

ÍNDEX MEMÒRIA

1 INTRODUCCIÓ	3
1.1 Antecedents	3
1.2 Objecte	3
1.3 Especificacions i abast	4
2 IMPACTE ACÚSTIC FERROVIARI.....	5
2.1 Traçat ferroviari	5
2.2 El tren com a font de soroll.....	6
2.3 Plantejament de l'estudi.....	8
2.4 Metodologia.....	9
2.5 Punts de mesura	10
2.5.1 Criteris d'elecció de l'entorn de mesura	10
2.5.2 Ubicació dels punts de mesura.....	12
2.6 Realització de mesures.....	15
2.6.1 Instrumentació	15
2.6.2 Protocol de mesura.....	16
2.6.3 Paràmetres de mesura.....	16
2.6.4 Criteris de rebuig de mesures.....	17
2.7 Descàrrega de dades	18
2.8 Criteris de validació de registres.....	19
2.9 Tractament de dades.....	21
2.10 Predicció acústica.....	26

2.10.1 Bases de la simulació	26
2.10.2 Zona d'estudi	27
2.10.3 Preparació del model predictiu acústic.....	28
2.10.4 Configuració de càlculs.....	29
2.10.5 Execució de la simulació	30
3 RESULTATS.....	31
3.1 Presentació dels mapes.....	31
3.2 Impacte de les carreteres	32
3.3 Comparació acústica entre diferents tipologies de trens.....	35
3.4 Anàlisi d'impacte acústic en diferents receptors	37
4 ANÀLISI DE RESULTATS.....	40
5 AVALUACIÓ LEGAL DELS RESULTATS	43
6 RESUM DEL PRESSUPOST.....	44
7 CONCLUSIONS	45
8 RELACIÓ DE DOCUMENTS	46
9 BIBLIOGRAFIA.....	47
10 RECULL D'ABREVIATURES.....	48

1 INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

Analitzar i controlar el soroll és important en qualsevol entorn, sigui una zona industrial, un nucli urbà o una àrea agrícola. Al llarg de la carrera, però, el so ha estat un tema poc estudiat i tractat només a l'assignatura de "Ciència i tecnologia del medi ambient", on es va comentar de manera bàsica.

Donat que considero important i del meu interès el poder comprendre i tractar tot allò referent al soroll i l'impacte acústic, l'oportunitat d'adquirir els coneixements necessaris i una primera experiència per a treballar en aquesta àrea a nivell de camp i d'anàlisi informàtic em va motivar a escollir un tema d'estudi d'aquest àmbit.

El ferrocarril és una font de soroll important en el nucli urbà de Girona i al llarg de tot el seu recorregut. Si bé l'impacte acústic dels trens convencionals ha estat mesurat, estudiat i registrat, aquest procés no s'ha realitzat amb els trens d'alta velocitat, més moderns. Per aquest motiu, es realitzarà aquest estudi per als nous models de trens d'alta velocitat. Tanmateix, també es mesuraran els trens convencionals per tal de poder realitzar la pertinent comparació amb dades actualitzades.

1.2 Objecte

L'objecte del present document és l'anàlisi de l'impacte acústic dels trens d'alta velocitat i la seva comparació amb el dels trens convencionals. El projecte inclourà dades mesurades in-situ dels trens convencionals i d'alta velocitat, el seu tractament matemàtic i la creació d'un mapa acústic de les zones estudiades, tant pels convencionals com pels d'alta velocitat, amb un posterior anàlisi i comparació entre els dos models obtinguts i el soroll produït per les dues tipologies, tant per nivells de pressió sonora com freqüencial.

1.3 Especificacions i abast

El projecte se centrarà en l'impacte acústic tant dels trens convencionals com dels d'alta velocitat a les zones properes a la ciutat de Girona. Es tindrà en compte la freqüència de pas tant per les diferents franges horàries com pels diferents dies de la setmana.

Les dades seran preses in-situ, de manera que s'evitarà l'ús de models predictius, i es classificaran segons la tipologia de trens enregistrats: regionals, mitja distància, de mercaderies i d'alta velocitat.

Es presentarà un mapa acústic tant de trens convencionals com d'alta velocitat, però amb l'objectiu d'exemplificar l'elaboració d'aquests mapes a partir de les dades obtingudes més que no pas l'estudi d'una zona concreta.

2 IMPACTE ACÚSTIC FERROVIARI

2.1 Traçat ferroviari

Els trens convencionals –que inclouen els regionals, els mitja distància i els de mercaderies– i els trens d'alta velocitat circulen per rutes i vies separades i de diferent estructura. Mentre que els convencionals realitzen el seu pas per la ciutat de Girona elevats per un viaducte, els d'alta velocitat estan soterrats fins a sortir de la zona urbana. Per aquest motiu, les zones de major interès d'estudi són les àrees fora la zona urbana de Girona, ja que totes dues tipologies de via estan descobertes i podem trobar trams amb suficient proximitat entre les dues vies per a realitzar una comparació final més directe. A la Figura 1 es mostra el recorregut de les vies convencionals en vermell i el de les vies dels trens d'alta velocitat en el seu tram descobert en blau al llarg de tota l'àrea on s'ha realitzat l'estudi de camp.

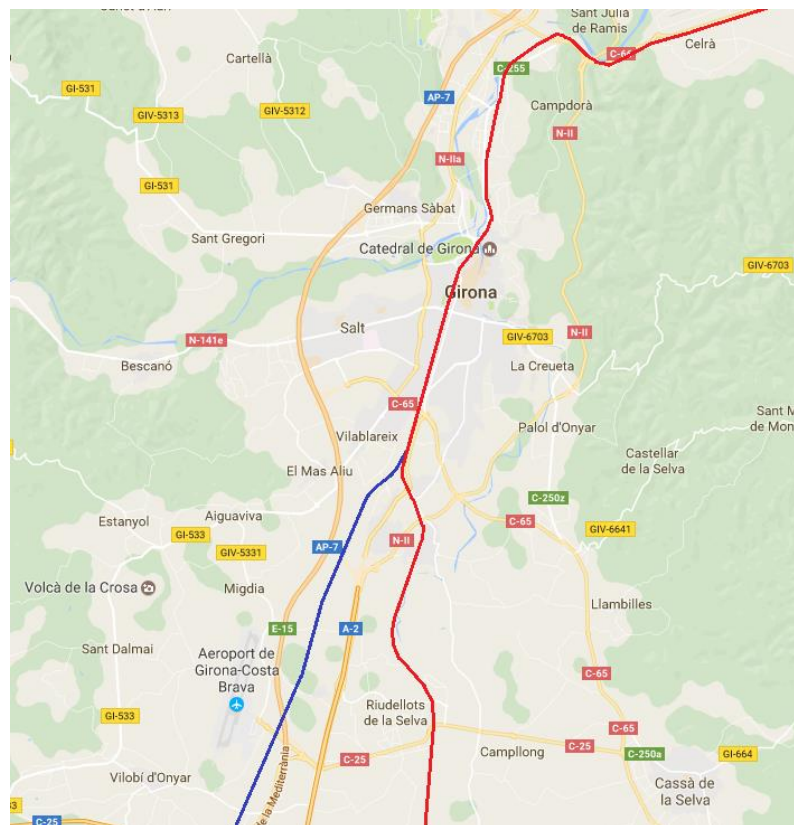


Figura 1. Traçat dels trens convencionals en vermell i d'alta velocitat descoberts en blau

2.2 El tren com a font de soroll

Per un tren en funcionament, el soroll és causat per una gran varietat de fonts de soroll, que van des de mecanismes en moviment fins a les fonts d'origen aerodinàmic. Aquestes fonts es classificaran en:

- Fonts unides al rodament.
- Fonts de soroll mecànic.
- Fonts d'origen aerodinàmic.

- **Fonts unides al rodament:**

Són les d'origens i factors més variats, que es poden llistar com:

- Tipologia de vagon:

Els vagon en circulació provoquen vibracions que, al seu torn, causen una major emissió sonora. Els diferents models de vagon tenen unes vibracions i impacte acústic diferent, i factors com el pes poden contribuir a accentuar o esmorteir aquest impacte.

- Conjunt roda-rail:

El rodament de la roda pateix unes friccions i un desgast, causats bàsicament pel sistema de frenat, que contribueixen a l'emissió de soroll global.

- Plataforma de rodament:

Aquesta emissió és deguda a l'estructura del propi rail i de la plataforma sobre la qual se situa, i es veu afectada tant pels materials utilitzats com pel sistema de fixació del rail.

- Canvi de via:

Els canvis de via emeten un soroll de breu durada però de considerable nivell d'emissió.

– **Fonts de soroll mecànic**

S'inclouen aquí totes les fonts i sorolls causats pels mecanismes interns del tren, principalment del motor, i que no s'inclouen en les fonts unides al rodament.

– **Fonts d'origen aerodinàmic**

El soroll que causen les fonts d'origen aerodinàmic creix amb la velocitat del tren. S'ha demostrat que les fluctuacions aerodinàmiques poden ser la font principal de soroll a velocitat a partir de 250-280 km/h (P. Perea Melero et al., 1992), si bé el disseny de vagons moderns ha contrarestat força aquest problema.

Les fonts de soroll mecànic perden molta importància a mesura que la velocitat del tren augmenta, ja que de seguida es veuen superades per les fonts unides als rodaments, amb un creixement més acusat. Les fonts d'origen aerodinàmic triguen més a obtenir rellevància, però a altes velocitats creixen molt i són les més importants. A la Figura 2 (Konstantinos Vogiatzis, Georges Kourossis, 2017) es mostra l'evolució de cada font amb la velocitat, així com el soroll total.

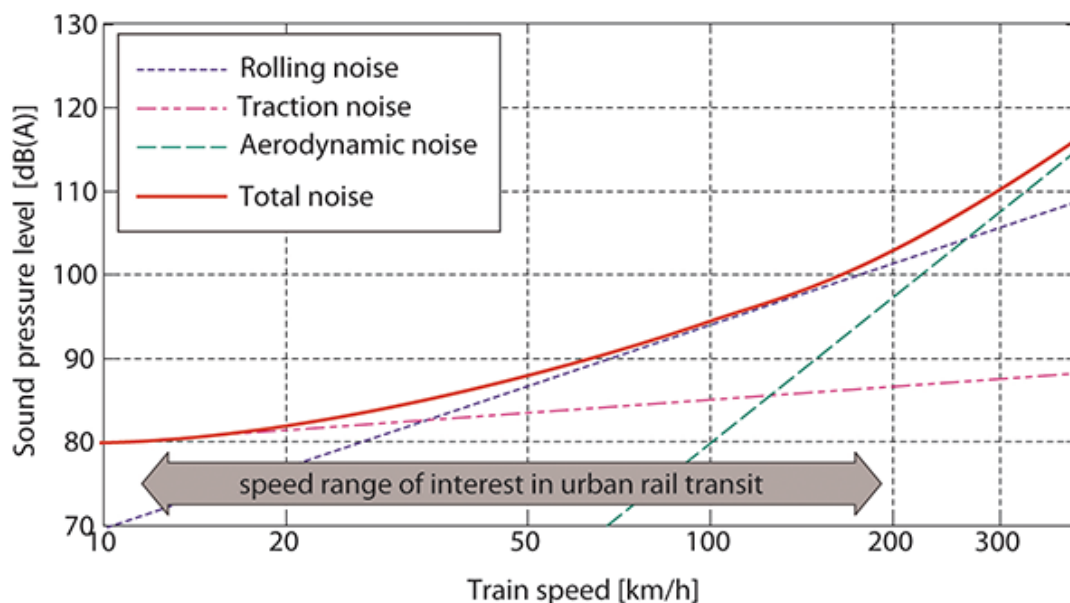


Figura 2. Evolució del soroll causat per les fonts als rodaments (rolling), mecàniques (traction) i aerodinàmiques (aerodynamic) en funció de la velocitat

2.3 Plantejament de l'estudi

L'objectiu d'aquest estudi és obtenir i avaluar les dades corresponents a l'impacte acústic dels trens d'alta velocitat en contraposició a les diverses tipologies de trens convencionals. Per a comparar l'impacte acústic de les diferents tipologies de trens s'han de comparar els seus nivells d'emissió. Un cop obtinguda aquesta informació, i a mode d'exemple d'ús i aplicació dels resultats tractats, es realitzarà un mapa acústic d'una zona on es puguin representar totes les tipologies de trens estudiades i enregistrades.

En primer lloc, es recolliran les dades necessàries per a la realització d'aquest anàlisi, l'impacte acústic de cada un dels tipus de trens estudiats. Per a aquest procés s'utilitzarà un sonòmetre CESVA model SC-30, que mesurarà els nivells de pressió sonora. El procés de recollida de dades es durà a terme al llarg de diferents dies i franges horàries per tal d'incloure una major varietat de trens.

La informació recollida pel sonòmetre serà importada utilitzant el software Capture Studio, que permet descarregar les dades a l'ordinador en una varietat de formats. S'utilitzarà el format per a fulles de càlcul .xls compatible amb Microsoft Excel.

Quan la quantitat de dades recollides sigui suficient, es procedirà al seu tractament per a preparar-les per al posterior anàlisi. Dels nivells sonors de cada tren individual se n'ha d'extreure un nivell equivalent (L_{eq}) que permetrà, al seu torn, obtenir el nivell equivalent a un segon (L_{AE}). Un cop es tingui el L_{AE} per a cada tren individual, es realitzarà una mitjana aritmètica per a tots els trens d'una mateixa tipologia i s'obtindrà el valor mig per al L_{AE} d'aquella tipologia concreta. Per tal que les dades siguin compatibles per a aquest tractament, és important que totes les dades utilitzades per a una mateixa mitjana aritmètica siguin preses des del mateix punt de mesura.

L'objectiu d'aquest tractament és poder convertir les dades a nivell d'emissió, ja que això ens permetrà extrapolar els resultats a qualsevol punt de la via. Per a aquesta tasca s'utilitzarà el programa Computer Aided Noise Abatement o CadnaA. Amb L_{AE} , una nova L_{eq} i una simulació de la situació del punt de mesura s'iterarà per tal de trobar els valors de nivell d'emissió que emet cada tipologia de tren, extrapolables al llarg de tota la via a excepció d'estacions, corbes pronunciades i altres possibles punts de frenada.

2.4 Metodologia

L'estructura que ha seguit la realització d'aquest estudi és, ordenada per passos, la següent:

1. Recerca bibliogràfica de coneixements teòrics sobre el so i la contaminació acústica previs a la realització pràctica de l'estudi.
2. Anàlisi de recorregut de les vies i el seu entorn. Tria de punts de mesura idonis.
3. Mesura de trens en els punts seleccionats.
4. Verificació de la validesa de les dades. Anàlisi individual de cada tren.
5. Càlcul de L_{eq} i L_{AE} de cada tren individual.
6. Unió dels L_{AE} segons tipologia de tren amb mitjana aritmètica.
7. Càlcul de L_{eq} de cada tipologia segons franja horària. Primeres comparacions numèriques.
8. Càlcul per iteració de nivell d'emissió segons tipologia de tren i franja horària.
9. Simulació amb CadnaA per a cada tipologia i franja horària.
10. Anàlisi, unió i comparació dels diferents mallats de càlcul i mapes acústics.
11. Valoració dels resultats.

2.5 Punts de mesura

2.5.1 Criteris d'elecció de l'entorn de mesura

Per a escollir els millors punts de mesura s'han de tenir en compte principalment dues qüestions: la facilitat per a obtenir unes dades precises i que aquestes dades siguin vàlides pel major nombre de punts possibles de la ruta ferroviària.

L'obtenció d'unes dades precises i clares facilitarà l'anàlisi posterior i permetrà obtenir uns resultats més exactes i fiables. Per a aconseguir-les, s'han tingut en compte els següents punts:

- Absència de sorolls ambientals forts o molt irregulars:

És important situar el sonòmetre en punts amb escàs soroll ambiental. Si l'entorn és silenciós, el soroll provocat pel tren destaca amb més facilitat i no es veu contaminat per altres fonts de soroll que s'hi puguin barrejar. A més, si les inevitables emissions sonores de l'entorn són regulars, es poden aïllar del soroll real del tren sense alterar els resultats numèrics, mentre que amb presència de fonts externes irregulars aquest procés resulta insuficient per a l'obtenció de dades netes per a l'anàlisi.

- Evitar entorns amb altres possibles esdeveniments acústics:

A part del soroll ambiental general, s'ha de preveure si altres esdeveniments acústics puntuals poden succeir en la zona de mesura, com ara transit dispers de vehicles, tasques agrícoles pròximes o presència humana. Si aquests esdeveniments resulten massa freqüents, serà probable que coincideixin amb el pas dels trens a mesurar, fet que invalidaria les dades corresponents a aquell tren.

- Espai obert:

Es requereix situar el punt de mesura en un espai obert amb reflexions d'ones sonores mínimes. La presència d'obstacles propers al sonòmetre poden distorsionar les mesures i, en el cas de parets properes, reflexions directes que alterarien les dades i accentuarien el soroll causat per la font.

- Sense obstacles entre el punt de mesura i la font:

L'espai entre el sonòmetre i el pas dels trens ha de ser net per a un correcte enregistrament de dades; altrament, el soroll que arribaria al sonòmetre es trobaria mitigat i alterat.

Per a uns resultats extrapolables al llarg del màxim tram ferroviari possible, les condicions de la font, és a dir, els trens, han de ser iguals o molt similars a les que tindran al llarg de la major part del trajecte. Això és degut a que, amb les dades recollides, es trobarà el nivell d'emissió de la font, que es considera igual i constant per a tot el tram on les condicions de la font siguin les mateixes que on s'han mesurat i, per tant, és també aplicable a totes aquestes seccions, però no és aplicable allà on la font tingui condicions diferents, ja que el seu nivell d'emissió seria diferent. Per tant, també s'ha de tenir en compte per a escollir els punts de mesura:

- Distància suficient amb estacions:

La ruta ferroviària es pot separar en dos tipus de seccions: les de frenada i arrancada, com són les estacions, i les de velocitat més o menys constant, que constitueixen la majoria del recorregut. El nivell d'emissió de la font és diferent per a aquests dos trams, o sigui que les dades d'un no són extrapolables a l'altre. Com que els trens d'alta velocitat passen per vies subterrànies per les estacions, aquests punts no resulten interessants i seran evitats.

- Vies a alçada de terra:

S'ha de tenir en compte si les vies es troben elevades en un viaducte, com al nucli urbà de Girona, o bé són a alçada de terra. Els materials i estructura dels viaductes afecten a l'impacte acústic emès pel tren, i l'alçada extra que adquireix altera la difusió del seu so i limita el possible ús de les dades a aplicacions relacionades exclusivament amb trams amb viaducte. Com que gran part del recorregut es realitza a alçada de terra, es buscaran punts amb aquesta condició.

A l'hora de realitzar la simulació, aquestes mesures seran aplicables també al pas per ponts, ja que són de longitud curta i, percentualment, d'impacte negligible en el conjunt de la simulació i comparació de resultats.

En resum, s'han cercat punts de mesura en zones acústicament tranquil·les on el tren circuli a velocitat constant i sense estructures tipus viaducte, ja que són les condicions generals al llarg del trajecte. No ens interessa estudiar l'impacte acústic en el nucli urbà de Girona perquè els trens d'alta velocitat passen soterrats.

2.5.2 Ubicació dels punts de mesura

D'acord amb els criteris de decisió descrits, s'han escollit dos punts per al procés d'enregistrament de dades, un per als trens convencionals i un altre per als trens d'alta velocitat:

- Trens convencionals: Campdorà

Zona on en el passat ja es van realitzar estudis referents a l'impacte acústic dels trens per part de personal de la universitat. La densitat de població, circulació i indústria és molt baixa, el soroll ambiental de la zona és escàs i no hi ha obstacles al voltant de la via ni prop del punt de mesura. El tram és a alçada de terra i es troba suficientment lluny del nucli urbà i de qualsevol estació.

Degut a la presència d'una petita àrea residencial propera, van succeir alguns esdeveniments acústics aliens als trens, com el pas d'algun cotxe o de gent amb radio prop del sonòmetre. Aquests esdeveniments han estat anotats i s'ha invalidat la mesura de qualsevol tren que coincidís amb algun d'aquests agents sonors.

Un cop escollit el punt exacte on situar el sonòmetre, es va mesurar la distància que el separava de les vies. Es va calcular que la longitud entre el sonòmetre i l'eix del tram ferroviari, format per dues vies, era de 22 metres, mentre que les vies es trobaven sobre una elevació de 2 metres respecte el terra, tot i que el sonòmetre ja té una alçada de 1.5 metres.

A la Figura 3 es pot veure un plànol de situació de l'emplaçament del punt de mesura de Campdorà per a trens convencionals, amb coordenades 42.0244926, 2.8351616.

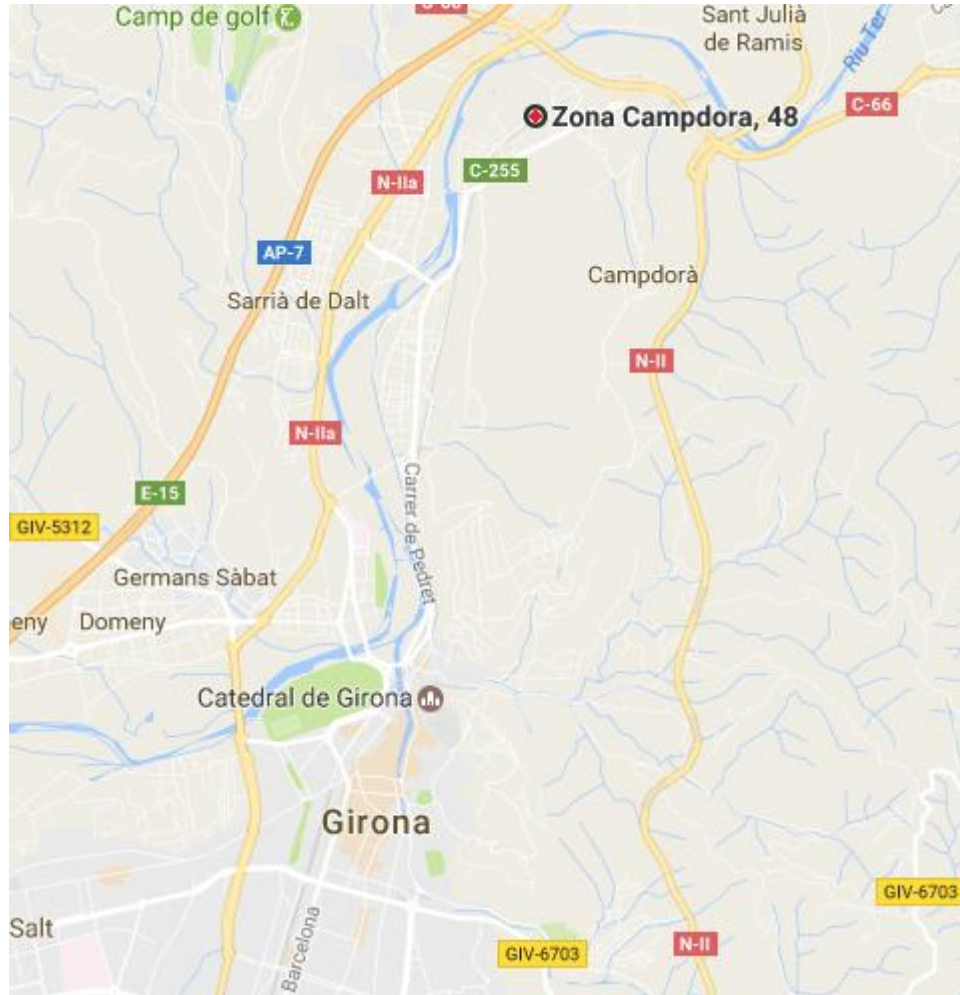


Figura 3. Situació del punt de mesura de Campdorà

- Trens d'alta velocitat: Entre Aiguaviva i Fornells de la Selva

Aquesta zona està completament apartada de qualsevol nucli residencial o industrial, i ni l'autopista ni l'autovia resulten un problema, ja que tot i afegir soroll de fons, aquest no és elevat i és completament regular i continu, de manera que es pot aïllar amb facilitat tota la informació enregistrada dels trens. No hi ha hagut esdeveniments acústics que hagin pogut contaminar les dades. Entre el sonòmetre i les vies hi ha una reixa, però s'ha comprovat que

és un objecte acústicament transparent, és a dir, que no afecta a la propagació de soroll.

Un cop mesurades les longituds, veiem que la distància entre el sonòmetre i l'eix del tram ferroviari és de 15 metres, i tots dos es troben a la mateixa alçada.

S'observa a la Figura 4 el plànol de situació de l'emplaçament del punt de mesura d'Aiguaviva per a trens d'alta velocitat, amb coordenades 41.926437, 2.786900.



Figura 4. Situació del punt de mesura d'Aiguaviva

2.6 Realització de mesures

2.6.1 Instrumentació

- Sonòmetre:

El sonòmetre utilitzat és un CESVA model SC-30 capaç de treballar com a analitzador d'espectre amb banda d'octava. Funciona a piles i té una capacitat de memòria per a un enregistrament de fins a aproximadament 4 hores amb un temps de mostreig igual a 1 segon.

- Pantalla anti-vent:

Serveix per a evitar que el poc vent que hi pugui haver no creï soroll aerodinàmic a través de les reixetes del micròfon.

- Trípod:

Permet fixar la posició i l'alçada del sonòmetre sobre el terreny. Sempre s'ha utilitzat la seva màxima extensió, que és de 1.5 metres.

- Calibrador:

Comprova que el sonòmetre mesuri correctament la pressió acústica de l'entorn. Per llei, és obligatori utilitzar-lo i realitzar aquesta comprovació abans i després de cada període de presa de dades.

- Cinta mètrica:

Per a mesurar la distància entre el sonòmetre i l'eix de les vies s'ha utilitzat una cinta mètrica de 30 metres. La distància entre el sonòmetre i la font de soroll és una dada important a l'hora de realitzar les iteracions i simulacions.

- Bloc de notes i bolígraf:

S'ha mantingut un registre de les hores de pas dels trens, la seva tipologia i de qualsevol esdeveniment acústic que hagi pogut afectar l'obtenció i tractament de les dades enregistrades.

2.6.2 Protocol de mesura

Aquests passos s'han seguit per a totes les mesures realitzades als dos punts seleccionats, de manera que assegurin una bona execució de la captura de dades i eviten qualsevol pertorbació possible:

1. Acoblar el sonòmetre al trípod i comprovar els 1.5 metres d'alçada del conjunt.
2. Fixar l'aparell en un punt amb superfície plana i sense obstacles entre el sonòmetre i el tram ferroviari. També és convenient evitar punts amb exposició directe al Sol, ja que els canvis de temperatura poden afectar la fiabilitat del sonòmetre.
3. Encarar el sonòmetre cap a les vies.
4. Programar el sonòmetre amb un temps de mostreig d'un segon, en octaves i amb ponderacions Z (dBZ) i A (dBA) per al nivell de pressió sonora.
5. Calibrar el sonòmetre. Aquest pas es repetirà tant bon punt finalitzi la presa de dades.

Realitzats aquests passos, es pot iniciar la captura de dades. En cas de pluja o vent, s'ha d'avortar la presa de mesures, ja que la pluja altera el soroll de la font i el vent genera pertorbacions en les captures, a més d'evitar qualsevol dany a l'equip ja sigui per mullar-se o per caure a terra. Es considera que el vent és acceptable fins a una velocitat de 5 m/s.

2.6.3 Paràmetres de mesura

El sonòmetre va enregistrant informació de l'entorn tant bon punt s'inicia el procés de gravació. La informació que es recull és:

- Data i hora de la mesura.
- LZT: Nivell de pressió sonora en ponderació Z per a l'interval de mesura T (dBZ).
- LAT: Nivell de pressió sonora en ponderació A per a l'interval de mesura T (dBA).

- LOct31.5: Nivell de pressió sonora en banda d'octava 31.5 Hz (dBZ).
- LOct63: Nivell de pressió sonora en banda d'octava 63 Hz (dBZ).
- LOct125: Nivell de pressió sonora en banda d'octava 125 Hz (dBZ).
- LOct250: Nivell de pressió sonora en banda d'octava 250 Hz (dBZ).
- LOct500: Nivell de pressió sonora en banda d'octava 500 Hz (dBZ).
- LOct1k: Nivell de pressió sonora en banda d'octava 1000 Hz (dBZ).
- LOct2k: Nivell de pressió sonora en banda d'octava 2000 Hz (dBZ).
- LOct4k: Nivell de pressió sonora en banda d'octava 4000 Hz (dBZ).
- LOct8k: Nivell de pressió sonora en banda d'octava 8000 Hz (dBZ).
- LOct16k: Nivell de pressió sonora en banda d'octava 16000 Hz (dBZ).

2.6.4 Criteris de rebuig de mesures

Durant el període d'enregistrament poden succeir diversos successos que invalidin una o més mesures. Es tindran en compte els següents:

- Increment sobtat del soroll ambiental:

Per a aïllar correctament la informació acústica dels trens, és necessari que el soroll ambiental sigui relativament baix, força constant i amb variacions escasses, lentes i progressives. Si es dona el cas que el soroll ambiental augmenta considerablement de nivell, les mesures en aquest espai de temps molt probablement quedin corruptes, especialment si aquesta variació s'ha dut a terme en un espai curt de temps o amb irregularitat, de manera que seran eliminades les dades pertinents.
- Esdeveniment acústic extern simultani a un tren:

Dos esdeveniments acústics simultanis enregistrats no es poden separar matemàticament, ja que no disposem dels valors d'emissió acústica individuals de cap de les fonts involucrades en aquest moment concret. Si un esdeveniment acústic extern coincideix amb el pas d'un tren, aquesta mesura queda invalidada.

- Trànsit simultani de dos trens:

Quan dos trens es creuen, no podem considerar el soroll enregistrat una suma del soroll emès per cada un d'ells. Durant el pas simultani de dos trens s'altera la vibració del conjunt, les pertorbacions són molt elevades i un dels trens actua com a pantalla respecte l'altre des del punt de vista del sonòmetre. Aquestes situacions seran eliminades de l'anàlisi de dades.

La resta d'informació pertanyent a cada tren serà analitzada i tractada posteriorment, però no totes les mesures seran necessàriament vàlides, de manera que s'haurà de realitzar una verificació de cada tren per separat abans d'iniciar el tractament matemàtic.

2.7 Descàrrega de dades

Un cop finalitzat l'enregistrament de les dades, que queden a la memòria del sonòmetre, s'han d'importar a un ordinador. Per a realitzar aquest procés s'utilitzarà el programa Capture Studio de CESVA, el suport de software oficial de l'empresa per als seus sistemes de captura acústica. Aquest programa carrega la informació del sonòmetre connectat per USB a l'ordinador, on es mostra una primera representació gràfica de tot el registre. Aquesta informació pot ser guardada en diferents formats, en aquest cas utilitzarem el format .xls per a fulles de càlcul, i utilitzarem el programa Microsoft Excel per al seu tractament.

2.8 Criteris de validació de registres

Les mesures enregistrades ja estan en un format de fàcil tractament, però abans d'iniciar-lo s'ha de verificar que les dades enregistrades de cada tren siguin correctes, és a dir, que la pressió acústica mesurada pel sonòmetre durant el pas de cada tren sigui suficientment neta per al seu ús matemàtic i coherent amb l'esdeveniment analitzat.

Per a aquest procés utilitzarem els valors de LZT i LAT, que són els nivells de pressió sonora més adequats per a identificar les diferents etapes d'un esdeveniment acústic. Els passos a seguir per a cada sessió de mesura seran:

1. Representació gràfica de LZT i LAT al llarg de tota la sessió:

Al mostrar LZT i LAT en una gràfica en funció del temps per a tot el continu de la mesura es podrà observar quins han estat els moments amb més soroll i quines són les etapes més silencioses. Això permetrà tenir una idea general dels nivells sonors enregistrats i valorar si el so dels trens destaca suficientment per sobre del so de fons, a més de notar si l'enregistrament presenta pics abundants o si els nivells han estat regulars. Si el so a estudiar destaca per sobre de 10 dB del so de fons, el so de fons no afectarà als valors d'estudi, si destaca entre 3 i 10 dB la mesura es considera acceptable i si destaca menys de 3dB es dona per dolenta i no es pot utilitzar.

2. Identificació del registre específic del tren:

Si bé s'han anat anotant les hores de pas de trens, aquesta informació només servirà de guia per a identificar els pics corresponents a la gràfica i aïllar-los per al seu posterior anàlisi. Els esdeveniments acústics sempre presenten un període de pujada, un període a màxim nivell i un altre de baixada; per tant, amb la gràfica es llistarà quan comença la pujada i quan acaba la baixada de cada tren per tal de poder exportar tota l'estructura per al seu tractament.

3. Aïllar informació individual de cada tren:

Per a cada tren identificat s'importaran les seves dades, és a dir, LZT, LAT i els diferents nivells de pressió sonora d'octaves per a cada instant mostrejat dins el període definit al pas anterior.

4. Representació gràfica individual de cada tren:

Tal i com s'ha fet amb el conjunt, es representaran els nivells de LZT i LAT en funció del temps. Aquest anàlisi gràfic individual permet observar amb major precisió els diferents períodes de l'esdeveniment acústic, de manera que es pot acabar d'afinar quines dades interessa mantenir i quines no. Aquí és quan es decideix definitivament si un tren és vàlid o no: si les diferents parts de l'esdeveniment són confuses, poc clares o molt irregulars, el tren quedarà invalidat; en canvi, si la forma és clara, destaca suficientment per sobre del so de fons i manté els màxims nivells de manera estable, el tren és bo i es podrà utilitzar per a l'estudi. A la Figura 5 es mostra la diferència entre un tren correcte i un d'invalidat.

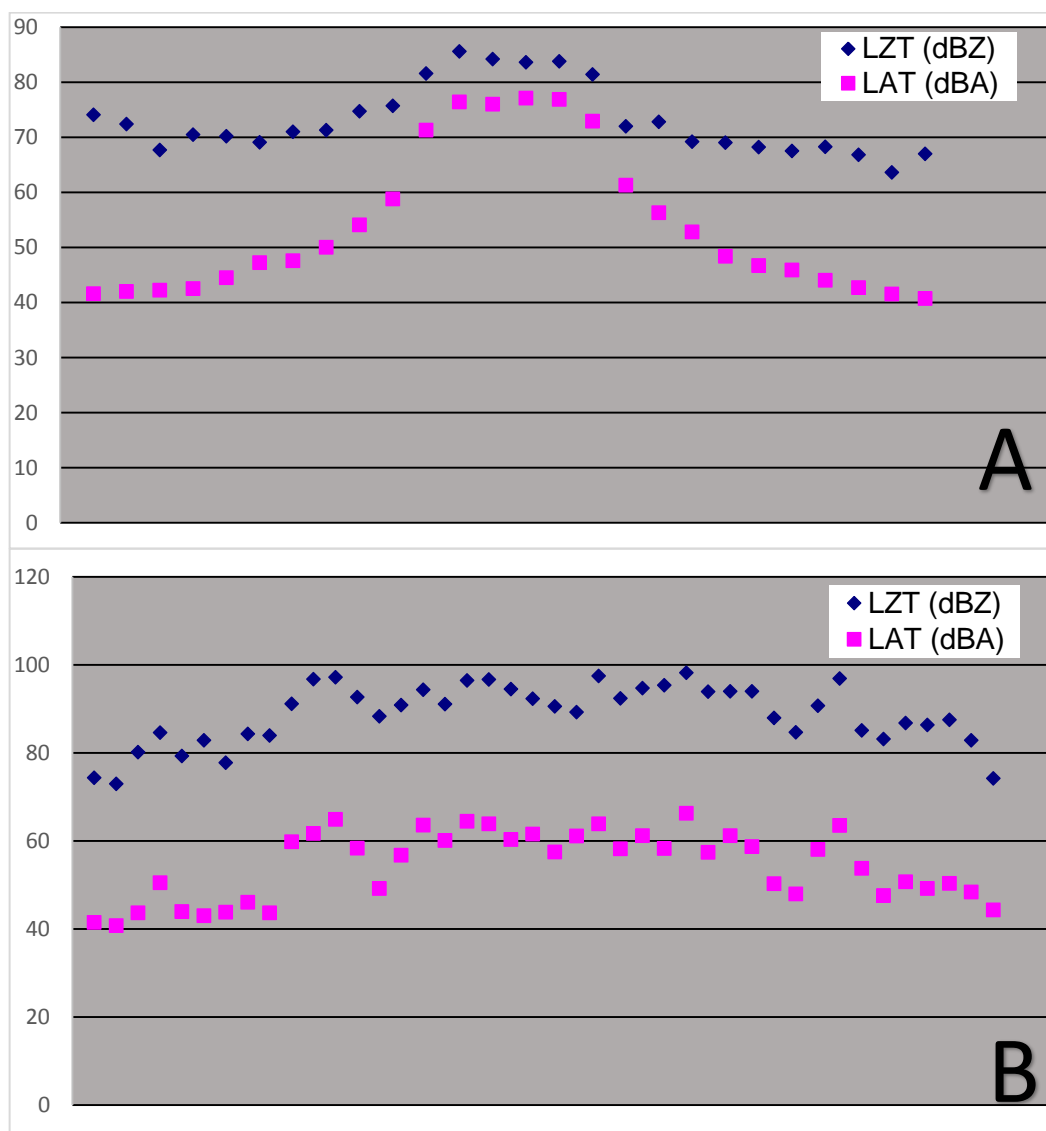


Figura 5. Tren vàlid (A) i tren no vàlid (B)

2.9 Tractament de dades

Filtrats ja els trens vàlids dels erràtics, es pot afirmar que totes les dades que s'han conservat fins aquí són correctes i permetran un bon tractament numèric. L'objectiu és acabar treballant amb tipologies de trens, no amb trens individuals, de manera que el primer pas serà adaptar la informació de cada esdeveniment acústic per a la seva inclusió en un conjunt on es realitzarà un estudi més exhaustiu. Els detalls d'aquests càlculs i les seves equacions es troben explicats a l'Annex A. Es seguirà el següent procediment:

1. Definir el nivell sonor equivalent (L_{eq}) i el nivell sonor equivalent a un segon (L_{AE}):

És el primer tractament matemàtic que es realitza en aquest estudi i el seu objectiu és permetre'ns treballar en funció de tot l'esdeveniment analitzat com a conjunt i no en funció de cada instant de mostreig. Trobar L_{eq} i L_{AE} equival a definir un nivell sonor mig per a tot l'esdeveniment i per a les seves LZT, LAT i els nivells de les bandes d'octava, de manera que ja no es parlarà de nivell acústic a un instant concret, sinó de nivell acústic per a un esdeveniment concret. D'aquests càlculs s'utilitzarà el L_{AE} .

2. Classificació segons tipologia:

Es llistaran les dades L_{AE} de cada tren en ponderacions Z, A i bandes d'octava classificades segons la seva tipologia. En aquest punt és adequat realitzar una comparació entre la informació dels diferents trens dins de cada tipologia per a detectar possibles dades estranyes o amb valor inusualment baixos o elevats. En cas de trobar un tren que s'allunyi massa dels valors mitjos, es considerarà una dada incorrecta no representativa del conjunt i s'eliminarà abans de continuar. Vista l'escassetat de mesures preses dels trens de mercaderies en comparació amb la resta de tipologies i la dificultat per a enregistrar-les, s'han utilitzat dades d'un altre estudi (Eguiguren Rocosa, A., 2008) per a complementar les ja existents.

3. L_{AE} mig de cada tipologia:

Es realitzarà la mitjana aritmètica de L_{AE} per a cada una de les tipologies de tren estudiades. Així, a partir d'ara es treballarà segons el conjunt sencer de cada tipologia. A la Taula 1 es llisten els resultats d'aquest apartat. Aquests valors no són comparables perquè el punt de mesura hauria d'estar a la mateixa distància en tots els casos.

	Regional	Mitja distància	Mercaderies	Alta velocitat
LZT (dBZ)	91.7	90.5	98.0	96.0
LAT (dBA)	83.0	82.6	94.4	90.6
LOct31.5 (dBZ)	83.7	84.1	87.3	87.8
LOct63 (dBZ)	85.0	85.5	88.2	89.3
LOct125 (dBZ)	80.5	80.0	88.1	84.9
LOct250 (dBZ)	78.3	77.4	89.4	79.3
LOct500 (dBZ)	79.3	79.9	89.3	81.0
LOct1k (dBZ)	78.2	77.2	89.1	86.9
LOct2k (dBZ)	76.6	76.1	89.4	85.6
LOct4k (dBZ)	72.2	71.6	82.7	78.7
LOct8k (dBZ)	64.3	63.3	73.1	74.3
LOct16k (dBZ)	56.2	52.7	61.9	65.3

Taula 1. L_{AE} mig per les diferents tipologies de trens estudiats

4. Càlcul del soroll mig anual:

Fins ara s'ha obtingut el soroll mig de cada tipologia durant el seu període de pas, però el flux de transit dels trens és puntual i aquests valors estan molt lluny de ser un soroll constant al llarg del temps. Així com per a una carretera es podrien considerar les dades mesurades com uns nivells constants degut al seu flux continu, en el cas dels trens s'ha de realitzar una mitjana al llarg del temps, s'han de repartir aquests pics de soroll que provoquen al llarg de tot l'any. Per tant, s'ha de definir la freqüència de pas de cada tipologia, diferenciant entre dies laborables i dies festius, a més de separar els trens segons si circulen durant el dia, la tarda o la nit, ja que també es classificaran segons la franja horària estipulada pel decret 176/2009:

- Dia: De 07:00 a 21:00.
- Tarda: De 21:00 a 23:00.
- Nit: De 23:00 a 07:00.

Per a definir les freqüències de pas s'ha utilitzat la informació mostrada a la pàgina web de la RENFE. Per als mercaderies, però, ha resultat impossible trobar informació oficial per cap via possible, de manera que s'utilitzaran les mateixes freqüències que per als mitja distància en els càlculs. La Taula 2 mostra la freqüència de circulació de cada tipologia segons dia i franja horària, a més del total anual, i s'han considerat 247 dies laborables i 118 dies festius.

		Laborables	Festius	Total anual
Regional	Dia	16	16	5840
	Tarda	0	1	118
	Nit	0	0	0
Mitja distància	Dia	13	9	4273
	Tarda	2	1	612
	Nit	1	0	247
Mercaderies	Dia	13	9	4273
	Tarda	2	1	612
	Nit	1	0	247
Alta velocitat	Dia	27	24	9501
	Tarda	2	3	848
	Nit	1	0	247

Taula 2. Freqüència de circulació de trens

Amb les freqüències definides, es trobarà el valor del soroll mig anual per a cada tipologia de tren i franja horària amb una mitjana logarítmica.

5. Trobar el nivell d'emissió segons el model SMR2 de soroll ferroviari:

El nivell d'emissió segons el model SMR2 ens permet donar uns valors d'emissió a tot el tram ferroviari. Quan el sonòmetre pren mesures, el que registra són els nivells d'emissió que li arriben, però varien segons la posició del punt de mesures i les condicions ambientals i de l'entorn; per tant,

aquestes dades no es poden utilitzar directament per a definir la font d'emissió. Per a trobar els nivells d'emissió real de la font i poder donar així uns valors a l'origen del soroll, s'utilitzarà el programa CadnaA de càlcul i anàlisi acústic. Es realitzarà el següent procés d'inversió de model acústic:

1. Situar el punt de mesura utilitzat en el mapa i comprovar que les condicions geogràfiques són similars a les reals.
2. Introduir a la font un nivell d'emissió inicial arbitrària. La font consta de dues vies, cadascuna amb el seu propi nivell d'emissió, que es considerarà igual entre elles i, per tant, serà la meitat del nivell d'emissió total.
3. Simular les emissions sonores de les vies i comprovar els valors que detecta el nostre punt de mesura en aquesta simulació.
4. Comparar els valors de L_{AE} reals amb els de la simulació per a trobar l'error de la iteració. Els valors reals es troben en dBZ i el CadnaA treballa en dBA, de manera que s'ha de tenir en compte la ponderació necessària abans d'aquesta comparació.
5. Realitzar una nova iteració aplicant els nivells d'error trobats als nous valors.

El procés es repetirà fins a obtenir un error igual o inferior a 0.2 per a tots els valors. En general, amb dues o tres iteracions s'arriba sempre a la precisió desitjada. Aquests resultats es mostren a la Taula 3, on els nivells sonors (L) es troben en dBZ. Aquests valors són comparables entre les diferents tipologies. No hi ha valors nocturns per al regional perquè no en circula cap en aquesta franja horària.

Ara que ja es té el nivell d'emissió de la font, es disposa de totes les dades numèriques necessàries per a fer una simulació a gran escala i generalitzada.

	Regional						
L (dBZ)	LOct63	LOct125	LOct250	LOct500	LOct1k	LOct2k	LOct4k
Nivell dia	93.6	96.6	99.3	98.5	93.1	89.3	70.0
Nivell tarda	83.6	87.0	90.5	89.3	84.5	82.1	68.0
Nivell nit	---	---	---	---	---	---	---
	Mitja distància						
L (dBZ)	LOct63	LOct125	LOct250	LOct500	LOct1k	LOct2k	LOct4k
Nivell dia	92.7	93.9	95.9	96.0	90.9	89.7	85.7
Nivell tarda	92.7	94.0	95.9	95.9	90.8	89.6	85.7
Nivell nit	82.7	84.0	85.9	86.0	80.9	79.7	75.7
	Mercaderies						
L (dBZ)	LOct63	LOct125	LOct250	LOct500	LOct1k	LOct2k	LOct4k
Nivell dia	95.4	102.1	107.8	105.4	102.7	102.9	96.7
Nivell tarda	95.4	102.1	107.8	105.4	102.7	102.9	96.7
Nivell nit	85.4	92.1	97.8	95.4	92.7	92.9	86.8
	Alta velocitat						
L (dBZ)	LOct63	LOct125	LOct250	LOct500	LOct1k	LOct2k	LOct4k
Nivell dia	97.5	96.7	94.3	97.2	98.4	98.2	90.9
Nivell tarda	95.4	94.7	92.3	95.2	96.4	96.1	88.9
Nivell nit	84.1	83.3	80.9	83.8	85.0	84.7	77.5

Taula 3. Nivell d'emissió SMR2 per a cada tipologia de tren

2.10 Predicció acústica

2.10.1 Bases de la simulació

CadnaA permet realitzar càlculs a tota una zona per a definir els nivells de so que presenta amb més o menys precisió. Un cop s'ha importat el mapa de la zona a estudiar, s'han configurat les fonts de soroll i s'han definit els paràmetres de càlcul, el CadnaA pot començar a realitzar les operacions necessàries per a trobar els nivells sonors d'aquesta àrea. Per a una millor comprensió dels passos necessaris per a la preparació prèvia de la simulació, es definirà el procediment que segueix el programa per al càlcul de les malles del mapa acústic final, que és el següent:

1. El programa situa diferents punts receptors de soroll més o menys separats entre ells per tot el mapa.
2. Per a cada punt receptor s'emeten vectors d'una longitud definida a totes les direccions possibles i s'analitza si troben alguna font de soroll o algun obstacle al llarg del seu recorregut.
3. En cas de topar amb una font de soroll, es calcula quin nivell de soroll rebrà el punt receptor segons el nivell d'emissió de la font i la distància amb aquest punt. En cas de trobar-se amb un obstacle, el vector és reflectit i difractat, i continua el seu recorregut. Les reflexions són limitades.
4. Un cop realitzat l'escombrat amb vectors al voltant de tot el punt receptors, passa al següent.
5. Un cop realitzat aquest procés per a tots els punts receptors, s'interpola entre punts adjacents per a definir els valors entre punts receptors.

Per a preparar la simulació es començarà definint l'àrea de treball, després comprovant el correcte posicionament de les fonts de soroll en el mapa tridimensional i finalment especificant les variables i precisió dels càlculs.

2.10.2 Zona d'estudi

Les dades estan llestes per a calcular la simulació de tot un mapa acústic, però primer s'ha de decidir de quina zona es realitzarà. El nivell d'emissió que s'ha trobat és aplicable a qualsevol tram ferroviari situat sobre terra, sense corbes pronunciades, no proper a cap estació i sense cap altre singularitat, de manera que aquesta és la única restricció. Per tal de poder realitzar una millor comparació entre els trens convencionals i els d'alta velocitat, es buscarà una àrea amb trams vàlids per a tots dos conjunts de tipologies i on les diferents vies no es trobin gaire allunyades. A més, per a afegir una altra dada comparativa al conjunt, s'escollirà una zona amb presència de carreteres amb alt flux de circulació, de tal manera que es podrà comparar l'impacte acústic dels trens amb el de les carreteres principals.

Una àrea que compleix tots aquests requisits és la que se situa a les proximitats de Fornells de la Selva i Riudellots de la Selva. En aquesta zona hi passen tant trens convencionals com d'alta velocitat; també hi ha l'autopista AP-7 i la carretera nacional N-II, que passa a ser l'autovia A-2 a partir d'un punt concret. El mapa de l'àrea serà importat de la pàgina web de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya des de la seva base topogràfica de Catalunya 1:5000. Els fulls escollits i descarregats són el full 304-100, el 305-100, el 304-101 i el 305-101, i inclouen corbes de nivell cada 5 metres, carreteres, vies de tren i edificacions. A la Figura 6 es pot observar l'àrea escollida.

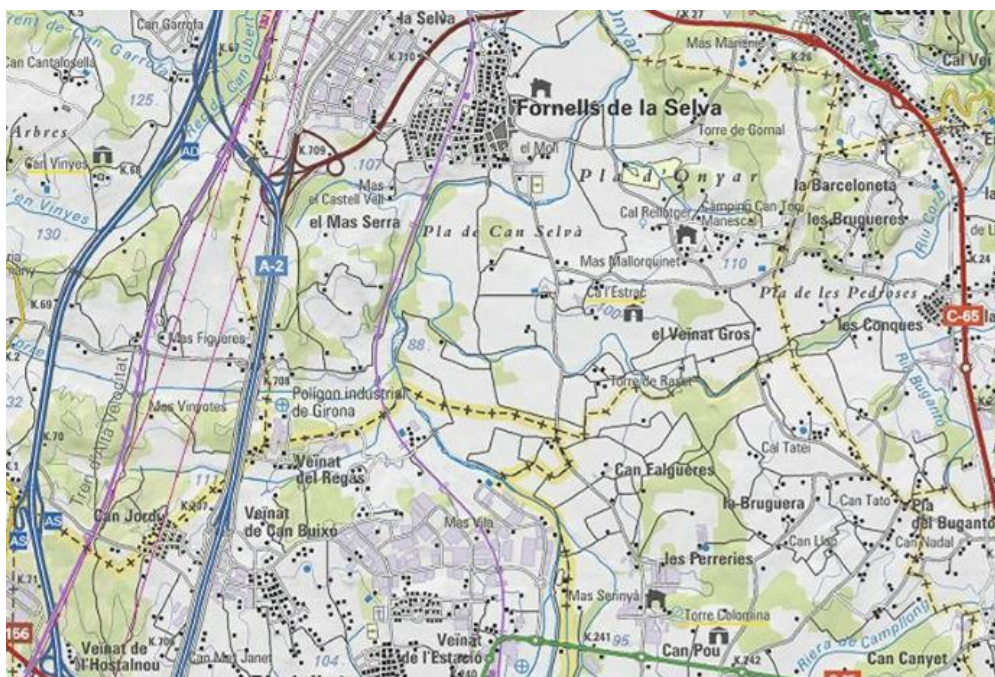


Figura 6. Zona d'estudi

2.10.3 Preparació del model predictiu acústic

Un cop s'ha escollit i importat el mapa de la zona on es treballarà, s'han d'incloure les dades i preparar els elements a simular:

1. Introduir les potències acústiques de cada font:

Per a les vies s'utilitzaran les calculades anteriorment, mentre que per les carreteres s'utilitzarà la intensitat mitja diària (IMD) proporcionada pel Ministeri de Foment del Govern d'Espanya en els mapes provincials de trànsit 2016 i l'informe 2015 sobre el sector d'autopistes de peatge d'Espanya. Les dades sobre carreteres subministrades pel Ministeri de Foment no inclouen la tarda com una franja horària separada, de manera que no es realitzaran càlculs per a les carreteres durant el període de tarda.

2. Assegurar el correcte posicionament de les vies:

Deguda a la precisió geogràfica de 5 metres amb corbes de nivell, alguns trams ferroviaris es poden trobar soterrats o alçats erròniament en el mapa de la simulació un cop aplicats els valors topogràfics per a una representació en tres dimensions. El mateix CadnaA disposa d'eines per a adequar les vies a l'alçada correcta segons el terreny.

3. Reducció de l'àrea de càlcul:

La zona est de la fitxa 305-100 serà obviada per a la realització de la simulació, ja que es troba molt allunyada de les fonts de soroll i és de poc interès per a l'estudi.

4. Eliminació d'elements irrellevants:

Totes les edificacions de menys de 100 metres quadrats seran eliminades. Aquests elements tenen un efecte molt escàs en els càlculs i suprimir-los permet adequar el mapa a la limitació de mil elements físics que té el programa CadnaA per a la realització de simulacions.

A la Figura 7 es mostra el mapa final sobre el que es treballarà i es realitzaran els càlculs, amb corbes de nivell cada 5 metres.

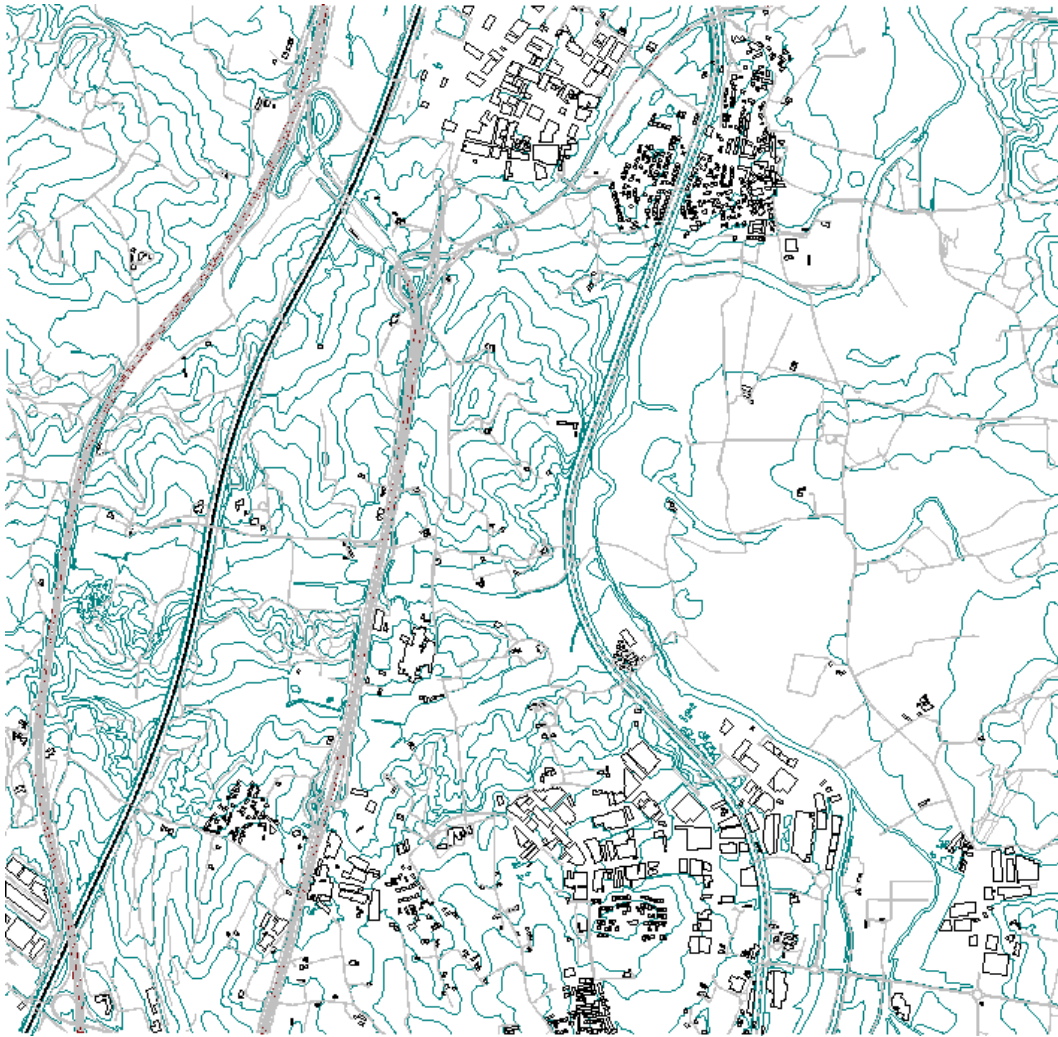


Figura 7. Mapa final per a la simulació

2.10.4 Configuració de càlculs

Uns càlculs més precisos requereixen un major temps de processat, de manera que s'ha de buscar un equilibri entre la precisió dels resultats finals i el temps de càlcul necessari. La configuració dels següents elements és de gran importància per a l'obtenció d'uns resultats adequats:

- Distància entre punts receptors:

Com més pròxims, més punts formaran el mallat, augmentant considerablement el temps de càlcul. S'ha definit una distància de 10 metres entre punts.

- Alçada dels punts receptors:
Se situaran a 4 metres d'altura relativa, requisit per als mapes acústics europeus.
- Radi màxim de cerca:
És la longitud dels vectors propagats per cada punt receptor. S'ha establert a 3000 metres.
- Número de reflexions:
Defineix quantes reflexions pot realitzar un vector abans no interrompi el seu recorregut. S'ha fixat en tres reflexions per a les mesures d'identificació i una reflexió per als càlculs del mapa de soroll.
- Error màxim:
Afecta a la precisió dels càlculs. S'ha definit un error màxim de 0.1 dB.
- Penalitzacions horàries:
El soroll a la franja horària de tarda té una penalització de 5 dB, mentre que a la franja de nit aquesta penalització és de 10 dB. Aquestes xifres s'han d'afegir al programa com a penalitzacions quan es defineixin les franges horàries.

2.10.5 Execució de la simulació













Tota la configuració i preparació necessaris per al processat de la simulació ha estat realitzada. Es calcularà un mallat diferent i separat per a cada tipologia de trens i un altre per a les carreteres, un total de cinc mallats. Com que s'obtindran resultats de nivell sonor separats, es podrà analitzar millor cada element per separat i realitzar les comparacions lliurement, ja que si es calculessin tots junts només s'obtindria una única malla impossible de separar. Amb els fitxers de mallat que s'obtindran, el programa CadnaA permet carregar múltiples malles i sumar-les logarítmicament de manera automàtica.

3 RESULTATS

3.1 Presentació dels mapes

El CadnaA ha completat els càlculs i ha guardat els resultats en cinc malles separades, que corresponen als trens regionals, mitja distància, mercaderies, d'alta velocitat i les carreteres. Aquestes malles es poden ajuntar i sumar logarítmicament per a estudiar els resultats de tot el conjunt.

Per a la representació gràfica dels mapes acústics es pot optar entre diferents possibilitats, com ara línies isòfones o delimitació d'àrees cada cert nivell de soroll. El programa utilitza per defecte una paleta de colors pròpia. Per a adaptar els mapes a la normativa vigent, aquesta configuració es modificarà i s'utilitzarà la paleta de colors corresponent a la ISO 1996-1:2016. La paleta de colors ISO 1996-1:2016 és la mostrada a la Taula 4.

L (dBA)	Color
> -99.0	
> 35.0	
> 40.0	
> 45.0	
> 50.0	
> 55.0	
> 60.0	
> 65.0	
> 70.0	
> 75.0	
> 80.0	
> 85.0	

Taula 4. Paleta de colors ISO 1996

3.2 Impacte de les carreteres

A les Figures 8 i 9 es mostra el mapa acústic amb el conjunt de totes les tipologies de trens i carreteres per a les franges horàries de dia i nit, respectivament. Per a la franja de tardes no es disposa d'informació per a les carreteres i no s'han inclòs al càlcul perquè les distribucions estadístiques del transit no estan contemplades en el model de predicció NMPB 96 (routes), que és el que s'utilitza en aquesta predicció acústica i converteix les dades de trànsit introduïdes en dades acústiques.

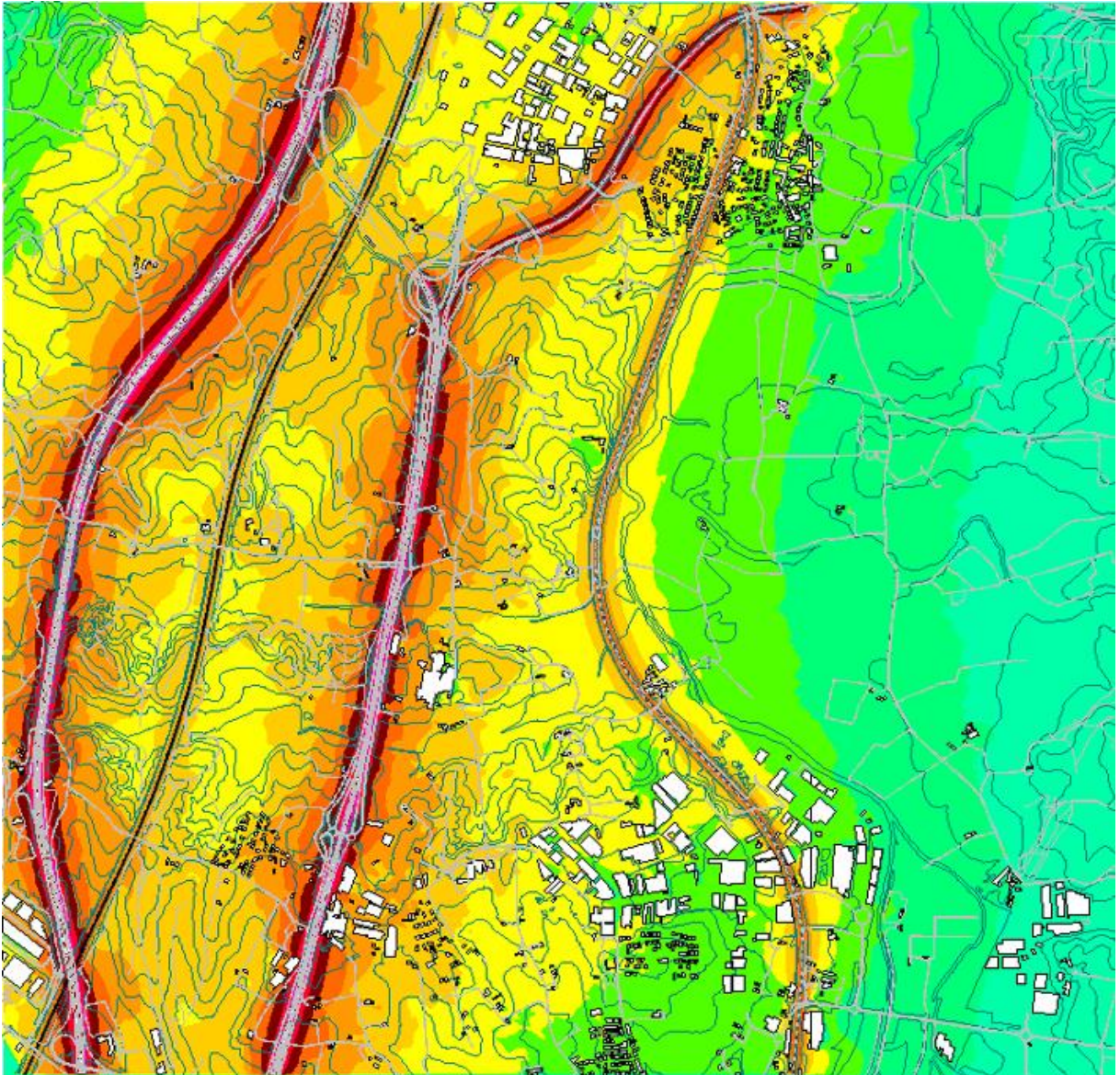


Figura 8. Mapa acústic de carreteres i trens, franja diürna

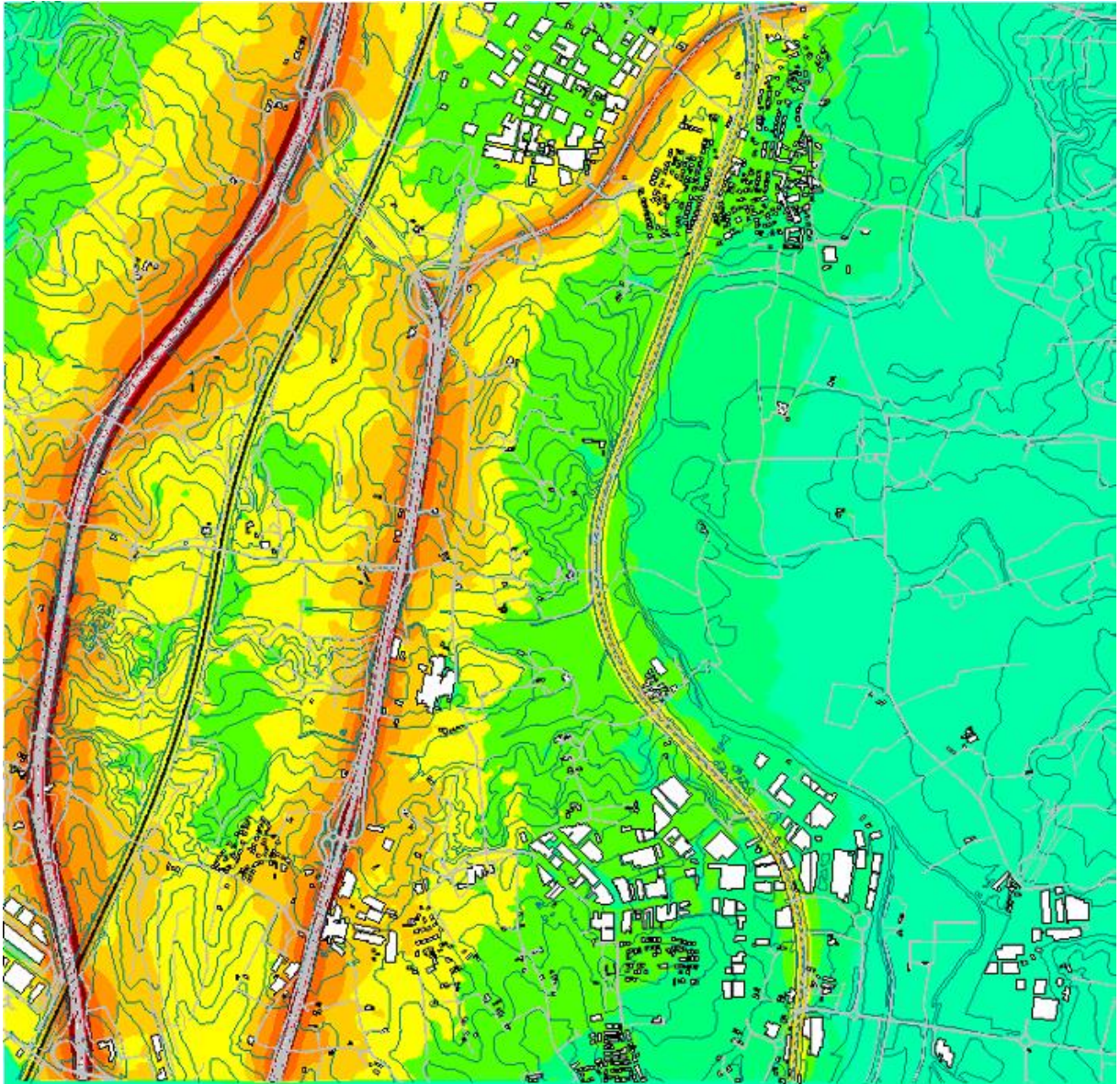


Figura 9. Mapa acústic de carreteres i trens, franja nocturna

Destaca ja a primera vista la notòria diferència entre el soroll emès per les carreteres i l'emès pels trens. Per a comprovar la magnitud d'aquesta diferència, a les Figures 10 i 11 es mostren els mapes acústics només amb carreteres i només amb trens per a la franja diürna i per a la nocturna.

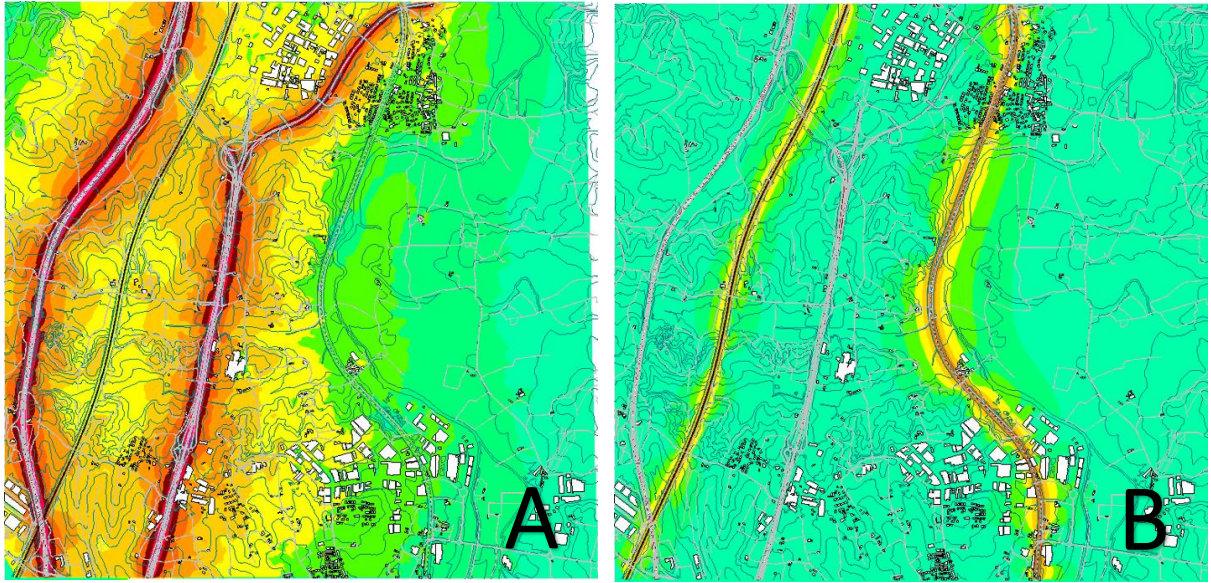


Figura 10. Mapa acústic diürn de carreteres (A) i trens (B)

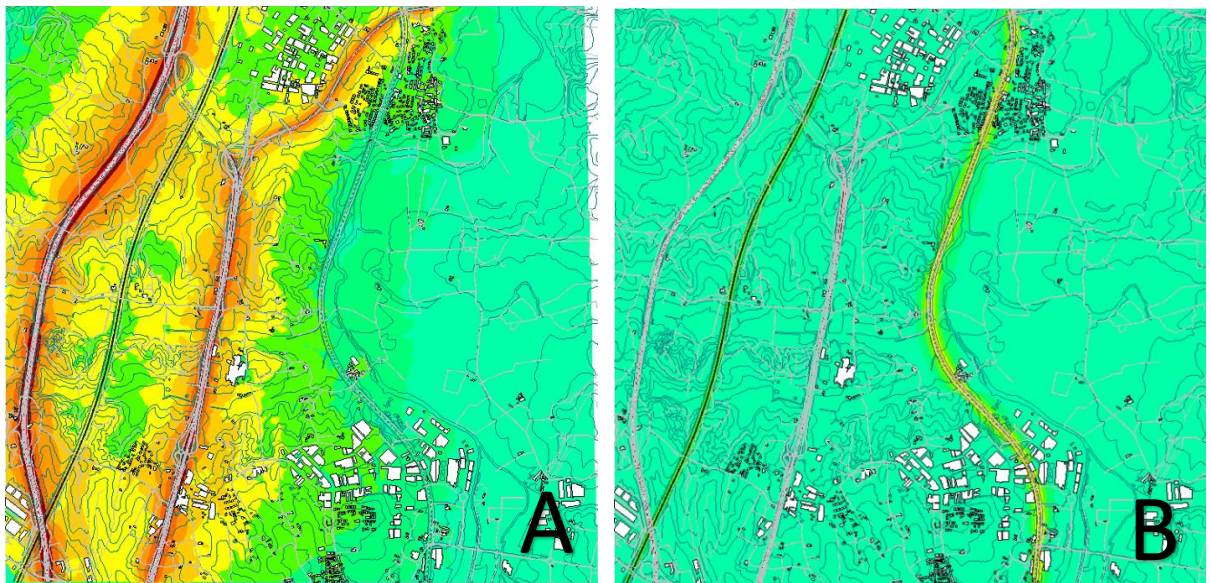


Figura 11. Mapa acústic nocturn de carreteres (A) i trens (B)

Aquesta diferència tan gran és deguda al flux de trànsit a les carreteres i a la freqüència de pas dels trens. En el moment que un tren circula per la via, el soroll que emet és molt més gran que el d'una carretera, però aquesta emissió no és continua en el temps, sinó lligada a un esdeveniment puntual de curta durada; la carretera, en canvi, és un emissor constant de soroll. Quan es realitza el mapa acústic d'una àrea per a determinar l'impacte acústic que causen les seves fonts, el soroll causat pels seus esdeveniments es reparteix fent una mitjana per a tot el temps a calcular, tractament que s'ha realitzat anteriorment quan s'ha

calculat el nivell mig i el nivell d'emissió per a cada tipologia de tren. Per tant, queda demostrat que l'impacte acústic de les carreteres és molt més important que el dels trens, de manera que d'ara en endavant es treballarà només amb els nivells sonors provocats per les emissions ferroviàries.

3.3 Comparació acústica entre diferents tipologies de trens

A l'Annex B es recullen tots els mapes acústics obtinguts per a cada tipologia i franja horària per separat, a més dels mapes acústics amb múltiples fonts aplicades simultàniament que es considerin de major rellevància. A continuació, a les Figures 12, 13, 14 i 15 es mostraran fragments de mapes on hi ha representat l'impacte acústic de cada tipologia de tren durant el dia per tal d'il·lustrar parcialment la diferència entre ells. Les seccions mostrades per als tres trens convencionals són la mateixa.

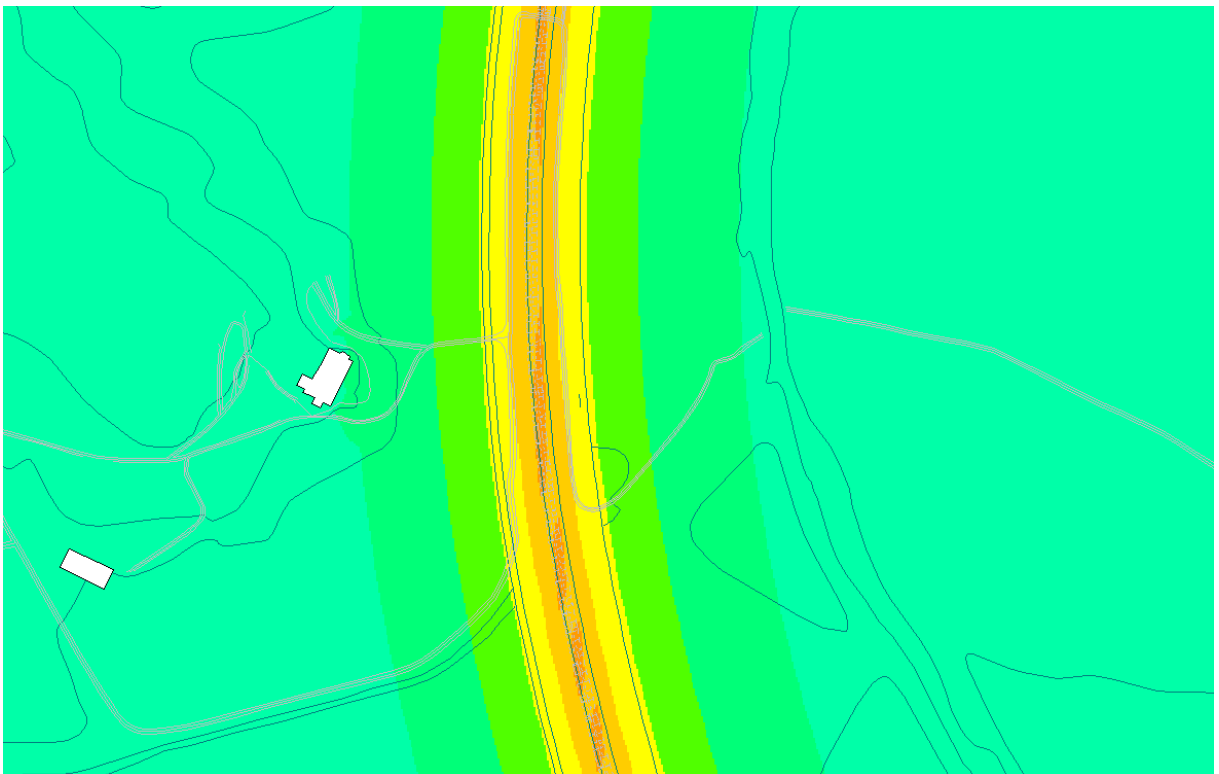


Figura 12. Fragment de mapa acústic diürn de tren regional

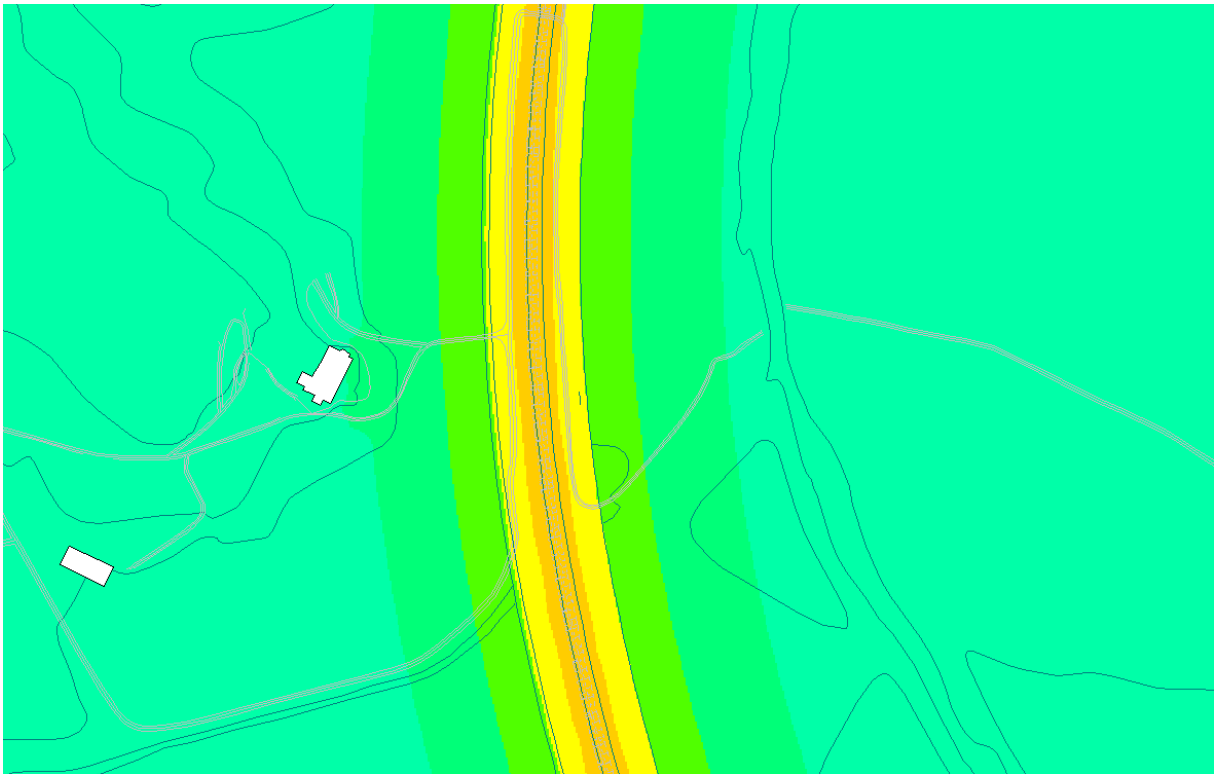


Figura 13. Fragment de mapa acústic diürn de tren mitja distància

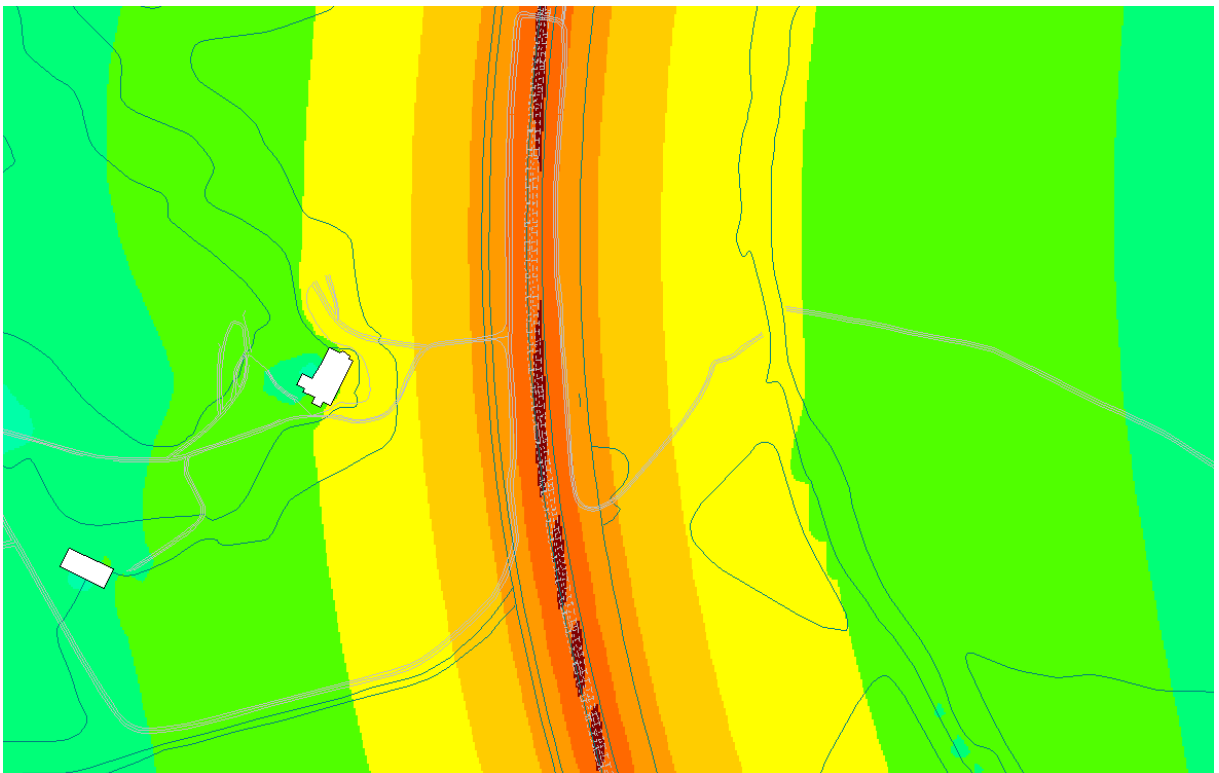


Figura 14. Fragment de mapa acústic diürn de tren de mercaderies



Figura 15. Fragment de mapa acústic diürn de tren d'alta velocitat

3.4 Anàlisi d'impacte acústic en diferents receptors

Al mapa s'han seleccionat tres punts per a comparar dades numèriques entre cada un dels mapes acústics d'interès. Aquests punts s'han seleccionat arbitràriament, però s'ha escollit un punt molt proper a les vies dels trens convencionals, un punt molt proper a les vies dels trens d'alta velocitat i un punt entre tots dos trams. La Figura 16 mostra la ubicació d'aquests punts.

Els punts escollits són:

- Punt 1, al costat del tram convencional. Coordenades UTM 484160.03, 4642237.05.
- Punt 2, al costat del tram d'alta velocitat. Coordenades UTM 482020.10, 4640967.85.
- Punt 3, localitzat entre els dos anteriors. Coordenades UTM 482779.62, 4640347.38.

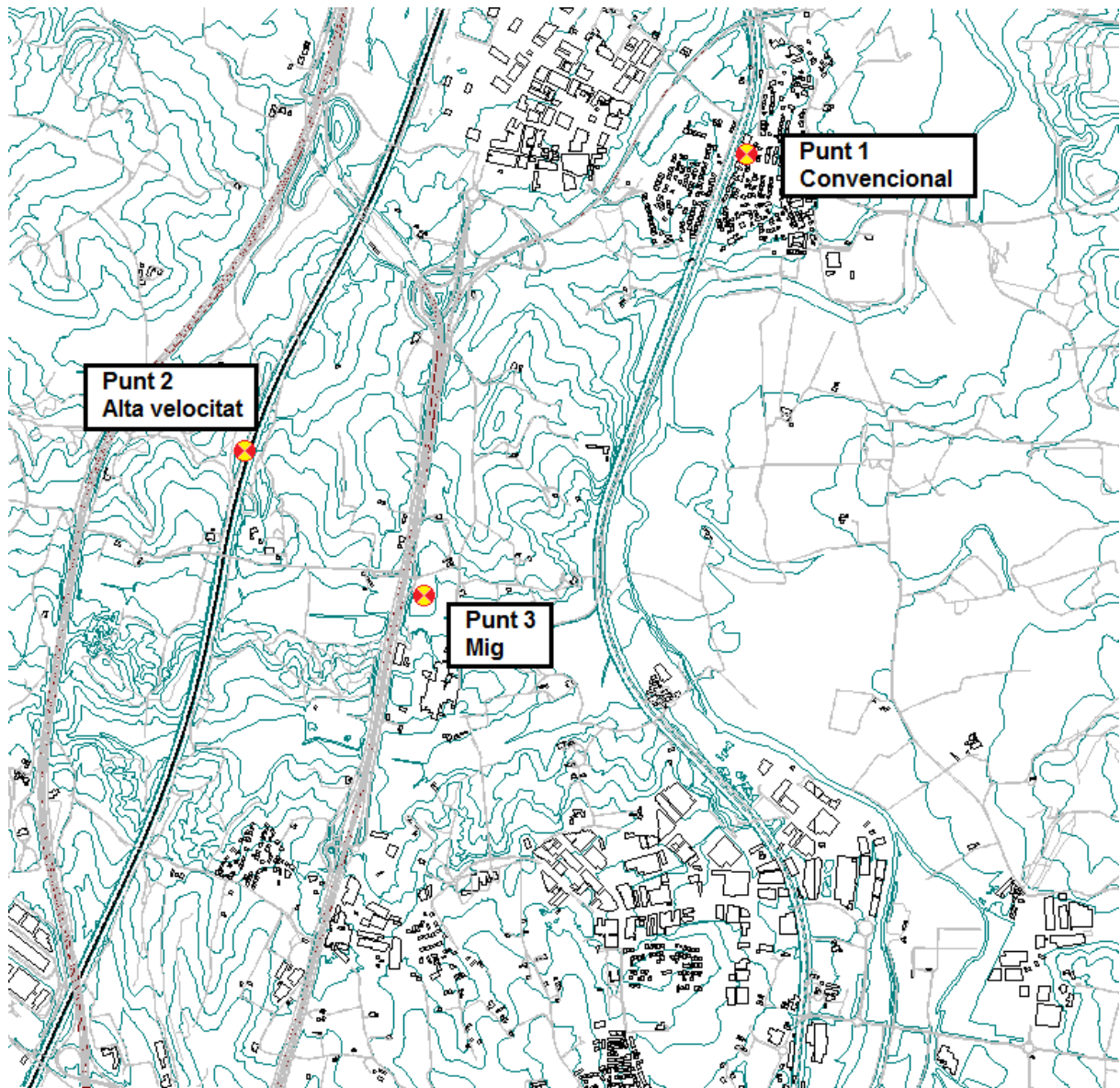


Figura 16. Punts de mapa acústic seleccionats

A la Taula 5 es llisten els nivells de soroll per a diferents trens i franges horàries. A la nit no circulen regionals i no hi ha dades de carreteres per la franja horària de la tarda, o sigui que aquests valors s'ometran.

L (dBA)	Punt 1 (Convencional)			Punt 2 (Alta vel.)			Punt 3 (Mig)		
	Dia	Tarda	Nit	Dia	Tarda	Nit	Dia	Tarda	Nit
Regional	42.4	33.7	---	10.2	1.5	---	16.9	8.2	---
Mitja distància	41.6	41.5	31.6	7.8	7.7	-2.2	15.0	14.9	5.0
Mercaderies	53.7	53.7	43.7	18.2	18.2	8.2	26.4	26.4	16.4
Alta velocitat	5.6	3.5	-7.9	52.7	50.6	39.2	23.9	21.8	10.4
Regional + MD	45	42.2	31.6	12.2	8.6	-2.2	19.1	15.7	5.0
Convencionals (reg.+MD+merc.)	54.3	54.0	44.0	19.1	18.6	8.6	27.2	26.8	16.7
Convencional + Alta velocitat	54.3	54.0	44.0	52.7	50.6	39.2	28.8	28.0	17.6
Conv. + Alta vel. + Carreteres	54.7	---	45.4	54.0	---	46.0	60.2	---	54.0
Carreteres	44.0	---	40.0	48.2	---	45.0	60.1	---	54.0

Taula 5. Nivells de soroll per a diferents mapes i punts

4 ANÀLISI DE RESULTATS

Un cop mostrada la informació corresponent per a cada tipologia tant numèrica com gràficament, es pot realitzar una comparació entre els diferents trens i franges horàries. Per a aquests contrastos és important, sobretot, fixar-se en:

- Nivell d'emissió de la font. Taula 3, apartat 2.8.
El soroll que emet la font, independentment de la seva situació, extrapolable a tot arreu on es trobi sota les mateixes condicions. Defineix si la font en sí mateixa és més o menys sorollosa.
- Soroll rebut als tres punts receptors marcats a la simulació. Taula 5, apartat 3.4.
Els valors obtinguts es veuen afectats pel nivell d'emissió de les fonts, la freqüència d'esdeveniments acústics, la distància amb la font, la geografia de l'entorn i les edificacions i obstacles de les proximitats. Mostra l'efecte de la font de soroll sobre l'entorn.
- Mapes acústics. Annex B.
Si bé els mapes perden precisió numèrica en la seva representació i són més un complement que no pas uns resultats en sí mateixos, permeten denotar diferències clares entre tipologies i situacions.

Quan a la Taula 1, dins l'apartat 2.8, s'ha llistat la mitjana de nivells acústics per a cada tipologia de trens, els mercaderies mostraven els valors més elevats, seguits pels trens d'alta velocitat. Els regionals i els mitja distància, ja força per sota, tenien uns nivells acústics semblants. Aquests valors són els nivells mitjos d'un sol esdeveniment acústic de cada tipologia.

Un cop definida la freqüència de pas dels trens i calculat el seu nivell d'emissió, recollida a la Taula 3 de l'apartat 2.8, es pot apreciar realment si una tipologia emet més o menys soroll. El tren que té uns valors més elevats i, per tant, el que més soroll aporta a l'entorn, és el de mercaderies, clarament superior a tots els altres en qualsevol franja horària. El segon tren més important pel seu impacte acústic és el tren d'alta velocitat, seguit del regional i, finalment, del mitja distància. En aquesta comparació de potències acústiques, però, pot resultar confús definir amb certesa quina és la font més sorollosa, ja que per a alguns nivells d'octaves els valors són més elevats per a, per exemple, el tren regional que no pas el d'alta

velocitat. Per això és important realitzar una simulació i recollir-ne els nivells de soroll resultants, així es podrà comparar el soroll que aporta cada tipus de font a l'entorn amb una única xifra per franja horària.

A la Taula 5 de l'apartat 3.4 es mostren aquests nivells de soroll. Per a comparar la importància de cada tipologia de tren en el conjunt, s'utilitzen els valors obtinguts al Punt 1 per als trens convencionals i al Punt 2 per als d'alta velocitat per a comparar-los, ja que són els punts de màxima proximitat amb les vies. El Punt 3, situat a una zona equidistant a les dues vies, permet contrastar l'aportament de cada tipologia i combinació de trens a una major distància.

Vistos aquests últims resultats es pot afirmar, ara sí amb total certesa, que els trens de mercaderies són els que provoquen un major augment en el nivell de soroll de l'entorn per a qualsevol franja horària. Els trens d'alta velocitat es troben per sota, a 1 dBA de distància per a la franja diürna però al voltant de 4 dBA per sota en les franges de tarda i de nit, però en qualsevol cas són una font amb nivells més elevats que els regionals o els mitja distància. Entre aquests dos trens convencionals, El regional té un impacte major durant el dia respecte el mitja distància, si bé la diferència no arriba a 1 dBA, però a la tarda el mitja distància passa a ser clarament superior. A la nit no circulen trens regionals, de manera que la seva aportació és nul·la.

Que els trens de mercaderies siguin molt més sorollosos que qualsevol altre tren convencional pot ser degut a diferents causes. Primer de tot, els trens de mercaderies són d'una longitud molt més gran que els regionals i mitja distància, de manera que cada tren de mercaderies emet soroll durant més temps i això augmenta considerablement la seva contribució als nivells de soroll de l'entorn. En segon lloc, degut a les diferents càrregues i sistemes de subjecció, les vibracions que pateix un tren de mercaderies són molt superiors a les de qualsevol tren de passatgers. Finalment, els vagons d'un tren de mercaderies no solen tenir un disseny on s'hagi donat tanta importància al soroll generat a altes velocitats com en un tren de passatgers, a més d'haver-hi vagons amb càrrega descoberta o amb elements sorollosos com ara lones, de manera que les fonts d'origen aerodinàmic són d'una importància molt considerable.

Dins els trens de passatgers, els trens d'alta velocitat són molt més sorollosos que les tipologies convencionals. Els trens d'alta velocitat, com el seu propi nom indica, circulen a velocitats molt més elevades que un regional o un mitja distància, de manera que el seu

soroll per fonts d'origen aerodinàmic és molt més important, i precisament per això el seu disseny se centra en minimitzar aquestes emissions acústiques. En el cas dels trens d'alta velocitat hi ha un altre factor a tenir en compte: la freqüència de pas. Per als trens convencionals, la freqüència de pas era més o menys similar per a tots, de manera que no implicava un factor diferenciador a tenir en compte, però per als trens d'alta velocitat és un element clau, ja que circulen aproximadament tants trens d'alta velocitat com regionals i mitja distància junts. Si bé s'estima, com s'ha vist abans, que el nivell d'emissió dels trens d'alta velocitat és superior a la dels trens de passatgers convencionals, la seva freqüència de pas elevada té també un paper important en aquesta diferència de nivell sonor vista en la simulació.

Per a comprovar si per als trens d'alta velocitat té més pes el nivell d'emissió del tren o la seva freqüència de pas, a la Taula 5 s'ha inclòs també el nivell de soroll captat pel pas combinat de regionals i mitja distància, que junts sumen una freqüència de pas similar a la dels d'alta velocitat. Comparant aquests valors, es veu que els trens d'alta velocitat segueixen provocant un nivell de soroll més elevat que els trens convencionals de passatgers tot i tenir ara una freqüència de pas similar, de manera que es pot afirmar que els trens d'alta velocitat son més sorollosos que els trens de passatgers convencionals.

5 AVALUACIÓ LEGAL DELS RESULTATS

L'avaluació legal d'aquests resultats es realitzarà d'acord amb el Recull legislatiu de la Generalitat de Catalunya per a la gestió i avaluació de l'acústica ambiental (2010), Reglament aprovat per la Llei 16/2002, de 28 de juny, de protecció contra la contaminació acústica, i annexos modificats segons el Decret 176/2009, de 10 de novembre.

Segons aquest Reglament, l'àrea estudiada es classifica com a zona de sensibilitat acústica alta, denominació que es considerarà adequada degut a la presència d'habitatges aïllats al medi rural, que no formen part de cap nucli de població i que estan habitats de forma permanent (Recull legislatiu de la Generalitat de Catalunya per a la gestió i avaluació de l'acústica ambiental, 2010). Els valors límits d'immissió de soroll són:

- 57 dBA en període de dia.
- 57 dBA en període de tarda.
- 47 dBA en període de nit.

D'acord amb la Taula 5 de l'apartat 3.4, amb el soroll emès pel transit ferroviari no s'arriba en cap cas estudiat a aquests valors límit.

A les proximitats d'una de les carreteres principals representades, i si s'afegís el soroll emès pel trànsit de carreteres, els valors són superiors, però això és degut únicament a l'impacte del flux de trànsit d'aquestes carreteres, no dels trens, que queden eclipsats amb una aportació quasi menyspreable. El transport per carretera no entra dins l'àmbit d'aquest treball i només s'ha utilitzat de manera comparativa amb el trànsit ferroviari, de manera que els resultats es consideren correctes pel transport de ferrocarrils i s'obvia el de carretera, que requeriria un estudi propi.

6 RESUM DEL PRESSUPOST

Els detalls desglossats es troben a l'Annex C. El cost total de la realització d'aquest estudi és de SET MIL SET-CENTS SETANTA-NOU EUROS (7.779 €). S'afegeix a aquest valor un 21% d'IVA. El valor final és de **NOU MIL QUATRE-CENTS DOTZE EUROS AMB CINQUANTA-NOU CÈNTIMS (9.412,59 €)**.

7 CONCLUSIONS

S'ha comprovat que l'impacte acústic de les diferents tipologies de trens està clarament diferenciat segons el tipus de tren que s'estigui analitzant. Els trens d'alta velocitat han mostrat majors emissions de soroll que els trens de transport de passatgers convencionals, tant regionals com mitja distància, però els trens de mercaderies han resultat ser els més sorollosos. Els trens de mercaderies, però, no s'adeqüen als estàndards comuns en les altres tipologies, ja que una major longitud, vagons descoberts i la presència d'una gran quantitat d'elements vibratoris el distancien de la resta.

Els trens d'alta velocitat resulten més sorollosos que els trens de passatgers convencionals per l'increment de les fonts d'origen aerodinàmic proporcional a la velocitat de desplaçament, que li atorga un major nivell d'emissió. A més, una major freqüència de circulació provoca que la seva contribució al nivell de soroll de l'entorn sigui també més gran, ja que més esdeveniments acústics impliquen aportar més potència a aquests nivells.

També és interessant analitzar a quines freqüències emeten més soroll cada una de les tipologies. Els trens convencionals tenen els valors d'emissió més grans a les freqüències de 250 i 500 Hz; en canvi, els trens d'alta velocitat emeten els valors més grans a les freqüències de 1k i 2k Hz; per tant, els trens d'alta velocitat emeten impacte acústic a unes freqüències més grans que els trens convencionals, siguin trens regionals, mitja distància o mercaderies.

Albert Antiñolo Velázquez

Girona, 6 de juny de 2017

8 RELACIÓ DE DOCUMENTS

1. MEMÒRIA I ANNEXOS

2. Fitxer MESURES.xlsx

El fitxer MESURES conté un recull en diferents pàgines de les mesures de trens convencionals i d'alta velocitat utilitzades per a la realització d'aquest estudi, així com els càlculs de L_{eq} i L_{AE} per a cada tren individual i una representació gràfica de cada tren i de cada sessió de mesura. Com que es lliura tot el conjunt de dades mesurades, inclou també trens declarats invàlids en passos posteriors del tractament i preparació de les mesures. No s'han inclòs les sessions de mesura invalidades per problemes de calibratge del sonòmetre, agent climàtics ni altres possibles problemes d'enregistrament o extracció de dades que poguessin comprometre la seva viabilitat per a ser utilitzades en aquest estudi.

9 BIBLIOGRAFIA

PEREA MELERO, P. et al., Impacto Ambiental de la Alta Velocidad Ferroviaria, 1992.

ZALBIDEA GARMENDIA, J. L., El futur del transport de mercaderies per ferrocarril, 2006.

RUANO GÓMEZ, A., Las líneas de Alta Velocidad frente a las convencionales. Adaptación de las líneas convencionales a Velocidad Alta, 2007.

EGUIGUREN ROCOSA, A., Estudi del soroll del tren a la ciutat de Girona, 2008

KONSTANTINOS VOGIATZIS, GEORGES KOUROUSSIS, Airborne and Ground-Borne Noise and Vibration from Urban Rail Transit Systems, 2017

MINISTERIO DE FOMENTO, Informe 2015 sobre el sector de autopistes de peaje en España, 2016.

Recull legislatiu de la Generalitat de Catalunya per a la gestió i avaluació de l'acústica ambiental, 2010.

Llei 16/2002, de 28 de juny, de protecció contra la contaminació acústica.

Annexos modificats de la Llei 16/2002, de 28 de juny, segons el Decret 176/2009, de 10 de novembre.

ISO 1996-1:2016, Acoustics. Description, measurement and assessment of environmental noise.

RENFE, Renfe, www.renfe.com, 23 de març de 2017.

INSTITUT CARTOGRÀFIC I GEOLÒGIC DE CATALUNYA, Base topogràfica de Catalunya 1:5.000. Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, <http://www.icgc.cat/Administracio-i-empresa/Descarregues/Cartografia-topografica/Base-topografica-de-Catalunya-1-5.000>, 8 d'abril de 2017.

10 RECULL D'ABREVIATURES

L: Nivell acústic o nivell de pressió sonora (dB)

L_{eq} : Nivell acústic equivalent o nivell de pressió sonora equivalent (dB)

L_{AE} : Nivell acústic equivalent a un segon o nivell de pressió sonora equivalent a un segon (dB)

LZT: Nivell acústic o nivell de pressió sonora en ponderació Z amb base de temps T (dBZ)

LAT: Nivell acústic o nivell de pressió sonora en ponderació A amb base de temps T (dBA)

LOct: Nivell acústic o nivell de pressió sonora en banda d'octava (dB)

IMD: Intensitat mitjana diària (vehicles per unitat de temps)

Reg.: Tren regional

MD: Tren de mitja distància

Merc.: Tren de mercaderies