

12. CÀLCUL DE LES DISTÀNCIES A LES ISÒFONES

Aquest càlcul es basarà en el mètode del C.E.R.T.U. explicat en l'apartat 8 d'aquest treball. Habitualment, aquest mètode parteix d'una sèrie de dades i dóna com a resultat el nivell sonor produït per un determinat trànsit de trens a una certa distància de les vies. Aquí haurem de modificar aquesta manera de treballar ja que la nostra incògnita és precisament la distància a la que es produeix un nivell sonor donat que ve imposat per les lleis. És a dir, la nostra fórmula de treball per obtenir la distància desitjada provindrà de seguir un camí invers al que marca el C.E.R.T.U. en condicions habituals.

12.1. OBTENCIÓ DE DADES

L'aplicació del mètode del C.E.R.T.U. requereix fixar i determinar tota una sèrie de dades necessàries en el càlcul. Algunes d'aquestes dades, sempre de forma justificada, es prendran directament de les recomanacions del mètode. Altres, s'han de definir de forma específica per aquesta tesina ja que fan referència a les característiques dels trens catalans i de les vies i terreny per on circulen. A continuació s'explica com s'han escollit les dades a utilitzar.

12.1.1. Característiques dels trens

Els tres primers paràmetres fan referència directa a les característiques dels trens que circulen per la línia d'estudi: longitud, velocitat i número de circulacions. A l'hora de determinar-los, s'ha decidit prendre els seus valors mitjans enlloc dels seus màxims. Aquests valors màxims seran els adequats per calcular mesures protectores o correctores com per exemple pantalles antisoroll ja que ens deixaran del costat de la seguretat i de les persones. En el nostre cas, però, es tracta de determinar el nivell sonor habitual i diari al que es troba exposat el nostre territori. Així doncs, resultaria excessiu usar uns màxims que es donen en moments puntuals de la circulació i que podrien conduir-nos a sobredimensionar el problema real.

El quart paràmetre, una altra característica dels trens que el mètode requereix determinar, és a quina de les quatre categories definides pel C.E.R.T.U. pertanyen els trens de les línies Barcelona - Vallès i Llobregat - Anoia.

S'han caracteritzat, per un cantó, la línia Barcelona - Vallès i, per altre cantó, el tram Barcelona - Martorell de la línia Llobregat - Anoia.

12.1.1.1. Categoria dels trens

Els trens de la línia Barcelona - Vallès pertanyen tots a la mateixa categoria: trens de rodalies lleugers i metros, atès que no hi circulen trens de llarga distància ni de mercaderies. El trànsit de mecanismes aïllat (manteniment, inspecció, etc.) es pot considerar menyspreable respecte el trànsit principal. Això suposa un cert avantatge en el procés posterior ja que facilita en cert grau el càlcul.

12. CÀLCUL DE LES DISTÀNCIES A LES ISÒFONES

Pel que fa referència a la línia Llobregat - Anoia, sí que es poden distingir dues categories: trens de rodalies i de mercaderies.

12.1.1.2. Longitud dels trens, L

Per la línia Barcelona - Vallès circulen els models UT 111 i 112. El primer circula per la zona de túnel urbà fins al Tibidabo i Reina Elisenda i el segon cobreix la part que arriba fins a Sabadell i Terrassa ja a cel obert. Òbviament, serà aquest últim els que ens interessarà i determinarà el valor que busquem. Com ja s'ha justificat en l'apartat 10.3.1, la composició més habitual d'aquest tren és la de quatre cotxes amb una longitud mitja total de 78 metres.

Els trens de viatgers que circulen pel trajecte Barcelona – Martorell són el UT 211. Els més comuns són els formats per tres cotxes, que tenen una longitud total de 54 m. Pel que fa referència a trens de mercaderies, hem considerat un tren de referència compost d'una locomotora model 254 amb 40 vagons de sal i 22 de potassa, un total de 370 metres.

LÍNIA	TIPUS DE TREN	LONGITUD MITJA TREN (m)
Barcelona - Vallès	Transport de viatgers	78
Llobregat - Anoia	Transport de viatgers	54
	Transport de mercaderies	370

Taula 12.1 Longitud dels trens (elaboració pròpia)

12.1.1.3. Velocitat dels trens, v

La velocitat dels trens s'ha calculat considerant la longitud i el temps de viatge de cada tram. Com s'observa en les taules que s'adjunten a continuació, les velocitats reals de circulació són bastant inferiors a les màximes tècniques que permeten els vehicles ferroviaris. Fent un càlcul "in situ" de la velocitat s'obtenen resultats semblants als calculats numèricament. Les dades s'han obtingut de documentació procedent de F.F.G.C..

LÍNIA BARCELONA - VALLÈS			
Recorregut comú			
Tram	Longitud (m)	Temps viatge (min)	Velocitat mitja (Km/h)
Barcelona - Valldoreix	13990	21,5	39
Valldoreix - St. Cugat	1325	3,5	23
Línia S1			
Tram	Longitud (m)	Temps viatge (min)	Velocitat mitja (Km/h)
St. Cugat - Rubí	4809	7	41
Rubí - Terrassa	9340	9	62
Línia S2			
Tram	Longitud (m)	Temps viatge (min)	Velocitat mitja (Km/h)
St. Cugat - Bellaterra	4499	7,5	36
Bellaterra - UAB	1175	2,5	28
UAB - Sabadell	6563	7	56

12. CÀLCUL DE LES DISTÀNCIES A LES ISÒFONES

LÍNIA LLOBREGAT - ANOIA			
Transport de viatgers			
Tram	Longitud (m)	Temps viatge (min)	Velocitat mitja (Km/h)
Barcelona - Molí Nou /CC	10245	20	31
Molí Nou/CC - Can Ros	5229	9	35
Can Ros - El Palau	7691	10	46
El Palau - Martorell Enllaç	5531	8	41

LÍNIA LLOBREGAT - ANOIA	
Transport de mercaderies	
Tram	Velocitat mitja (Km/h)
Sant Boi - Martorell Enllaç	40

Taula 12.2 Velocitat dels trens (elaboració pròpia)

En el cas del trànsit de mercaderies, tenint en compte que els trens circulen durant els períodes de dia i vespre i per tant estan sotmesos a les velocitats del trens de viatgers, agafarem com a velocitat mitja del trànsit de mercaderies la velocitat mitja del trànsit de viatgers en el tram Barcelona - Martorell: 40 Km/h.

12.1.1.4. Número de circulacions, n

Aquest paràmetre és l'únic que depèn del període del dia que es consideri. Com s'ha dit, es consideren tres períodes:

PERÍODE DEL DIA	DURADA	
Dia	12 hores	43200 segons
Vespre	4 hores	14400 segons
Nit	8 hores	28800 segons

Taula 12.3 Períodes del dia (elaboració pròpia)

Cadascun dels períodes presenta un volum i característiques del trànsit de passatgers i per tant el número de trens no és uniforme al llarg del dia. De nou, les dades s'han extret de fonts oficials de F.F.G.C.. Òbviament el percentatge més gran de trens circula durant els dia, especialment a primera hora del matí (viatges a la feina), entre les 13 i 15 hores (hora de dinar) i entre les 17 i 20 hores (sortides de la feina).

LÍNIA BARCELONA - VALLÈS				
Recorregut comú				
Tram	n dia	n vespre	n nit	n total
Barcelona - Valldoreix	296	94	44	434
Valldoreix - St. Cugat	296	94	44	434
Línia S1				
Tram	n dia	n vespre	n nit	n total
St. Cugat - Rubí	126	54	22	202
Rubí - Terrassa	112	28	22	162
Línia S2				
Tram	n dia	n vespre	n nit	n total
St. Cugat - Bellaterra	170	40	22	232
Bellaterra - UAB	170	40	22	232
UAB - Sabadell	146	40	22	208

12. CÀLCUL DE LES DISTÀNCIES A LES ISÒFONES

LÍNIA LLOBREGAT – ANOIA (viatgers)				
Tram	n dia	n vespre	n nit	n total
Barcelona - Molí nou/Ciutat cooperativa	248	76	52	376
Molí nou/Ciutat cooperativa - can ros	160	48	26	234
Can Ros - El Palau	148	48	24	220
El Palau - Martorell enllaç	148	48	24	220

LÍNIA LLOBREGAT – ANOIA (mercaderies)				
Tram	n dia	n vespre	n nit	n total
St. Boi - Martorell	3	1	0	4

Taula 12.4 Número de circulacions (elaboració pròpia)

12.1.2. Constants: K_d (correcció per directivitat) i K (coeficient multiplicador de la funció distància que depèn de la longitud del tren)

La primera constant té en compte la directivitat i la segona, els efectes d'absorció de l'aire i la longitud dels trens. Aquests valors responen a complexos estudis experimentals que no es poden reproduir en aquesta tesina i per tant es consideraran com a suficientment acurats els valors proposats pel C.E.R.T.U. Aquests valors es troben en la taula 8.2 i la figura 8.2. En concret, quan treballem amb trens de rodalies destinats al trànsit de viatgers es prendran valors de $K=17$ i $K_d = 0$ i per trànsit de mercaderies valors de $K=14$ i $K_d = 0$, tenint en compte que els trens de mercaderies del tram d'estudi no són massa llargs.

12.1.3. Valors de referència dels trens: L_0 , v_0 i d_0

Com s'ha explicat al capítol 8, aquests són els valors característics dels trens que circulen per una línia donada d'estudi i a partir dels quals es pot obtenir el nivell sonor a una altra distància i velocitat. El C.E.R.T.U. proposa uns valors que han estat calculats i mesurats pels trens pertanyents a la xarxa de ferrocarril francesos.

En una tesina anterior realitzada a l'ETSECCPB [16], es va estudiar la validesa dels valors francesos a Catalunya mitjançant una sèrie de mesures de camp i, considerant els resultats obtinguts, aquests es van corregir amb -1 dBA respecte els indicats pel C.E.R.T.U. en la taula 8.1.

Per tant, els valors de referència que d'aquí en endavant s'usaran en els càlculs són els que es mostren en la següent taula:

TIPUS DE TRANSPORT	d_0 (m)	L_0	v_0 (Km/h)
Transport de viatgers	7,5	78	60
	15	74	
	25	71	
Transport de mercaderies	7,5	92	80
	15	88	
	25	85	

Taula 12.5 Valors de referència dels trens de F.F.G.C. (elaboració pròpia)

12.2. OBTENCIÓ DE LA FÓRMULA DE TREBALL

Per obtenir la fórmula que ens permeti calcular la distància desitjada partirem de les tres fórmules bàsiques proposades en l'apartat 8 d'aquesta tesina: la 8.1, 8.4 i 8.8.

$$L_{Amàx} = L_0 - K \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + 30 \cdot \log\left(\frac{v}{v_0}\right) - K_d \quad (8.1)$$

$$L_{Aeq(1tren)} = 10 \cdot \log\left(\frac{t_e}{T} \cdot 10^{\frac{L_{Amàx}}{10}}\right) \quad (8.4)$$

$$L_{Aeq(ntrens)} = L_{Aeq(1tren)} + 10 \cdot \log(n) \quad (8.8)$$

En condicions habituals, quan es busca obtenir el nivell sonor, aquestes fórmules s'usen en l'ordre que aquí s'ha mostrat. Nosaltres, per obtenir una distància, haurem de seguir un procés invers. És a dir, fixarem un nivell sonor en la fórmula 8.8 i obtindrem el valor per a un tren ($L_{Aeq(1tren)}$).

$$L_{Aeq(1tren)} = L_{Aeq(ntrens)} - 10 \cdot \log(n) \quad (12.1)$$

A continuació introduïrem aquest valor en la fórmula 8.4 i aïllarem el valor del nivell màxim mesurat al pas d'un tren ($L_{Amàx}$).

$$L_{Amàx} = 10 \cdot \log\left(\frac{T}{t_e} \cdot 10^{\frac{L_{Aeq(1tren)}}{10}}\right) \quad (12.2)$$

S'ha de tenir en compte que el temps d'exposició (t_e) també depèn de la distància a la que es fa la mesura, la nostra incògnita. Aquesta dependència es veu en la fórmula 8.6.

$$t_e = \frac{l}{v} + \frac{6d}{100} \quad (8.6)$$

Aquesta relació entre el temps d'exposició i la distància complicarà l'expressió resultant com es veurà tot seguit.

Per últim, introduïm el valor de $L_{Amàx}$ en la fórmula 8.1. En aquest punt ja tenim una expressió que permet obtenir la distància (d), ja que la resta de paràmetres són coneguts. Aquesta expressió a la que s'arriba finalment és la següent (12.3):

$$10 \cdot \log\left(\frac{T}{3,6 \cdot \frac{l}{v} + 0,06 \cdot d} \cdot 10^{\frac{L_{eq(ntrens)} - 10 \log(n)}{10}}\right) + K \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) - L_0 - 30 \cdot \log\left(\frac{v}{v_0}\right) + K_d = 0$$

12. CÀLCUL DE LES DISTÀNCIES A LES ISÒFONES

Com s'observa en aquesta expressió, el caràcter logarítmic de les fórmules de les quals es parteix no permet aïllar de forma directa el valor de la distància.

Aquesta expressió és la que resulta més còmode de tractar ja que si s'intenta anar més enllà en la seva manipulació és pot complicar bastant el càlcul. Per tant, es presenten bàsicament dues formes de resoldre el problema:

1. Per iteració. És a dir, introduir la fórmula en un full de càlcul i anar avaluant la funció en diferents valors de la distància (d) fins obtenir aquell que fa zero la fórmula.

2. Trobant el zero de la funció. Per fer-ho així, s'ha d'elaborar un algoritme i executar-lo en algun programa matemàtic més avançat.

Les dues maneres permeten arribar al resultat però presenten avantatges i inconvenients. El primer és molt més fàcil de programar però resulta més lent arribar a la solució (s'han d'anar provant diferents valors) i és difícil trobar la solució de forma precisa. El segon requereix una programació més elaborada però, un cop fet, dóna la solució amb un error menyspreable donat l'origen experimental de tot el raonament. Un problema comú a totes dues maneres de treballar és la necessitat de comptar amb una aproximació inicial.

La solució adoptada finalment consisteix en buscar una aproximació inicial mitjançant una iteració. Això resulta relativament ràpid ja que no cal gaire precisió i es veu fàcilment quan la solució comença a tendir a zero. Un cop fet aquest pas, s'utilitza aquesta aproximació per implementar l'algoritme creat i obtenir la solució exacta.

El primer pas, la iteració, s'ha fet amb una pàgina de càlcul Excel mentre que el zero de la funció s'ha trobat amb el programa Matlab.

Al treballar amb la fórmula que s'ha obtingut s'estan assumint les hipòtesis del mètode del C.E.R.T.U. recollides a l'apartat número 8. Aquestes condicions es recorden tot seguit:

- Circulacions a camp obert sobre carrils soldats i continus i vies amb travesses de formigó i subjeccions clàssiques.
- Distàncies no superiors a 250 m de la via.
- Velocitats superiors a 40 km/h i inferiors a 200 km/h
- Terreny pla i acústicament reflectant.
- Via rectilínia i infinitament llarga.
- Inexistència de grups d'edificis o altres elements reflectants.

Les dues primeres hipòtesis es poden considerar completes sense cap restricció d'importància. La condició que restringeix el rang vàlid de velocitats s'incompleix en el cas d'alguns dels trams d'estudi. Es pren aquesta llibertat per tal de ser més fidel a les característiques dels trens circulants per la línia d'estudi. Les condicions que afecten a la via i al terreny es suposen certes donat que deixen del costat segur ja que el terreny pla és la situació més desfavorable per a la gent que pot viure pels voltants de les vies. Pel que fa

12. CÀLCUL DE LES DISTÀNCIES A LES ISÒFONES

referència a la darrera hipòtesi, l'explicació seria la mateixa atès que la presència d'edificis, tot i augmentar la molèstia dels situats més a prop, apantallarà els habitatges situats al seu darrere.

12.3. METODOLOGIA DE CÀLCUL

Un cop trobada la fórmula de treball i fixades de forma raonada les dades que s'han d'utilitzar en el procés, cal establir una metodologia per realitzar els càlculs de les distàncies de les isòfones corresponents als diferents nivells sonors que especifica la llei.

Abans, però, s'ha de fer una diferenciació entre les dues línies d'estudi: en la línia Barcelona - Vallès hi circulen només trens de viatgers, mentre que en la línia Llobregat - Anoia hi ha dues categories de trens: de viatgers i de mercaderies. Això farà que la metodologia de càlcul de la segona línia sigui més complexa.

12.3.1. Metodologia de càlcul pels trams amb una sola categoria de trens

Per tal d'establir una metodologia, s'ha fet un estudi previ en un dels trams de la línia Barcelona - Vallès: Sant Cugat - Bellaterra. Les dades de càlcul són les següents:

DADES GENERALS				
do (m)	Kd	T dia (s)	T vespre (s)	T nit (s)
25	0	43200	14400	28800

LÍNIA BARCELONA - VALLÈS			
Lo	vo (km/h)	l (m)	K
71	60	78	17

TRAM ST. CUGAT - BELLATERRA			
v (km/h)	n dia	n vespre	n nit
36	170	40	22

Taula 12.6 Dades de càlcul del tram Sant Cugat – Bellaterra (elaboració pròpia)

Primer de tot, seguint l'ordre convencional del mètode del C.E.R.T.U., hem trobat el perfil transversal del nivell sonor en aquest tram. Es parteix de diferents distàncies (d) i, mitjançant les fórmules 8.1, 8.4, 8.6, 8.8 i 4.5, es troben els nivells sonors associats (L_{den} = nivell corregit mitjà dia – vespre - nit).

d (m)	L Amax	L Aeq (1tren) dia	L Aeq (1tren) vespre	L Aeq (1tren) nit	L Aeq (ntrens) dia	L Aeq (ntrens) vespre	L Aeq (ntrens) nit	L den (dBA)
0,2	99,99	62,56	67,34	64,33	84,87	83,36	77,75	86,69
0,5	93,23	55,81	60,58	57,57	78,11	76,60	70,99	79,93
1	88,11	50,71	55,48	52,47	73,01	71,50	65,89	74,83
5	76,23	38,96	43,73	40,72	61,26	59,75	54,14	63,08
10	71,11	34,00	38,77	35,76	56,30	54,79	49,18	58,12
15	68,12	31,16	35,93	32,92	53,46	51,95	46,34	55,28
20	65,99	29,18	33,95	30,94	51,48	49,97	44,36	53,30

12. CÀLCUL DE LES DISTÀNCIES A LES ISÒFONES

25	64,34	27,67	32,45	29,44	49,98	48,47	42,86	51,79
-----------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------------

Taula 12.7 L_{den} associat a una determinada distància (elaboració pròpia)

Es pot realitzar la següent gràfica, on es representen les relacions distància – nivell sonor equivalent durant els períodes de dia, vespre i nit i també la relació distància – L_{den} , utilitzant la notació “24 hores”, ja que correspon al resultat mitjà de tot el dia.

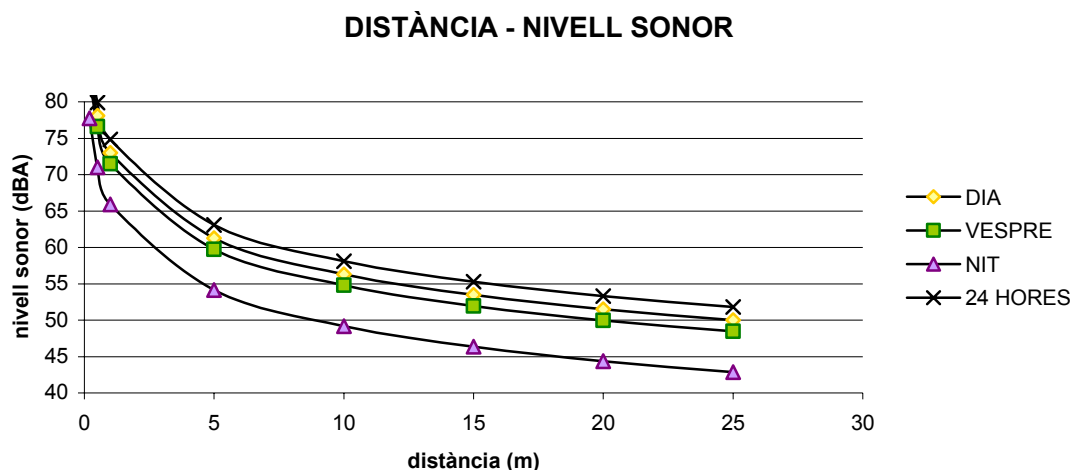


Figura 12.1 Relació entre el nivell sonor i la distància (elaboració pròpia)

Els resultats obtinguts són lògics: L_{den} és superior als L_{Aeq} , ja que, en la fórmula per calcular-lo, s'introdueix una penalització horària de 5 i 10 dBA en les franges del vespre i la nit.

Si s'estudien els resultats, es pot observar que les diferències entre L_{den} i els tres L_{Aeq} (dia, vespre i nit) són sempre constants, sigui quina sigui la distància:

L den - L Aeq dia (dBA)	L den - L Aeq vespre (dBA)	L den - L Aeq nit (dBA)
1,82	3,33	8,94

Taula 12.8 Diferència entre L_{den} i L_{Aeq} (dia, vespre i nit). (elaboració pròpia)

Així doncs, a l'hora de triar els L_{Aeq} , corresponents a cada L_{den} , que cal introduir en la fórmula 12.2 per tal d'obtenir la distància associada, utilitzarem aquestes diferències. En el cas del tram St. Cugat - Bellaterra:

L den (dBA)	L Aeq dia (dBA)	L Aeq vespre (dBA)	L Aeq nit (dBA)
50	48,18	46,67	41,06
55	53,18	51,67	46,06
60	58,18	56,67	51,06
65	63,18	61,67	56,06
70	68,18	66,67	61,06
75	73,18	71,67	66,06

Taula 12.9 L_{Aeq} (dia, vespre i nit) associats a cada L_{den} (elaboració pròpia)

12. CÀLCUL DE LES DISTÀNCIES A LES ISÒFONES

Amb aquests valors ja podem calcular les distàncies. Utilitzant l'algoritme de zero de funcions en Matlab, s'obtenen els següents resultats:

L Aeq dia	Distància (m)
48,18	32,82
53,18	15,61
58,18	7,67
63,18	3,83
68,18	1,93
73,18	0,98

L Aeq vespre	Distància (m)
46,67	32,82
51,67	15,61
56,67	7,67
61,67	3,83
66,67	1,93
71,67	0,98

L Aeq nit	Distància (m)
41,06	32,82
46,06	15,61
51,06	7,67
56,06	3,83
61,06	1,93
66,06	0,98

Taula 12.10 Distàncies associades a cada L_{Aeq} (dia, vespre i nit).
(elaboració pròpia)

Com es pot veure, si es calculen les distàncies amb els diferents L_{Aeq} (dia, vespre i nit) corresponents a un determinat L_{den} , s'obtenen els mateixos valors de la distància. Aquests resultats són lògics i ens permeten establir una relació Nivell Sonor - Distància:

L den (dBA)	Distància (m)
50	32,82
55	15,61
60	7,67
65	3,83
70	1,93
75	0,98

Taula 12.11 Distància associada a un determinat L_{den} fixat per la llei
(elaboració pròpia)

Per comprovar que la metodologia establerta és correcta, podem comparar aquests resultats amb els obtinguts mitjançant el mètode del C.E.R.T.U.:

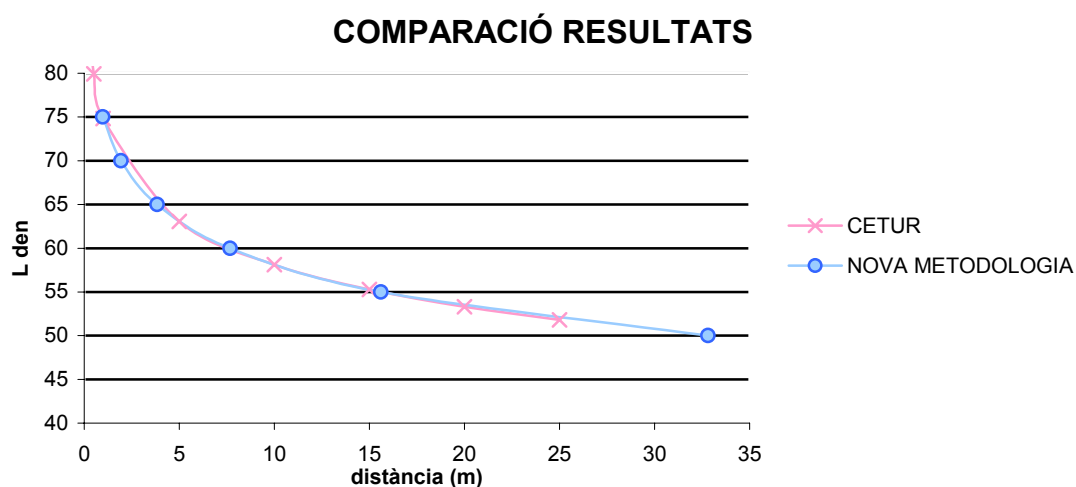


Figura 12.2 Comparació entre els resultats del C.E.R.T.U. i la nova metodologia
(elaboració pròpia)

12. CÀLCUL DE LES DISTÀNCIES A LES ISÒFONES

Veiem que els perfils transversals de soroll coincideixen. Aleshores, podem donar per correcta aquesta metodologia de càlcul. A continuació, en resumim els passos:

1. Partint d'una distància qualsevol, trobarem: $L_{Aeq \text{ dia}}$, $L_{Aeq \text{ vespre}}$, $L_{Aeq \text{ nit}}$ i L_{den} (fórmules 8.1, 8.4, 8.6, 8.8 i 4.5).
2. Calcularem una de les tres distàncies: $L_{den} - L_{Aeq \text{ dia}}$ o $L_{den} - L_{Aeq \text{ vespre}}$ o $L_{den} - L_{Aeq \text{ nit}}$ (no cal calcular-les les tres perquè només n'utilitzarem una). Per exemple, $L_{den} - L_{Aeq \text{ dia}}$.
3. Trobem els $L_{Aeq \text{ dia}}$ associats a cada L_{den} dels fixats per la llei: 50, 55, 60, 65, 70 i 75, utilitzant la diferència anterior.
4. Introduint aquests $L_{Aeq \text{ dia}}$ en la fórmula 12.3, trobarem les distàncies corresponents als nivells sonors definits per la llei.

12.3.2. Metodologia de càlcul pels trams amb més d'una categoria de trens

En la línia Llobregat - Anoià, tenim dues categories de tren: de viatgers i de mercaderies. Per tal d'establir la metodologia de càlcul a aplicar en aquestes circumstàncies, s'ha fet un estudi previ en el tram Molí Nou/Ciutat Cooperativa - Can Ros.

Les dades de càlcul són les següents:

DADES GENERALS				
do (m)	Kd	T dia (s)	T vespre (s)	T nit (s)
25	0	43200	14400	28800

LÍNIA LLOBREGAT - ANOIA	Lo	vo (km/h)	l (m)	K
Transport de viatgers	71	60	54	17
Transport de mercaderies	85	80	370	14

TRAM MOLÍ NOU/CIUTAT COOPERATIVA - CAN ROS				
TIPUS DE TREN	v (km/h)	n dia	n vespre	n nit
Transport de viatgers	35	160	48	26
Transport de mercaderies	40	3	1	0

Taula 12.12 Dades de càlcul del tram Molí Nou – Can Ros (elaboració pròpia)

Primer de tot, partint d'unes distàncies, trobem: per una banda, els L_{Amax} , $L_{Aeq(1tren)}$ i $L_{Aeq(ntrens)}$ corresponents al transport de viatgers i, per altra banda, els mateixos paràmetres corresponents al transport de mercaderies. Per fer-ho, utilitzem les fórmules:

$$L_{Amax} = L_0 - K \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + 30 \cdot \log\left(\frac{v}{v_0}\right) - K_d \quad (8.1)$$

$$L_{Aeq(1tren)} = 10 \cdot \log\left(\frac{t_e}{T} \cdot 10^{\frac{L_{Amax}}{10}}\right) \quad (8.4)$$

12. Càlcul de les distàncies a les isòfones

$$t_e = \frac{l}{v} + \frac{6d}{100} \quad (8.6)$$

$$L_{Aeq(ntrens)} = L_{Aeq(1tren)} + 10 \cdot \log(n) \quad (8.8)$$

TRANSPORT DE VIATGERS							
distància (m)	L Amax	L Aeq (1tren) dia	L Aeq (1tren) vespre	L Aeq (1tren) nit	L Aeq (ntrens) dia	L Aeq (ntrens) vespre	L Aeq (ntrens) nit
0,2	99,62	60,73	65,50	62,49	82,77	82,31	76,64
0,5	92,86	53,97	58,75	55,74	76,02	75,56	69,89
1	87,74	48,88	53,65	50,64	70,92	70,46	64,79
5	75,86	37,18	41,95	38,94	59,22	58,76	53,09
10	70,74	32,28	37,05	34,04	54,32	53,86	48,19
15	67,75	29,49	34,26	31,25	51,53	51,08	45,40
20	65,62	27,57	32,34	29,33	49,61	49,15	43,48
25	63,98	26,11	30,88	27,87	48,15	47,69	42,02

TRANSPORT DE MERCADERIES							
distància (m)	L Amax	L Aeq (1tren) dia	L Aeq (1tren) vespre	L Aeq (1tren) nit	L Aeq (ntrens) dia	L Aeq (ntrens) vespre	L Aeq (ntrens) nit
0,2	105,33	74,20	78,97	75,96	78,97	78,97	0,00
0,5	99,75	68,63	73,40	70,39	73,40	73,40	0,00
1	95,54	64,42	69,19	66,18	69,19	69,19	0,00
5	85,75	54,66	59,43	56,42	59,43	59,43	0,00
10	81,54	50,49	55,26	52,25	55,26	55,26	0,00
15	79,07	48,06	52,83	49,82	52,83	52,83	0,00
20	77,33	46,35	51,12	48,11	51,12	51,12	0,00
25	75,97	45,03	49,80	46,79	49,80	49,80	0,00

Taules 12.13 L_{Aeq} (dia, vespre i nit) associats a una determinada distància (elaboració pròpia)

Partint dels $L_{Aeq(ntrens)}$ dels diferents tipus de tren, en fem la suma logarítmica:

$$L_{AeqCOMBINAT} = Suma_{logaritmica} = 10 \log \left(10^{\frac{L_{AeqVIATGERS}}{10}} + 10^{\frac{L_{AeqMERCADERIES}}{10}} \right)$$

L Aeq (n trens) dia VIATGERS	L Aeq (n trens) dia MERCADERIES	L Aeq (n trens) dia COMBINAT
82,77	78,97	84,28
76,02	73,40	77,91
70,92	69,19	73,15
59,22	59,43	62,34
54,32	55,26	57,83
51,53	52,83	55,24
49,61	51,12	53,44
48,15	49,80	52,06

12. CÀLCUL DE LES DISTÀNCIES A LES ISÒFONES

L Aeq (n trens) vespre VIATGERS	L Aeq (n trens) vespre MERCADERIES	L Aeq (n trens) vespre COMBINAT
82,31	78,97	83,96
75,56	73,40	77,62
70,46	69,19	72,88
58,76	59,43	62,12
53,86	55,26	57,63
51,08	52,83	55,05
49,15	51,12	53,26
47,69	49,80	51,88

L Aeq (n trens) nit VIATGERS	L Aeq (n trens) nit MERCADERIES	L Aeq (n trens) nit COMBINAT
76,64	0,00	76,64
69,89	0,00	69,89
64,79	0,00	64,79
53,09	0,00	53,09
48,19	0,00	48,19
45,40	0,00	45,40
43,48	0,00	43,48
42,02	0,00	42,02

Taules 12.14 L_{Aeq} COMBINAT(dia, vespre i nit). (elaboració pròpia)

Un cop tenim aquests valors de L_{Aeq} (ntrens) COMBINATS, ja podem trobar L_{den} COMBINAT, mitjançant la fórmula:

$$L_{den} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{24} \left(t_d \cdot 10^{\frac{L_{Aeq}(d)}{10}} + t_e \cdot 10^{\frac{L_{Aeq}(e)+5}{10}} + t_n \cdot 10^{\frac{L_{Aeq}(n)+10}{10}} \right) \right) \quad (4.5)$$

distància (m)	L Aeq (n trens) dia COMBINAT	L Aeq (ntrens) vespre COMBINAT	L Aeq (n trens) nit COMBINAT	L den COMBINAT
0,2	84,28	83,96	76,64	86,22
0,5	77,91	77,62	69,89	79,73
1	73,15	72,88	64,79	74,86
5	62,34	62,12	53,09	63,79
10	57,83	57,63	48,19	59,18
15	55,24	55,05	45,40	56,55
20	53,44	53,26	43,48	54,72
25	52,06	51,88	42,02	53,32

Taula 12.15 L_{den} COMBINAT associat a una determinada distància (elaboració pròpia)

Podem representar el perfil transversal del nivell sonor en aquest tram:

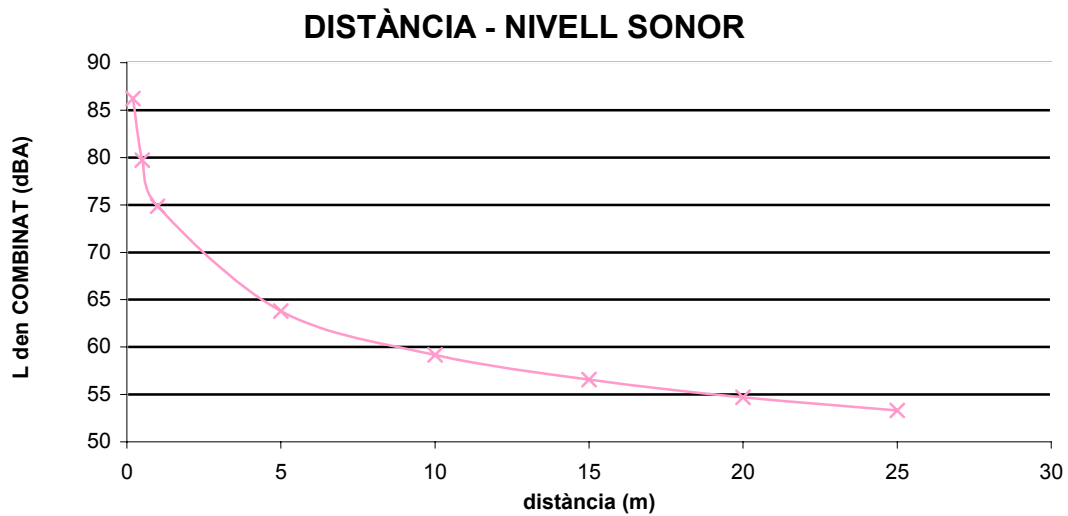


Figura 12.3 Relació entre el nivell sonor i la distància (elaboració pròpia)

Si fem un estudi de la relació $L_{den\ COMBINAT} - L_{Aeq\ COMBINAT}$ (pel dia, vespre i nit), ens adonem que mantenen una relació aproximadament lineal:

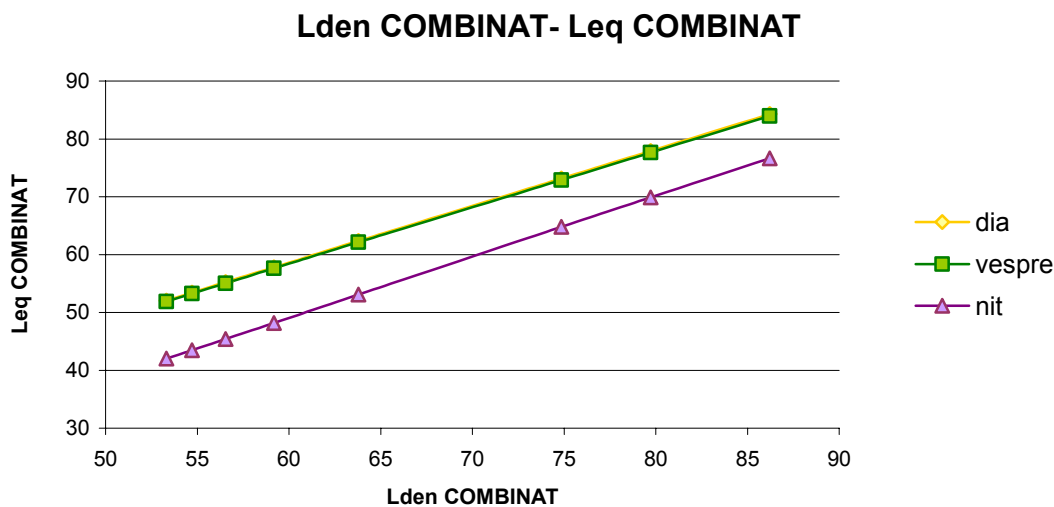


Figura 12.4 Relació entre $L_{den\ COMBINAT}$ i els $L_{Aeq\ COMBINAT}$ (pel dia, vespre i nit) (elaboració pròpia)

Aleshores, podem aproximar aquestes rectes per tal de poder trobar, posteriorment, els $L_{Aeq\ COMBINAT}$ s corresponents als L_{den} definits per la llei (50, 55, 60, 65, 70 i 75).

S'obtenen les següents rectes:

DIA:
$$L_{AeqCOMBINATdia} = -0.2290 + 0.9808L_{denCOMBINAT}$$

VESPRE:
$$L_{AeqCOMBINATvespre} = -0.2039 + 0.9770L_{denCOMBINAT}$$

NIT: $L_{AeqCOMBINATnit} = -13.9944 + 1.0516L_{denCOMBINAT}$

A la pràctica, només utilitzem una d'aquestes equacions, triem per exemple la recta corresponent al període de dia.

L den COMBINAT	L Aeq dia COMBINAT
50	48,81
55	53,71
60	58,62
65	63,52
70	68,43
75	73,33

Taula 12.16 $L_{Aeq COMBINAT dia}$ associats als L_{den} fixats per la llei (elaboració pròpia)

També podem fer un estudi de la relació $L_{Aeq dia COMBINAT} - L_{Aeq dia}$ (per viatgers i mercaderies). Observem que aquesta relació també és aproximadament lineal:

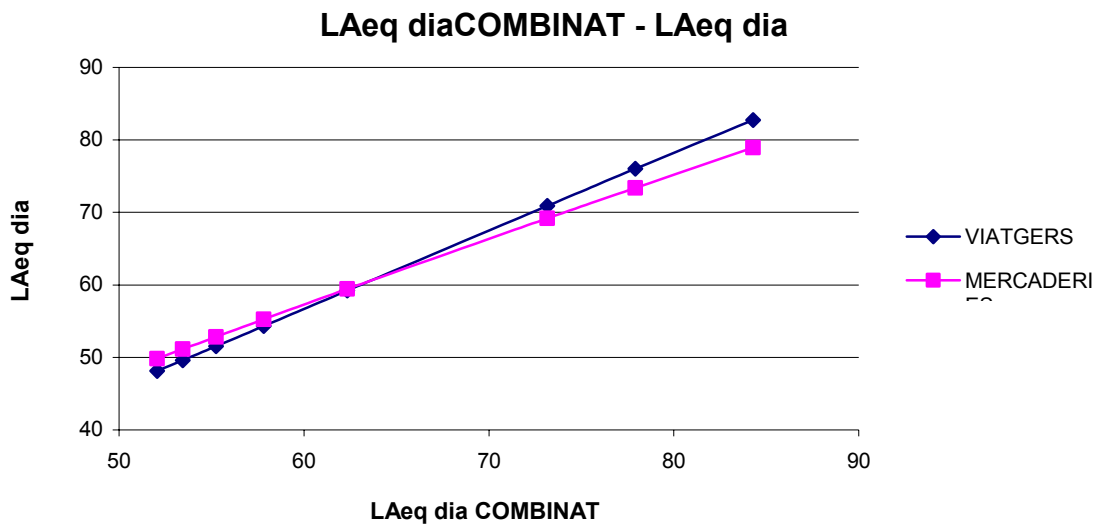


Figura 12.5 Relació entre $L_{Aeq dia COMBINAT}$ i els $L_{Aeq dia}$ (per viatgers i mercaderies). (elaboració pròpia)

Podem aproximar aquestes rectes. No cal, però, trobar-les les dues, perquè a la pràctica, en Matlab, trobarem les distàncies a partir d'un dels dos paràmetres, o $L_{Aeq dia VIATGERS}$ o $L_{Aeq dia MERCADERIES}$. Decidim trobar la recta corresponent a viatgers.

$$L_{AeqVIATGERSdia} = -7.6192 + 1.0722L_{AeqCOMBINATdia}$$

Amb aquesta equació i els valors de $L_{Aeq COMBINAT dia}$ trobats anteriorment, obtenim els valors de $L_{Aeq dia VIATGERS}$ associats:

12. CÀLCUL DE LES DISTÀNCIES A LES ISÒFONES

L Aeq dia COMBINAT	L Aeq dia VIATGERS
48,8108	44,7152
53,7148	49,9736
58,6189	55,2319
63,5230	60,4902
68,4270	65,7485
73,3311	71,0068

Taula 12.17 L_{Aeq} dia VIATGERS associats a cada L_{Aeq} COMBINAT dia (elaboració pròpia)

Introduint aquests valors de L_{Aeq} dia en el programa de Matlab, és a dir, aplicant la fórmula 12.3, amb les dades corresponents a transport de viatgers, s'obtenen els següents resultats:

L Aeq dia VIATGERS	Distància (m)
44,72	43,34
49,97	18,92
55,23	8,78
60,49	4,19
65,75	2,03
71,01	0,99

Taula 12.17 Distància associada a cada L_{Aeq} dia VIATGERS (elaboració pròpia)

Si comparem aquests resultats amb els obtinguts amb el procés habitual del C.E.R.T.U., veiem que coincideixen:

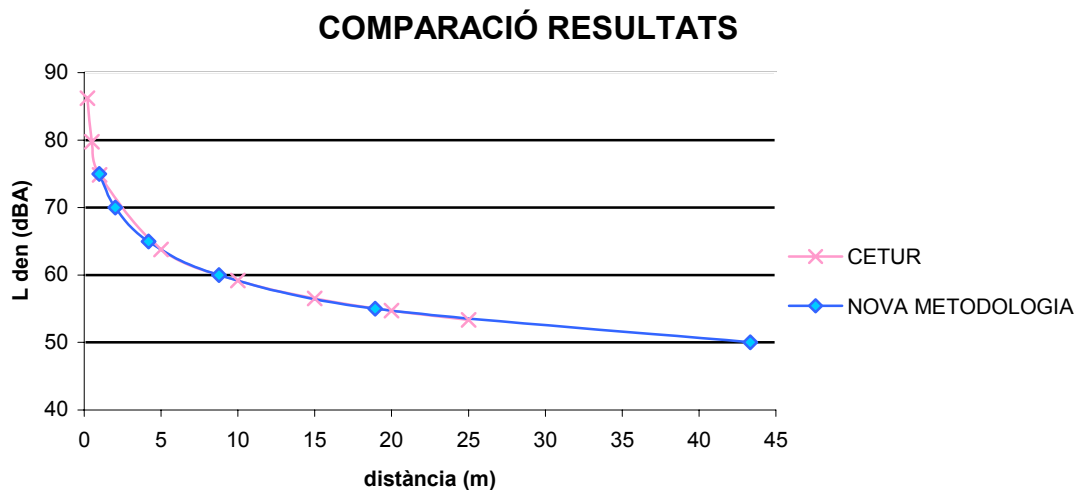


Figura 12.6 Comparació entre els resultats del C.E.R.T.U. i la nova metodologia (elaboració pròpia)

Aleshores, podem donar per correcta aquesta metodologia de càlcul, que ens permet establir una relació L_{den} - Distància:

12. CÀLCUL DE LES DISTÀNCIES A LES ISÒFONES

L den COMBINAT	Distància (m)
50	43,34
55	18,92
60	8,78
65	4,19
70	2,03
75	0,99

Taula 12.18 Distància associada a cada Lden dels fixats per la llei (elaboració pròpia)

A partir d'aquest estudi previ, podem descriure la metodologia:

1. Partint d'unes distàncies qualsevol, trobarem: $L_{Aeq \text{ dia}}$, $L_{Aeq \text{ vespre}}$ i $L_{Aeq \text{ nit}}$ tant pel transport de viatgers com pel de mercaderies (fórmules 8.1, 8.4, 8.6 i 8.8).
2. Farem la suma energètica dels paràmetres corresponents a les dues categories de trens, per cadascun dels períodes del dia. Obtindrem: $L_{Aeq \text{ dia COMBINAT}}$, $L_{Aeq \text{ vespre COMBINAT}}$ i $L_{Aeq \text{ nit COMBINAT}}$.
3. Calcularem $L_{den \text{ COMBINAT}}$ mitjançant la fórmula 4.5.
4. Trobarem les rectes $L_{den \text{ COMBINAT}} - L_{Aeq \text{ dia COMBINAT}}$ (R1) i $L_{Aeq \text{ dia COMBINAT}} - L_{Aeq \text{ dia VIATGERS}}$ (R2).
5. Calcularem els $L_{Aeq \text{ dia COMBINAT}}$ corresponents als L_{den} marcats per la normativa: 50, 55, 60, 65, 70 i 75, mitjançant la funció R1.
6. Calcularem els $L_{Aeq \text{ dia VIATGERS}}$ associats als $L_{Aeq \text{ dia COMBINAT}}$ trobats en 5, amb la funció R2.
7. Introduint aquests $L_{Aeq \text{ dia VIATGERS}}$ (i les dades associades a transport de viatgers) en la fórmula 12.3, mitjançant l'algoritme de Matlab, trobarem les distàncies corresponents als nivells sonors definits per la llei.

12.4. RESULTATS: DISTÀNCIA DE LES ISÒFONES A LA VIA

Aquest càlcul és el pas previ al cartografiat estratègic, un altre dels objectius del treball.

Es realitzarà el càlcul per als nivells sonors límit entre els diferents intervals que s'han esmentat en apartats anteriors, és a dir, pels valors de L_{den} de 50, 55, 60, 65, 70 i 75 dBA. Escollir aquests valors permetrà després valorar la quantitat de població sotmesa a cadascun dels nivells i poder així extreure conclusions.

Per altra banda, es calcularan les distàncies associades als valors de 50, 55, 60, 65, 70 i 75 dBA corresponents a L_{nit} , L_{vespre} i L_{dia} ja que la llei espanyola, d'acord amb la Directiva Europea 2002/49/CE, també els demana.

Com ja s'ha vist en l'apartat 12.1 (obtenció de dades) i com es veurà tot seguit, el càlcul s'ha realitzat dividint la línia d'estudi en una sèrie de trams de manera que les seves característiques siguin prou homogènies com per considerar que la circulació dels trens no pateix grans variacions de velocitat o de traçat al llarg de la seva longitud.

12. CÀLCUL DE LES DISTÀNCIES A LES ISÒFONES

La línia Barcelona – Vallès ha quedat dividida en set trams d'estudi diferents:

- Barcelona – Valldoreix
- Valldoreix – Sant Cugat
- Sant Cugat – Rubí
- Rubí – Terrassa
- Sant Cugat – Bellaterra
- Bellaterra – Universitat Autònoma de Barcelona
- Universitat Autònoma de Barcelona – Sabadell

Per altra banda, el trajecte Barcelona – Martorell l'hem dividit en quatre trams, cadascun amb unes característiques concretes:

- Barcelona – Molí Nou / Ciutat Cooperativa
- Molí Nou / Ciutat Cooperativa – Can Ros
- Can Ros – El Palau
- El Palau – Martorell Enllaç

Es pot consultar una taula resum dels trets característics de cada tram en l'annex 1; són les dades que s'han introduït en la fórmula 12.3 per tal de trobar les distàncies.

De cada tram es mostren, mitjançant taules, les distàncies en metres a les que es produeixen els nivells sonors esmentats, juntament amb les distàncies en centímetres corresponents a l'escala de treball escollida (1:5.000).

12.4.1. Línia Barcelona - Vallès

Utilitzant les dades de longitud dels trens, velocitat, número de circulacions, període d'estudi (dia, però podríem haver utilitzat qualsevol dels altres), constants i valors de referència considerats en aquest mateix capítol, i aplicant la metodologia establerta en l'apartat 12.3.1, els resultats de l'aplicació de l'expressió 12.3 per a aquesta línia són els següents:

12.4.1.1. Recorregut comú

BARCELONA – VALLDOREIX								
Soroll (dBA)	L den		L dia		L vespre		L nit	
	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)
50	60,36	1,21	40,63	0,81	39,29	0,79	15,18	0,30
55	27,21	0,54	18,95	0,38	18,38	0,37	7,45	0,15
60	13,02	0,26	9,23	0,18	8,96	0,18	3,72	0,07
65	6,42	0,13	4,59	0,09	4,46	0,09	1,87	0,04
70	3,21	0,06	2,31	0,05	2,24	0,04	0,95	0,02
75	1,62	0,03	1,16	0,02	1,13	0,02	0,48	0,01

Taula 12.19 Isòfones tram Barcelona – Valldoreix (elaboració pròpia)

12. CÀLCUL DE LES DISTÀNCIES A LES ISÒFONES

VALLDOREIX – SANT CUGAT								
Soroll (dBA)	L den		L dia		L vespre		L nit	
	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)
50	27,49	0,55	19,40	0,39	18,83	0,38	7,78	0,16
55	13,46	0,27	9,60	0,19	9,32	0,19	3,91	0,08
60	6,71	0,13	4,81	0,10	4,67	0,09	1,97	0,04
65	3,38	0,07	2,43	0,05	2,36	0,05	1,00	0,02
70	1,71	0,03	1,23	0,02	1,19	0,02	0,51	0,01
75	0,87	0,02	0,62	0,01	0,61	0,01	0,26	0,01

Taula 12.20 Isòfones tram Valldoreix – Sant Cugat (elaboració pròpia)

12.4.1.2. Línia S1

SANT CUGAT - RUBÍ								
Soroll (dBA)	L den		L dia		L vespre		L nit	
	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)
50	39,98	0,80	24,64	0,49	29,10	0,58	10,52	0,21
55	18,60	0,37	11,82	0,24	13,84	0,28	5,21	0,10
60	9,05	0,18	5,84	0,12	6,80	0,14	2,61	0,05
65	4,49	0,09	2,92	0,06	3,40	0,07	1,32	0,03
70	2,26	0,05	1,47	0,03	1,71	0,03	0,67	0,01
75	1,14	0,02	0,75	0,01	0,87	0,02	0,34	0,01

Taula 12.21 Isòfones tram Sant Cugat – Rubí (elaboració pròpia)

RUBÍ - TERRASSA								
Soroll (dBA)	L den		L dia		L vespre		L nit	
	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)
50	71,45	1,43	43,59	0,87	35,27	0,71	18,48	0,37
55	29,84	0,60	19,37	0,39	16,01	0,32	8,81	0,18
60	13,75	0,28	9,21	0,18	7,69	0,15	4,33	0,09
65	6,65	0,13	4,52	0,09	3,80	0,08	2,17	0,04
70	3,30	0,07	2,26	0,05	1,90	0,04	1,09	0,02
75	1,66	0,03	1,14	0,02	0,96	0,02	0,55	0,01

Taula 12.22 Isòfones tram Rubí - Terrassa (elaboració pròpia)

12.4.1.3. Línia S2

SANT CUGAT - BELLATERRA								
Soroll (dBA)	L den		L dia		L vespre		L nit	
	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)
50	32,82	0,66	24,92	0,50	19,92	0,40	8,91	0,18
55	15,61	0,31	12,03	0,24	9,71	0,19	4,44	0,09
60	7,67	0,15	5,96	0,12	4,83	0,10	2,23	0,04
65	3,83	0,08	2,99	0,06	2,43	0,05	1,13	0,02
70	1,93	0,04	1,51	0,03	1,23	0,02	0,57	0,01
75	0,98	0,02	0,76	0,02	0,62	0,01	0,29	0,01

Taula 12.23 Isòfones tram Sant Cugat – Bellaterra (elaboració pròpia)

12. CÀLCUL DE LES DISTÀNCIES A LES ISÒFONES

BELLATERRA – UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE BARCELONA								
Soroll (dBA)	L den		L dia		L vespre		L nit	
	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)
50	23,08	0,46	17,75	0,35	14,30	0,29	6,52	0,13
55	11,29	0,23	8,76	0,18	7,09	0,14	3,28	0,07
60	5,63	0,11	4,38	0,09	3,56	0,07	1,66	0,03
65	2,83	0,06	2,21	0,04	1,80	0,04	0,84	0,02
70	1,43	0,03	1,12	0,02	0,91	0,02	0,43	0,01
75	0,73	0,01	0,57	0,01	0,46	0,01	0,22	0,00

Taula 12.24 Isòfones tram Bellaterra - UAB (elaboració pròpia)

UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE BARCELONA - SABADELL								
Soroll (dBA)	L den		L dia		L vespre		L nit	
	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)
50	66,28	1,33	44,41	0,89	38,49	0,77	15,97	0,32
55	28,36	0,57	19,91	0,40	17,50	0,35	7,71	0,15
60	13,23	0,26	9,50	0,19	8,41	0,17	3,82	0,08
65	6,44	0,13	4,68	0,09	4,16	0,08	1,92	0,04
70	3,20	0,06	2,34	0,05	2,08	0,04	0,97	0,02
75	1,61	0,03	1,18	0,02	1,05	0,02	0,49	0,01

Taula 12.25 Isòfones tram UAB - Sabadell (elaboració pròpia)

12.4.2. Línia Llobregat - Anoia (Trajecte Barcelona - Martorell)

Utilitzant les dades de longitud dels trens, velocitat, número de circulacions, període d'estudi (dia, però podríem haver utilitzat qualsevol dels altres), constants i valors de referència considerats en aquest mateix capítol, i aplicant la metodologia establerta en l'apartat 12.3.2, els resultats de l'aplicació de l'expressió 12.3 per a aquesta línia són els següents

BARCELONA – MOLÍ NOU / CIUTAT COOPERATIVA								
Soroll (dBA)	L den		L dia		L vespre		L nit	
	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)
50	33,97	0,68	21,13	0,42	20,01	0,40	10,14	0,20
55	15,89	0,32	10,17	0,20	9,66	0,19	5,01	0,10
60	7,75	0,15	5,03	0,10	4,78	0,10	2,51	0,05
65	3,86	0,08	2,52	0,05	2,40	0,05	1,27	0,03
70	1,94	0,04	1,27	0,03	1,21	0,02	0,64	0,01
75	0,98	0,02	0,64	0,01	0,61	0,01	0,33	0,01

Taula 12.26 Isòfones tram Barcelona – Molí Nou/CC (elaboració pròpia)

12. Càlcul de les distàncies a les isòfones

MOLÍ NOU / CIUTAT COOPERATIVA – CAN ROS								
Soroll (dBA)	L den		L dia		L vespre		L nit	
	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)
50	43,34	0,87	35,16	0,70	34,12	0,68	7,72	0,15
55	18,92	0,38	15,41	0,31	14,95	0,30	3,83	0,08
60	8,78	0,18	7,11	0,14	6,89	0,14	1,92	0,04
65	4,19	0,08	3,37	0,07	3,66	0,07	0,97	0,02
70	2,03	0,04	1,61	0,03	1,55	0,03	0,49	0,01
75	0,99	0,02	0,77	0,02	0,74	0,01	0,25	0,00

Taula 12.27 Isòfones tram Molí Nou/CC – Can Ros (elaboració pròpia)

CAN ROS – EL PALAU								
Soroll (dBA)	L den		L dia		L vespre		L nit	
	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)
50	57,83	1,16	43,16	0,86	42,72	0,85	10,52	0,21
55	24,02	0,48	18,36	0,37	18,17	0,36	5,13	0,10
60	10,94	0,22	8,42	0,17	8,34	0,17	2,55	0,05
65	5,21	0,10	4,00	0,08	3,96	0,08	1,28	0,03
70	2,54	0,05	1,94	0,04	1,92	0,04	0,65	0,01
75	1,25	0,02	0,95	0,02	0,93	0,02	0,33	0,01

Taula 12.28 Isòfones tram Can Ros – El Palau (elaboració pròpia)

EL PALAU – MARTORELL ENLLAÇ								
Soroll (dBA)	L den		L dia		L vespre		L nit	
	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)	d (m)	d 1:5000 (cm)
50	50,00	1,00	38,77	0,78	38,39	0,77	9,02	0,18
55	21,32	0,43	16,77	0,34	16,60	0,33	4,44	0,09
60	9,81	0,20	7,72	0,15	7,64	0,15	2,22	0,04
65	4,68	0,09	3,66	0,07	3,63	0,07	1,12	0,02
70	2,28	0,05	1,76	0,04	1,75	0,03	0,57	0,01
75	1,12	0,02	0,86	0,02	0,85	0,02	0,29	0,01

Taula 12.29 Isòfones tram El Palau – Martorell Enllaç (elaboració pròpia)

Com es veu en les taules anteriors, corresponents a les dues línies d'estudi, les distàncies resultants a escala 1:5.000 són molt petites i per tant difícils de poder dibuixar i distingir en els mapes. En el pròxim apartat, es farà un estudi sobre l'elaboració dels mapes estratègics on es discutirà la idoneïtat de l'escala escollida i les possibles alternatives.

L'annex 2 conté les taules resum de les distàncies calculades en aquest apartat, ordenades per paràmetres: L_{den} , $L_{Aeq\ nit}$, $L_{Aeq\ vespre}$ i $L_{Aeq\ dia}$.