interiom*, niveles de potencia sonora de maquinaria extraídos de la base de datos *SourceDB* y experiencias previas de CECOR.

El modelo propuesto consistirá en la estimación de la potencia acústica global de la actividad de construcción, en base a la sumatoria de las potencias acústicas individuales de la maquinaria con emisión sonora más significativa, ponderadas por su tiempo aproximado de operación, y asimilarlo a una fuente sonora lineal prediciendo el avance de las obras a lo largo del tiempo.

La potencia sonora estimada para la fuente lineal, según experiencias previas de CECOR, será de **89,4 dBA / m**. Se estima una velocidad de avance de las obras de **3 m / día**. El resultado será una estimación de los niveles sonoros equivalentes de 60 días de integración en horario de funcionamiento de la obra, cuando ésta recorre secciones de 180

[55] Informe **T-13-044.** Estudio de ruido y vibraciones del proyecto de trazado en superficie de la Línea 1 del Metro de Málaga. Tramo: Guadalmedina – La Malagueta (Málaga). Versión 2.

metros. En la siguiente figura el nivel máximo ocurre cuando la obra se encuentra a la menor distancia del punto de observación:

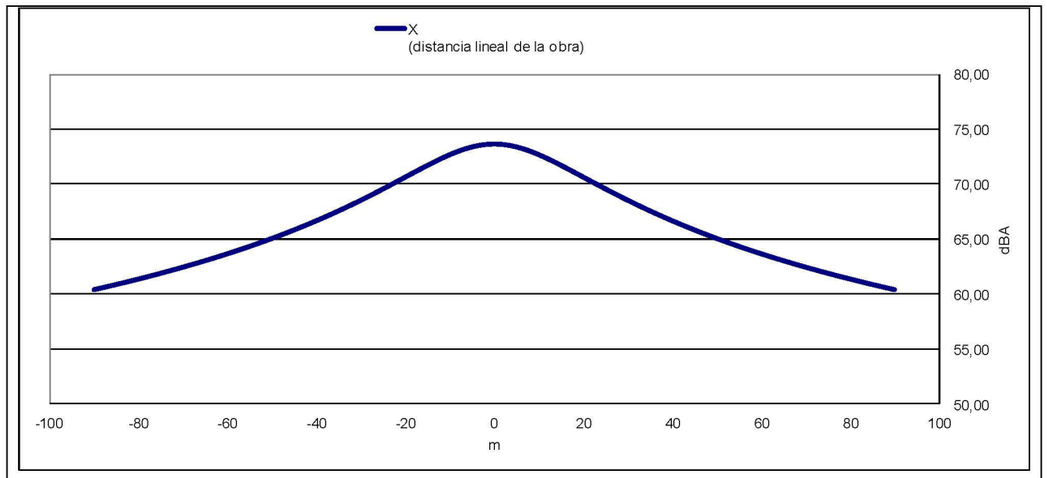


Figura 29: Estimación de nivel de emisión sonora de obra en función de la distancia al punto de observación

5.1.3 Definición de los periodos horarios

Los períodos horarios establecidos en la legislación de aplicación son:

- Período **día** (7:00 – 19:00h): 12 horas
- Período **tarde** (19:00h – 23:00h): 4 horas
- Período **noche** (23:00 – 7:00h): 8 horas.

5.1.4 Índices de evaluación

De acuerdo a los límites sonoros establecidos en la legislación de aplicación, los índices de evaluación establecidos en el Real Decreto 1513/2005 y calculados en el modelo serán los siguientes:

- L_d (Nivel equivalente día): es el índice de ruido asociado a la molestia durante el período día, es el nivel sonoro medio a largo plazo ponderado A definido en la norma ISO 1996-2:1987, determinado a lo largo de todos los períodos día de un año.
- L_e (Nivel equivalente tarde): es el índice de ruido asociado a la molestia durante el período tarde, es el nivel sonoro medio a largo plazo ponderado A definido en la norma ISO 1996-2:1987, determinado a lo largo de todos los períodos tarde de un año.
- L_n (Nivel equivalente noche): es el índice de ruido asociado a la molestia durante el período noche, es el nivel sonoro medio a largo plazo ponderado A definido en la norma ISO 1996-2:1987, determinado a lo largo de todos los períodos noche de un año.
- L_{max} (Nivel máximo): es el mayor nivel de presión sonora ponderado A y evaluado con constante de integración rápida durante un período T percibido por un receptor particular R para un evento sonoro dado, tal como se define en la norma UNE-EN ISO 1996-1:2005 y en los límites aplicables de la legislación de referencia.

Los cálculos se realizarán mediante análisis de bandas de frecuencia de octava. El espectro de emisión y propagación estará definido entre 63 Hz y 8 kHz, si bien la representación de los resultados se realizará en banda ancha con ponderación frecuencial A. La leyenda de colores empleada para la representación de los niveles sonoros a largo plazo será la siguiente:

Figura 30: Leyenda de colores

Cabe esperar cierta incertidumbre en los cálculos, que puede estimarse en ± 3 dB.

5.2 Predicción de niveles de vibración

En el caso de las vibraciones no existe un modelo aceptado por la legislación para la predicción de dichos valores, por lo que en el presente estudio utilizará un modelo de ingeniería semianalítico para la predicción de la propagación de las vibraciones provocadas por la explotación de infraestructuras ferroviarias a través del terreno que parte de la expresión de la propagación de ondas en el terreno desarrollada por Lamb[56] y aplicada por Barkan[57], y que se valida mediante medidas experimentales.

Mediante la aplicación de esta metodología se obtendrán los espectros de aceleración estimados en la fase de explotación para las condiciones de circulación previstas más desfavorables, en función de la distancia al trazado, del perfil geológico y topográfico, calculándose los indicadores de percepción vibratoria L_{aw}, conforme a la ISO 2631-2 y a las diferentes legislaciones aplicables.

Los resultados serán extrapolados a todo el trazado, obteniendo unas curvas de nivel que muestran el índice de vibración a pie de edificio. En caso de que los valores de vibración de la nueva configuración de vía superasen los

[56] *H. Lamb. On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid. Philosophical transactions of the Royal Society, London. 203, 1904, 1-42.*
[57] *D.D. Barkan. Dynamics of Bases and Foundations. McGraw-Hill. 1962.*

máximos establecidos en la legislación se propondrán la implantación de medidas correctoras, cuya efectividad se evaluaría con el mismo método, actualizando la respuesta de la plataforma.

5.2.1 Metodología de simulación

El modelo propuesto predice el nivel de vibración en un punto de interés (v_b) tomando como base la vibración de excitación de referencia (v_a), la distancia de propagación (r_b) y el coeficiente de atenuación del terreno (α).

Los coeficientes de excitación del terreno (α) y de atenuación geométrica (γ) han sido obtenidos de bibliografía contrastada a partir de los estudios geotécnicos del terreno facilitados por la Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía. Se ha preferido esta solución en lugar de la realización de ensayos de caracterización *in situ* debido a la dificultad de obtención de datos significativos en un entorno urbano, salvo si se efectúan ensayos destructivos (clavado de piquetas a profundidad suficiente), y cortes de tráfico en el entorno que eviten la contaminación de las muestras con vibraciones espurias.

La expresión del modelo es la siguiente:

$$v_b = v_a \cdot \left(\frac{r_a}{r_b}\right)^{\gamma} \cdot e^{\alpha \cdot (r_a - r_b)} + K$$

Ecuación 4

Donde,

- γ: es la atenuación geométrica, debida a la expansión del frente de onda.
- α es la atenuación material, debida a la disipación de energía en el seno de terreno.
- K hace referencia al comportamiento vibratorio del edificio.

El nivel de vibración de referencia, v_a a una distancia r_a, fue determinado empíricamente con una unidad del ferrocarril que circulará en el futuro por el tramo bajo estudio, en una jornada de ensayos programada en el tramo de pruebas con que cuenta la entidad explotadora Metro Málaga. Este tren fue accionado a una velocidad conocida v_0 y en una superestructura similar a la del futuro trazado. Este nivel se asumirá como referencia para el material que circulará en la futura vía considerándose ésta como un solo bloque, por lo que no se entra en detalle en la influencia de cada elemento que la compone (carril, sujeción, traviesa y lecho elástico). Ver detalles del procedimiento en el apartado 5.3.

5.2.2 Determinación de los parámetros de propagación

ATENUACIÓN GEOMÉTRICA γ

La atenuación geométrica hace referencia a la pérdida de energía debido a la expansión y aumento del radio de acción de la onda cuando ésta se aleja de la fuente, lo que provoca la distribución de la energía en una superficie mayor y, por tanto, una disminución de la intensidad de energía. Por tanto, este coeficiente dependerá del tipo de fuente considerada (puntual, infinita o finita), de su localización (en superficie o soterrada) y del tipo de ondas sísmicas que genere (superficiales o volumétricas), tomando un valor para cada una de las posibles situaciones.

Para el caso particular del tren, la hipótesis correcta es la de suponerlo como una fuente de vibración multipuntual compuesta por diferentes fuentes puntuales (no correlacionadas) que representan los diferentes bogies del tren. Es por esta razón que el parámetro γ depende de la longitud del tren y de su velocidad.

Por los datos consultados en la bibliografía[58] así como por experiencias anteriores de CECOR en estudios realizados sobre ferrocarriles ligeros similares al que circulará por el tramo bajo estudio, se considerará un coeficiente de atenuación geométrica de **0,3** para el tramo en superficie y de **1,4** para el tramo en túnel. Este valor es independiente de la frecuencia.

ATENUACIÓN MATERIAL α

La atenuación material, α, es el otro fenómeno por el que el nivel de vibración disminuye con la distancia a la fuente y hace referencia a la atenuación causada por la fricción y cohesión entre las partículas del terreno debido al comportamiento visco-elástico de éste.

El coeficiente de atenuación material, expresado en unidades de m-1, se representa mediante la expresión siguiente:

$$\alpha = \frac{\delta \cdot f}{c_R}$$

Ecuación 5

Donde,

- δ es el amortiguamiento interno del terreno, también llamado decremento logarítmico
- f es la frecuencia (Hz)
- c_R es la velocidad de fase de la onda de Rayleigh

Los datos presentes en bibliografía respecto al valor de este parámetro son muy variables, por lo que se establece una clasificación de los terrenos desde el punto de vista de su comportamiento frente a la propagación, y a la definición

[58] *Jordi Romeo Garbí "Modelos semiempíricos de predicción basados en expresiones analíticas". Intevia Madrid, Abril 2008*

de un procedimiento experimental de cálculo del amortiguamiento para cada tipología de terreno. Véase un ejemplo de clasificación de terrenos por sus características mecánicas en la siguiente figura:

Soil class	Wave speed[1] [m/s]	Loss factor (η)	Density [kg/m^3]
Rock	3500	0.01	2.65
Sand, silt, gravel, loess	600	0.1	1.6
Clay, clayey soil	1500	0.1-0.2[2]	1.7

1) Longitudinal wave speed.
2) A conservative value since the factor can be as high as 0.5, but such a high value should be used with caution.

Tabla 5: Propiedades de propagación de onda para suelos típicos [Ungar y Bender, 1975]

Por los datos consultados, así como por experiencias anteriores de CECOR en estudios realizados sobre terrenos de similar composición a la del tramo en evaluación, se considerará un coeficiente de atenuación material de **0,02** para toda la longitud del trazado.

5.2.3 Períodos horarios

Los períodos horarios establecidos en la legislación de aplicación son:

- Período **día** (7:00 – 23:00h): 16 horas
- Período **noche** (23:00 – 7:00h): 8 horas.

Si bien en la definición de los objetivos de calidad acústica para vibraciones a satisfacer no existen diferentes límites para los períodos horarios.

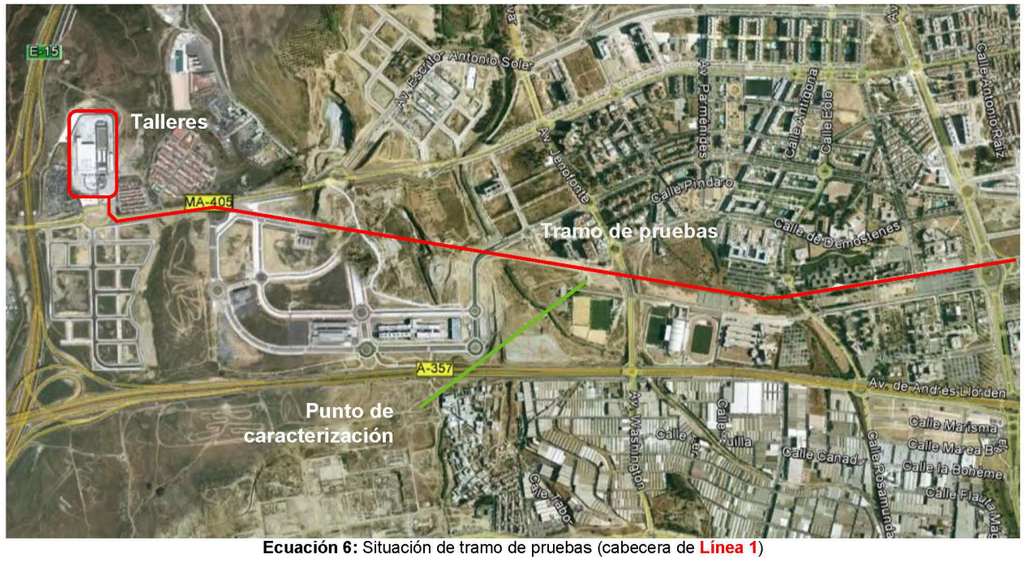
5.2.4 Índices de evaluación

De acuerdo a los límites de vibraciones establecidos en la legislación de aplicación, los índices de evaluación a calcular en el modelo serán los siguientes:

- L_{aw} (Índice de vibración): el índice de vibración asociado a la molestia, o a los efectos nocivos, producidos por vibraciones, también conocido como Maximum Transient Vibration Value (MTVV), y definido en la norma ISO 2631-1:1997.

5.3 Caracterización de la fuente de emisión

La excitación acústica y vibratoria debida al paso de los trenes por la vía se simula a partir de datos experimentales obtenidos *in situ*[59] en el tramo de pruebas con Metro Málaga cuenta en las afueras de la ciudad en la cabecera de la futura línea 1, entre la paradas del *Paraninfo* y del *El Cónsul,* cerca del campus universitario de Teatinos.



Ecuación 6: Situación de tramo de pruebas (cabecera de **Línea 1**)

En términos generales, la situación ideal para los puntos de medida que puedan evitar efectos no controlables se define por las siguientes características:

- Ser un tramo de vía llano y recto.
- El carril debe estar libre de juntas o cruces.
- El entorno tiene que cumplir condiciones de campo libre. El terreno emisor y el receptor debe estar libre de obstáculos y de elementos reflectantes o fuertemente absorbentes.
- El estado de corrugación del carril debe ser representativo de la situación del tramo bajo estudio en este proyecto.

[59] Datos extraídos del Informe **T-13-044.** Estudio de ruido y vibraciones del proyecto de trazado en superficie de la Línea 1 del Metro de Málaga. Tramo: Guadalmedina – La Malagueta (Málaga). Versión 2.

El tramo de pruebas se encuentra en una zona relativamente despejada, llana y alejada de otros focos de ruidos o vibraciones que puedan influir en los resultados de las determinaciones experimentales y por ello se considera adecuado para una obtención de una relación señal / ruido suficiente para la caracterización.

No obstante, en la zona escogida, al ser de menor sensibilidad que el tramo en estudio, no ha sido ejecutado un tratamiento específico contra vibraciones. Por lo tanto, los datos recogidos durante las pruebas supondrán una sobrestimación respecto a los que en el futuro puedan obtenerse en el futuro tramo Guadalmedina – Malagueta.

Los ensayos tuvieron lugar durante la mañana del día **13/03/2013**.

Para la prueba se dispuso de una de las unidades de ferrocarril que en el futuro circularán por el tramo bajo estudio. Se trata de un modelo del fabricante francés **CAF**, modelo **Urbos 3**, con las siguientes características técnicas:

Figura 31: CAF Urbos 3

Características físicas

- Longitud total: 32.360 mm
- Anchura máxima: 2.650 mm
- Altura máxima: 3.500 mm
- Peso en vacío: 38.070 kg

Capacidad de viajeros:

- Número de plazas sentados: 52
- Número de plazas de pie (4p/m^2): 169
- Número de plazas PMR: 2
- Número total de plazas: 221

Prestaciones

- Velocidad máxima: 70 km/h
- Aceleración máxima: 1,33 m/s^2
- Deceleración máxima:
  - 1.25 m/s^2
  - 2.5 m/s^2 (emergencia)
- Tensión de alimentación 750 V_{cc}

5.3.1 Procedimiento de caracterización

El procedimiento de caracterización se basará en la obtención de perfiles sonoros y vibratorios en un punto de evaluación fijo, para un número suficiente de pasadas de ferrocarril circulando a una velocidad constante y conocida:

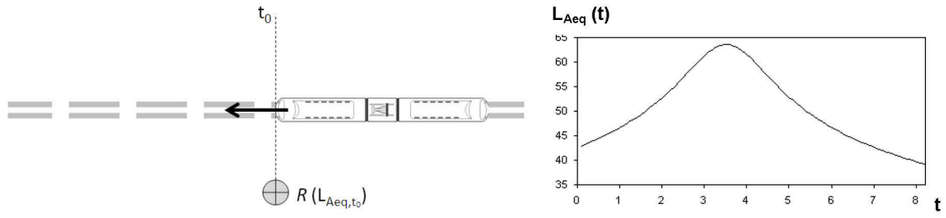
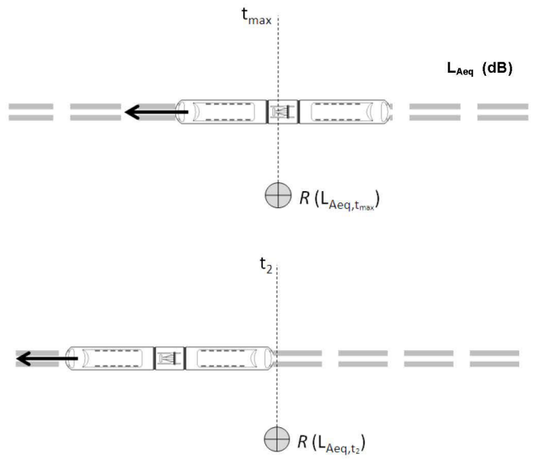


Figura 32: Ejemplo de *perfil sonoro*



- Se escoge un punto de evaluación *R* ubicado a **7,5 m** del centro de la traza:
  - El micrófono se sitúa a 1,2 m de altura respecto al plano de circulación.
  - El acelerómetro se apoya directamente sobre el terreno, en este caso de tipo rústico.
- Se hace circular el ferrocarril *en vacío* por el tramo de pruebas, a una velocidad controlada por el conductor constante y conocida representativa de las velocidades de explotación en el tramo bajo estudio.
  - Se efectúan **8 pasadas** a una velocidad de **30 km/h** (4 por sentido)[60].
  - Se efectúan **6 pasadas** a una velocidad de **15 km/h** (3 por sentido).
- Al paso del convoy se registran simultáneamente, mediante un sonómetro y un analizador de vibraciones multicanal, los siguientes parámetros:
  - **Ruido:**
    - Nivel continuo equivalente ponderado A (L_{Aeq}), con intervalos de registro de 1 segundo.
    - Espectro de nivel continuo equivalente sin ponderación frecuencial (L_{Zeq}), entre las bandas de 1/1 octava de 63 Hz y 8 KHz, con intervalos de registro de 1 segundo.

[60] Uno de los registros sonoros fue descartado por saturación en el micrófono, de modo que se disponen de 7 perfiles sonoros válidos.

- **Vibración**:
  - Espectro de nivel de aceleración eficaz (L_a) en las tres direcciones ortogonales (x, y, z) sin ponderación frecuencial, en las bandas de 1/3 de octava comprendidas entre las frecuencias de 1 y 80 Hz, con intervalos de registro de 1 segundo.
    - El canal 1 (eje x) se dispone de forma paralela a la traza (plano horizontal)
    - El canal 2 (eje y) se dispone de forma perpendicular a la traza (plano horizontal)
    - El canal 3 (eje z) se dispone de forma perpendicular a la traza (plano vertical)

- El **tiempo de paso (T_p)** es el intervalo que discurre entre el momento en que la zona delantera del vehículo cruza dicha línea (t_0) y en el que lo hace la zona trasera (t_2):

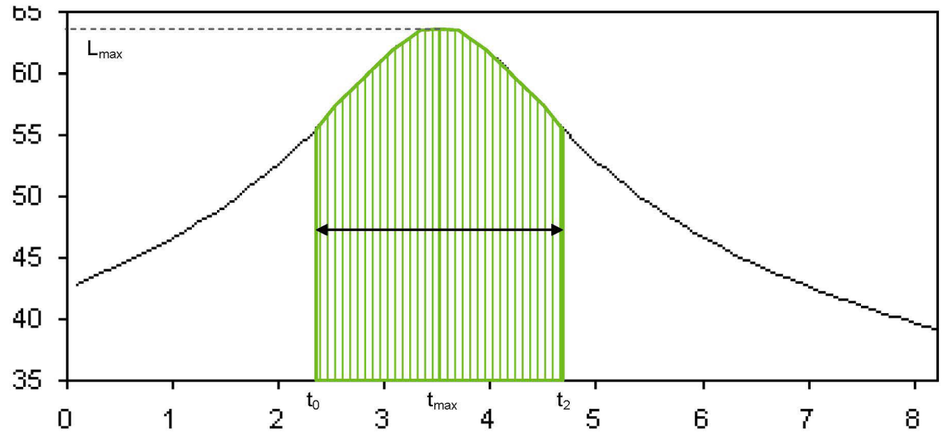
$$T_p = \frac{LongitudTren}{VelocidadPaso}$$

Ecuación 7

Teniendo en cuenta las velocidades de circulación empleadas durante las pruebas, los valores de T_p a considerar serán los siguientes:

	Tiempo de paso (T_p)
V_1 = 30 km/h	3,88 s
V_2 = 15 km/h	7,76 s

- Los niveles de excitación (ruido y vibraciones) se obtendrán a partir del perfil registrado teniendo en cuenta el tiempo de paso, según se observa en el siguiente esquema:



Nivel de excitación de Ruido:

$$L_{eq,T}[f] = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{T_p}\sum_{i=t_0}^{t_2} 10^{L_{eq,t_i}[f]/10}\right) \forall f \in [63-8000]Hz$$

Ecuación 8

Nivel de excitación de Vibración:

$$v_a = v_{[x,y,z],MTVV} \xrightarrow{L_{aw,max}} \begin{matrix} v_{a,x} = v_{MTVV,x} \\ v_{a,y} = v_{MTVV,y} \\ v_{a,z} = v_{MTVV,z} \end{matrix} \forall f \in [1-80]Hz$$

Ecuación 9

- Es decir, el nivel de excitación para ruido corresponde al espectro del nivel continuo equivalente integrado de todo el tiempo de paso del vehículo ($L_{eq,Tp}[f]$), mientras que el nivel de excitación de vibraciones será, directamente, el vector de aceleración máximo registrado durante la prueba ($v_{MTVV[x,y,z]}[f]$).

Figura 33: Sonómetro analizador

Figura 34: Transductor de vibraciones sobre el terreno

Figura 35: Desarrollo de las pruebas

Figura 36: Desarrollo de las pruebas

5.3.2 Resultados de la caracterización

Una vez efectuadas las pruebas se procede a evaluar los resultados, distinguiendo los datos obtenidos en cuanto ruido de los de vibraciones.

RUIDO

Los niveles sonoros registrados durante las medidas se procesan y comparan con los niveles sonoros generados por el paso de cada una de las categorías de tren de la base de datos holandesa en un modelo acústico dedicado.

La metodología de asignación del método holandés requiere que el tren se asigne a la categoría que supere en todas las frecuencias el nivel sonoro del que se va a caracterizar, tomando siempre la mínima emisión posible. Puesto que una aplicación estricta de este método puede maximizar considerablemente la asignación, se decide realizar una asignación basada en la similitud entre el nivel global del paso medido y en el espectro sonoro del tren calculado:

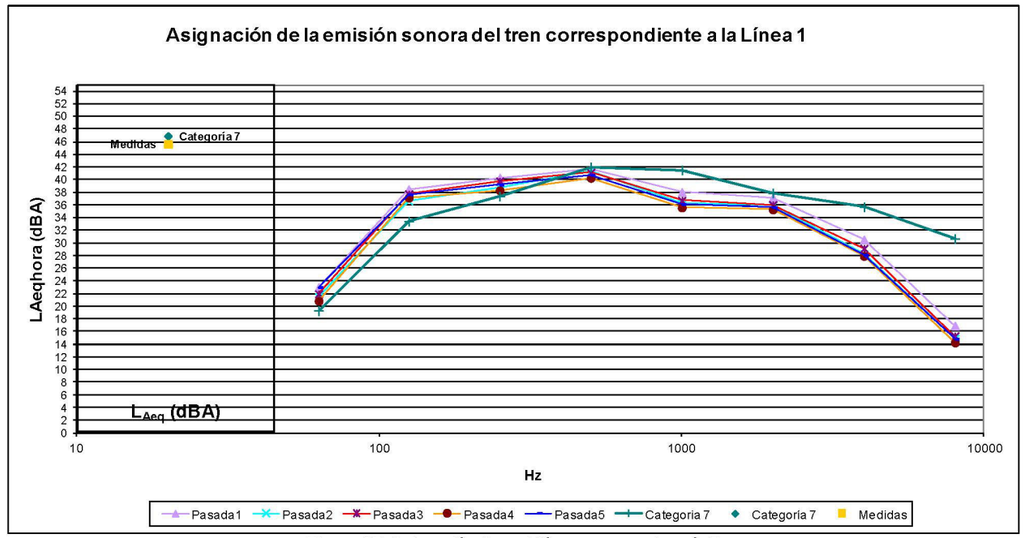


Figura 37: Asignación de emisión sonora a categoría 7

La figura anterior representa los niveles de ruido generados por el paso de la unidad evaluada a 30 km/h. Se han representado 5 pasadas en diferentes instantes de tiempo en el mismo punto de medida, aunque durante las pruebas se obtuvieron 7 pasadas.

También se ha incluido en la gráfica el nivel de emisión de la Categoría 7 en el punto correspondiente del modelo simulado. Como se ve, los niveles medidos *in situ* serían ligeramente superiores a los estimados en baja frecuencia, e inferiores en medias y altas frecuencias. No obstante, la caracterización se considerará aceptable ya que el nivel de emisión global de las medidas es inferior y muy similar al nivel de emisión global simulado.

De modo que la emisión acústica a implementar en el modelo será la correspondiente a ferrocarriles de **Categoría 7**.

De todas las pasadas registradas, el valor máximo obtenido en el punto de observación (7,5 m de distancia) ha sido de **77 dBA**, con el siguiente espectro de emisión sonora:

Frecuencia 1/1 (Hz)	L_{Zeq} (dB)	L_{Aeq} (dBA)
63	77,2	77,0
125	85,1	
250	79,6	
500	75,4	
1000	68,8	
2000	68,0	
4000	60,3	
8000	49,5	

Tabla 6: Emisión sonora CAF Urbos 3

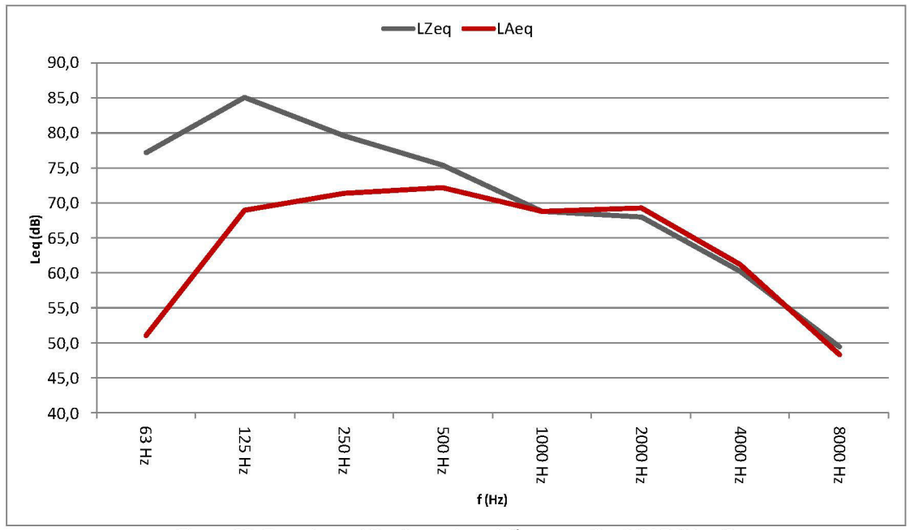


Figura 38: Espectro en 1/1 octavas de emisión sonora (L_{Zeq}) CAF Urbos 3

VIBRACIONES

Los niveles vibratorios registrados durante las medidas se procesan para obtener el *Most Transient Vibration Value* (MTVV) o, lo que es lo mismo, el valor máximo del índice L_{aw} de todos los registros obtenidos durante las pruebas. Dicho valor ha resultado en el punto de observación (7,5 m de distancia) ser **68,7 dB**.

Los valores asignados para el modelo de cálculo será la descomposición del MTVV en sus vectores de aceleración x, y, z, sin ponderación frecuencial:

Frecuencia 1/3 (Hz)	MTVV (m/s)			a_w (m/s)	L_{aw} (dB)
	V_x máxima	V_y máxima	V_z máxima		
1	0,00012162	9,1201E-05	4,8978E-05	0,00013304	68,7
1,25	3,5481E-05	5,7544E-05	8,9125E-05	0,00010146	
1,6	7,3282E-05	3,8459E-05	6,166E-05	9,6394E-05	
2	3,8019E-05	3,9355E-05	6,0256E-05	7,586E-05	
2,5	6,7608E-05	4,8417E-05	6,6834E-06	7,5917E-05	
3,15	7,2444E-06	7,9433E-05	5,559E-05	8,4779E-05	
4	1,9953E-05	4,2658E-05	3,3884E-05	4,7458E-05	
5	4,8978E-05	4,121E-05	5,6234E-05	6,3901E-05	
6,3	4,5709E-05	2,9174E-05	3,1989E-05	4,2119E-05	
8	9,3325E-05	8,9125E-05	6,6069E-05	8,4376E-05	
10	7,0795E-05	0,00014454	0,00015668	0,00011096	
12,5	0,00010233	0,00029854	0,00030903	0,00018154	
16	0,00026002	0,00056885	0,00066069	0,0003066	
20	0,00054954	0,00066069	0,00066069	0,00029701	
25	0,00081283	0,00120226	0,00116145	0,00040893	
31,5	0,00130317	0,00350752	0,00216272	0,00076064	
40	0,00223872	0,00944061	0,00524807	0,00154432	
50	0,00223872	0,00537032	0,00582103	0,00089709	
63	0,0060256	0,00562341	0,00922571	0,00103175	
80	0,00944061	0,01109175	0,01840772	0,00141779	

Tabla 7: Vibración CAF Urbos 3

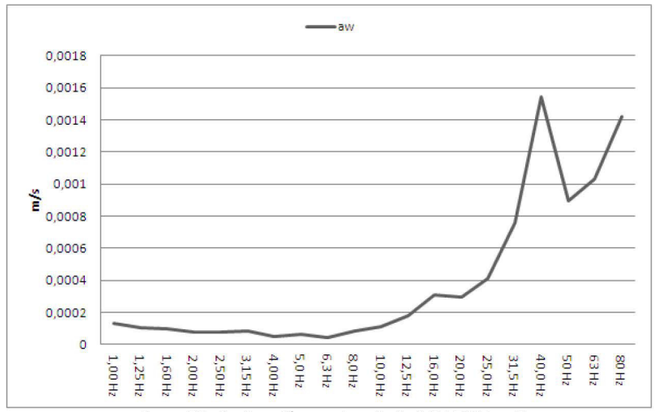


Figura 39: Aceleración ponderada (a_w) CAF Urbos 3

5.4 Validación del modelo

5.4.1 Ruido

El modelo acústico descrito anteriormente ha sido validado mediante una serie de mediciones acústicas en varios puntos representativos del trazado de la infraestructura estudiada en estado actual, según el plan de muestreo propuesto por CECOR. Pueden verse más detalles acerca del procedimiento de ensayo *in situ* en el Anexo 3.

Las mediciones acústicas efectuadas tienen dos objetivos principales:

- Identificar, valorar y cuantificar las fuentes de ruido existentes en el área de estudio, en la situación actual.
- Valorar la situación acústica en determinados puntos receptores con el fin de ajustar y validar el mapa acústico realizado mediante predicción.

La siguiente tabla presenta la diferencia de nivel sonoro existente en cada período horario entre el nivel de ruido obtenido en las mediciones realizadas in situ y el nivel sonoro obtenido en el modelo de simulación *preoperacional* (dBA), para cada punto de muestreo considerado:

	L_d			L_e			L_n		
Punto	**Medido**	**Calculado**	**Diferencia**	**Medido**	**Calculado**	**Diferencia**	**Medido**	**Calculado**	**Diferencia**
1	73	40	33	69	38	31	70	31	39
2	66	69	-3	63	66	-3	57	59	-2
3	71	69	2	72	67	5	63	60	3
4	68	66	2	71	64	7	57	57	0
5	71	74	-3	70	71	-1	59	64	-5
6	72	77	-5	71	74	-3	67	67	0
7	73	75	-2	72	72	0	66	65	1
8	66	72	-6	70	69	1	67	62	5
9	71	76	-5	69	75	-6	70	69	1
10	63	71	-8	61	68	-7	57	61	-4
11	75	77	-2	73	74	-1	64	67	-3
12	67	67	0	65	65	0	59	58	1

Tabla 8: Niveles sonoros registrados *in situ* vs. Modelo

***Nota**: Avenida de Andalucía no implementada en modelo.

Tal como puede observarse en la tabla anterior, se observa cierta dispersión de los resultados de la campaña de mediciones *in situ* y los resultados del modelo de simulación, en parte debido a la relativa poca información en cuanto a datos de tráfico, especialmente en calles perpendiculares al trazado y no incluidas en el citado estudio de tráfico. En cualquier caso, puesto que el modelo tiende a sobrestimar los niveles sonoros esperados en el entorno de la vía, se dará por validado en estas condiciones.

5.4.2 Vibraciones

El modelo de simulación empleado es válido, con ciertos límites, para la caracterización de vías de ferrocarril en servicio. En la actualidad, en el tramo bajo estudio no existe ninguna vía de ferrocarril en servicio y, por ello, el modelo de predicción no puede ser evaluado *a priori*.

5.5 Presentación de resultados

5.5.1 Ruido

Los niveles sonoros resultantes (nivel continuo equivalente: L_{eq} (dBA)) se mostrarán en general de forma gráfica, mediante curvas isófonas a color, representando los mapas sonoros en los períodos día, tarde y noche a 4 m de altura en mapas 2D a escala 1:2000, tanto en estado preoperacional como operacional. En este último caso se evaluarán dos escenarios posibles: predicción de niveles sonoros debidos únicamente a la circulación de ferrocarriles (para evaluación del cumplimiento de límites aplicables a emisores acústicos) y de la situación operacional completa, incluyendo el tráfico futuro previsto en la zona (para evaluación del cumplimiento de los Objetivos de Calidad Acústica en la zona)

Los mapas generados son presentados en el Anexo 2, siguiendo la siguiente numeración:

- **Serie 0**: Plano de localización de emisores acústicos (2 planos).
- **Serie 1.1**: Mapa de ruido. Situación actual. Período día (4 planos).
- **Serie 1.2**: Mapa de ruido. Situación actual. Período tarde (4 planos).
- **Serie 1.3**: Mapa de ruido. Situación actual. Período noche (4 planos).
- **Serie 2.1**: Mapa de ruido. Situación operacional. *Ferrocarril.* Período día (4 planos).
- **Serie 2.2**: Mapa de ruido. Situación operacional. *Ferrocarril.* Período tarde (4 planos).
- **Serie 2.3**: Mapa de ruido. Situación operacional. *Ferrocarril.* Período noche (4 planos).
- **Serie 3.1:** Mapa de ruido. Situación operacional. *Ferrocarril y tráfico rodado.* Período día (4 planos).
- **Serie 3.2:** Mapa de ruido. Situación operacional. *Ferrocarril y tráfico rodado.* Período tarde (4 planos).
- **Serie 3.3:** Mapa de ruido. Situación operacional. *Ferrocarril y tráfico rodado.* Período noche (4 planos).

5.5.2 Vibraciones

Los resultados de la prognosis se mostrarán en forma de una franja de servidumbre vibratoria paralela a la traza de la infraestructura a nivel de pie de edificio, representando la distancia mínima a partir de la cual se satisfarían los límites de inmisión de vibraciones establecidos en la legislación (una franja para usos *residencial – administrativo* y otra para usos *sanitario – cultural*[61]). Se recuerda que el modelo no tendrá en cuenta la propia tipología de los edificios.

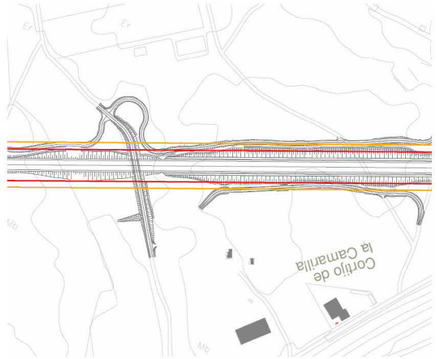


Figura 40: Ejemplo de representación de resultados de vibraciones

Los mapas generados son presentados en el Anexo 2, siguiendo la siguiente numeración:

[61] Por afinidad este mismo límite será asignado a los edificios con uso *educativo*

- **Serie 4**: Mapa de afección por vibraciones.

6 RESULTADOS

6.1 Ruido

6.1.1 Situación preoperacional

En la situación preoperacional se evalúa el nivel de ruido generado por los actuales viales de circulación, especialmente los de aquellos con mayor nivel sonoro según la campaña de mediciones acústicas efectuada en la zona. La distribución de tráficos introducidos en el modelo puede consultarse en el apartado 4.3.1.1, que produce un resultado que puede considerarse como representativo de la situación actual, según se menciona en el apartado 5.4.1.

En este apartado se muestran los resultados más significativos obtenidos para este escenario. Los mapas detallados y a escala normalizada pueden consultarse en el Anexo 2.

Como se puede observar en las figuras siguientes, los edificios situados en primera línea de fachadas de la zona de la Eugenio Gross y el Blas de Lezo soportarían en la actualidad niveles sonoros globales superiores a **75 dBA** en período diurno y de unos **67 dBA** en período nocturno, cuando los Objetivos de Calidad Acústica para zonas con predominio de uso residencial (el establecido para todo el área de estudio) son, respectivamente, 65 y 55 dBA.

En parte por un menor aforo de vehículos, en parte por la mayor distancia entre éstos, los niveles esperados en C/ Hilera y C/ Santa Elena son ligeramente inferiores, aunque igualmente están por encima de los Objetivos de Calidad Acústica para zonificación residencial.

ZONA C/ SANTA ELENA

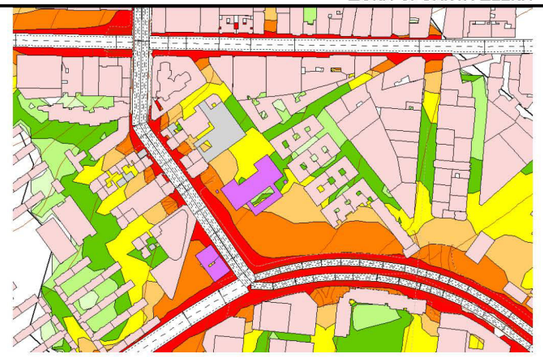


Figura 41: Niveles sonoros en situación preoperacional. **L_d (dBA) a 4 m**

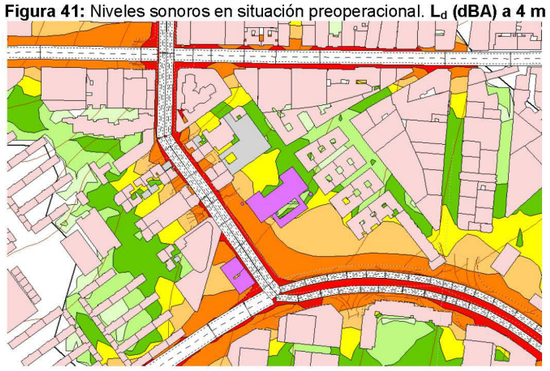


Figura 42: Niveles sonoros en situación preoperacional. **L_e (dBA) a 4 m**

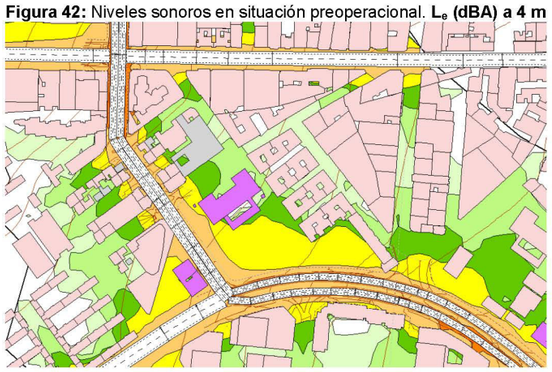


Figura 43: Niveles sonoros en situación preoperacional. **L_n (dBA) a 4 m**

Objetivos de Calidad Acústica	
L_d	65
L_e	65
L_n	55

> 40.0 dB
> 45.0 dB
> 50.0 dB
> 55.0 dB
> 60.0 dB
> 65.0 dB
> 70.0 dB
> 75.0 dB

ZONA EUGENIO GROSS

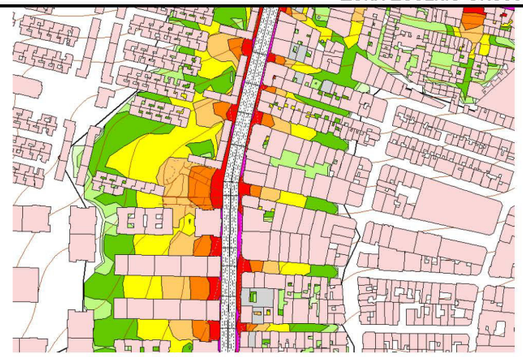


Figura 44: Niveles sonoros en situación preoperacional. **L_d (dBA) a 4 m**

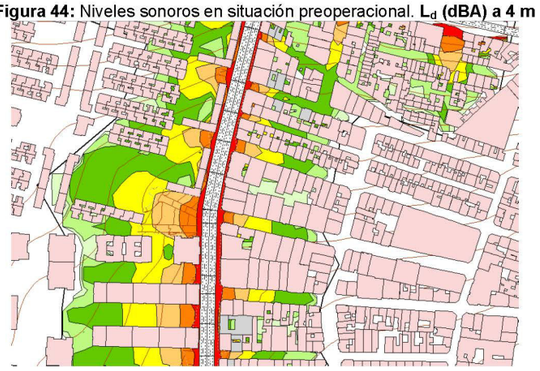


Figura 45: Niveles sonoros en situación preoperacional. **L_e (dBA) a 4 m**

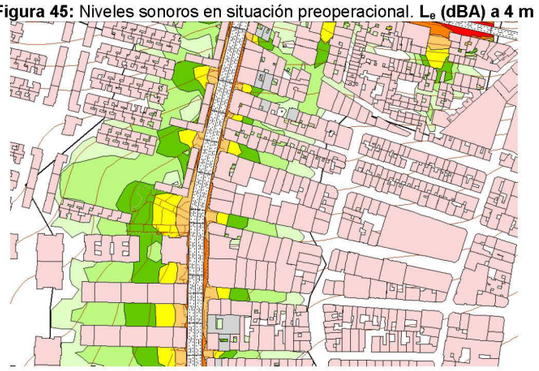


Figura 46: Niveles sonoros en situación preoperacional. **L_n (dBA) a 4 m**

Objetivos de Calidad Acústica	
L_d	65
L_e	65
L_n	55

- > 40.0 dB
- > 45.0 dB
- > 50.0 dB
- > 55.0 dB
- > 60.0 dB
- > 65.0 dB
- > 70.0 dB
- > 75.0 dB

ZONA BLAS DE LEZO

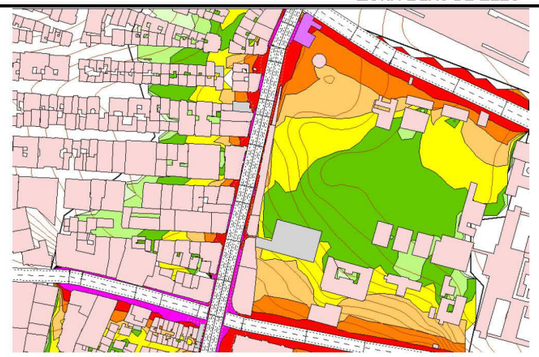


Figura 47: Niveles sonoros en situación preoperacional. **L_d (dBA) a 4 m**

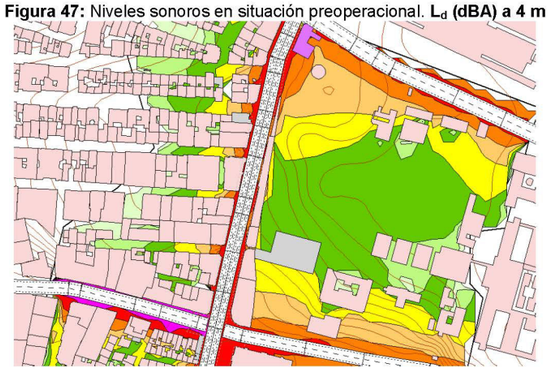


Figura 48: Niveles sonoros en situación preoperacional. **L_e (dBA) a 4 m**

Figura 49: Niveles sonoros en situación preoperacional. **L_n (dBA) a 4 m**

Objetivos de Calidad Acústica	
L_d	65
L_e	65
L_n	55

- > 40.0 dB
- > 45.0 dB
- > 50.0 dB
- > 55.0 dB
- > 60.0 dB
- > 65.0 dB
- > 70.0 dB
- > 75.0 dB

En la siguiente tabla se muestran cualitativamente los niveles sonoros esperados en fachada de los edificios inventariados en este trabajo. Se muestran únicamente la primera línea de edificios respecto de los ejes de tráfico más relevantes de la zona de estudio:

	Niveles sonoros (dBA)			Objetivos de Calidad Acústica (ruido)		
ID	L_d	L_e	L_n	L_d	L_e	L_n
33	73	69	62	65	65	55
36	71	68	61	65	65	55
37	67	65	58	65	65	55
39	72	70	63	65	65	55
42	65	63	56	65	65	55
44	75	71	64	65	65	55
46	74	72	65	65	65	55
47	69	67	59	65	65	55
52	74	72	65	65	65	55
53	74	71	64	65	65	55
58	73	69	62	65	65	55
60	74	71	64	65	65	55
63	73	69	63	65	65	55
69	73	71	64	65	65	55
77	71	58	50	65	65	55
80	76	73	66	65	65	55
82	76	73	66	65	65	55
83	76	73	66	65	65	55
87	76	73	66	65	65	55
89	77	75	67	65	65	55
92	74	72	65	65	65	55
94	77	75	67	65	65	55
97	77	74	67	65	65	55
99	77	74	67	65	65	55
100	77	74	67	65	65	55
108	77	73	67	65	65	55
116	76	73	66	65	65	55
118	77	74	67	65	65	55
125	76	74	67	65	65	55
132	74	71	65	65	65	55
138	77	74	67	65	65	55
144	73	70	63	65	65	55
147	77	74	67	65	65	55
153	77	75	67	65	65	55
154	76	73	66	65	65	55
157	76	73	67	65	65	55
161	75	72	65	65	65	55
166	76	72	66	65	65	55
167	73	70	62	65	65	55

	Niveles sonoros (dBA)			Objetivos de Calidad Acústica (ruido)		
ID	L_d	L_e	L_n	L_d	L_e	L_n
169	77	73	66	65	65	55
170	72	70	63	65	65	55
171	75	72	65	65	65	55
175	74	70	63	65	65	55
176	75	71	64	65	65	55
188	75	72	65	65	65	55
189	74	71	64	65	65	55
197	73	70	63	65	65	55
198	75	70	65	65	65	55
205	77	74	67	65	65	55
207	72	69	63	65	65	55
223	77	75	67	65	65	55
224	74	72	65	65	65	55
234	70	67	61	65	65	55
235	77	74	67	65	65	55
238	75	72	65	65	65	55
240	72	72	65	65	65	55
249	74	71	64	65	65	55
251	76	74	66	65	65	55
254	75	73	66	65	65	55
262	78	75	68	65	65	55
266	78	76	70	65	65	55
276	77	74	68	65	65	55
281	77	76	69	65	65	55
286	76	74	67	65	65	55
293	75	72	65	65	65	55
299	73	70	63	65	65	55
307	74	72	64	65	65	55
318	74	72	64	65	65	55
319	77	75	66	65	65	55
331	74	71	65	65	65	55
332	79	77	72	65	65	55
338	76	74	66	65	65	55
339	76	74	67	65	65	55
346	77	74	67	65	65	55
348	77	74	67	65	65	55
351	74	70	64	65	65	55
352	76	74	67	65	65	55
355	76	73	66	65	65	55
357	75	72	64	65	65	55
358	76	73	67	65	65	55
361	76	73	66	65	65	55
365	76	73	66	65	65	55

	Niveles sonoros (dBA)			Objetivos de Calidad Acústica (ruido)		
ID	L_d	L_e	L_n	L_d	L_e	L_n
370	**76**	**73**	**66**	65	65	55
377	**68**	**65**	**58**	65	65	55
381	**75**	**73**	**66**	65	65	55

Tabla 9: Evaluación de Objetivos de Calidad Acústica (preoperacional)

En resumen, en la situación actual el elevado volumen de tráfico soportado en las vías de tráfico situadas en el entorno de estudio implica a su vez una alta densidad de edificios con niveles de inmisión por encima de los Objetivos de Calidad Acústica. En la práctica, todos los edificios situados en las inmediaciones de las principales vías de tráfico de la zona de estudio soportan niveles sonoros por encima de los límites establecidos.

6.1.2 Situación en fase de construcción

En este escenario se tendrá en cuenta la estimación de emisión sonora para los trabajos de construcción, tal como se explicó en el apartado 5.1.2.3. El resultado mostrado en el presente apartado consiste en una estimación del nivel de exposición sonora a largo plazo (60 días de obra) en secciones de 180 m de longitud de la nueva infraestructura ferroviaria.

Puesto que en la fase actual del proyecto se desconoce la planificación detallada de las obras, se muestran los resultados estimados únicamente para el período diurno, y con carácter meramente estimativo:

OBRAS

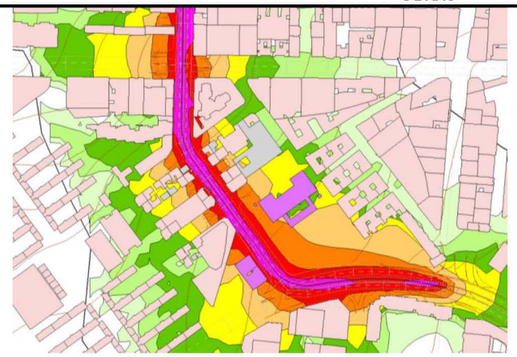


Figura 50: Niveles sonoros en fase de ejecución (1). **L_d (dBA) a 4 m**

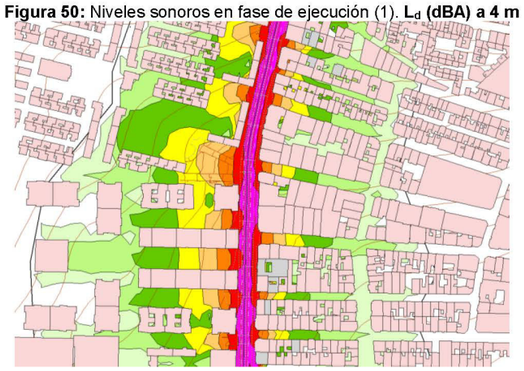


Figura 51: Niveles sonoros en fase de ejecución (2). **L_d (dBA) a 4 m**

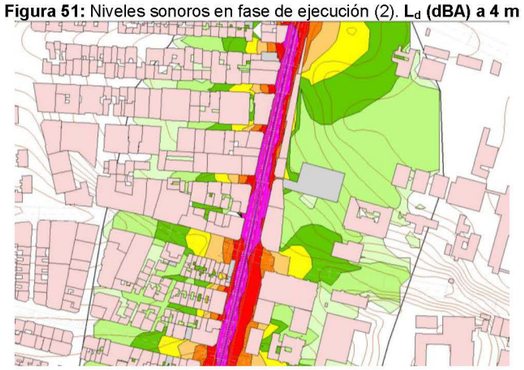


Figura 52: Niveles sonoros en fase de ejecución (3). **L_d (dBA) a 4 m**

> 40.0 dB
> 45.0 dB
> 50.0 dB
> 55.0 dB
> 60.0 dB
> 65.0 dB
> 70.0 dB
> 75.0 dB

Tal como se observa en las figuras anteriores, se estima un nivel sonoro debido a la construcción de la nueva línea ferroviaria no despreciable, superando en muchos puntos niveles equivalentes (para todo el período diurno) de 75 dBA. Estos niveles, si bien son similares a los evaluados en parte de la zona de estudio en la actualidad, especialmente por el tráfico rodado en el eje Eugenio Gross – Blas de Lezo, previsiblemente producirán molestias a la comunidad.

En todo caso, cabe destacar que la emisión sonora de la actividad de construcción de una infraestructura lineal se regula en base al etiquetado de la *maquinaria* empleada en ella, debiendo ser respetados los valores máximos definidos en el Real Decreto 212/2002. Es decir, los resultados mostrados en el presente apartado son meramente *informativos*, puesto que en la legislación aplicable no se define un límite sonoro para la actividad de construcción en sí.

No obstante, se propondrán algunas medidas preventivas con el fin de minimizar las molestias debidas a esta fase del proyecto.

6.1.3 Situación operacional

6.1.3.1 Escenario 1: Metro

En este escenario sólo se tiene en cuenta el nivel de emisión de la futura infraestructura ferroviaria, sin tener en cuenta el nivel de emisión del resto de fuentes sonoras identificadas en este estudio. Los tráficos introducidos son representativos de la semana media de operación, tal como se describe en el apartado 4.3.1.2.

Dicha infraestructura debe producir un nivel de emisión sonora inferior a los límites definidos en las tablas VIII y IX del Decreto 6/2012, independientemente del cumplimiento de los objetivos de calidad acústica.

En las siguientes figuras se muestran los resultados más significativos de la predicción, destacando las mismas zonas que en la situación operacional:

ZONA HILERA - SANTA ELENA

Figura 53: Niveles sonoros en situación operacional (sólo Metro). **L_d (dBA) a 4 m**

Figura 54: Niveles sonoros en situación operacional (sólo Metro). **L_e (dBA) a 4 m**

Figura 55: Niveles sonoros en situación operacional (sólo Metro). **L_n (dBA) a 4 m**

Límites de inmisión sonora para emisores acústicos	
L_d	60
L_e	60
L_n	50
L_{max}	85

> 40.0 dB
> 45.0 dB
> 50.0 dB
> 55.0 dB
> 60.0 dB
> 65.0 dB
> 70.0 dB
> 75.0 dB

ZONA EUGENIO GROSS

Figura 56: Niveles sonoros en situación operacional (sólo Metro). **L_d (dBA) a 4 m**

Figura 57: Niveles sonoros en situación operacional (sólo Metro). **L_e (dBA) a 4 m**

Figura 58: Niveles sonoros en situación operacional (sólo Metro). **L_n (dBA) a 4 m**

Límites de inmisión sonora para emisores acústicos	
L_d	60
L_e	60
L_n	50
L_{max}	85

- > 40.0 dB
- > 45.0 dB
- > 50.0 dB
- > 55.0 dB
- > 60.0 dB
- > 65.0 dB
- > 70.0 dB
- > 75.0 dB

ZONA BLAS DE LEZO

Figura 59: Niveles sonoros en situación operacional (sólo Metro). **L_d (dBA) a 4 m**

Figura 60: Niveles sonoros en situación operacional (sólo Metro). **L_e (dBA) a 4 m**

Figura 61: Niveles sonoros en situación operacional (sólo Metro). **L_n (dBA) a 4 m**

Límites de inmisión sonora para emisores acústicos	
L_d	60
L_e	60
L_n	50
L_{max}	85

- > 40.0 dB
- > 45.0 dB
- > 50.0 dB
- > 55.0 dB
- > 60.0 dB
- > 65.0 dB
- > 70.0 dB
- > 75.0 dB

Mediante un primer análisis visual en base a los resultados mostrados en las figuras anteriores se puede comprobar que la inmisión sonora debida exclusivamente al funcionamiento habitual del ferrocarril está en el entorno de los límites establecidos en la legislación para nuevas infraestructuras ferroviarias, siempre teniendo en cuenta la incertidumbre asociada al modelo de simulación. Los niveles de inmisión son claramente inferiores en las inmediaciones de las paradas, ya que en estos puntos el tren se encuentra detenido o a una velocidad baja (acelerando o decelerando). En cualquier caso, como se observará en el apartado siguiente, los niveles sonoros debidos al funcionamiento del ferrocarril quedarían en la práctica enmascarados en relación con el nivel de ruido de tráfico soportado en la zona, incluso con la importante reducción de aforo prevista.

Tampoco se espera una afección sonora debida a los niveles máximos calculados en fachadas, calculados en los puntos en los cuales se prevé la máxima velocidad de circulación (ver Figura 21 y Figura 22). Esta conclusión es coherente con los datos registrados en la jornada de ensayos *in situ*, donde se obtuvieron niveles inferiores al límite establecido (85 dBA) medidos a una distancia de 7,5 m, distancia inferior a la ubicación de cualquier edificio de los inventariados. Por lo tanto, el nivel sonoro en los edificios del entorno debería ser inferior al dato registrado en las mediciones.

Para confirmar las anteriores hipótesis, se muestran los resultados de la evaluación en los edificios inventariados, tanto en lo referente a niveles sonoros equivalentes por período horario como a los niveles máximos (este último cálculo se ha efectuado por muestreo en las inmediaciones de los puntos de máxima velocidad prevista, no en todos los edificios). Se muestra una selección de receptores con la mayor inmisión sonora estimada, todos ellos en el eje Eugenio Gross – Blas de Lezo:

	Niveles sonoros (dBA)				Límites inmisión ruido (Metro)			
ID	L_d	L_e	L_n	L_{max}	L_d	L_e	L_n	L_{max}
89	61	61	53	79	60	60	50	85
92	59	59	51	80	60	60	50	85
94	61	61	53	79	60	60	50	85
97	62	62	54	80	60	60	50	85
100	61	61	53	79	60	60	50	85
108	61	61	52	79	60	60	50	85
116	61	61	54	80	60	60	50	85
118	61	61	53	79	60	60	50	85
125	61	61	53	79	60	60	50	85
132	57	57	49	79	60	60	50	85
138	58	58	50	80	60	60	50	85
147	54	54	46	80	60	60	50	85
166	53	53	44	79	60	60	50	85
167	50	50	43	80	60	60	50	85
169	53	53	46	79	60	60	50	85
170	54	54	44	80	60	60	50	85
171	54	54	47	79	60	60	50	85
175	58	58	49	79	60	60	50	85
176	58	58	51	80	60	60	50	85
188	58	58	49	79	60	60	50	85
189	59	59	51	80	60	60	50	85
197	57	57	49	79	60	60	50	85
198	60	60	51	80	60	60	50	85
205	61	61	53	79	60	60	50	85
207	58	58	49	80	60	60	50	85
223	62	62	53	78	60	60	50	85
224	60	60	51	73	60	60	50	85
234	55	55	47	73	60	60	50	85
235	61	61	53	78	60	60	50	85
238	59	59	51	78	60	60	50	85
240	60	60	51	73	60	60	50	85
249	59	59	51	78	60	60	50	85
251	60	60	51	78	60	60	50	85
254	60	60	51	73	60	60	50	85
262	59	59	51	78	60	60	50	85
266	56	56	47	78	60	60	50	85
332	60	60	52	81	60	60	50	85
338	62	62	54	78	60	60	50	85
339	62	62	54	81	60	60	50	85
346	62	62	54	78	60	60	50	85
348	62	62	54	81	60	60	50	85
351	59	59	50	78	60	60	50	85
352	62	62	54	81	60	60	50	85
355	62	62	53	81	60	60	50	85
357	57	57	52	78	60	60	50	85
358	61	61	55	82	60	60	50	85
361	62	62	54	82	60	60	50	85
365	62	62	54	82	60	60	50	85

% Edificios afectados			
L_d	L_e	L_n	L_{max}
5%	5%	8%	0%

Tabla 10: Evaluación de nivel de inmisión sonora en edificios

Observando los resultados consignados en la Tabla 10 puede verse que, en la práctica, el funcionamiento del ferrocarril no producirá una afección acústica especialmente significativa en su entorno. Los niveles sonoros más altos se esperan en el eje Eugenio Gross – Blas de Lezo, donde se alcanza la mayor velocidad prevista de 50 km/h.

En estos puntos de velocidad máxima de circulación se ha observado una pequeña cantidad de edificios donde se superan, por poco, los límites establecidos en la legislación aplicable, en mayor medida para el horario *nocturno* (aunque en este período se prevén pocas frecuencias de circulación de trenes). Se trata de un exceso poco significativo al estar dentro del intervalo de incertidumbre del modelo acústico (± 3 dB). No obstante, el nivel sonoro debido al tráfico rodado en el global de la zona de estudio resulta claramente superior al determinado para el ferrocarril, ya que aunque se reducirá drásticamente el aforo en la mayor parte del trazado, no se contempla ninguna zona peatonalizada. De esta forma, el nivel sonoro de la nueva infraestructura ferroviaria quedaría enmascarado por el debido al tráfico rodado.

De hecho, los niveles sonoros calculados para este escenario son en todos los casos inferiores a los obtenidos durante la campaña de ensayos *in situ* en la zona para la situación operacional.

Por las razones anteriores no se propondrán medidas correctoras específicas contra el ruido, si bien se recomendarán algunas acciones preventivas a tener en cuenta tanto en la construcción como en la explotación del nuevo ferrocarril.

6.1.3.2 Escenario 2: Metro y viales de tráfico rodado

En este escenario se tienen en cuenta tanto la emisión sonora de la futura infraestructura ferroviaria como del resto de viales de tráfico rodado de su entorno. Los tráficos introducidos en este caso son los descritos en el apartado anterior para la línea de ferrocarril (apartado 4.3.1.2) así como los estimados para la situación operacional en cuanto a tráfico rodado en la zona (apartado 4.3.1.1). Se representa así la situación *promedio* de la semana laborable.

Este escenario debería satisfacer los Objetivos de Calidad Acústica para ruido en zonas urbanizadas existentes, definidos en la Tabla I del Decreto 6/2012, si bien la evaluación del cumplimiento de dichos límites queda fuera del alcance del presente proyecto.

En las siguientes figuras se muestran los resultados más significativos de la predicción, destacando las mismas zonas que en las situaciones anteriores:

ZONA HILERA - SANTA ELENA

Figura 62: Niveles sonoros en situación operacional (Metro y Tráfico). **L_d (dBA) a 4 m**

Figura 63: Niveles sonoros en situación operacional (Metro y Tráfico). **L_e (dBA) a 4 m**

Figura 64: Niveles sonoros en situación operacional (Metro y Tráfico). **L_n (dBA) a 4 m**

Objetivos de Calidad Acústica	
L_d	65
L_e	65
L_n	55

> 40.0 dB
> 45.0 dB
> 50.0 dB
> 55.0 dB
> 60.0 dB
> 65.0 dB
> 70.0 dB
> 75.0 dB

ZONA EUGENIO GROSS

Figura 65: Niveles sonoros en situación operacional (Metro y Tráfico). **L_d (dBA) a 4 m**

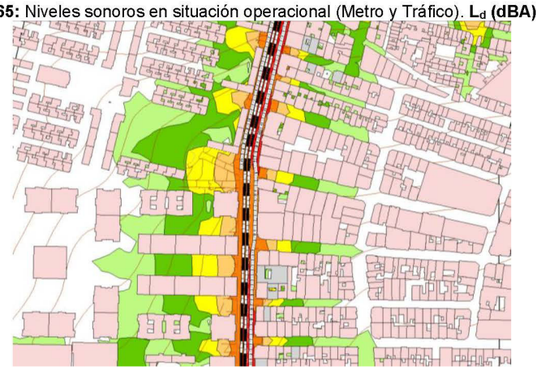


Figura 66: Niveles sonoros en situación operacional (Metro y Tráfico). **L_e (dBA) a 4 m**

Figura 67: Niveles sonoros en situación operacional (Metro y Tráfico). **L_n (dBA) a 4 m**

Objetivos de Calidad Acústica	
L_d	65
L_e	65
L_n	55

- > 40.0 dB
- > 45.0 dB
- > 50.0 dB
- > 55.0 dB
- > 60.0 dB
- > 65.0 dB
- > 70.0 dB
- > 75.0 dB

ZONA BLAS DE LEZO

Figura 68: Niveles sonoros en situación operacional (Metro y Tráfico). **L_d (dBA) a 4 m**

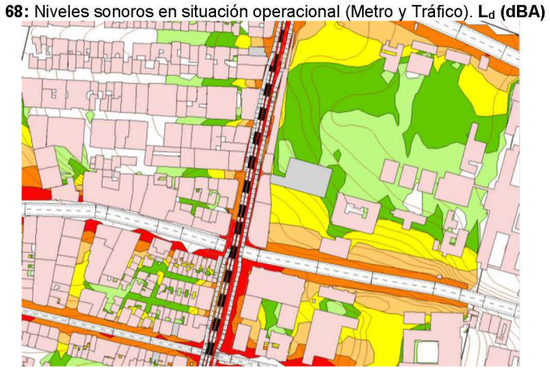


Figura 69: Niveles sonoros en situación operacional (Metro y Tráfico). **L_e (dBA) a 4 m**

Figura 70: Niveles sonoros en situación operacional (Metro y Tráfico). **L_n (dBA) a 4 m**

Objetivos de Calidad Acústica	
L_d	65
L_e	65
L_n	55

- > 40.0 dB
- > 45.0 dB
- > 50.0 dB
- > 55.0 dB
- > 60.0 dB
- > 65.0 dB
- > 70.0 dB
- > 75.0 dB

Como puede observarse en las figuras anteriores, los niveles sonoros estimados en este escenario son en general sensiblemente superiores a los predichos para el funcionamiento del ferrocarril en sí mismo. Es decir, a pesar de la importante reducción de aforo prevista en la zona, en el futuro sería el tráfico la principal fuente de contaminación sonora.

No obstante los niveles sonoros esperados tras la ejecución del ferrocarril son inferiores a los obtenidos en la situación actual, notándose especialmente en las fachadas de los edificios situados en primera línea de las avenidas principales de la zona de estudio. Esta disminución no resulta suficiente para alcanzar el cumplimiento de los Objetivos de Calidad Acústica para zonas residenciales, pero sin duda mejora la situación actual.

Para confirmar estas observaciones se procede a la evaluación del cumplimiento de los Objetivos de Calidad Acústica, del mismo modo que se hizo para la situación preoperacional (ver apartado 6.1.1). En la siguiente tabla se señalan los mismos edificios evaluados a lo largo del presente estudio:

	Niveles sonoros (dBA)			Diferencia preoperacional (dB)			Objetivos de Calidad Acústica (ruido)		
ID	L_d	L_e	L_n	L_d	L_e	L_n	L_d	L_e	L_n
33	71	68	61	-2	-1	-1	65	65	55
36	70	68	60	-1	0	-1	65	65	55
37	67	64	57	0	-1	-1	65	65	55
39	68	66	59	-4	-4	-4	65	65	55
42	64	61	54	-1	-2	-2	65	65	55
44	69	67	60	-6	-4	-4	65	65	55
46	68	66	58	-6	-6	-7	65	65	55
47	68	65	58	-1	-2	-1	65	65	55
52	73	70	63	-1	-2	-2	65	65	55
53	68	66	59	-6	-5	-5	65	65	55
58	68	66	58	-5	-3	-4	65	65	55
60	72	69	62	-2	-2	-2	65	65	55
63	68	65	58	-5	-4	-5	65	65	55
69	72	70	62	-1	-1	-2	65	65	55
77	71	69	61	0	-1	-1	65	65	55
80	72	70	63	-4	-3	-3	65	65	55
82	75	72	65	-1	-1	-1	65	65	55
83	72	70	63	-4	-3	-3	65	65	55
87	72	70	63	-4	-3	-3	65	65	55
89	75	73	66	-2	-2	-1	65	65	55
92	70	67	60	-4	-5	-5	65	65	55
94	75	73	65	-2	-2	-2	65	65	55
97	71	69	62	-6	-5	-5	65	65	55
99	75	72	65	-2	-2	-2	65	65	55
100	75	72	65	-2	-2	-2	65	65	55
108	74	72	65	-3	-1	-2	65	65	55
116	71	69	61	-5	-4	-5	65	65	55
118	74	72	64	-3	-2	-3	65	65	55
125	74	72	64	-2	-2	-3	65	65	55
132	72	69	62	-2	-2	-3	65	65	55
138	71	68	61	-6	-6	-6	65	65	55
144	71	68	62	-2	-2	-1	65	65	55
147	70	68	61	-7	-6	-6	65	65	55
153	72	70	63	-5	-5	-4	65	65	55
154	70	68	61	-6	-5	-5	65	65	55
157	73	70	63	-3	-3	-4	65	65	55
161	72	69	62	-3	-3	-3	65	65	55
166	74	72	65	-2	0	-1	65	65	55
167	69	67	60	-4	-3	-2	65	65	55
169	75	72	65	-2	-1	-1	65	65	55
170	68	64	57	-4	-6	-6	65	65	55
171	74	72	64	-1	0	-1	65	65	55
175	72	69	63	-2	-1	0	65	65	55
176	73	70	61	-2	-1	-3	65	65	55
188	73	71	64	-2	-1	-1	65	65	55
189	69	66	60	-5	-5	-4	65	65	55
197	71	69	62	-2	-1	-1	65	65	55
198	71	69	61	-4	-1	-4	65	65	55
205	76	73	66	-1	-1	-1	65	65	55
207	69	67	60	-3	-2	-3	65	65	55
223	75	72	65	-2	-3	-2	65	65	55
224	71	69	62	-3	-3	-3	65	65	55
234	66	64	57	-4	-3	-4	65	65	55
235	75	73	66	-2	-1	-1	65	65	55
238	73	71	63	-2	-1	-2	65	65	55
240	71	69	61	-1	-3	-4	65	65	55
249	72	69	62	-2	-2	-2	65	65	55
251	75	73	65	-1	-1	-1	65	65	55
254	71	69	62	-4	-4	-4	65	65	55
262	76	73	66	-2	-2	-2	65	65	55
266	76	75	69	-2	-1	-1	65	65	55
276	73	71	64	-4	-3	-4	65	65	55
281	76	74	68	-1	-2	-1	65	65	55
286	72	70	63	-4	-4	-4	65	65	55
293	70	68	61	-5	-4	-4	65	65	55
299	72	70	63	-1	0	0	65	65	55
307	70	68	60	-4	-4	-4	65	65	55
318	69	67	61	-5	-5	-3	65	65	55
319	74	72	66	-3	-3	0	65	65	55
331	73	71	64	-1	0	-1	65	65	55

	Niveles sonoros (dBA)			Diferencia preoperacional (dB)			Objetivos de Calidad Acústica (ruido)		
ID	L_d	L_e	L_n	L_d	L_e	L_n	L_d	L_e	L_n
332	79	77	72	0	0	0	65	65	55
338	76	73	66	0	-1	0	65	65	55
339	72	69	62	-4	-5	-5	65	65	55
346	75	72	65	-2	-2	-2	65	65	55
348	73	71	64	-4	-3	-3	65	65	55
351	73	70	63	-1	0	-1	65	65	55
352	73	71	64	-3	-3	-3	65	65	55
355	73	70	63	-3	-3	-3	65	65	55
357	74	71	63	-1	-1	-1	65	65	55
358	73	70	63	-3	-3	-4	65	65	55
361	73	71	63	-3	-2	-3	65	65	55
365	73	70	63	-3	-3	-3	65	65	55
370	72	69	62	-4	-4	-4	65	65	55
377	65	62	55	-3	-3	-3	65	65	55
381	67	66	59	-8	-7	-7	65	65	55

Tabla 11: Evaluación de objetivos de calidad acústica (operacional)

En conclusión, puesto que la implantación de un metro en superficie implicaría a su vez una reducción del aforo de tráfico rodado en el eje Santa Elena – Eugenio Gross – Blas de Lezo, se espera cierta mejora en cuanto al cumplimiento de los Objetivos de Calidad Acústica. Por lo tanto, la implantación del escenario descrito en este apartado lograría cierta disminución de la contaminación acústica percibida en el área evaluada.

Puesto que en C/ Hilera el trazado discurre de forma soterrada, no parece haber cambios significativos en dicha calle.

6.2 Vibraciones

6.2.1 Situación operacional

A partir de los niveles de excitación medidos así como de la caracterización del terreno teórica realizada se procede al cálculo de los niveles de vibración conforme a la metodología descrita en el apartado 5.2. Puesto que parte del trazado evaluado discurre de forma soterrada la predicción distinguirá dicha situación respecto de lo esperable en el tramo en superficie.

Este escenario debería satisfacer los Objetivos de Calidad Acústica para vibraciones en el interior de edificios, definidos en la Tabla V del Decreto 6/2012, aunque los valores de vibración son calculados a pie de edificio y no en su interior.

En el siguiente gráfico se muestran los resultados de la predicción del nivel de vibraciones en función de la distancia para el **tramo soterrado**. En esta zona se estimará la mayor velocidad de circulación del Metro (50 km/h) al no encontrar obstáculos:

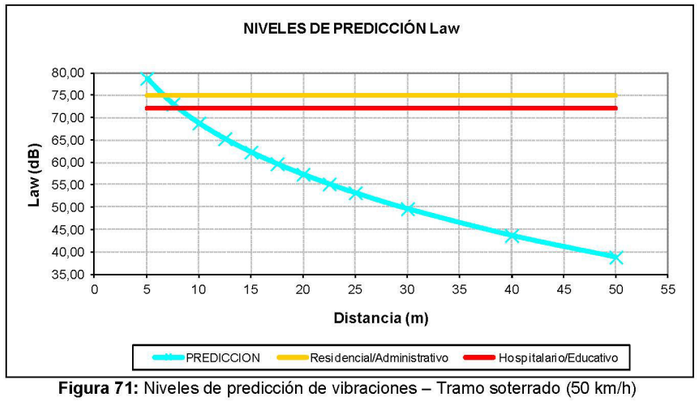


Figura 71: Niveles de predicción de vibraciones – Tramo soterrado (50 km/h)

Por otro lado, en los gráficos siguientes se muestran los resultados de la predicción del nivel de vibraciones en función de la distancia y para dos velocidades de circulación del Metro (30 y 50 km/h) para el **tramo en superficie**, así como los límites aplicables:

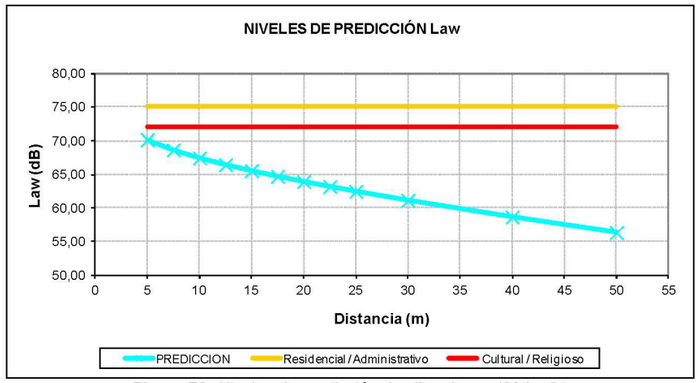


Figura 72: Niveles de predicción de vibraciones (30 km/h)