

## PROGETTO REPORT

### “Rumore e Porti”

CUP E48B17001310007

Prodotto T3.2.1

# Report di validazione dei modelli in T2.2

**Componente T3**

**Attività T3.2**

**Data di consegna prevista: 08/2020**

**Data di consegna effettiva: 07/2021**

Organizzazione responsabile della componente: **Università di Pisa**

Livello di diffusione		
<b>PU</b>	Pubblico	<b>X</b>
<b>CO</b>	Confidenziale, solo per i partner	

<b>Numero della documentazione da consegnare:</b>	<b>T3.2.1</b>
<b>Responsabile della documentazione da consegnare:</b>	ARPAT Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana
<b>Componente:</b>	T3 - verifica e validazione dei modelli e degli scenari sviluppati

<b>Autore/i - in ordine alfabetico</b>		
<b>Nome</b>	<b>Organizzazione</b>	<b>E-mail</b>
Matteo Bolognese	ARPAT	m.bolognese@arpat.toscana.it
Gaetano Licitra	ARPAT	g.licitra@arpat.toscna.it

<b>Revisione del Documento</b>			
<b>Versione</b>	<b>Data</b>	<b>Modifiche</b>	
		<b>Tipo di modifiche</b>	<b>Modificato da</b>

<b>Sintesi</b>
Report contenente i rapporti delle verifica effettuate attraverso l'ausilio di un software open-source e le considerazioni sulla validazione delle soluzioni.

## Indice

1	Introduzione.....	4
1.1	Il modello di regolazione del traffico sviluppato da UNICA.....	4
2	Processo di Validazione.....	6
2.1	Scenario di validazione: il Porto di Cagliari.....	6
2.1.1	Porto Vecchio.....	6
	Bacino di Levante.....	7
	Porto interno.....	7
	Bacino di ponente.....	7
3	La campagna di monitoraggio.....	8
3.1	Strumentazione utilizzata.....	9
3.2	Campagna di monitoraggio "a".....	9
3.3	Campagna di monitoraggio "b".....	9
3.4	Addestramento rete neurale.....	10
3.5	Simulazione tradizionale.....	10
4	Risultati.....	13
4.1	Risultati ottenuti con il software SoundPLAN.....	13
5	Confronto dei risultati.....	16
6	Conclusioni.....	20

## 1 Introduzione

L'obiettivo generale a lungo termine del progetto REPORT (d'ora in poi Progetto) è la mitigazione delle emissioni sonore e l'impatto acustico dei porti nell'area di cooperazione transfrontaliera per rendere più sostenibile le infrastrutture portuali dello Spazio Marittimo. Tutto ciò è ottenibile attraverso la creazione di un approccio specifico per la corretta gestione del rumore portuale ad oggi mancante nel sistema normativo, destinato a tutti quei soggetti che intendono mitigare l'impatto acustico proveniente dai porti. Tale metodologia, sviluppata in maniera multidisciplinare grazie alle diverse competenze degli Enti Scientifici che compongono la partnership, mira ad essere recepita ed integrata all'interno della Direttiva 2002/49/CE. Quest'ultima infatti, non richiede specificamente una valutazione del rumore emesso dai porti ma lo assimila a rumore industriale senza tenere conto delle caratteristiche e peculiarità di tali realtà, quali sorgenti sonore complesse di diversa natura e caratteristiche, distribuzione delle sorgenti stesse, caratteristiche peculiari di propagazione (ad es. specchio d'acqua antistante alle infrastrutture). In aggiunta, un'integrazione della normativa dal punto di vista dell'impatto acustico andrebbe a completare il quadro dell'analisi dell'inquinamento da agenti fisici (già inclusivo degli approcci relativi all'inquinamento atmosferico).

Le simulazioni numeriche e i nuovi algoritmi e metodologie atti a delineare e definire le migliori strategie comuni per l'abbattimento dell'inquinamento acustico sviluppati nell'ambito del Progetto sono per propria natura a carattere generale e quindi pensati per essere applicabili e replicabili in ogni realtà portuale. Ciò permette, pertanto, di garantire lo sviluppo sostenibile dei porti commerciali e delle piattaforme logistiche collegate assicurandone crescita e espansione, consentendo nel contempo di limitare l'impatto sulla popolazione urbana circostante la cui sensibilità nell'ambito dell'inquinamento acustico risulta sempre crescente.

In particolare, i modelli sviluppati sono quattro, per ciascuno dei quali è stata definita una specifica attività all'interno della Componente T2 del Progetto:

- Attività T2.1 "Sviluppo di un modello di simulazione del rumore", affidata al **CSTB**;
- Attività T2.2 "Analisi delle emissioni sonore al variare delle condizioni di traffico attraverso interventi di gestione e regolazione" affidato all'Università di Cagliari (di seguito **UNICA**);
- Attività T2.3 "Analisi emissioni sonore attività portuali di movimentazione delle merci e delle persone nell'ipotesi di nuovi vettori energetici di propulsione" affidata al dipartimento di Ingegneria dell'Università di Pisa;
- Attività T2.4 "Valutazione dei costi sociali associati all'inquinamento acustico nei porti" affidato all'Università della Corsica Pasquale Paoli.

Per dimostrare la correttezza e l'efficacia dei modelli sviluppati è indispensabile predisporre un'attività di validazione. La Componente T3 racchiude al suo interno le tre attività di validazione T3.1, T3.2 e T3.3 relative rispettivamente ai modelli sviluppati nelle Attività T2.1, T2.2 e T2.3.

L'Attività T3.2, di cui questo documento è parte integrante, è stata affidata ad **ARPAT**, che in collaborazione con **UNICA**, ha pianificato le attività di validazione dei risultati ottenuti dal modello di regolazione del traffico sviluppato dalla stessa **UNICA**.

Per rendere più comprensibile l'attività di validazione nel prossimo paragrafo riassumiamo brevemente la natura del modello oggetto della validazione.

### 1.1 Il modello di regolazione del traffico sviluppato da UNICA

Il modello, sviluppato nel corso dell'Attività T2.2 dal partner **UNICA** è basato su una rete neurale. La rete, una volta addestrata, sulla base di dati sul traffico fornisce livelli di rumore ambientale presso specifici ricettori.

Si sottolinea però come lo scopo del modello dinamico nasca per fornire una risposta ad esigenze differenti rispetto ai modelli con software previsionale tradizionale. Il modello a reti neurali oggetto della ricerca del partner **UNICA**, nasce come modulo di un DSS per la gestione del traffico in tempo "reale", quindi con un approccio differente rispetto a quello del modello statico, il quale, ai fini di questa attività di validazione viene forzato a emulare un regime variabile. Lo scopo del modello a reti neurali è infatti quello di monitorare nel tempo i livelli del rumore in punti critici di interesse, rappresentativi del campo acustico in generale, e valutarne istantaneamente la sua evoluzione. Inoltre, la rappresentatività o meno dei punti potrebbe essere verificata anche grazie all'ausilio dei modelli convenzionali. Pertanto i due modelli possono lavorare in sinergia, andando a svolgere funzioni ben diverse.

La rete neurale viene quindi applicata al traffico stradale in prossimità dell'area portuale con lo scopo di permettere stime dei livelli sonori in punti specifici della rete sulla base dei soli dati di traffico quali, numero di transiti e velocità di transito per le quattro categorie di veicoli definite da **CNOSSOS**. Pertanto è necessaria una compagna di monitoraggio del rumore e del traffico veicolare nella rete stradale adiacente al porto in esame. Nel corso dello sviluppo, campagne di monitoraggio a tal fine sono state eseguite a Olbia. Durante le campagne di

monitoraggio ciascun arco stradale è stato monitorato attraverso un conta-traffico e un fonometro. I dati sono stati registrati con una risoluzione temporale di 100 ms e forniti alla rete neurale in forma aggregata con base temporale di un minuto, cinque minuti o un'ora.

Una frazione dei dati (pari a circa il 20% del totale) è stata utilizzata per allenare la rete e la restante parte per validazione e test. I risultati così ottenuti sono risultati molto soddisfacenti.

## 2 Processo di Validazione

Il processo di validazione dei modelli svolge un ruolo importante all'interno del progetto.

Nel caso particolare del modello sviluppato da UNICA, lo scopo del piano di validazione definito da **ARPAT**, di comune accordo con **UNICA**, è quello di valutare la consistenza e la ripetibilità dei risultati ottenuti.

Il piano è riassumibile nelle seguenti fasi:

- esecuzione di una campagna di misura su uno scenario inedito alla rete (porto di Cagliari);
- addestramento della rete su una frazione dei dati del monitoraggio da parte di UNICA;
- generazione di stime dei livelli di rumore attraverso la rete neurale sulla base dei soli dati di traffico, da parte di UNICA;
- simulazione dello scenario su un software previsionale tradizionale (SoundPLAN) da parte di ARPAT;
- confronto delle stime fornite dalla rete neurale e di quelle fornite dal software previsionale tradizionale con i livelli misurati durante il monitoraggio;
- confronto del livello di incertezza della rete con quello fornito dal software tradizionale.

Il primo passo della validazione consiste nell'esecuzione di apposite campagne di monitoraggio. Nei prossimi paragrafi descriveremo lo scenario designato per la validazione, ossia la rete stradale antistante il porto di Cagliari.

### 2.1 Scenario di validazione: il Porto di Cagliari

In 1 è rappresentata la mappa di tutte le componenti del Porto di Cagliari, tuttavia al fine della validazione la regione del porto di interesse è quella del Porto Vecchio.



Figura 1 - Mappa delle zone del porto di Cagliari

#### 2.1.1 Porto Vecchio

Il porto vecchio di Cagliari è una importante infrastruttura logistica per tutta la Sardegna e uno dei più importanti porti del Mar Mediterraneo in termini di merci scambiate e passeggeri. Il porto, come è possibile osservare in 2, è delimitato da due opere foranee esterne, la diga foranea di ponente e la diga foranea di levante, e da un'opera interna, il Molo Ichnusa.

Dette opere suddividono il porto commerciale in tre distinti bacini:

- *bacino di Ponente*, compreso fra la diga foranea di ponente ed il Molo Sabauda;
- *porto interno*, compreso fra il Molo Sabauda ed il Molo Ichnusa;

- *bacino di Levante*, compreso fra il Molo Ichnusa e la diga foranea di levante.

Lo specchio d'acqua si estende per 2.065.000 m<sup>2</sup> complessivi, con fondali fino a dodici metri, la superficie a terra è pari a 333.250 m<sup>2</sup>, lo sviluppo costiero dello scalo è di oltre 11.000 m, di cui 4.800 m banchinati.

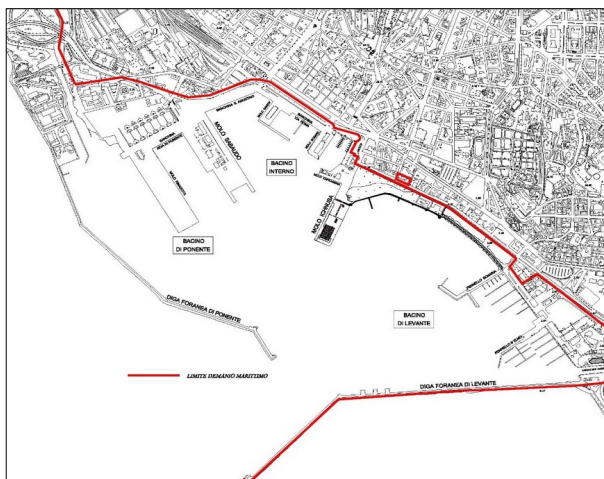


Figura 2 - Mappa del Porto Vecchio di Cagliari con l'indicazione del confine dell'ambito portuale.

All'interno delle dighe foranee del porto commerciale si articolano poco più di 7 km di sviluppo di fronte d'acqua banchinato, dei quali 2.400 m per *operazioni commerciali* e *traffico passeggeri*.

I suddetti ambiti portuali sono articolati come sotto indicato.

#### **Bacino di Levante**

Specchio d'acqua: 972.000m<sup>2</sup>, con fondali da 3 a 12 m, è destinato a porto turistico. Attualmente tra i moli Sant'Elmo e Bonaria ormeggiano *imbarcazioni da diporto* e *motopescherecci* e si svolgono le attività nautiche delle società sportive che hanno sede nelle aree a terra, pure adibite ad attività di ristorazione. Gli spazi retrostanti la calata dei Mercedari sono utilizzati per il rimessaggio ed il ricovero delle barche da diporto.

Il lungomare di Su Siccu è utilizzato, conformemente alle previsioni del piano regolatore portuale, che lo individua come "Parco di Bonaria", a verde attrezzato e passeggiata a mare.

Il lato di levante del molo Ichnusa è impiegato esclusivamente per le esigenze di servizio della Marina Militare.

#### **Porto interno**

Specchio d'acqua di 298.000m<sup>2</sup>, con fondali da 3 a 8 metri, comprende le opere portuali di più antica realizzazione e coincide con la parte centrale del porto vecchio, posta tra il molo Ichnusa e la calata Sant'Agostino.

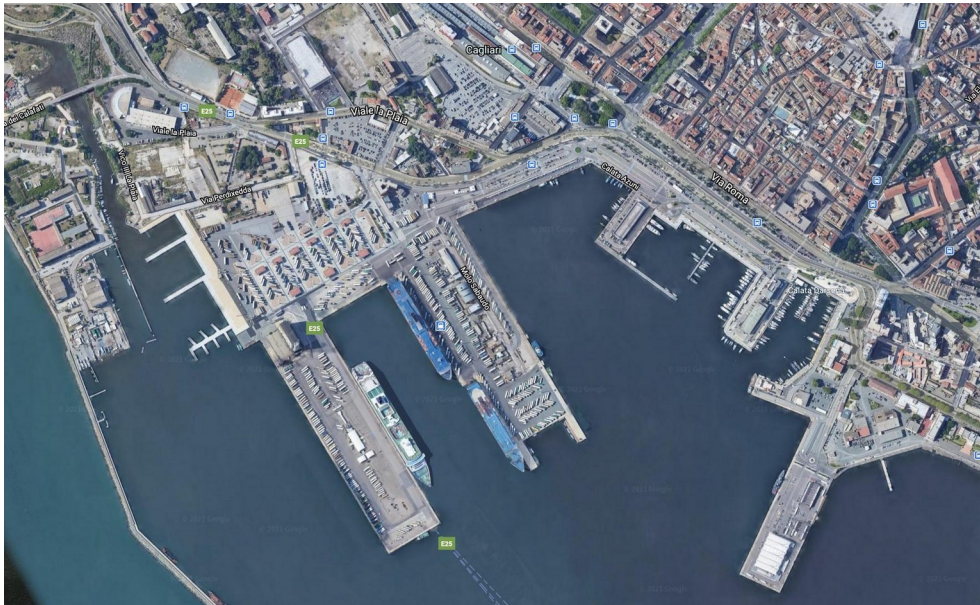
Il molo, è destinato dal piano regolatore portuale a servizi turistico-ricettivi. Allo stato attuale la banchina è saltuariamente utilizzata per l'ormeggio di *navi da crociera* o di navi militari, nelle more di un suo riutilizzo a beneficio dei maxi-yacht.

#### **Bacino di ponente**

Abbraccia la zona commerciale del porto vecchio, oggi impiegata per gli intensi traffici delle merci (con le navi *Ro-Ro*) e dei passeggeri (con navi di linea o in transito sulle navi da crociera).

### 3 La campagna di monitoraggio

La campagna di monitoraggio del traffico ha preso luogo nella rete stradale che circonda il Porto Vecchio e in particolare le regioni del Bacino di Ponente e del bacino del Porto Interno. In 3 è riportata una immagine satellitare dell'area in cui è evidenziata la rete stradale cittadina.



*Figura 3 - Area del porto Vecchio di Cagliari. Il porto è circondato da importanti arterie di trasporto urbane, nonché dalla strada europea E25 che, in un percorso di 1547 km attraverso terraferma e mare, collega Hoek van Holland (Paesi Bassi) a Palermo passando per Belgio, Lussemburgo, Francia e Svizzera.*

Come è possibile osservare in 4, La rete stradale presenta a Est via Roma, un ampio viale a 3 corsie per senso di marcia caratterizzato da intenso traffico veicolare leggero e pesante (prevalentemente autobus del trasporto cittadino) e, parallelo ad essa, il lungomare "New York 11 settembre" caratterizzato da traffico veicolare leggero a bassissima velocità. All'estremo occidentale, via Roma e lungomare New York confluiscono in un complesso incrocio caratterizzato da semafori e una rotonda. In corrispondenza di questa è presente un accesso al porto. Ad Ovest dell'incrocio confluisce Via Molo Sant'Agostino la quale, proseguendo verso Ovest, si biforca in Via Ripa di Ponente e Viale La Plaia, entrambe strade a due corsie a unico senso di marcia e caratterizzate da un intenso traffico veicolare.

Il monitoraggio dei livelli di rumore, a differenza di quanto indicato dal partner **UNICA**, non è stato eseguito simultaneamente, ma attraverso due diverse campagne, ciascuna della durata superiore alle 48 ore. Le campagne hanno coperto due distinte porzioni della rete stradale in osservazione monitorandone tre punti ciascuna. In 4 sono riportati i punti oggetto di monitoraggio.

Nonostante la non contemporaneità dei due monitoraggi potrebbe costituire un problema per la rete neurale, al fine della modellizzazione con software previsionale tradizionale, per garantire la correttezza dei risultati è sufficiente che i livelli di rumore misurati in ciascuno dei punti della rete siano indipendenti dai livelli presenti negli altri punti, ossia che eventuale traffico intenso in uno dei punti non vada a modificare il livello di fondo dei punti limitrofi. Tale ipotesi si può considerare soddisfatta data la distanza tra i punti del monitoraggio e la correlazione tra i traffici.

Per verificare tale ipotesi sono state effettuate delle apposite simulazioni tramite il software soundPLAN. Separatamente per il periodo diurno e per il periodo notturno sono stati calcolati i livelli di rumore di fondo nei punti della rete B in presenza di traffico nei tratti stradali della rete A e vice versa. I livelli di rumore di fondo presenti in una delle due metà della rete nel periodo diurno (notturno) sono stati calcolati sulla base del livello di rumore massimo riscontrato nell'altra metà della rete nello stesso periodo. Questi livelli sono stati quindi confrontati con i livelli di rumore minimi riscontrati nel corso dei periodi diurni (notturni) del monitoraggio. Dal confronto è stato quindi calcolato il rapporto segnale rumore. In particolare, il minimo rapporto segnale rumore è stato riscontrato nel punto Pa2 durante il periodo notturno ed è risultato pari a 12,0 dB(A). Pertanto, nel periodo notturno si può stimare l'errore sulla stima dei livelli della rete A causato dal traffico dei punti della rete B inferiore a 0,3 dB(A). Per quanto riguarda il periodo diurno i rapporti segnale rumore sono superiori a 20 dB(A), pertanto l'errore scaturitone risulta inferiore a 0,1 dB(A).



### 3.1 Strumentazione utilizzata

Il monitoraggio dei livelli di rumore lungo la rete stradale è stato effettuato attraverso fonometri classe 1 come richiesto dalla normativa. Il traffico veicolare è stato monitorato per mezzo di conta-traffico e per mezzo di telecamere tenendo conto delle seguenti categorie veicolari:

- categoria 1 - veicoli leggeri <3.5 t;
- categoria 2 - Veicoli medi >3.5 t;
- categoria 3 - Veicoli pesanti;
- categoria 4.a - Motocicli <50cc;
- categoria 4.b - Motocicli >50cc.

Il monitoraggio del traffico è stato effettuato con base temporale di 100ms e sono stati forniti dati aggregati con base temporale di 1min, 5min e 1ora. La base temporale di 100ms ha permesso di individuare il singolo veicolo in transito registrandone la velocità. In aggiunta dei dati grezzi, sono stati forniti anche indicatori quali capacità, densità di traffico, fattore ora di punta e portata oraria per direzione.

Il monitoraggio fonometrico e di traffico è stato affiancato dal monitoraggio meteorologico, necessario per escludere gli intervalli di tempo con avverse condizioni meteo secondo la normativa vigente (velocità del vento superiore a 5m/s o insorgere di precipitazioni quali pioggia, grandine o neve).

### 3.2 Campagna di monitoraggio "a"

Il primo monitoraggio effettuato interessa i punti Pa1, Pa2 e Pa3, indicati in 4 con simboli di colore verde. In ciascun punto sono disponibili dati di livello e traffico. La durata complessiva utile del monitoraggio è di 52 ore a partire dalle ore 02:00 del 13 luglio 2020 fino alle ore 06:00 del 15 luglio 2020.



Figura 4 - Dettaglio della rete stradale oggetto del monitoraggio con indicazione della posizione delle centraline di monitoraggio acustico e dei conta-traffico. In verde i punti della parte "a" del monitoraggio, in blu i punti relativi alla parte "b" del monitoraggio.

### 3.3 Campagna di monitoraggio "b"

Il secondo monitoraggio interessa invece i punti Pb4, Pb5 e Pb6, indicati in 4 con simboli azzurri, che sono necessari per la ricostruzione dei flussi di traffico indotti dalla complessa realtà portuale. A causa della complessità della rete stradale, sono state effettuate misure di traffico più complesse che hanno richiesto l'impiego di più conta-traffico per due dei tre punti (Pb5 e Pb6). In corrispondenza del punto Pb5 (5) sono stati impiegati tre conta-traffico, uno per senso di marcia su Via Roma (CT-101 e CT-102) e uno su Lungomare New York 11 Settembre.



Figura 5: Dettaglio punto Pb5 con conta-traffici.

In corrispondenza del punto Pb6 (6), in aggiunta al conta-traffico puntato su via Ripa di Ponente, è stato utilizzato un ulteriore conta-traffico per monitorare il traffico in ingresso al porto (CT-99).



Figura 6: Dettaglio punto Pb6 con conta-traffico.

La durata complessiva utile del monitoraggio è di 53 ore a partire dalle ore 10:00 del 15 luglio 2020 fino alle ore 15:00 del 17 luglio 2020.

### 3.4 Addestramento rete neurale

L'addestramento della rete neurale è stato eseguito dal partner **UNICA** a cui sono stati forniti i dati di traffico relativi all'intera lunghezza del monitoraggio e i dati di rumore relativi al 90% della durata totale del monitoraggio.

UNICA ha utilizzato i dati relativi alla prima parte del monitoraggio (quella della quale disponeva sia dei dati di rumore che dei dati di traffico) per effettuare l'addestramento della rete (training) e il successivo test. I dati relativi alla seconda fase del monitoraggio (quella della quale **UNICA** disponeva dei soli dati di traffico) sono stati utilizzati per effettuare una validazione in cieco. Per effettuare la validazione in cieco **UNICA** ha prodotto stime dei livelli di rumore sulla base dei soli dati di traffico senza conoscere gli effettivi livelli di rumore. In seguito **ARPAT** ha confrontato queste stime con i livelli di rumore misurati durante il monitoraggio e con le stime prodotte dal software SoundPLAN.

Precisiamo che stime sulla prima e ultima ora del monitoraggio non sono state fornite a causa delle peculiarità della rete.

### 3.5 Simulazione tradizionale

Parallelamente all'addestramento della rete neurale, **ARPAT** ha processato i dati dei transiti e i relativi livelli di rumore in modo da permetterne l'importazione nel software previsionale tradizionale SoundPLAN.

SoundPLAN si basa sul metodo del ray-tracing, ed è in grado di calcolare la propagazione del rumore emesso da sorgenti di tipo puntiforme, lineare o areale in tutto lo spazio circostante. Il risultato del calcolo è il livello sonoro complessivo dovuto a tutte le sorgenti presenti (con la possibilità di distinguere i contributi delle singole sorgenti o di gruppi di sorgenti) su un insieme di punti prescelto. Il risultato può essere espresso anche in forma di mappa a

falsi colori se si sceglie di calcolare i livelli su una matrice di punti, oppure in forma tabellare.

Le sorgenti stradali sono state valutate mediante l'inserimento, nell'infrastruttura corrispondente, dei volumi di traffico misurati, suddivisi per le classi di veicoli distinte nel modello **CNOSSOS**.

Il modello acustico è stato sviluppato prendendo in considerazione i periodi di riferimento della normativa europea (*day*, dalle 06:00 alle 20:00, *evening*, dalle 20:00 alle 22:00 e *night*, dalle 22:00 alle 06:00).

Generalmente, lo sviluppo di un modello acustico è realizzato seguendo i seguenti passi:

- caratterizzazione geografica del territorio;
- creazione del modello 3d dell'area;
- definizione e localizzazione delle sorgenti e dei ricettori;
- caratterizzazione acustica delle sorgenti e inserimento di potenze sonore e spettri nel modello;
- definizione dell'area di calcolo o dei ricettori;
- esecuzione del calcolo;
- validazione del modello acustico.

Per la caratterizzazione geografica del territorio sono stati reperiti i dati cartografici necessari: la rete infrastrutturale (stradale), l'edificato, i punti quota e linee altimetriche, e l'uso del suolo.

La realizzazione del modello passa per la definizione del Digital Terrain Model (DTM), il quale rappresenta il suolo e tutti gli ostacoli naturali presenti nell'area di interesse. Il DTM viene pertanto definito a partire da punti quota e linee altimetriche. La restante parte del modello 3d è costituita dall'edificato, ossia l'insieme degli edifici e degli ostacoli artificiali presenti nell'area (barriere acustiche, muri, ecc...) e dall'uso del suolo, che attribuisce alla superficie del DTM adeguati valori di riflettività e assorbimento in base alla tipologia di terreno. Sottolineiamo come all'interno del modello dell'edificato siano indicati anche i valori di assorbimento acustico associati alle superfici di ciascun edificio.

Al fine di caratterizzare acusticamente le sorgenti, per ciascuno dei singoli monitoraggi (*a* e *b*) è stato preparato un numero di file cartografici *shapefile* (.shp) pari al numero di ore di monitoraggio *n*. Ciascun .shp contiene il modello dell'intera rete stradale oggetto del monitoraggio. All'interno di ciascun file .shp relativo a una particolare ora del monitoraggio *a* sono stati attribuiti agli archi stradali specifici del monitoraggio *a* i flussi veicolari orari e le relative velocità medie per ciascuna classe di veicolo. Lo stesso vale per i file .shp relativi al monitoraggio *b*.

Per ottimizzare l'inserimento degli .shp in SoundPLAN sono state definite *n/3* "situazioni" per entrambi i monitoraggi. All'interno di SoundPLAN diverse situazione corrispondono a diverse varianti del modello in cui possono essere inserite diverse sorgenti di rumore e o diversi elementi 3d. Per ciascuna situazione è possibile calcolare il livello di rumore per tre distinti periodi della giornata (periodo diurno, serale e notturno), pertanto a ciascuno di questi periodi si sono assegnati flussi e velocità veicolari relativi a una diversa ora di monitoraggio (7). In tal modo è stato possibile ridurre a *n/3* il numero di situazioni da creare.

	Veic/h(d)	p(d)[%]	Veic/h(e)	p(e)[%]	Veic/h(n)	p(n)[%]
	86.0	100.0	40.0	100.0	52.0	100.0
	Veic/h(d)	p(d)[%]	Veic/h(e)	p(e)[%]	Veic/h(n)	p(n)[%]
1 - Light motor vehicles	85.0	98.8	38.0	95.0	48.0	92.3
2 - Medium heavy vehicles	1.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0
3 - Heavy vehicles	0.0	0.0	2.0	5.0	1.0	1.9
4a - Powered twowheelers (Mopeds)	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	3.8
4b - Motor-, Tri- and Quadricycles	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.9

LwAeq	d(6-20h)	e(20-22h)	n(22-6h)
dB(A)	68.07	66.18	66.85

Figura 7 - In verde il flusso di traffico delle ore 02:00, in celeste il flusso di traffico delle ore 03:00, in magenta il flusso di traffico delle ore 04:00.

Le situazioni sono state denominate quindi in base al monitoraggio al quale queste appartengono:

- le "situazioni #a" si riferiscono alla campagna di monitoraggio *a*, includendo quindi il flusso veicolare di viale La Plaia e del tratto ovest di via Ripa di Ponente, oltre ai ricevitori Pa1, Pa2 e Pa3;
- le "situazioni #b" si riferiscono alla campagna di monitoraggio *b*, includendo quindi il flusso veicolare del tratto est di via Ripa di Ponente, del tratto interno al porto dove era stato posizionato il conta-traffico "CT-99", di via Molo Sant'Agostino, di Lungomare New York 11 settembre e di via Roma oltre ai ricevitori Pb4,

Pb5 e Pb6;

dove # sta per il numero della situazione.

A scopo esplicativo, si riporta di seguito un esempio di importazione in SoundPLAN dei dati riferiti alla campagna di monitoraggio a:

- “Situazione 1 a”, viale la Plaia, dalle ore 02:00 alle ore 04:00 del giorno 13 luglio 2020 (7);
- “Situazione 2 a”, viale la Plaia, dalle ore 05:00 alle ore 07:00 del giorno 13 luglio 2020;

fino ad arrivare a:

- “Situazione 18 a”, viale la Plaia, dalle ore 03:00 alle ore 05:00 del giorno 15 luglio 2020.

Per ogni categoria di veicoli considerata sono state riportate anche le relative velocità medie associate (8).

Tipo veicoli	V[d] [km/h]	V[e] [km/h]	V[n] [km/h]	Qstud [%]	Ts [mesi]
Cat1	39.6	43.0	42.7	0.0	0.0
Cat2	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cat3	0.0	28.0	18.0	0.0	0.0
Cat4a	0.0	0.0	47.7	0.0	0.0
Cat4b	0.0	0.0	47.7	0.0	0.0

Figura 8 - n verde la velocità media riferita al flusso di traffico delle ore 02:00, in celeste quella delle ore 03:00, in magenta quella delle ore 04:00.

SoundPLAN associa automaticamente un fondo stradale standard alle strade inserite. A seguito dei primi run di calcolo, si è evidenziato il bisogno di modificare la pavimentazione associata alle singole sorgenti stradali. In fatti, nel caso in cui i risultati ottenuti dal modello risultassero sovrastimati o sottostimati rispetto ai valori ottenuti con le campagne di monitoraggio, si è sostituito il fondo stradale associato dal programma con uno più o meno emittente.

Specialmente nel caso della campagna di monitoraggio b è stato necessario utilizzare fondi stradali a bassa emissione acustica. Si riporta di seguito un grafico esemplificativo riferito alla postazione Pb5 (9):

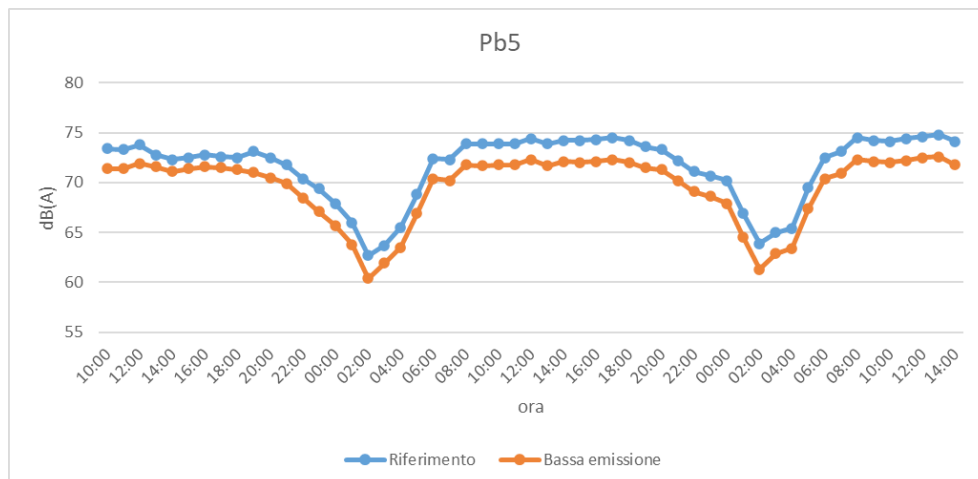


Figura 9 - Differenza tra i risultati ottenuti con un fondo stradale di riferimento e un fondo stradale a bassa emissione.

## 4 Risultati

### 4.1 Risultati ottenuti con il software SoundPLAN

Dal calcolo del modello acustico delle sorgenti di rumore stradale sono stati ottenuti i seguenti risultati, riportati in grafici rappresentanti gli andamenti temporali per ogni ricevitore e suddivisi nelle due campagne di monitoraggio:

- campagna di monitoraggio *a* (10, 11, 12):

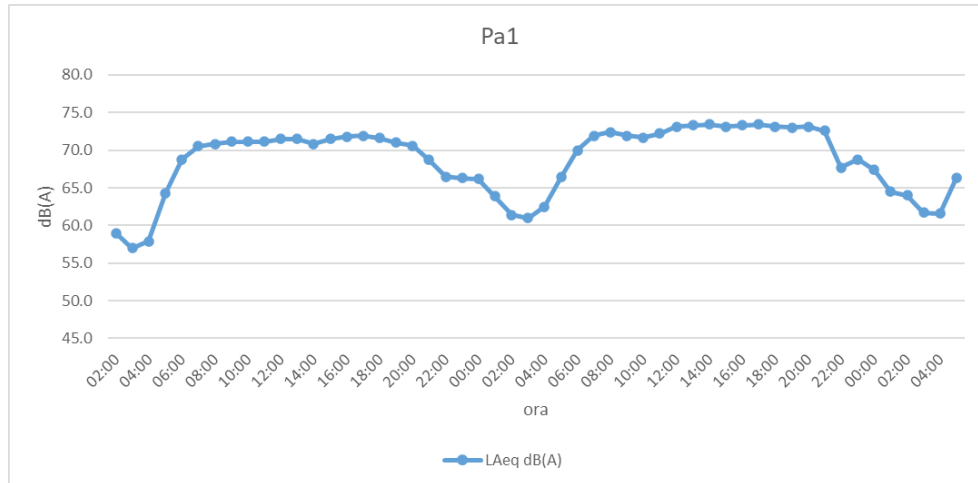


Figura 10 - Andamento temporale dei livelli ottenuti al ricevitore Pa1.

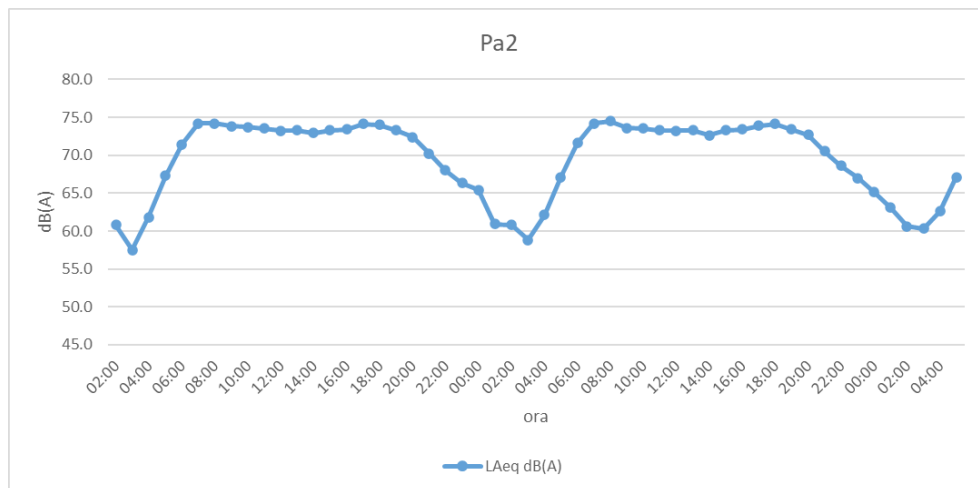


Figura 11 - Andamento temporale dei livelli ottenuti al ricevitore Pa2.

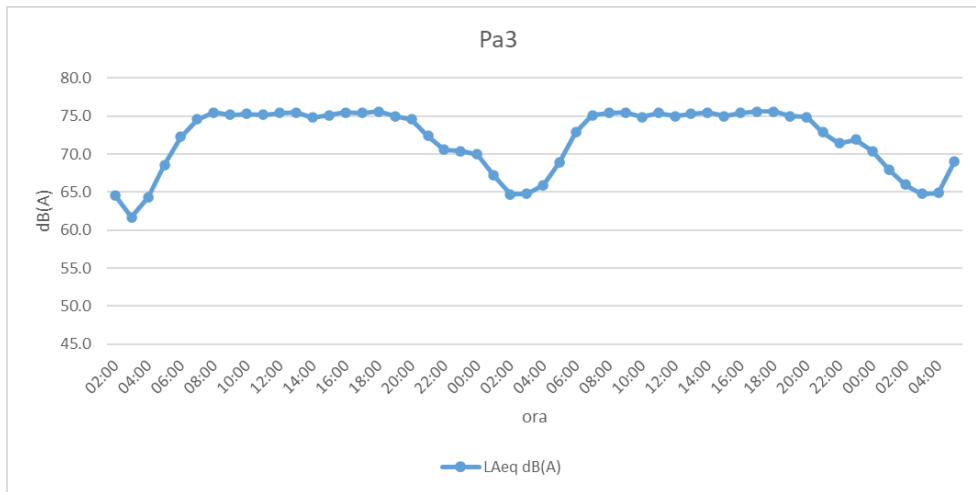


Figura 12 - Andamento temporale dei livelli ottenuti al ricevitore Pa3.

- campagna di monitoraggio b (13, 14, 15):

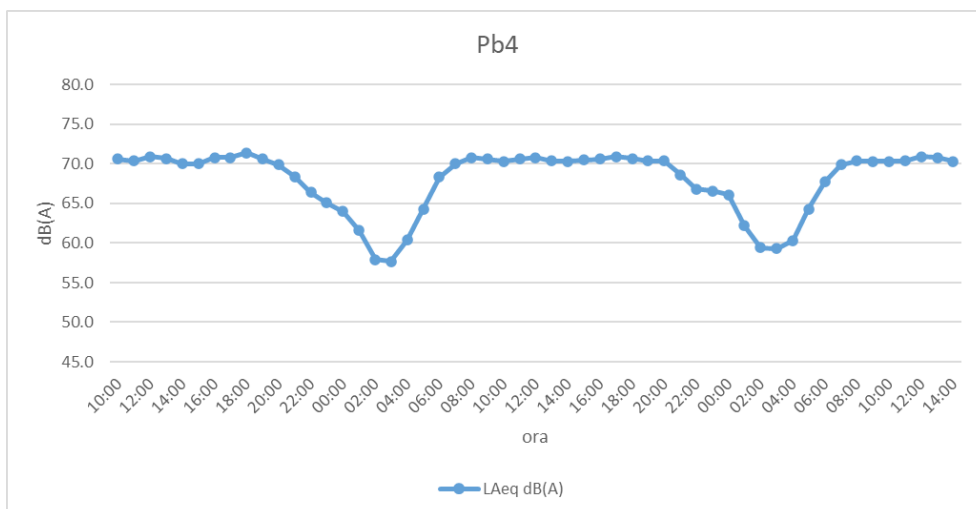


Figura 13 - Andamento temporale dei livelli ottenuti al ricevitore Pb4.

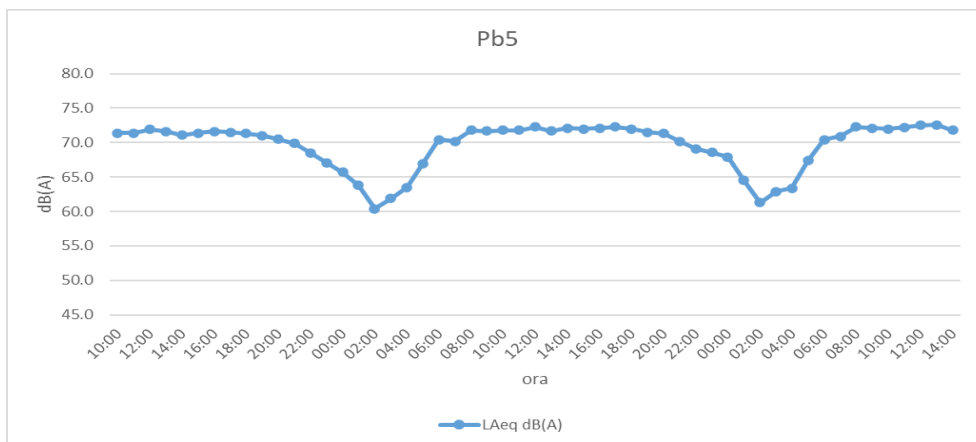


Figura 14 - Andamento temporale dei livelli ottenuti al ricevitore Pb5.

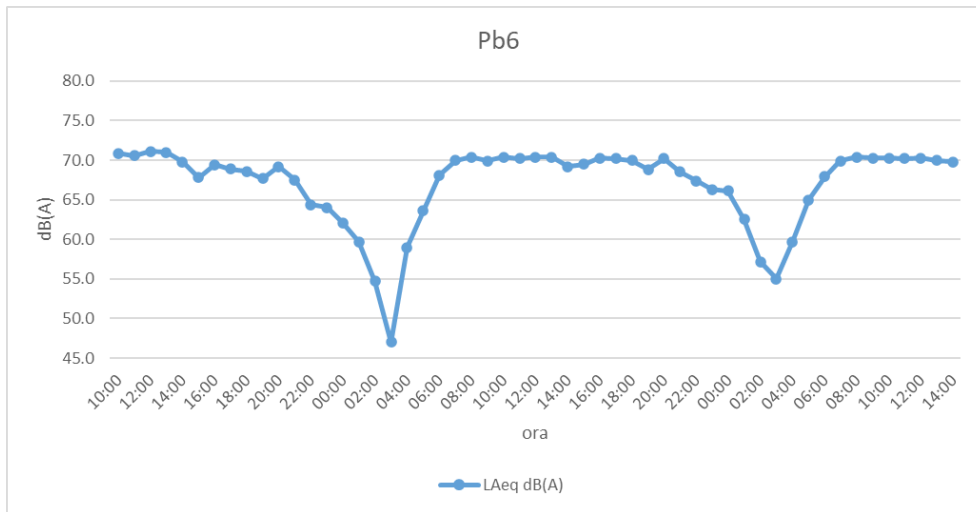
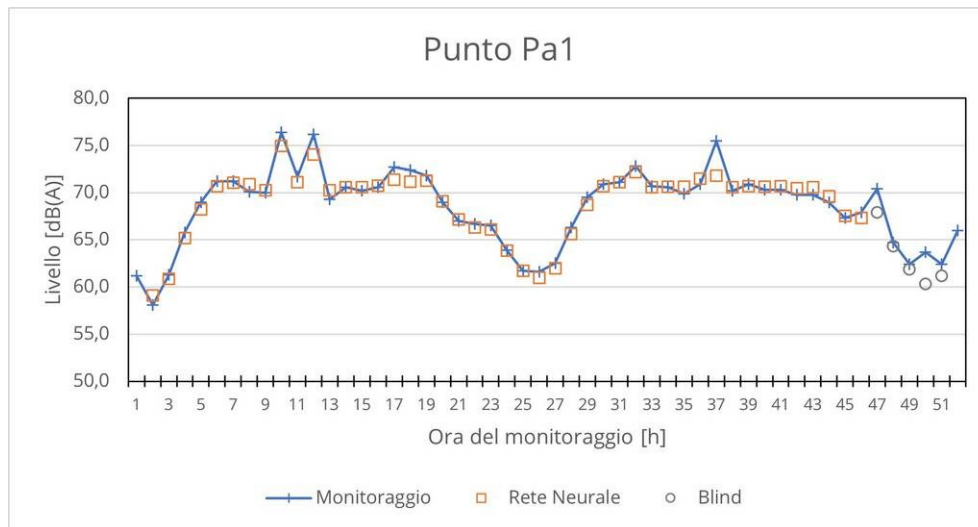


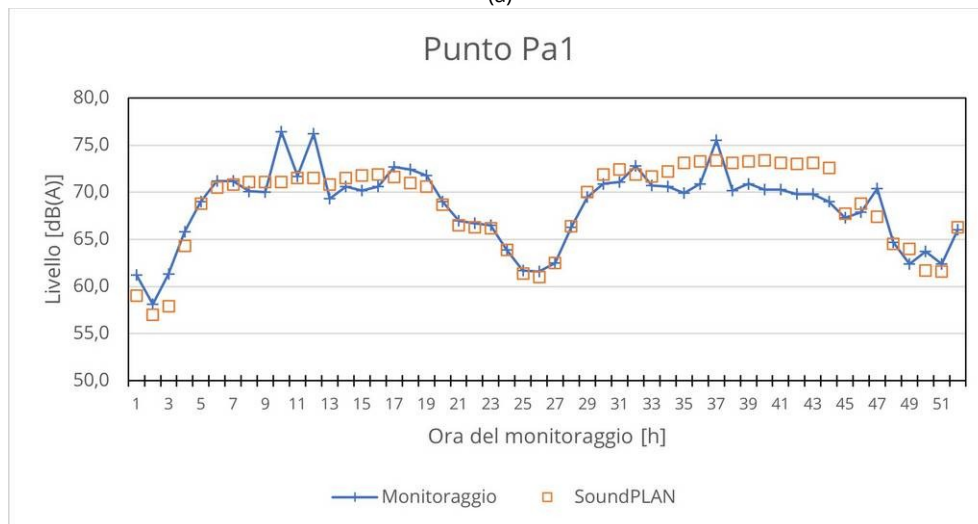
Figura 15 - Andamento temporale dei livelli ottenuti al ricevitore Pb6.

## 5 Confronto dei risultati

In questo capitolo confronteremo i risultati ottenuti attraverso i due software con i livelli misurati durante la campagna di monitoraggio. In particolare, valuteremo le prestazioni (in termini di differenza media tra il livello stimato e il livello realmente presente) ottenute della rete neurale durante la validazione in "cieco" ossia senza conoscere il reale livello di rumore. Nelle successive 16, 17 e 18 sono riportati gli andamenti temporali dei risultati ottenuti mediante le due metodiche. Nelle figure relative alla rete neurale sono colorati in grigio i punti relativi alla validazione in cieco. A causa di un inconveniente tecnico non è stato possibile allenare il Modello sui punti del monitoraggio *b* entro i termini del progetto ma si provvederà in seguito. Restringiamo quindi l'analisi ai soli punti del monitoraggio *a*.



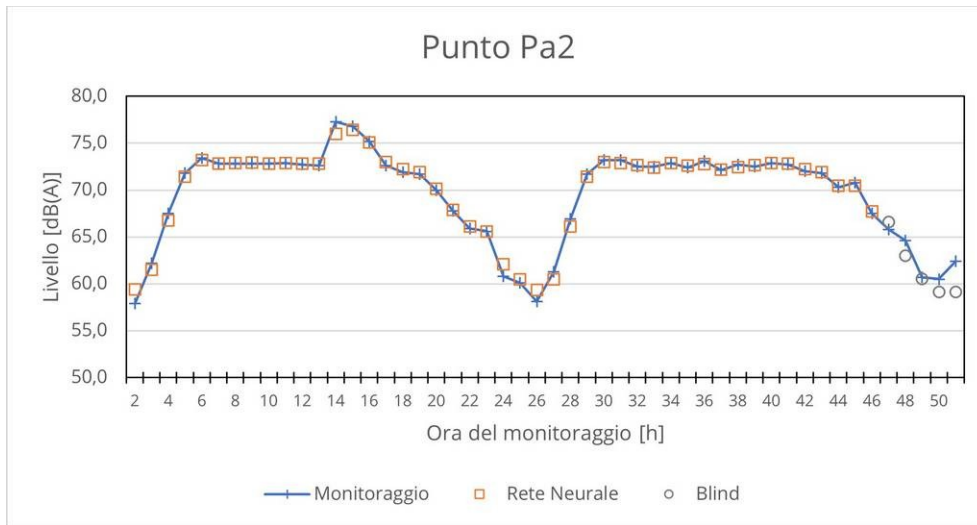
(a)



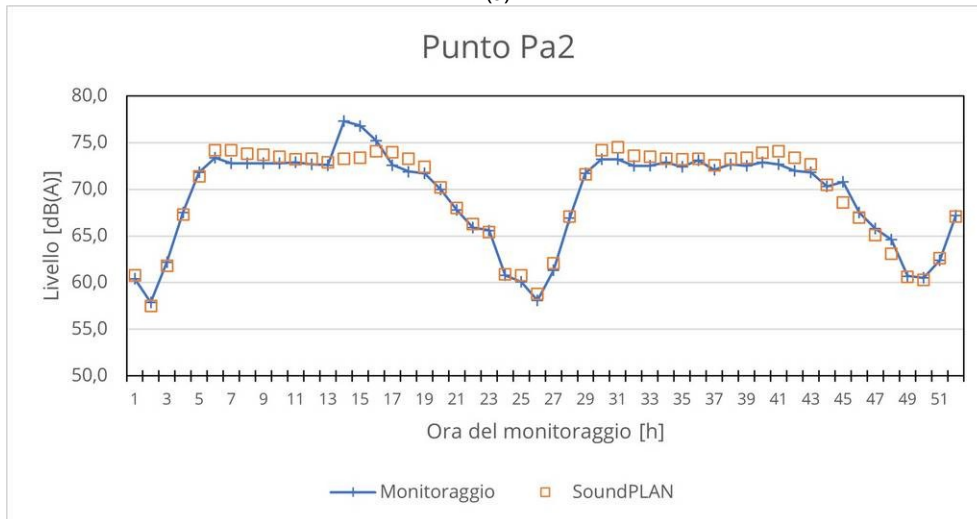
(b)

Figura 16 - Confronto tra i risultati del monitoraggio nel punto Pa1 e le previsioni dei modelli. a) Andamento nel tempo dei risultati forniti dalla rete neurale, in grigio le stime fornite senza conoscere i reali livelli di rumore. b) Andamento temporale dei risultati forniti dal software SoundPLAN.



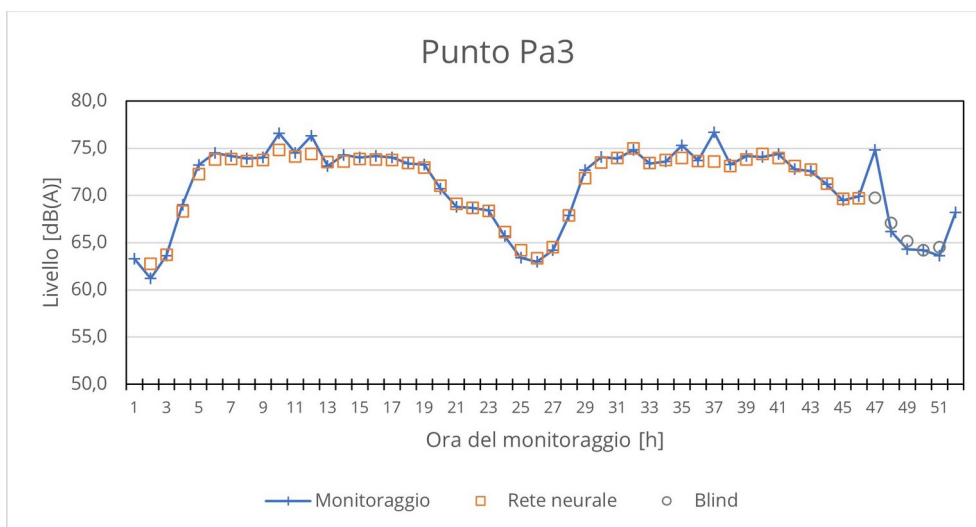


(a)

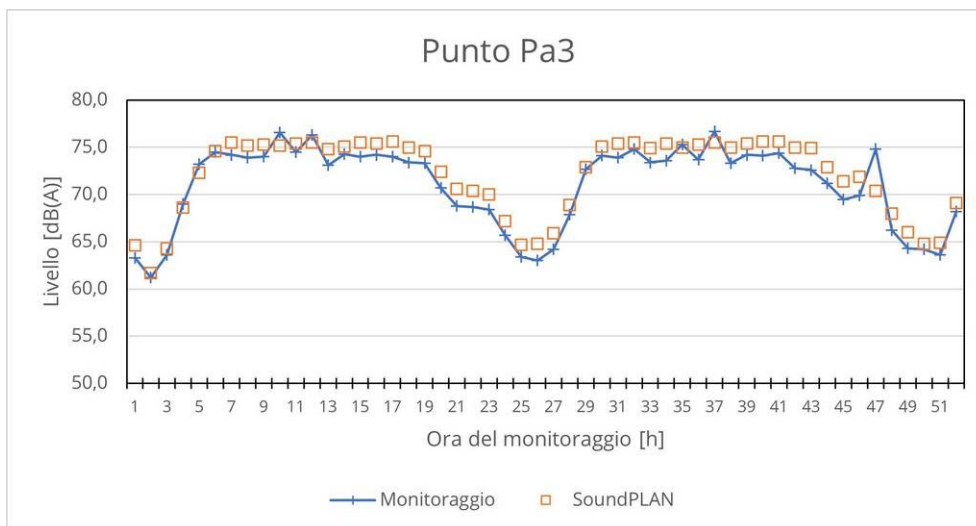


(b)

Figura 17 - Confronto tra i risultati del monitoraggio nel punto Pa2 e le previsioni dei modelli. a) Andamento nel tempo dei risultati forniti dalla rete neurale, in grigio le stime fornite senza conoscere i reali livelli di rumore. b) Andamento temporale dei risultati forniti dal software SoundPLAN.



(a)



(b)

Figura 18 - Confronto tra i risultati del monitoraggio nel punto Pa3 e le previsioni dei modelli. a) Andamento nel tempo dei risultati forniti dalla rete neurale, in grigio le stime fornite senza conoscere i reali livelli di rumore. b) Andamento temporale dei risultati forniti dal software SoundPLAN.

Come è possibile osservare dalle Figure, la rete neurale riesce a seguire con maggiore fedeltà l'andamento temporale del livello di rumore. Le differenze maggiori si verificano di norma in corrispondenza delle fasce orarie caratterizzate da livelli di rumore inferiori. Questi periodi del monitoraggio corrispondono alle ore notturne in cui, sulla base dei dati di traffico, si riscontra traffico poco intenso ma caratterizzato da una più alta percentuale di mezzi pesanti. In maniera del tutto casuale le ore del monitoraggio corrispondenti alla validazione in cieco corrispondono esattamente ad uno questi periodi, pertanto bisogna tenerne conto nella valutazione delle prestazioni della rete neurale.

Le stime effettuate attraverso la metodica tradizionale invece, nonostante in media producano risultati molto buoni, risultano meno aderenti all'andamento temporale. Ciò è particolarmente evidente nel punto Pa1, 16, dove tra 33° e la 45° ora del monitoraggio gli andamenti dei livelli reali e dei livelli stimati sono evidentemente discrepanti. Ciò nonostante, come è possibile osservare da 1, l'errore medio su tutta la durata del monitoraggio è contenuto.

Tabella 1 - Risultati sintetici della validazione.

		Pa1			Pa2			Pa3		
		Media dB(A)	Dev. St.	Corr.	Media dB(A)	Dev. St.	Corr.	Media dB(A)	Dev St.	Corr.
Pavim. standard	Calibrazione	-1,5	1,7	0,94	-0,6	1,3	0,98	0,3	0,8	0,99
	Validazione	0,4	1,9	0,47	-0,1	1,1	0,96	0,4	1,6	0,57
	Cieco	-1,1	1,1	0,75	-1,3	0,8	0,94	0,2	0,3	0,98
	Totale	-0,8	1,9	0,91	-0,5	1,2	0,97	0,4	1,1	0,97
Pavim. alternativa	Calibrazione	-0,7	1,6	0,94	0,1	1,2	0,98	1	0,9	0,98
	Validazione	1,5	1,8	0,48	0,5	0,9	0,96	1	1,5	0,57
	Cieco	-0,2	1,2	0,74	-0,3	0,6	0,97	1,3	0,5	0,96
	Totale	0,2	1,9	0,9	0,2	1,1	0,98	1	1,1	0,96
Rete neurale	Allenamento	-0,3	0,8	0,98	0	0,5	0,99	-0,3	0,7	0,99
	Test	-0,1	0,9	0,97	0	0,5	1	-0,2	0,8	0,98
	Cieco	1,6	1,2	0,92	1,1	1,1	0,77	0,5	2,3	0,95
	Totale	0,4	1	0,97	0,1	0,7	0,99	0,3	1	0,97

## 6 Conclusioni

Nel corso della Componente T2 del Progetto diversi modelli matematici relativi al rumore portuale sono stati sviluppati. In particolare, l'Università degli studi di Cagliari (UNICA) ha sviluppato una rete neurale che, sulla base del traffico transitante sulla rete stradale, è in grado di fornire stime del rumore generato. La rete permette di effettuare stime con base temporale molto breve, anche pari a un minuto. Nel produrre tali stime il Modello garantisce indubbi vantaggi in termini di potenza computazionale e tempo di elaborazione dei dati necessari alla previsione dei livelli attesi rispetto a un software di simulazione tradizionale.

Nel corso dell'Attività T3.2, **ARPAT** ha interagito con **UNICA** per validare il Modello su uno scenario a lei ignoto, costituito dalla rete stradale antistante il Porto di Cagliari e infine ha effettuato una validazione in cieco per la stessa **UNICA**. I risultati ottenuti dalla rete neurale "non in cieco" sono molto positivi, con una differenza media massima di 0,3 dB(A) e una deviazione standard compresa 0,5 dB(A) e 0,9 dB(A) rispetto ai livelli di rumore misurati.

Le previsioni in cieco sono caratterizzate da una differenza media maggiore, compresa tra gli 0,5 dB(A) del punto Pa3 e gli 1,6 dB(A) del punto Pa1. Tali risultati potrebbero essere dovuti alla peculiarità del traffico nelle ore che sono state riservate alla validazione in cieco. Queste infatti sono ore notturne con bassi volumi di traffico, con una percentuale di mezzi pesanti talvolta superiore alla media, e velocità media oraria superiore alla velocità delle ore diurne. Nonostante il test cieco abbia interessato le ore notturne, quindi le più sfavorevoli, i risultati ottenuti dalla rete neurale sono soddisfacenti, e ciò depone a favore della bontà lavoro svolto dal partner UNICA, poiché il test è stato superato anche nelle condizioni peggiori.

I risultati ottenuti dal software tradizionale sono in media lievemente migliori nelle ore dedicate alla validazione in cieco, con deviazioni medie che vanno da un minimo di 0,2 dB(A) a un massimo di 1,3 dB(A) e deviazioni standard che oscillano tra gli 0,3 dB(A) e gli 1,2 dB(A). Tuttavia l'errore medio su tutta la durata del monitoraggio risulta più elevato, mentre i coefficienti di correlazione tra il livello di rumore stimato e quello effettivo sono inferiori (da 0,90 a 0,98) a quelli ottenuti con la rete neurale (sempre superiori a 0,97).

Osservando gli andamenti temporali è evidente come quelli prodotti dalla rete neurale siano più aderenti ai livelli reali, mentre quelli generati dal software tradizionale vedono più spesso deviazioni. Queste, potrebbero essere dovute a caratteristiche del traffico non adeguatamente descrivibili da velocità medie orarie e numero di veicoli orario. Tali caratteristiche, non possono essere risolte dal software tradizionale, che si basa su valori medi. Infatti, se su SoundPLAN è risultato necessario operare con flussi di traffico relativi ad un periodo orario, la rete, una volta addestrata, fornisce livelli di rumore ambientale presso specifici ricettori con un livello di dettaglio decisamente maggiore (minuto per minuto). In questo modo è possibile individuare con maggiore chiarezza quegli eventi che vanno ad inficiare la bontà dei risultati ottenuti, permettendo non solo di escludere più facilmente gli *outlier*, ma anche di risalire alla causa precisa.

Dal lavoro svolto emerge come, nonostante l'enorme mole di lavoro necessario, il software tradizionale non è adatto a fornire stime orarie o a intervalli minori, nonostante fornisca risultati di comprovata affidabilità su intervalli di tempo ben più lunghi. D'altra parte il modello tradizionale consente la realizzazione di mappe in un unico run, mentre la rete risponde sui ricettori individuati e solo su quelli.

La rete neurale sviluppata si è dimostrata in grado di fornire stime dei livelli di rumore con un errore comparabile a quello di un software certificato rispetto alle misure eseguite sul campo, ma con un ingente risparmio in termini di sforzo computazionale e di lavoro umano se l'interesse specifico è quello di verificare determinati ricettori.

Come già sottolineato nel Paragrafo 1.1, il modello dinamico a rete neurale nasce per fornire risposte ad esigenze differenti rispetto ai modelli con software previsionale tradizionale. Tra i due modelli quindi non c'è una reale competizione, bensì quanto un'ampia possibilità di collaborazione sinergica. Da un lato il modello tradizionale potrebbe essere d'aiuto alla verifica della rappresentatività dei punti monitorati del modello a rete neurale. Dall'altro, il modello a rete neurale potrebbe svolgere il ruolo di modulo preprocessing per un modello convenzionale al fine di fornire un'immagine spaziale complessiva del campo acustico, sulla base dell'evoluzione temporale delle previsioni fornite dal modello di rete neurale.