



Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Settentrionale
Scali Rosciano, 6 - 57123 Livorno, Italia

R.U.P. ing. Enrico Pribaz
D.E.C. ing. Ilaria Lotti

R.T.P.



30035 Mirano (VE)
Viale Belvedere, 8/10
www.fm-ingegneria.com

Tel. +39 041 5785 711
Fax +39 041 4355 933
portolivorno@fm-ingegneria.com



P.O. Box 1132
3800 BC Amersfoort
The Netherlands
www.royalhaskoningdhv.com

Tel. +44 (0)207 222 2115
Fax +44 (0)207 222 2659
info@rhdhv.com



35027 Noventa Padovana (PD)
Via Panà 56/a

Tel. +39 049 8945 087
Fax +39 049 8707 868
mail@hsmarinesrl.com



31027 Spresiano (TV)
Via Tiepolo, 8
www.gtgeo.it

Tel. +39 0422 8870 31
Fax +39 0422 8895 89
info@gtgeo.it

PROGETTO

**PROGETTAZIONE PRELIMINARE E DEFINITIVA DELLE
OPERE MARITTIME DI DIFESA E DEI DRAGAGGI PREVISTI
NELLA NUOVA PRIMA FASE DI ATTUAZIONE DELLA
PIATTAFORMA EUROPA, COMPRESO LO STUDIO DI
IMPATTO AMBIENTALE E LA VALUTAZIONE DI INCIDENZA
AMBIENTALE**

EMISSIONE

PROGETTO DEFINITIVO

TITOLO

C - STUDI AMBIENTALI

Studio di impatto ambientale - Appendice 2 " Studio di modellazione della dispersione degli inquinanti

REV.	DATA	FILE	OGGETTO	DIS.	APPR.
1	24/07/2023	1233_PD-C-012_1.pdf	Aggiornamento in riscontro a Istruttoria VIA [ID VIP 8058]	Arianet srl	T. Tassi
2					
3					
4					
5					

ELABORATO N.

C012

DATA: 31/10/2022	SCALA:	FILE: - 1233_PD-C-012_0.pdf	J.N. 1233/19
PROGETTO Arianet srl	DISEGNO Arianet srl	VERIFICA C. Galli	APPROVAZIONE T. Tassi

Studio modellistico d'impatto
atmosferico della fase di cantiere del
progetto di ampliamento del porto di
Livorno

Rapporto finale

Autori: N.Pepe;C.Pozzi;P.Radice

Riferimento: R2023.10

Luglio 2023

Rapporto R2023.10

Autori: N.Pepe;C.Pozzi;P.Radice

Ciente:

Autorità Portuale di Livorno

SOMMARIO

1	Introduzione	2
2	Area di indagine	3
3	Modellistica meteorologica	4
4	Modellistica emissiva.....	5
4.1	Inventario regionale delle emissioni	5
4.2	Traffico navale portuale	7
4.3	Attività di cantiere	8
4.3.1	Mezzi terrestri operanti nelle aree di cantiere.....	12
4.3.2	Mezzi navali operanti nelle aree di cantiere.....	18
4.4	Predisposizione dell'input al modello di qualità dell'aria.....	23
5	Modellistica di qualità dell'aria	25
5.1	Sistema modellistico e configurazione del modello di qualità dell'aria.....	25
5.2	Simulazione di riferimento, validazione e scenario di cantiere.....	26
5.2.1	Confronto con le stazioni della rete ARPAT	32
5.2.2	Estrazione dei valori simulati in corrispondenza dei recettori sensibili	41
5.3	Simulazione dello scenario di esercizio	46
5.3.1	Estrazione dei valori simulati in corrispondenza delle stazioni ARPAT e dei recettori sensibili.....	51
5.4	Confronti con i dati delle campagne	59
6	Conclusioni.....	64
7	Bibliografia	67
8	Materiale supplementare	68
8.1	Mappe della media annuale - scenario di riferimento – dettaglio urbano.....	68
8.2	Mappe della media annuale - scenario di cantiere – dettaglio urbano.....	73
8.3	Mappe della media annuale - scenario di esercizio – dettaglio urbano	78

1 Introduzione

Nell'ambito del progetto delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, la redazione dello Studio di Impatto Ambientale da parte del Raggruppamento di Professionisti (R.T.P.), costituito tra FM Ingegneria spa, Royal Haskoning DHV, HS Marine Srl e G&T srl prevede di poter utilizzare, come punto di partenza, lo Studio Preliminare Ambientale e il Piano di Lavoro elaborati ai sensi dell'art. 21 del D.Lgs 152/06.

La procedura ex art. 21 del D.Lgs 152/06 (ex procedura di scoping) ha permesso di definire il Piano di Lavoro per la redazione del SIA; la suddetta procedura si è conclusa positivamente con condizioni con N. Determinazione direttoriale MATTM_2021-0000028 del 04/01/2021.

Tale studio preliminare, oltre a sottolineare i significativi impatti sulla componente aria emersi già nel Rapporto Ambientale della VAS del Piano Regolatore Portuale, ha previsto l'utilizzo, per la componente atmosfera, del sistema modellistico della qualità dell'aria messo a punto e validato da ARIANET.

Il sistema è attualmente installato, corredato delle basi dati di riferimento (meteorologia, emissioni, condizioni al contorno per le concentrazioni), presso un server di calcolo dell'Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Settentrionale, ed è quindi utilizzabile per l'analisi di scenari di impatto sulla componente atmosferica. È alimentato da basi dati che descrivono la conformazione del territorio, le emissioni legate alle attività presenti su di esso, nonché gli apporti ai livelli di fondo delle concentrazioni dati dalle sorgenti più lontane.

In base alle osservazioni fatte da ARPAT (nota del 18/12/2019 - prot. DV.03.04/116.26) in merito alla richiesta di parere sul «modello diffusionale qualità dell'aria del Porto di Livorno» fatta da AdSP-MTS, si evidenzia l'opportunità di aggiornare l'input emissivo per lo scenario di riferimento ante operam, in particolare per le parti relative all'inventario regionale (IRSE) che, attualmente, risale al 2010, con l'ultima versione disponibile (2017), allineandosi al contempo con l'anno di rilevazione considerato per la stima delle emissioni alle attività portuali ed al traffico stradale afferente al Porto (2017 / 2018).

Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Settentrionale ha voluto approfondire anche l'aspetto dell'esercizio del porto di Livorno a valle della conclusione dei lavori della Piattaforma Europa valutando gli impatti in atmosfera della modifica della traiettoria delle navi che potranno entrare in porto anche dall'ingresso localizzato a nord del porto.

La presente relazione descrive l'aggiornamento del database emissivo e l'integrazione dello stesso con le sorgenti mobili, terrestri e navali, che opereranno nel cantiere, e la conseguente simulazione modellistica reattiva effettuata sul dominio di riferimento. La relazione include anche la simulazione per lo scenario di esercizio in modalità reattiva sullo stesso dominio.

2 Area di indagine

Il territorio di riferimento per lo sviluppo e l'applicazione e dei modelli di simulazione richiesti è il porto di Livorno ed un suo intorno significativo, comprendente la città di Livorno e l'area ad essa circostante. Il dominio preso in considerazione è riportato in Figura 1: di ampiezza pari a 40 km, include il porto di Livorno, il resto del territorio comunale, la fascia costiera che si estende da Rosignano Solvay sino ad oltre Marina di Pisa ed un entroterra che giunge nella parte settentrionale sino a Pisa.

La scelta del dominio riflette sia la possibilità di considerare le aree potenzialmente interessate da impatti significativi delle attività portuali sulla qualità dell'aria, sia la necessità di includere nelle simulazioni modellistiche i possibili contributi delle sorgenti poste nelle aree circostanti. Il modello di qualità dell'aria scelto per l'implementazione su tale dominio è di tipo tridimensionale reattivo: attraverso un'opportuna descrizione delle condizioni al contorno (concentrazioni evolutive degli inquinanti ai bordi del dominio) è in grado di tenere in conto anche della possibile influenza delle sorgenti poste a maggiori distanze (al di fuori del dominio) sulla formazione degli inquinanti secondari (ozono, particolato secondario, ecc.).



Figura 1. Dominio di simulazione per il modello di qualità dell'aria.

3 Modellistica meteorologica

Le condizioni meteorologiche e diffusive sul territorio di interesse sono state ricostruite attraverso l'applicazione del modello meteorologico prognostico WRF-ARW (<http://wrf-model.org>; <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users>) la cui applicazione come sistema di produzione dei dati di input per modelli di qualità dell'aria si può considerare consolidata e per il quale esiste una vasta letteratura scientifica su attività di sviluppo, applicazione e validazione in tutto il mondo. WRF vanta una vastissima comunità di utilizzatori, con più di 30000 utenti registrati in 150 paesi. La scelta di WRF risulta inoltre congruente con le attività di modellistica meteorologica previsionale svolte dal consorzio LAMMA per la Regione Toscana (<http://www.lamma.rete.toscana.it/meteo/modelli/wrfinfo-sul-modello>). Nel contesto italiano WRF è utilizzato per attività di ricerca da molte università e da diversi istituti del CNR (IBIMET, IIA, ISAC, ISAFOM ed altri) e per attività di supporto alla previsione di qualità dell'aria da alcune agenzie regionali di protezione dell'ambiente (ARPA Lombardia, ARPA Friuli-Venezia Giulia, ARPA Lazio, ARPA Molise, ARPA Puglia, ARPA Calabria).

Non avendo modificato le condizioni relative la modellistica meteorologica, si rimanda alla relazione (ARIANET, 2018) "R2018.17-Sviluppo ed implementazione di un sistema integrato per la valutazione degli impatti sulla qualità dell'aria, per la gestione degli interventi previsti nel PR del Porto di Livorno" per il dettaglio di tutti gli aspetti relativi (appendice 1).

In essa vengono descritti l'acquisizione dei dati geografici e meteorologici, la configurazione del modello e la validazione della simulazione di riferimento, fatta tramite una verifica delle prestazioni del modello sul periodo di durata annuale e della ricostruzione della variabilità stagionale

4 Modellistica emissiva

Per rappresentare al meglio le condizioni emissive dell'area è stato utilizzato il più recente Inventario Regionale delle Sorgenti di Emissioni in atmosfera (IRSE, Regione Toscana), fonte informativa di riferimento per la valutazione di piani, programmi ed interventi che hanno effetto sulla qualità dell'aria nella regione e relativo all'anno 2017.

Ad integrare tale database emissivo con informazioni di maggior dettaglio relative al porto di Livorno ed alle aree circostanti, sono state usate le informazioni disponibili di maggior dettaglio, lasciate invariate dal precedente studio, riferendosi ai medesimi anni del database IRSE.

Per le emissioni associate al traffico navale si è mantenuto il modello emissivo alimentato dai dati forniti dall'ADSP circa i movimenti dei natanti nel corso di 12 mesi (a cavallo degli anni 2017- 2018) e da informazioni complementari circa i mezzi di supporto utilizzati per ciascuna tipologia in fase di manovra; nella presente relazione verranno riportati solo i totali emissivi, a valle della modifica del tenore di zolfo, per la descrizione dettagliata della metodologia si rimanda alla relazione "R2018.17-Sviluppo ed implementazione di un sistema integrato per la valutazione degli impatti sulla qualità dell'aria, per la gestione degli interventi previsti nel PR del Porto di Livorno" (Appendice 1).

Alla medesima relazione si fa riferimento per la stima delle emissioni da traffico stradale relative ad una porzione della rete di accesso al porto e per le emissioni da aerosol marini emessi a seguito dell'azione eolica ed i composti volatili organici emessi dalla vegetazione. Verranno invece spiegati nel dettaglio gli approcci adottati per la stima delle emissioni prodotte dalle attività di cantiere a terra e in mare.

4.1 Inventario regionale delle emissioni

Il primo riferimento utilizzato per la preparazione dell'input emissivo al modello è l'Inventario Regionale delle Sorgenti di Emissioni in atmosfera (IRSE) relativo all'anno 2017, fornito da ARPA Toscana.

Il database emissivo è strutturato in modo da fornire informazioni specifiche circa la tipologia di sorgente, la localizzazione, l'entità e la tipologia delle emissioni; questo risultato si ottiene tramite la classificazione dei dati che segue la metodologia standard europea EMEP-CORINAIR, che definisce le attività in base alle categorie SNAP (Selected Nomenclature for Air Pollution), articolate secondo "macrosettori", "settori" ed "attività".

I macrosettori sono 11 e vengono così definiti:

- macrosettore 1: "produzione energetica", riunisce le emissioni dovute ai processi di trasformazione dell'energia;
- macrosettore 2: "combustione non industriale", cioè le emissioni provenienti da impianti di riscaldamento commerciali ed istituzionali, residenziali ed agricoli stazionari;
- macrosettore 3: "combustione nell'industria", ovvero riscaldamento di capannoni e stabilimenti e tutti i processi che necessitano la presenza di forni di fusione o cottura dei materiali;
- macrosettore 4: "processi produttivi", è il macrosettore che comprende le emissioni legate alla produzione di un determinato bene o materiale;
- macrosettore 5: "estrazione, distribuzione combustibili fossili/geotermico", comprende le emissioni dovute ai processi di produzione, distribuzione, stoccaggio di combustibile solido, liquido e gassoso e riguarda sia le attività sul territorio che quelle off-shore.
- macrosettore 6: "uso di solventi", raggruppa le attività riconducibili all'uso di vernici, allo sgrassaggio alla lavorazione e sintesi dei prodotti chimici, etc...
- macrosettore 7: "trasporti stradali", sono le emissioni (esauste e non) prodotte da automobili, mezzi leggeri e pesanti, motocicli, nei diversi cicli di guida;
- macrosettore 8: "altre sorgenti mobili", ovvero il trasporto ferroviario, i mezzi militari, il traffico marittimo, quello aereo, i mezzi agricoli, forestali ed i mezzi industriali;

- macrosettore 9: “trattamento e smaltimento rifiuti”, raggruppa le attività di incenerimento, spargimento, interrimento di rifiuti, e gli aspetti ad essi collaterali come il trattamento delle acque reflue, il compostaggio, la produzione di biogas, lo spargimento di fanghi, ecc;
- macrosettore 10: “agricoltura”, macrosettore in cui si raggruppano le emissioni legate agli allevamenti, alle attività agricole (con e senza fertilizzanti e/o antiparassitari, pesticidi, diserbanti) ed all’incenerimento di residui effettuato in loco;
- macrosettore 11: “altre sorgenti di emissione ed assorbimenti”, comprende tutte quelle attività non antropiche che generano emissioni (attività fitologica di piante, arbusti ed erba, fulmini, emissioni spontanee di gas, emissioni dal suolo, vulcani, combustione naturale, ecc.).

Oltre alla suddivisione delle emissioni in base alle attività soggiacenti, all’interno dell’IRSE vi è un’ulteriore distinzione, fatta in base alle caratteristiche geometriche delle sorgenti:

- di tipo puntuale: sono emissioni da sorgenti localizzabili geograficamente con precisione che emettono quantità di inquinanti superiori a determinate soglie; le informazioni relative a tali tipi di sorgente vengono solitamente raccolte a partire da apposite schede compilate dai gestori degli impianti;
- di tipo lineare: sono emissioni derivanti da sorgenti assimilabili a linee come, ad esempio, le strade e le linee ferroviarie;
- di tipo diffuso: comprendono tutte le sorgenti non localizzabili, ma distribuite sul territorio (per questo sono spesso anche chiamate emissioni areali); nell’inventario IRSE tali sorgenti sono riferite ai comuni.

Analizzando con particolare dettaglio le emissioni riportate nell’inventario IRSE per il solo comune di Livorno, si osserva come i settori che contribuiscono maggiormente alle emissioni complessive siano essenzialmente il riscaldamento residenziale per quanto riguarda le emissioni di particolato, il traffico stradale e gli altri trasporti, settore, questo, essenzialmente rappresentato dal trasporto marittimo.

In Figura 2 sono riportate le percentuali emissive dei diversi comparti che assumono una importanza diversa in base all’inquinante considerato.

Le emissioni di ossidi di azoto appaiono dominate dal macrosettore 8 – “Altre sorgenti mobili” (62%), che è composto, oltre che dal traffico navale, dal traffico ferroviario, dalle attività legate ai mezzi agricoli e dai mezzi presenti nelle industrie, e dal trasporto stradale (29%). Il particolato è prodotto, con contributi tra essi paragonabili, dal traffico stradale e dalla combustione non industriale (riscaldamento degli edifici) e per circa il 21-24 % dalle altre sorgenti mobili.

Il monossido di carbonio è essenzialmente prodotto dal trasporto stradale, per oltre il 70% del totale, dalla combustione residenziale (15%) e, in piccola parte, dagli altri trasporti. I composti organici volatili sono invece rappresentati per il 60% dalle attività legate all’uso dei solventi e, in seconda battuta, dal traffico su strada e dai processi produttivi.

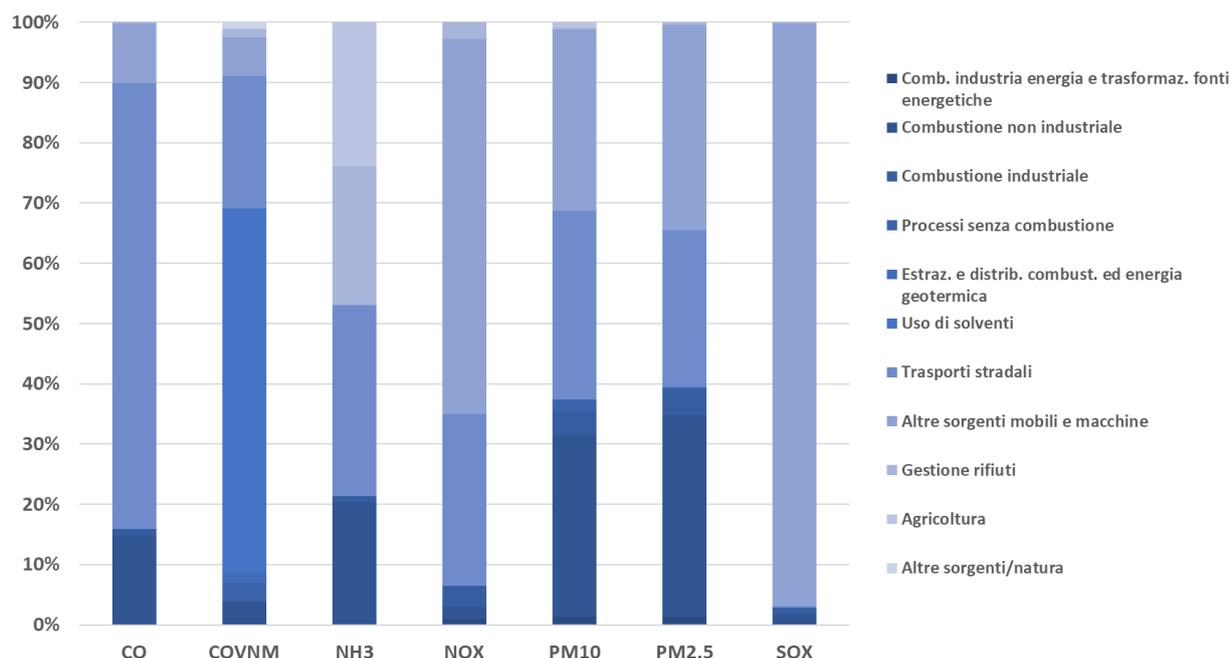


Figura 2. Contributi emissivi dei diversi macrosettori presenti nel comune di Livorno (fonte IRSE 2017).

Dalle osservazioni appena riportate si evince come il comparto navale rappresenti per il comune e per l'area circostante una fonte rilevante di emissioni inquinanti e per questo merita un'attenzione particolare ed un trattamento più approfondito.

4.2 Traffico navale portuale

Come anticipato all'inizio del capitolo, per le emissioni associate al traffico navale si è mantenuto il modello emissivo alimentato dai dati forniti dall'ADSP circa i movimenti dei natanti nel corso di 12 mesi (a cavallo degli anni 2017-2018) e da informazioni complementari circa i mezzi di supporto utilizzati per ciascuna tipologia in fase di manovra e descritto nella relazione "R2018.17-Sviluppo ed implementazione di un sistema integrato per la valutazione degli impatti sulla qualità dell'aria, per la gestione degli interventi previsti nel PR del Porto di Livorno".

I risultati complessivi su base annuale, a valle del ricalcolo delle emissioni di SO₂, per il porto di Livorno sono riportati in Tabella 1. La parte di crociera include la porzione di navigazione all'interno del dominio considerato. Considerando come "emissioni in porto" le emissioni in fase di stazionamento e manovra, si nota come la maggior parte delle emissioni venga prodotta nella fase di stazionamento.

Tabella 1. Emissioni totali per il traffico navale del porto di Livorno calcolate con l'approccio bottom-up. (tenore di zolfo 0.1%)

	CO	COVNM	NOX	PM10	PM2.5	SOX
stazionamento	373	111	2591	138	138	504
manovra	85	53	569	74	74	114
crociera	254	79	2174	150	150	344
rimorchiatori in manovra	14	8	85	8	8	20

Per quanto riguarda i rimorchiatori si è considerata la sola fase di manovra all'interno del porto: essi compiono una parte delle manovre accompagnando le navi e una parte dopo aver lasciato le navi alla propria destinazione (banchina o uscita dal porto). Si è assunto che abbiano una velocità media

di circa 7 km/h in fase “operativa”, e si è poi ipotizzato che in assenza di navi i rimorchiatori compiano le manovre a una velocità di 10 km/h. Perciò al totale delle ore di accompagnamento si è aggiunta la frazione di ore in cui i rimorchiatori svolgono manovre in assenza di navi.

4.3 Attività di cantiere

Con riferimento alla documentazione fornita dall’Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Settentrionale, l’opera in progetto è ubicata a nord del Porto di Livorno, di fronte alle attuali vasche di colmata in prossimità dello scolmatore d’Arno adiacente alla Darsena Toscana e verrà realizzata seguendo le macrofasi descritte nel documento di “Progettazione preliminare e definitiva delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa, compreso lo studio di impatto ambientale e la valutazione di incidenza ambientale” e qui sintetizzate:

- Bonifica bellica dei fondali di tipo superficiale e profonda;
- Dragaggio meccanico dei fondali interessati dalle opere a scogliera per la formazione degli scanni di imbasamento.
- Formazione delle scogliere nei vari strati con materiale lapideo e massi artificiali tipo accropode;
- Rimozione della diga della Meloria e recupero del materiale salpato/demolito all’interno dell’ambito portuale;
- Dragaggio idraulico/meccanico dei fondali di progetto e conferimento del materiale all’interno delle casse di colmata;
- Gestione del materiale all’interno della cassa di colmata con drenaggio delle acque mediante manufatto di sfioro.

Il presente studio è stato redatto considerando le fasi operative definite dal Raggruppamento Temporaneo di Imprese (RTI Impese) che eseguiranno i lavori, secondo lo specifico cronoprogramma definito in sede di gara ed aggiornato in data 30/9/2022.

In tale cronoprogramma le singole macrofasi sono state affidate a specifiche squadre operative, in cui oltre alla rappresentazione delle lavorazioni sono state esplicitate le risorse (mezzi e personale) (Figura 3), e la matrice di impiego delle squadre in funzione dei semestri e delle aree di lavoro (Figura 4), in modo da poter effettuare un’analisi estremamente dettagliata dei lavori, producendo un planning realistico, coerente e quindi affidabile.

Al fine di mantenere un approccio cautelativo nella stima degli impatti sulla matrice atmosferica, è stata considerata la distribuzione delle attività nei diversi anni di cantiere; dall’analisi dettagliata del cronoprogramma è stata definita come fase critica il 3° anno (semestri 5 e 6) che verrà dunque utilizzato come anno di riferimento per i calcoli emissivi.

In Tabella 2 sono riportate le quantità di materiali trasportati nei semestri 5 e 6 presi in considerazione per le simulazioni; i valori riportati potranno discostarsi dal bilancio delle forniture desunte dal computo metrico, senza comunque influire significativamente sulle stime elaborate.



Figura 3. Composizione delle squadre interessate nelle diverse fasi di lavoro

		SEMESTRI							
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
SQUADRE	SQ.1	WBS2b WBS3	WBS2a WBS2b WBS4b	WBS4a	WBS6	WBS1 WBS6 WBS7			
	SQ.2	WBS2b WBS3	WBS2a WBS2b WBS4b	WBS2a WBS4b	WBS6	WBS1 WBS6	WBS5		
	SQ.3	WBS3	WBS2a WBS2b WBS3 WBS4b	WBS2a WBS4b	WBS6	WBS1 WBS6	WBS5		
	SQ.4		WBS2a WBS2b WBS3 WBS4b	WBS2a WBS2b WBS4b	WBS2a WBS4a WBS4b	WBS1 WBS4a WBS6	WBS1 WBS5		
	SQ.5		WBS2b WBS3	WBS2a WBS2b	WBS2a WBS4a	WBS1 WBS4a WBS6	WBS1 WBS5		
	SQ.6		WBS2b WBS3	WBS2a WBS2b WBS4b	WBS2a WBS4a WBS4b	WBS1 WBS2b WBS4a WBS6	WBS1 WBS5		
	SQ.7			WBS2a	WBS2a	WBS1 WBS6	WBS1		
	SQ.8				WBS10 WBS11	WBS11 WBS12 WBS13	WBS12 WBS13 WBS14		
	SQ.9					WBS12	WBS12 WBS13 WBS14		
	SQ.10	WBS1 WBS2a WBS2b WBS3 WBS4a WBS4b	WBS4a	WBS6 WBS10 WBS11	WBS12 WBS13 WBS14				
	SQ.11					WBS7	WBS7	WBS7	
	SQ.12	WBS2a	WBS2a	WBS2a WBS6	WBS6	WBS1 WBS6	WBS1		
	SQ.13		WBS2b		WBS2a	WBS2b WBS3	WBS1 WBS2a WBS2b		
	SQ.14					WBS2a	WBS2a		
	SQ.15						Vasca2-1 Vasca2-2	Vasca2-1 Vasca2-2 Vasca2-3	Vasca2-2 Vasca2-3
	SQ.16					WBS7	WBS7	WBS7	

Figura 4. Matrice di impiego delle squadre in funzione dei semestri e delle aree di lavoro

Tabella 2. Materiali complessivi (mc) da trasportare nei semestri 5 e 6

LAVORAZIONI	WBS	QUANTITA' [mc]
POSA MATERIALE 1° CAT 50-500 kg (nucleo rettilineo)	WBS 1 rettilineo	226 832.90
POSA MATERIALE 1° CAT 50-500 kg (nucleo testata)	WBS 1 testata	22 182.24
POSA MATERIALE 1° CAT 50-500 kg (nucleo + scanno)	WBS 4A	433 106.84
POSA MATERIALE 1° CAT 50-500 kg (nucleo + scanno)	WBS 5	24 968.84
POSA MATERIALE 1° CAT 50-500 kg (nucleo + scanno)	WBS 6	185 751.28
		30 886.47
POSA MATERIALE 1° CAT 500-1000 kg (filtro + scanno rettilineo)	WBS 1 rettilineo	14 552.65
POSA MATERIALE 1° CAT 500-1000 kg (filtro + scanno testata)	WBS 1 testata	9 353.23
POSA MATERIALE 1° CAT 500-1000 kg (filtro)	WBS 1	22 900.39
POSA MATERIALE 1° CAT 500-1000 kg (filtro)	WBS 4A	49 415.52
POSA MATERIALE 1° CAT 500-1000 kg (filtro)	WBS 5	1 978.79
POSA MATERIALE 1° CAT 500-1000 kg (scanno)	WBS 6	4 838.75
POSA MATERIALE 1°/2° CAT 500-1500 kg (filtro)	WBS 6	68 191.88
POSA SCOGLI 2°/3° CAT 1000-3000 kg (mantellata)	WBS 5	6 953.12
POSA SCOGLI 2°/3° CAT 1000-3000 kg (piede)	WBS 6	16 429.82
POSA SCOGLI 3°/4° CAT 2000-4000 kg (piede)	WBS 1	1 706.04
	WBS 1	2 213.05
POSA SCOGLI 3°/4° CAT 2000-4000 kg (piede)	WBS 6	4 863.72
POSA SCOGLI 4° CAT 3000-7000 kg (piede)	WBS 1	16 400.04
POSA SCOGLI 4° CAT 3000-5000 kg (mantellata)	WBS 4A	91 367.67
POSA SCOGLI 4° CAT 3000-5000 kg (mantellata)	WBS 5	1 807.90
POSA SCOGLI 4° CAT 3000-7000 kg (piede)	WBS 6	10 177.63
POSA ACCROPODI 4-5 mc (rettilineo)	WBS 1 rettilineo	68 032.37
POSA ACCROPODI 4-5 mc (testata)	WBS 1 testata	4 358.60
POSA ACCROPODI 4-5 mc	WBS 6	72 612.39
MATERIALE ARIDO PER VIBROSOSITUZIONE	WBS 1	288 166.62
MATERIALE ARIDO PER VIBROSOSITUZIONE	WBS 5	34 050.59
MATERIALE ARIDO PER VIBROSOSITUZIONE	WBS 6	244 816.17

4.3.1 Mezzi terrestri operanti nelle aree di cantiere

Per i mezzi di lavoro operanti nelle aree di cantiere si considerano le tipologie, il numero e le caratteristiche di funzionamento fornite dal RTI Imprese, riportate in Tabella 3

Tabella 3. Mezzi off road impiegati per la realizzazione delle opere marittime

ID SQUADRA	TIPOLOGIA	#	POTENZA	Load Factor (%)	FUNZIONAMENTO (ore/giorno)
2	Escavatore CAT 330	1	204 kW	80%	10
3	Muletto	1	25 kW	80%	8
4	Escavatore CAT 330	2	204 kW	80%	8
	Dozer D6	1	161 kW	80%	8
5	Escavatore CAT 330	1	204 kW	80%	8
6	Gru 300 ton	1	455kW	80%	8
7	Gru 300 ton	1	455kW	80%	8
8	Dozer D6	1	161 kW	80%	20
	Escavatore Cat 330	1	204 kW	80%	20
9	Dozer D6	1	161 kW	80%	20
	Escavatore Cat 330	1	204 kW	80%	20
11	Escavatore CAT 330	1	204 kW	80%	8
	Dozer D6	1	161 kW	80%	8
	Impianto frantumazione	1	175 kW	80%	8
12	Escavatore CAT 330	2	204 kW	80%	8
	Muletto	2	25 kW	80%	8
13	Muletto	1	25 kW	80%	8
	Gru 100 ton	1	355 kW	80%	8
14	Muletto	1	25 kW	80%	8
	Trivella Micropali	2	72 kW	80%	8
15	Trivella Dreni pvd	3	204 kW	80%	8
	Dozer D6	1	161 kW	80%	8
	Escavatore CAT 330	4	204 kW	80%	8
	Slingers	4	80 kW	80%	8
16	Escavatore CAT 330	4	204 kW	80%	8
	Dozer D6	1	161 kW	80%	8
	Impianto frantumazione	1	175 kW	80%	8

Per la stima delle emissioni relative si sono utilizzati i fattori di emissione OFFROAD (CaIEEMod v2016.3.2) disponibili nel Road Construction Emission Model (versione 9.0.0 - <http://www.airquality.org/>) in massa per unità di potenza, per anno e tipologia di macchinario. Come anno di riferimento per i semestri 5 e 6 del cronoprogramma di cantiere del porto di Livorno si è considerato il 2025, per cui i mezzi previsti, associati alla specifica squadra di lavoro (prima colonna in Tabella 3), si considerano operativi 6gg/7 su una o più opere marittime (WBS) a seconda della programmazione operativa delle attività di cantiere nei semestri considerati (Anno 3). La formula applicata per valutare le emissioni di questo settore è:

$$E_i = \sum_{k,z} e_{ij} \times P_j \times LF$$

dove:

- e_{ij} fattore di emissione in [g/hp/hr] specifico per inquinante i e tipologia di mezzo j

- P potenza [hp]
- LF percentuale di carico del motore [%]
- k numero di mezzi contemporaneamente operanti
- z ore di funzionamento di ciascun mezzo

Le emissioni orarie del complesso dei mezzi terrestri associati a ciascuna squadra risultano le seguenti:

Tabella 4. Stima delle emissioni esauste (kg/h) generate dai motori dei mezzi terrestri di cantiere

ID Squadra	NOX	PM10	PM2.5	SOX	CO	NMVOG
2	0.157	0.005	0.005	0.0008	0.1765	0.0213
3	0.079	0.004	0.003	0.0001	0.1006	0.0127
4	0.859	0.040	0.037	0.0022	0.8182	0.1020
5	0.157	0.005	0.005	0.0008	0.1765	0.0213
6	0.784	0.032	0.029	0.0018	0.6674	0.0795
7	0.784	0.032	0.029	0.0018	0.6674	0.0795
8	0.702	0.035	0.032	0.0014	0.6418	0.0807
9	0.702	0.035	0.032	0.0014	0.6418	0.0807
11	0.884	0.043	0.040	0.0023	1.0962	0.1185
12	0.471	0.017	0.016	0.0018	0.5541	0.0681
13	0.690	0.029	0.026	0.0015	0.6213	0.0747
14	0.181	0.008	0.007	0.0007	0.4431	0.0258
15	2.168	0.086	0.079	0.0075	2.5778	0.2493
16	1.355	0.059	0.055	0.0047	1.6256	0.1825

4.3.1.1 Produzione polveri provenienti da attività di trattamento inerti

Per quanto riguarda la produzione di polveri durante le operazioni di cantiere, le attività che contribuiscono alla formazione di polveri risultano la frantumazione, la formazione dei cumuli e l'erosione eolica dai medesimi, il transito su strada sterrata.

I calcoli presentati in questo documento ripercorrono le Linee Guida di ARPAT per la valutazione delle emissioni di polveri provenienti da attività di produzione, manipolazione, trasporto, carico o stoccaggio di materiali polverulenti, che fanno riferimento ai metodi proposti e validati dall'US-EPA contenuti nel documento AP-42 "Compilation of Air Pollutant Emission Factors". Ogni fase, possibile fonte di emissione di polveri, viene classificata attraverso il codice SCS (Source Classification Codes).

4.3.1.1.1 Frantumazione

L'impianto di frantumazione e vagliatura previsto in progetto verrà localizzato, secondo le specifiche informazione fornite dal RTI Imprese, all'interno del cantiere nelle aree portuali (vasche di colmata).

La valutazione degli impatti relativa all'impianto di frantumazione e vagliatura è stata oggetto di uno studio specialistico (cfr. Studio di impatto ambientale, Quadro Ambientale), basato sui dati di progetto con trattamento di 27.500 mc (60.000 ton) di materiali derivanti dalla rimozione della diga delle Meloria, con trattamento giornaliero di circa 300 mc/giorno. Considerando che l'impianto è dotato di sistemi di abbattimento delle polveri, si stimano 0.225 kg/ora di emissioni di PM10, distribuite nell'arco temporale 8:00- 20:00, 5gg/7, per una durata di circa 100 giorni.

4.3.1.1.2 Accumulo materiali

Un'attività suscettibile di produrre l'emissione di polveri è l'operazione di formazione e stoccaggio del materiale in cumuli in uscita dall'impianto di frantumazione e vagliatura; quindi, collocati sempre nel cantiere principale.

Il modello proposto nel paragrafo 13.2.4 "Aggregate Handling and Storage Piles" dell'AP-42 calcola l'emissione di polveri per quantità di materiale lavorato in base al fattore di emissione:

$$EF_i(\text{kg/Mg}) = k_i(0.0016) \frac{\left(\frac{u}{2.2}\right)^{1.3}}{\left(\frac{M}{2}\right)^{1.4}}$$

dove:

- i = particolato
- k_i = coefficiente dipendente dalle dimensioni del particolato
- u = velocità del vento (m/s)
- M = contenuto percentuale di umidità (%)

L'espressione è valida entro il dominio di valori per i quali è stata determinata, ovvero per un contenuto di umidità di 0.2-4.8 %. Poiché il materiale inerte trattato nell'impianto di frantumazione presenta una matrice fortemente arida e secca si assume cautelativamente che l'umidità sia pari allo 0.2%, limite inferiore del range di applicazione dell'equazione.

Poiché le emissioni dipendono dalle condizioni meteorologiche, esse variano nel tempo e per poter ottenere una valutazione preventiva delle emissioni di una certa attività occorre riferirsi ad uno specifico periodo di tempo, ipotizzando che in esso si verificano mediamente le condizioni anemologiche tipiche dell'area in cui avviene l'attività.

Nelle Linee Guida ARPAT si specifica che ai fini di una stima globale delle emissioni dovute a questo tipo di attività, si possa utilizzare la distribuzione di frequenze della velocità del vento della stazione di Empoli-Riottoli e quindi l'espressione per il calcolo può essere semplificata riducendosi a:

$$E_{i,\text{diurno}} = k_i \cdot (0.0058) \cdot \frac{1}{M^{1.4}} \quad E_{i,\text{notturno}} = k_i \cdot (0.0032) \cdot \frac{1}{M^{1.4}}$$

Considerando che l'attività si limita alle ore diurne (8-20) e un valore di $k_{\text{PM}_{10}}=0.35$ e $k_{\text{PM}_{2.5}}=0.11$, si ottengono i fattori di emissione pari a 0.019 [$\text{kg}_{\text{PM}_{10}}/\text{Mg}$] e 0.006 [$\text{kg}_{\text{PM}_{2.5}}/\text{Mg}$], che moltiplicati per la quantità di materiale trattato (36 t/h, dato di progetto) portano ad emissioni rispettivamente di 0,7 [$\text{kg}_{\text{PM}_{10}}/\text{h}$] e 0,22 [$\text{kg}_{\text{PM}_{2.5}}/\text{h}$].

4.3.1.1.3 Erosione del vento dai cumuli

Le emissioni causate dall'erosione del vento sono dovute all'occorrenza di venti intensi su cumuli soggetti a movimentazione. Nell'AP-42 (paragrafo 13.2.5 "Industrial Wind Erosion") queste emissioni sono trattate tramite la potenzialità di emissione del singolo cumulo in corrispondenza di certe condizioni di vento. La scelta operata nel presente contesto è quella di presentare l'effettiva emissione dell'unità di area di ciascun cumulo soggetto a movimentazione dovuta alle condizioni anemologiche attese nell'area di interesse. In riferimento alla distribuzione di frequenze dei valori della velocità del vento di Empoli-Riottoli il rateo emissivo orario si calcola dall'espressione:

$$E_i(\text{kg/h}) = EF_i \cdot a \cdot \text{movh}$$

dove:

- a = superficie dell'area movimentata in m^2
- movh = numero di movimentazioni/ora

- EF_i = fattore di emissione areale dell'i-esimo tipo di particolato, distinto per cumuli alti o bassi

I cumuli in questione sono assimilabili a prismi triangolari con dimensioni di base 20 m x 70 m e altezza 3 m. Nella metodologia si assume invece che la forma di un cumulo sia conica, sempre a base circolare, per cui è necessario stimarne una dimensione lineare che ragionevolmente rappresenti il diametro (42.2 m) della base circolare equivalente a quella reale (1400 m²).

Considerando il rapporto H/D =0.07 i fattori di emissione areali da considerare risultano:

cumuli bassi $H/D \leq 0.2$	
	$EF_i (kg/m^2)$
PTS	5.1E-04
PM ₁₀	2.5 E-04
PM _{2,5}	3.8 E-05

Considerando che la superficie dell'area movimentata del cumulo sia cautelativamente pari al suo fronte (30 mq) e che sulla base della capacità dei mezzi si compia una movimentazione all'ora, si ottiene un'emissione di 0.0075 kg/h di PM10 e di 0.0011 kg/h di PM2.5.

4.3.1.1.4 Passaggio dei mezzi su sterrato

Per il calcolo dell'emissione di particolato dovuto al transito di mezzi su strade non asfaltate si ricorre al modello emissivo proposto nel paragrafo 13.2.2 "Unpaved roads" dell'AP-42. Il rateo emissivo orario risulta proporzionale a (i) il volume di traffico e (ii) il contenuto di limo (silt) del suolo, inteso come particolato di diametro inferiore a 75 µm. Il fattore di emissione lineare dell'i-esimo tipo di particolato per ciascun mezzo EF_i (kg/km) per il transito su strade non asfaltate all'interno dell'area industriale è calcolato secondo la formula:

$$EF_i (kg/km) = k_i \cdot (s/12)^{a_i} \cdot (W/3)^{b_i}$$

dove:

- i = particolato (PTS, PM10, PM2.5)
- s = contenuto in limo del suolo in percentuale in massa(%)
- W = peso medio del veicolo (Mg)

Tabella 5. Coefficienti variabili in funzione della dimensione del particolato

	k_i	a_i	b_i
PTS	1.38	0.7	0.45
PM ₁₀	0.423	0.9	0.45
PM _{2,5}	0.0423	0.9	0.45

L'espressione (6) è valida per un intervallo di valori di limo (silt) compreso tra l'1.8% ed il 25.2%. Nel caso in esame si è considerato un valore di $s = 7.1\%$ relativo a Sand and gravel processing - Material storage area (Table 13.2.2-1, sezione "Unpaved Roads" AP-42).

Come peso dei veicoli transitanti sulle strade sterrate di cantiere si è considerato un peso medio tra andata e ritorno di 47.5 ton per il dumper e 30 ton per i camion, ottenuti dalle medie dei pesi a pieno carico / a vuoto (rispettivamente dumper: 65 t / 30 t e camion: 50 t / 10 t). Come percorrenze interne si utilizzano i dati forniti dal RTI imprese e progettisti relative ai seguenti mezzi e numero:

Tabella 6. Dati di attività e risolleamento polveri dei mezzi transitanti sulle piste di cantiere sterrate

Squadra	TIPOLOGIA	Q.tà	Percorrenze interne [km/giorno]		EF [kg/km]		Emissioni [kg/giorno]	
			unitarie	Tot.	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5
4	Camion	30	5	150	0.743	0.074	111.5	11.15
12	Camion	12	5	60	0.743	0.074	44.6	4.46
15	Dumper articolato	5	5	25	0.914	0.091	22.9	2.29
-	Totale	47	-	235	-	-	179.0	17.90

Le emissioni sono attribuite alle sorgenti lineari rappresentate dalla viabilità interna (Figura 5.) e modulate temporalmente in accordo con gli orari di attività dei camion nell'intervallo 6:00- 22:00, 6gg/7.

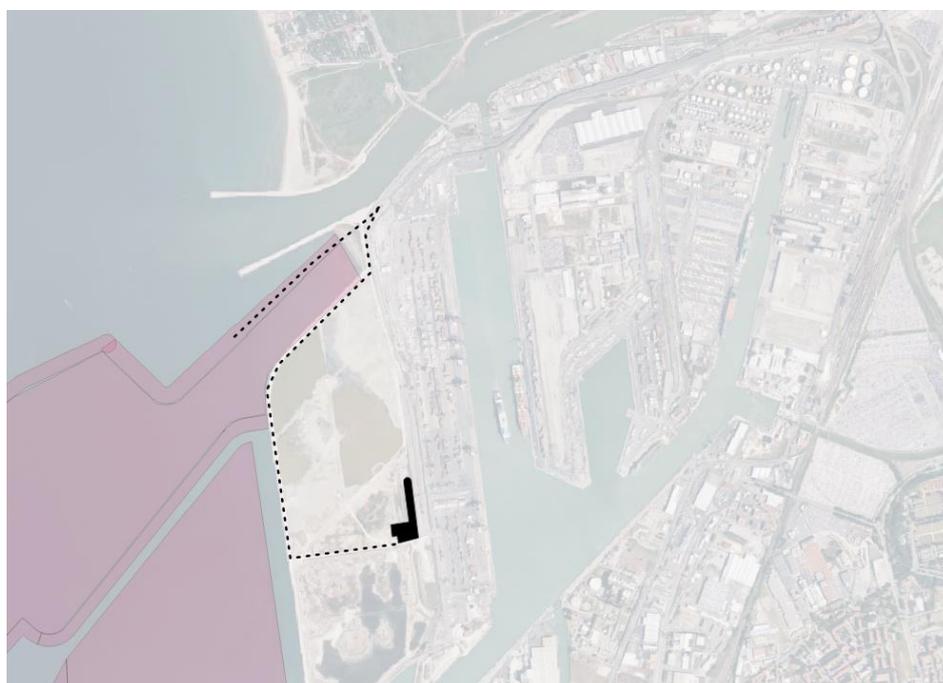


Figura 5. Viabilità interna di cantiere (linee tratteggiate) e area di frantumazione/cumuli (nero)

Si riepilogano in Tabella 7. i ratei emissivi orari di polveri generate da ciascuna delle attività previste all'interno del cantiere del Porto di Livorno legate al trattamento di materiali inerti e polverulenti.

Tabella 7. Stima delle emissioni di polveri generate dalle attività di cantiere (kg/h)

Attività	PM10	PM2.5
Frantumazione e macinazione del materiale	0.225	-
Formazione e stoccaggio di cumuli	0.70	0.22
Erosione del vento dai cumuli	0.0075	0.0011
Transito di mezzi su strade sterrate	11.19	1.12

4.3.1.2 Trasporto materiali via terra

Facendo riferimento ai periodi di attività più intensa del cantiere (3° anno), si prevede che la modalità di trasporto via terra soddisfi un fabbisogno di circa 3 mila tonnellate al giorno. In funzione della capacità dei mezzi e delle condizioni operative a regime sono stati forniti i flussi di mezzi di approvvigionamento materiali su gomma, intesi come viaggi in ingresso al cantiere distinti per tipologia di fornitura:

Tabella 8. Flussi giornalieri di camion in ingresso al cantiere per approvvigionamento materiali

Tipo di materiale	V. pesanti / giorno
Materiale lapideo	64
Calcestruzzo	80
Accropodi	16
Ferro / casseri	24
Altre forniture	40
TOTALE	224

L'attività di trasporto definita dal RTI Imprese si considera operativa per 16 ore lavorative giornaliere (dalle 6:00 alle 22:00) e per 24 giorni lavorativi / mese. Tale cadenza è stata definita in maniera cautelativa (ai fini del carico emissivo) al fine di completare le opere secondo il cronoprogramma di progetto. Si considera comunque che eventuali variazioni del cronoprogramma con aumenti dei tempi di lavoro comporteranno una diluizione dei flussi di traffico con minori carichi emissivi puntuali.

La stima delle emissioni dei veicoli coinvolti nel trasporto materiali è stata effettuata utilizzando il codice TREFIC5.2 sviluppato da ARIANET srl, che implementa la metodologia europea COPERT 5.2.2 per la stima dei fattori di emissione dei veicoli stradali (Ntziachristos, 2017), espressi come massa di inquinante per unità di percorrenza [g/km] riferiti a ciascun veicolo. Questi coefficienti dipendono:

- dal tipo di carburante (benzina con o senza piombo, gasolio, gpl);
- dal tipo di veicolo (motociclo, autovettura, veicolo commerciale leggero o pesante, autobus);
- dalla velocità media di percorrenza;
- dal tipo di strada percorsa (urbana, extraurbana, autostrada);
- dalla cilindrata del motore per i veicoli passeggeri e dalla portata nel caso di veicoli commerciali;
- dall'età del veicolo, o più precisamente dall'anno di costruzione, che permette di risalire alla tecnologia costruttiva, normata dalle varie direttive europee che regolamentano le massime emissioni dei nuovi motori, e di legare il fattore d'emissione allo stato di efficienza e di manutenzione del veicolo stesso.

Tra le specie inquinanti stimate dal modello merita particolare attenzione in questo contesto la produzione di particolato (PM), riguardo al quale la metodologia Copert5.2 contiene i fattori di emissione aggiornati che considerano sia la componente esausta che quella legata alle abrasioni (delle parti meccaniche del veicolo, pneumatici e manto stradale).

Per quanto riguarda l'appartenenza dei camion alle categorie COPERT disponibili, sono stati utilizzati i dati forniti dal RTI Imprese per individuare la portata (32 ton) e la tecnologia costruttiva (Euro V, sulla base dell'anno di immatricolazione 2012).

Le percorrenze dei camion utilizzate per la stima delle emissioni considerano il viaggio di andata e ritorno tra il cantiere e i siti di approvvigionamento (le cave di Piombino e Carra definite in progetto per la fornitura del materiale lapideo, aree di cantiere Biscottino e Pian di Rota per il resto delle forniture), considerando i mezzi alternativamente a pieno carico o vuoti.

La velocità media di percorrenza sui tratti interessati dal transito dei mezzi è stata considerata di 70 km/h (strade extraurbane e tratti di autostrada).

Si mostra qui di seguito il riepilogo delle emissioni generate dal transito dei mezzi di approvvigionamento materiali.

Tabella 9. Emissioni orarie (kg/h) generate dal transito dei mezzi terrestri di approvvigionamento materiali

	NOX	PM10	PM2.5	SOX	CO	NM VOC	NH3
Materiale lapideo	1.243	0.059	0.042	0.0018	0.5959	0.0183	0.0021
Calcestruzzo	0.374	0.018	0.013	0.0005	0.1791	0.0055	0.0006
Accropodi	0.075	0.004	0.003	0.0001	0.0358	0.0011	0.0001
Ferro / casseri	0.112	0.005	0.004	0.0002	0.0537	0.0017	0.0002
Altre forniture	0.187	0.009	0.006	0.0003	0.0896	0.0028	0.0003

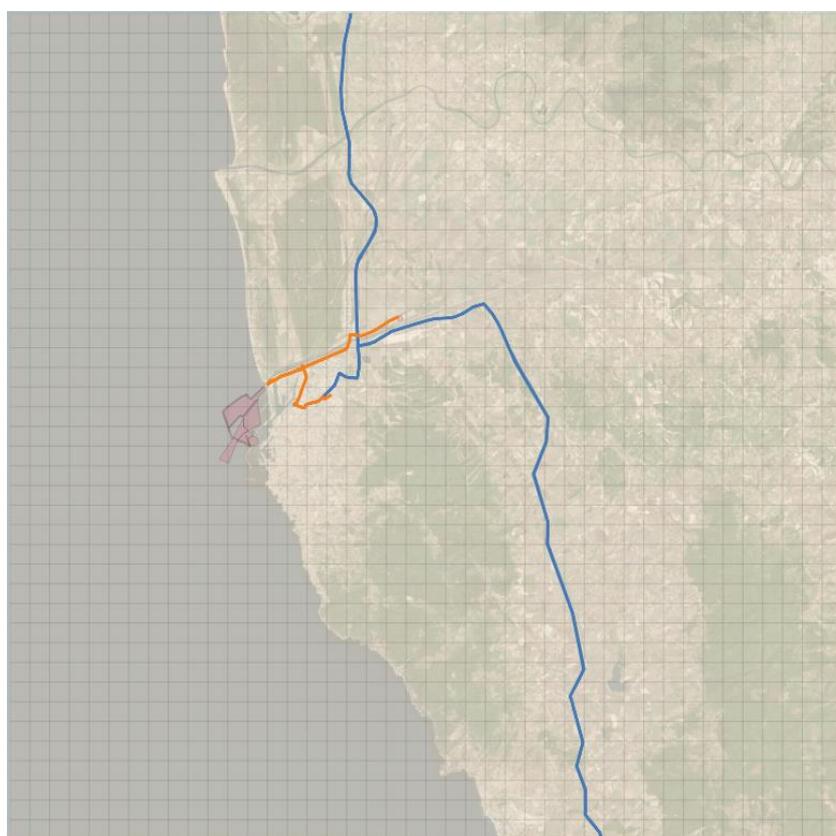


Figura 6. Percorsi stradali per approvvigionamento materiali al cantiere (in blu per materiale lapideo)

4.3.2 Mezzi navali operanti nelle aree di cantiere

Per realizzare una stima bottom-up delle emissioni navali, in grado di cogliere la differenza tra le varie aree del cantiere, sia in termini di quantità emesse sia della loro articolazione nel tempo, si è fatto riferimento agli approcci descritti nelle linee guida europee dell'Emission Inventory Guidebook (EMEP/EEA, 2019), dove vengono definite diverse metodologie di calcolo in base ai dati effettivamente a disposizione.

Nel caso in esame la ricchezza di informazioni messe a disposizione dal RTI Imprese ha fatto sì che si potesse utilizzare l'approccio più dettagliato, in grado di differenziare i movimenti delle navi e l'utilizzo dei diversi motori nelle fasi analizzate, stimando dunque le emissioni in base alle potenze utilizzate per determinati intervalli di tempo.

Nelle Tabelle 10 e 11, sono riportate le caratteristiche dei mezzi navali interessati dalle fasi di lavoro che si svolgeranno nell'anno 3.

Tabella 10. Mezzi navali impiegati per la realizzazione delle opere marittime

NOME	TIPOLOGIA	POTENZA [kW]	
		MOTORI PRINCIPALI	MOTORI SECONDARI
Fabio Duo	motonave	2x825 kw	2x150kw + 1x200kw
Massimo	motonave	2x825 kw	2x150kw + 1x200kw
Filippo	motonave	2x354 kw	1X77kw + 1x28kw
San Gennaro I	motonave	2x354 kw	1X77kw + 1x28kw
Marco	galleggiante		1x24kw
Maria Vittoria	motonave	2x825 kw	2x150kw + 1x200kw
Destriero I	motonave	2x825 kw	2x150kw + 1x200kw
Guang Rong	motonave	2x354 kw	1X77kw + 1x28kw
San Marco I	motonave	2x354 kw	1X77kw + 1x28kw
Nino I	motonave	2x354 kw	1X77kw + 1x28kw
Venezia	motonave	2x354 kw	1X77kw + 1x28kw

Tabella 11. Draga e Tug impiegati per la realizzazione delle opere marittime

NOME	TIPOLOGIA MOTORE	POTENZA [kW]
DRAGA CSD AMAZONE	MAIN GENERATOR ENGINE	6000
	DREDGE PUMP ENGINE	6000
	AUX GENERATOR ENGINE	760
TUG MT BUCKINGHAM	PROPULSION ENGINECATERPILLAR 3508B	2 X 760
	MAIN GENERATOR ENGINECATERPILLAR 3412C	328
	PORT GENERATOR ENGINECATERPILLAR 3056T	84

Per ognuno di questi motori è stato fornito un fattore di carico differenziato in base alla fase ed è stato associato il fattore di emissione opportuno in base al tipo di motore (principale o ausiliario), alla fase e, ovviamente, all'inquinante (per la metodologia dettagliata del calcolo bottom up delle emissioni da trasporto navale si faccia riferimento alla relazione "R2018.17-Sviluppo ed implementazione di un sistema integrato per la valutazione degli impatti sulla qualità dell'aria, per la gestione degli interventi previsti nel PR del Porto di Livorno").

Si sono dunque ottenute le emissioni orarie per singolo mezzo navale (Tabella 12) che sono state utilizzate per la stima delle pressioni prodotte nelle diverse aree di cantiere (rappresentate in Figura 7) nel corso dei semestri 5 e 6, ipotizzando un'operatività di 24h/giorno e 7giorni/settimana nei periodi di attività delle diverse squadre.

Tabella 12. Emissioni orarie generate dai mezzi navali presenti nei diversi corpi d'opera (kg/h).

NOME	CO	NMVOC	NOx	PM10	PM2.5	SOX
Fabio Duo	1.68	0.58	9.38	0.80	0.80	0.45
Massimo	1.68	0.58	9.38	0.80	0.80	0.45
Filippo	0.63	0.22	3.42	0.33	0.33	0.17
San Gennaro I	0.63	0.22	3.42	0.33	0.33	0.17
Marco	0.04	0.01	0.31	0.01	0.01	0.01
Maria Vittoria	1.68	0.58	9.38	0.80	0.80	0.45
Destriero I	1.68	0.58	9.38	0.80	0.80	0.45
Guang Rong	0.63	0.22	3.42	0.33	0.33	0.17
San Marco I	0.63	0.22	3.42	0.33	0.33	0.17
Nino I	0.63	0.22	3.42	0.33	0.33	0.17
Venezia	0.63	0.22	3.42	0.33	0.33	0.17
DRAGA CSD AMAZONE	6.68	6.08	40.10	3.65	3.65	1.81
TUG MT BUCKINGHAM	0.74	0.27	4.01	0.41	0.41	0.20

- Filippo e San Gennaro (aventi capacità di 2000 ton-viaggio) per il trasporto di ghiaia, con tempi di carico e scarico di 4 ore.

Le modalità di approvvigionamento dei materiali lapidei con trasporto marittimo sono state definite da RTI Imprese con le seguenti ripartizione tra i siti individuati: 70% Piombino, 20% Carrara e 10% Olbia.

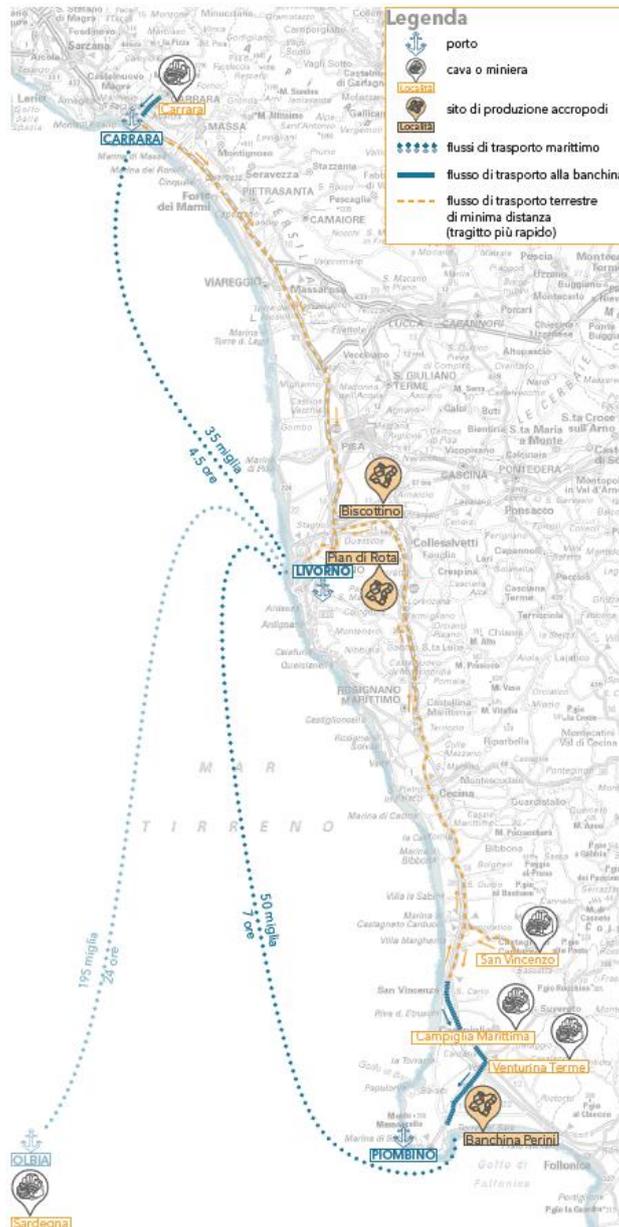


Figura 8. Percorsi dei mezzi navali per il trasporto dei materiali

Analogamente a quanto fatto per il calcolo delle emissioni in fase operativa nelle aree di cantiere, si sono ottenute le emissioni orarie per i mezzi navali interessati dal trasporto di materiale (Tabella 13), mentre per le fasi di carico e scarico si fa riferimento alle emissioni riportate in Tabella 12.

Tabella 13. Emissioni orarie generate dai mezzi navali nelle fasi di trasporto materiale (kg/h).

NOME	CO	NMVOC	NOx	PM10	PM2.5	SOX
Maria Vittoria	2.18	0.31	16.06	0.43	0.43	0.57
Guang Rong	0.89	0.12	6.61	0.18	0.18	0.23
Filippo	0.89	0.12	6.61	0.18	0.18	0.23
San Gennaro	0.89	0.12	6.61	0.18	0.18	0.23

4.4 Predisposizione dell'input al modello di qualità dell'aria

I dati emissivi relativi alle sorgenti finora descritte sono stati utilizzati per generare l'input emissivo al modello di qualità dell'aria (FARM). Tale input è su base oraria, riferito alle le griglie di calcolo considerate e deve includere tutte le specie chimiche articolate secondo le specifiche del meccanismo chimico adottato dal modello. I dati di inventario sono invece espressi in termini di totali annuali, sono riferiti ad entità geografiche di diversa geometria e si riferiscono a specie aggregate (es. totale dei "composti organici non metanici").

Il passaggio dai dati di inventario all'input del modello viene effettuato attraverso il sistema Emission Manager, il pre-processore delle emissioni del sistema modellistico ARIA Regional (si veda al capitolo successivo).

La Figura 9 illustra concettualmente la sequenza delle operazioni effettuate da Emission Manager:

- speciazione dei composti organici e del particolato, sulla base di profili tipici di ogni attività;
- disaggregazione spaziale sui due grigliati di calcolo, con l'ausilio di dati cartografici tematici;
- modulazione temporale a risoluzione oraria sulla base di profili annuali, settimanali e giornalieri tipici di ciascuna attività.

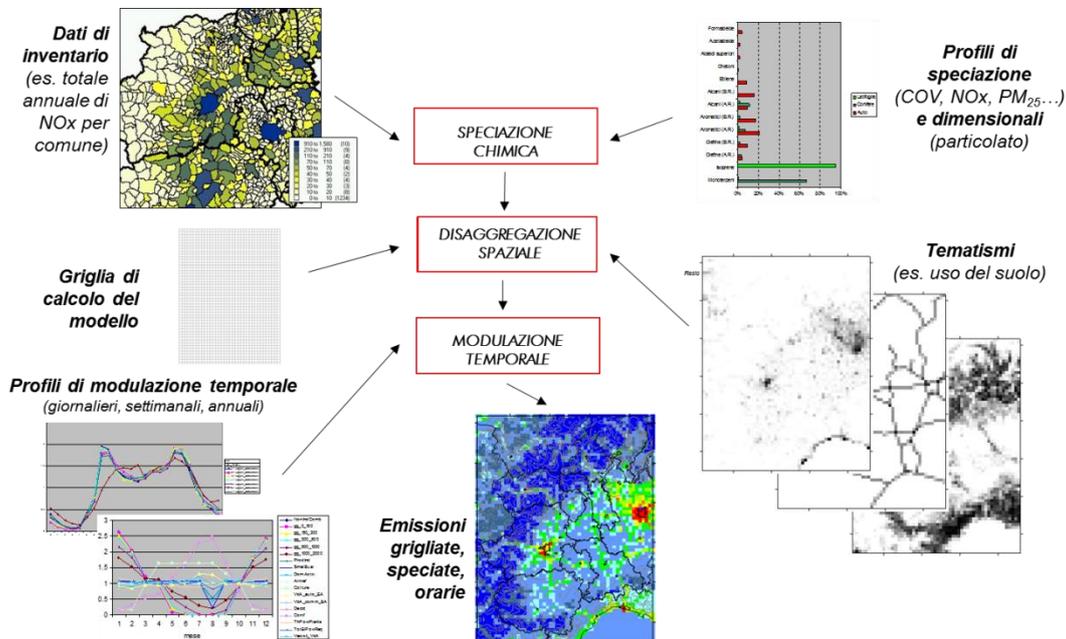


Figura 9. Schema logico del processo di produzione delle emissioni in input al modello reattivo a partire dai dati di inventario.

La disaggregazione sulle due griglie di calcolo delle emissioni associate nell'inventario a poligoni avviene mediante l'ausilio di tematismi grigliati alla risoluzione di interesse (1 km per la griglia del modello). Ciascun poligono viene dapprima intersecato con le celle del grigliato di calcolo, e le emissioni ad esso associate vengono ripartite sulle celle in modo proporzionale all'area dell'intersezioni risultanti tra il poligono di partenza e le celle. La ripartizione viene quindi corretta

tramite un tematismo su griglia, che rappresenta la percentuale di ciascuna cella coperta da una data tipologia di uso del suolo (es. aree urbanizzate, agricole, ecc.), o più in generale il peso che una proxy correlata con le emissioni ha su ciascuna cella, relativamente alle circostanti.

Le emissioni relative al traffico navale da cantiere sono localizzate in funzione delle diverse fasi:

- quelle relative alla manovra in corrispondenza delle aree di lavoro (secondo le specifiche WBS di lavoro) su cui insiste l'attività dei mezzi;
- quelle relative alla crociera sulla porzione di mare aperto interessato dalle principali rotte di navigazione di trasporto dei materiali.

Analogamente, anche le emissioni relative al traffico stradale da cantiere sono state localizzate in base alle diverse fasi:

- quelle relative alla movimentazione terra in corrispondenza delle aree di lavoro (aree logistiche di cantiere e secondo le specifiche WBS di lavoro);
- quelle relative al trasporto sugli assi stradali che conducono alle aree di cantiere.

5 Modellistica di qualità dell'aria

I dati territoriali, meteorologici, ed emissivi descritti ai capitoli precedenti costituiscono l'input per il modello di qualità dell'aria, utilizzato per una prima simulazione di riferimento, che copre un intero anno (marzo 2017 – febbraio 2018). Le sue uscite (concentrazioni orarie di inquinanti al suolo), sono state validate in prima istanza a fronte dei dati di qualità dell'aria disponibili sistematicamente all'interno dell'area di studio lungo tutto il periodo in questione: le serie storiche delle concentrazioni rilevate presso le stazioni fisse della rete di monitoraggio della qualità dell'aria di ARPAT.

Ad integrazione di tali informazioni, a partire da fine ottobre 2017 sino ad ottobre 2018 è stata effettuata una campagna di monitoraggio nell'area del porto di Livorno, finalizzata ad evidenziarne le eventuali peculiarità rispetto al resto dell'area urbana e negli andamenti temporali, nonché possibili correlazioni con i regimi anemologici e con le principali fonti emissive presenti nell'area. La campagna condotta dal CNR-IBIMET si avvale di 6 centraline low-cost (AIRQino), di cui 5 installate nell'area portuale ed una nell'entroterra urbano, e di un laboratorio mobile (AIRQlab), posizionato continuativamente su indicazione di ARPAT nei pressi della Stazione Calambrone.

Nel medesimo periodo ARPAT ha effettuato una campagna di misura con proprio mezzo mobile, posizionato alternativamente in località Fortezza Vecchia e Darsena Toscana Ovest.

La ricostruzione meteorologica per via modellistica e la successiva modellazione della qualità dell'aria sono state estese sino ad agosto 2018, in modo da coprire gran parte del periodo delle campagne ed estendere il confronto con i dati da essi derivati in modo analogo a quanto effettuato per l'anno meteorologico di riferimento.

5.1 Sistema modellistico e configurazione del modello di qualità dell'aria

Per la simulazione delle concentrazioni di inquinanti primari e secondari originate dalle sorgenti legati alle attività di cantiere, nonché di tutte le sorgenti presenti sul territorio circostante è stato utilizzato il modello euleriano fotochimico FARM.

Per eventuali dettagli tecnici si rimanda al rapporto precedente ARIANET (2018).

FARM fa parte di *ARIA Regional*, una suite modellistica co-sviluppata da ARIANET ed ARIA Technologies, per la simulazione multiscala della qualità dell'aria. Il sistema modellistico utilizzato nella configurazione utilizzata per questo studio è illustrato schematicamente in Figura 10 ed include:

- moduli per il trattamento dei dati territoriali (orografia, uso del suolo, cartografia);
- un insieme di moduli per la predisposizione di un input emissivo complesso (Emission Manager) a partire dai dati di inventario;
- modelli per la messa a punto dell'input meteorologico alle simulazioni di qualità dell'aria (WRF e SURFpro);
- pre-processor per il trattamento delle condizioni al contorno chimiche;
- il modello FARM per la dispersione e le trasformazioni chimiche degli inquinanti.

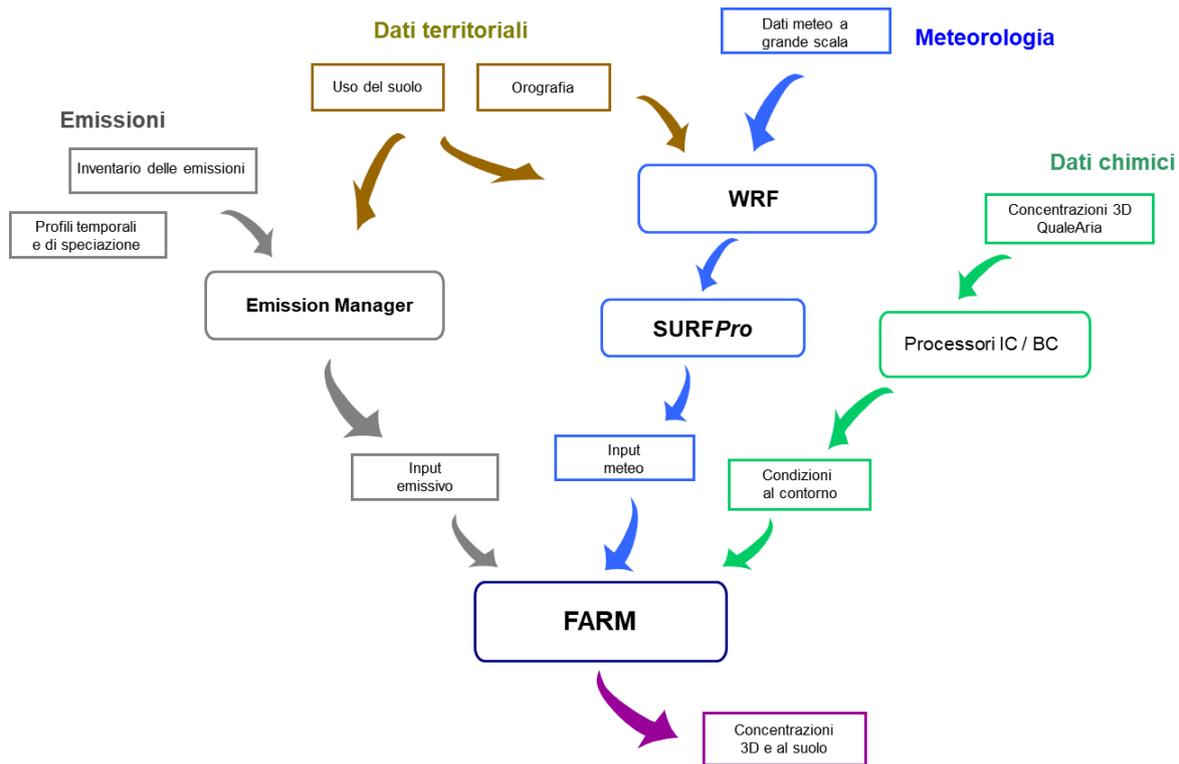


Figura 10. Schema di utilizzo della suite modellistica ARIA Regional / FARM.

Il modello FARM in modalità reattiva è stato configurato sul dominio di lato 40 km indicato in Figura 1, utilizzando una griglia orizzontale con passo di 1 km e 16 livelli verticali, progressivamente spaziatosi a partire dal suolo, posti a 10, 31, 55, 84, 121, 171, 242, 347, 505, 743, 1100, 1635, 2440, 3650, 5470, 8200 m al di sopra dell'orografia.

Mediante il preprocessore SURFPro l'input meteorologico è stato completato con le informazioni necessarie a FARM. A valle della stima dei parametri "di scala" utilizzati per descrivere la turbolenza atmosferica, realizzata a partire dai campi delle variabili meteo di base fornite dal modello WRF e dalle informazioni di uso del suolo, sono stati stimati i campi 3D delle diffusività turbolente orizzontale e verticale e le velocità di deposizione per le diverse specie chimiche. Queste ultime vengono utilizzate per descrivere gli scambi con la superficie in assenza di precipitazioni, e sono stimate tramite parametrizzazioni che tengono conto sia della natura dell'inquinante, sia dell'uso del suolo e delle condizioni meteorologiche correnti in ciascun punto.

Un altro elemento necessario per il modello di chimica e trasporto FARM è la definizione delle condizioni al contorno ovvero campo di concentrazioni orarie sulle facce laterali e superiore del dominio per tutte le specie inquinante considerate dallo schema chimico. Tale elemento è stato predisposto a partire da QualeAria (<http://www.qualearia.it/>), un sistema modellistico sviluppato da ARIANET che dal 2007 prevede operativamente fino a 120 ore l'inquinamento dell'aria sul territorio nazionale alla risoluzione orizzontale di 12 km e su scala europea con una risoluzione orizzontale di 48 km. Per la descrizione specifica delle condizioni al contorno si rimanda al precedente rapporto ARIANET (2018), così come l'approfondimento sulle sabbie sahariane, ovvero l'avvezione di polveri di origine desertica, che può contribuire in modo significativo alle concentrazioni di particolato atmosferico.

5.2 Simulazione di riferimento, validazione e scenario di cantiere

Il sistema ARIA Regional / FARM, così come configurato per il precedente lavoro presenta una risoluzione spaziale di 1 km, ed è stato applicato per ricostruire su di esso le concentrazioni complessive degli inquinanti per l'intero l'anno di riferimento scelto. A partire dai campi orari delle concentrazioni simulate sono state poi calcolate le statistiche di interesse.

Le Figure 11-15 mostrano le mappe delle medie annuali delle concentrazioni al suolo dei principali inquinanti di interesse risultanti sul dominio in corrispondenza dello scenario di riferimento e dello scenario emissivo di cantiere per l'attuazione della 1° Fase del PRP (opere in progetto) nella fattispecie la costruzione delle opere foranee e dragaggi (le emissioni del cantiere vengono sommate allo scenario di riferimento). Nelle figure seguenti si mostrano le mappe delle differenze sulle medie annuali fra lo scenario di cantiere e quello di riferimento evidenziando l'impatto del cantiere sull'intero dominio di calcolo; valori positivi indicano un aumento delle concentrazioni e quindi peggioramento della qualità dell'aria mentre valori negativi equivalgono ad una riduzione dei livelli di concentrazione.

La distribuzione spaziale delle sorgenti e la conformazione del territorio (presenza di rilievi e del mare) influenzano in maniera importante i campi di concentrazione al suolo dei diversi inquinanti.

Osservando i campi di concentrazione dei principali inquinanti sono chiare ed evidenti le principali aree urbane (influenza del traffico urbano e del riscaldamento degli edifici, specie per il particolato) e dei principali assi viari (specie nel caso del biossido di azoto), così come nel tratto di mare antistante Livorno è visibile l'influenza delle emissioni dell'area urbana e del traffico navale. Tutte le considerazioni descritte nella precedente relazione sono valide anche in questa fase dato che, nonostante l'aggiornamento dell'inventario emissivo a livello comunale, il rapporto tra le varie sorgenti emmissive non è stato stravolto.

Per quanto riguarda l'ozono, la distribuzione spaziale delle concentrazioni medie è generalmente "duale" rispetto a quelle appena viste, con valori più contenuti in corrispondenza dei maggiori centri abitati ed assi stradali (a causa delle emissioni locali di ossidi di azoto), e valori più elevati sui rilievi (a causa della quota stessa e della distanza dalle principali sorgenti emmissive) o sul mare, allontanandosi progressivamente dalla costa e dal tratto di mare antistante Livorno (maggiormente interessato dal traffico navale).

La distribuzione delle concentrazioni medie di SO₂ sul territorio risulta invece strettamente legata alla presenza di sorgenti industriali, in primo luogo la raffineria a nord di Livorno e l'intera area portuale in cui lo zolfo è presente all'interno del carburante per le navi, la Saint Gobain Glass Italia SpA nel comune di Pisa che opera nel settore della produzione di contenitori in vetro ed in misura minore la produzione di laterizi nella parte settentrionale del comune di Rosignano, per la precisione nella frazione di Gabbro.

Focalizzando l'attenzione sulle differenze fra lo scenario di riferimento e quello di cantiere, si nota come i campi di concentrazione siano molto simili fra loro ad esclusione dell'area portuale, laddove sono concentrate la quasi totalità delle emissioni del cantiere. L'impatto generato dal cantiere è circoscritto all'area del porto e si estende maggiormente verso il mare senza ripercussioni evidenti sul centro urbano adiacente. Tale comportamento è visibile soprattutto sul biossido di azoto e sul PM_{2,5}, le cui curve di isoconcentrazione a 10 ug/m³ coprono più superficie marina se rapportate allo scenario di riferimento.

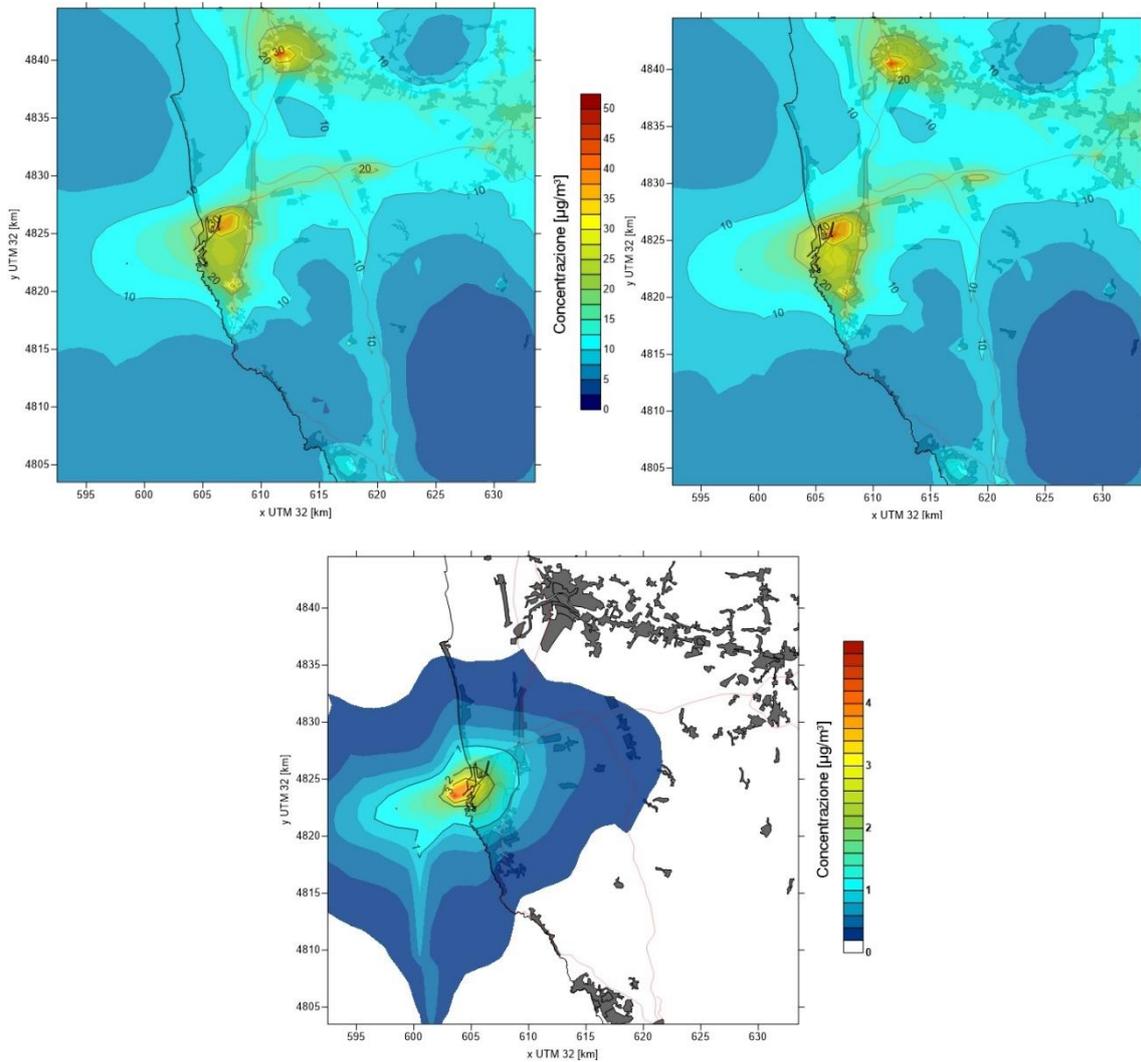


Figura 11. Concentrazioni al suolo di NO₂ simulate per lo scenario emissivo di riferimento e di cantiere – medie il periodo annuale 1/3/2017 – 28/2/2018 e la mappa della differenza.

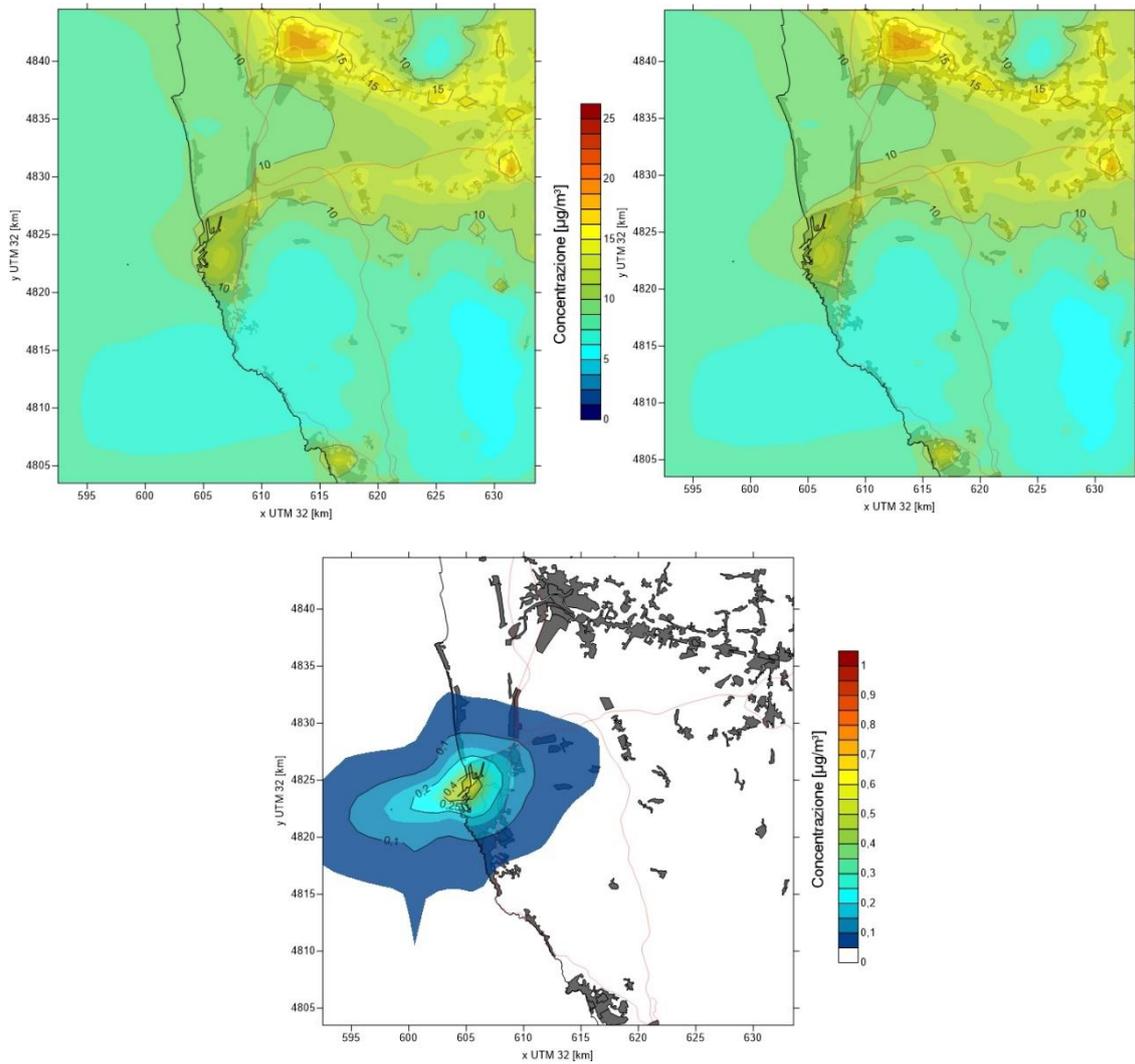


Figura 12. Concentrazioni al suolo di PM_{2.5} simulate per lo scenario emissivo di riferimento e di cantiere – medie il periodo annuale 1/3/2017 – 28/2/2018 e la mappa della differenza.

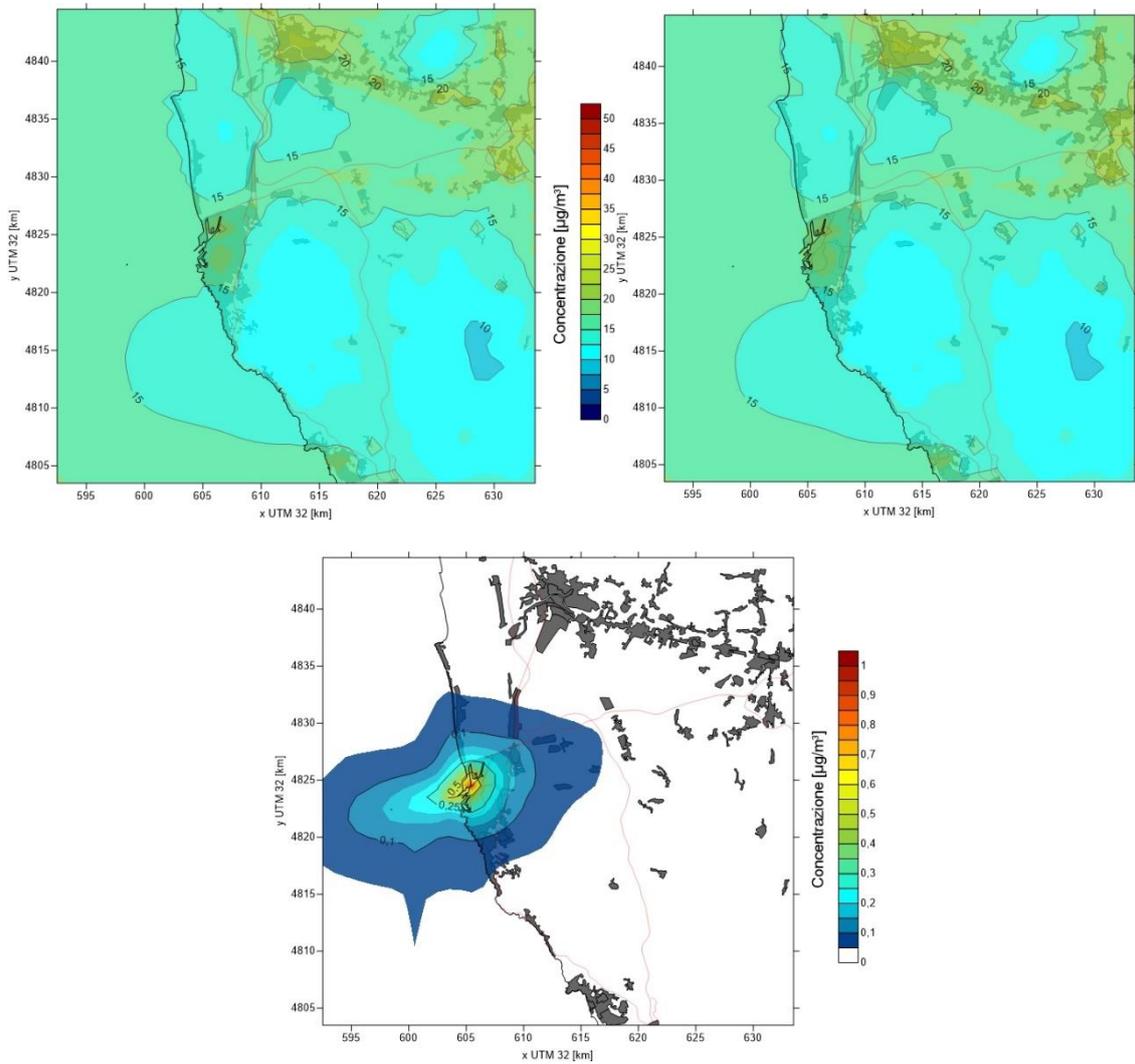


Figura 13. Concentrazioni al suolo di PM₁₀ simulate per lo scenario emissivo di riferimento e di cantiere – medie il periodo annuale 1/3/2017 – 28/2/2018 e la mappa della differenza.

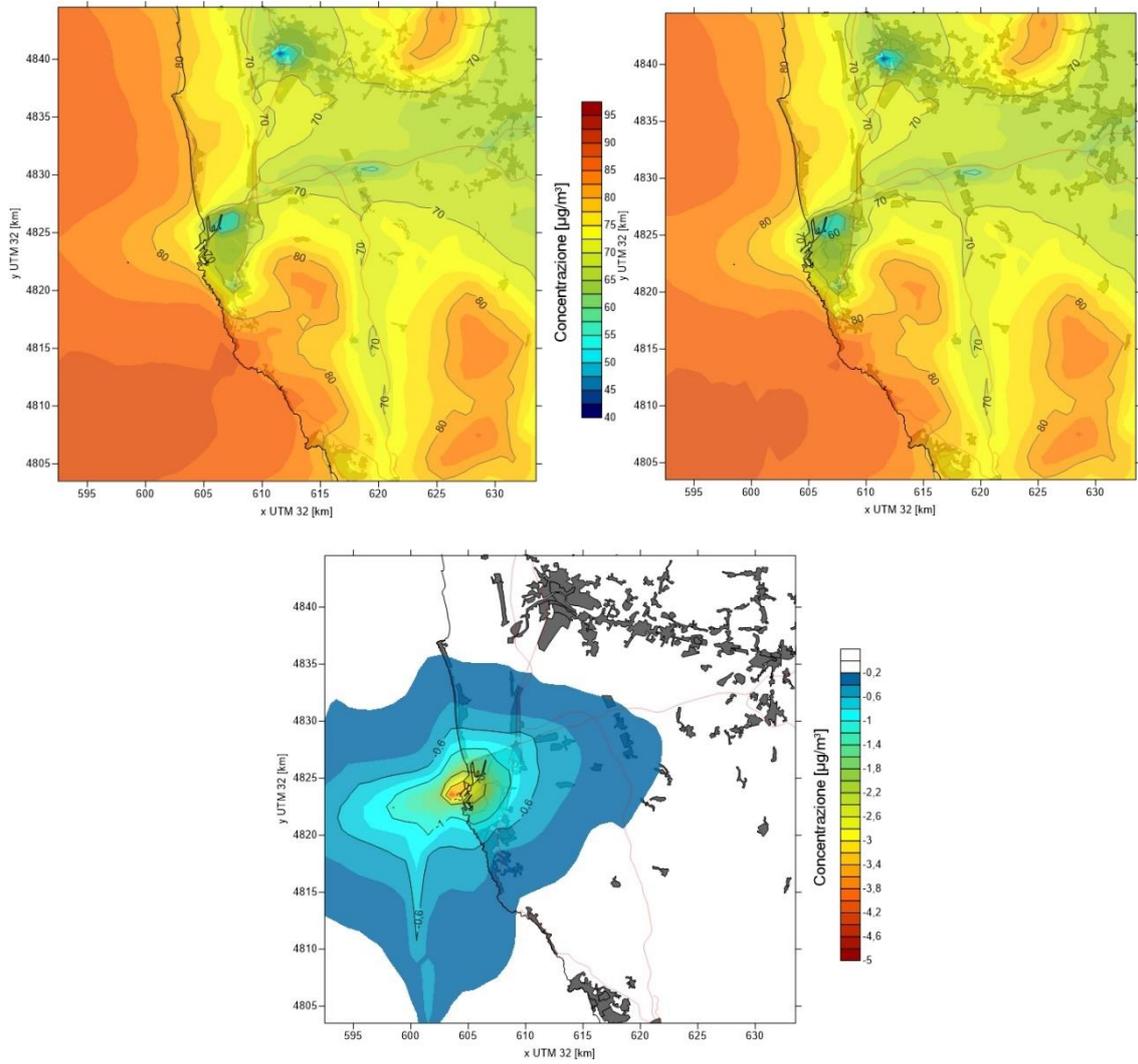


Figura 14. Concentrazioni al suolo di O₃ simulate per lo scenario emissivo di riferimento e di cantiere – medie il periodo annuale 1/3/2017 – 28/2/2018 e la mappa della differenza.

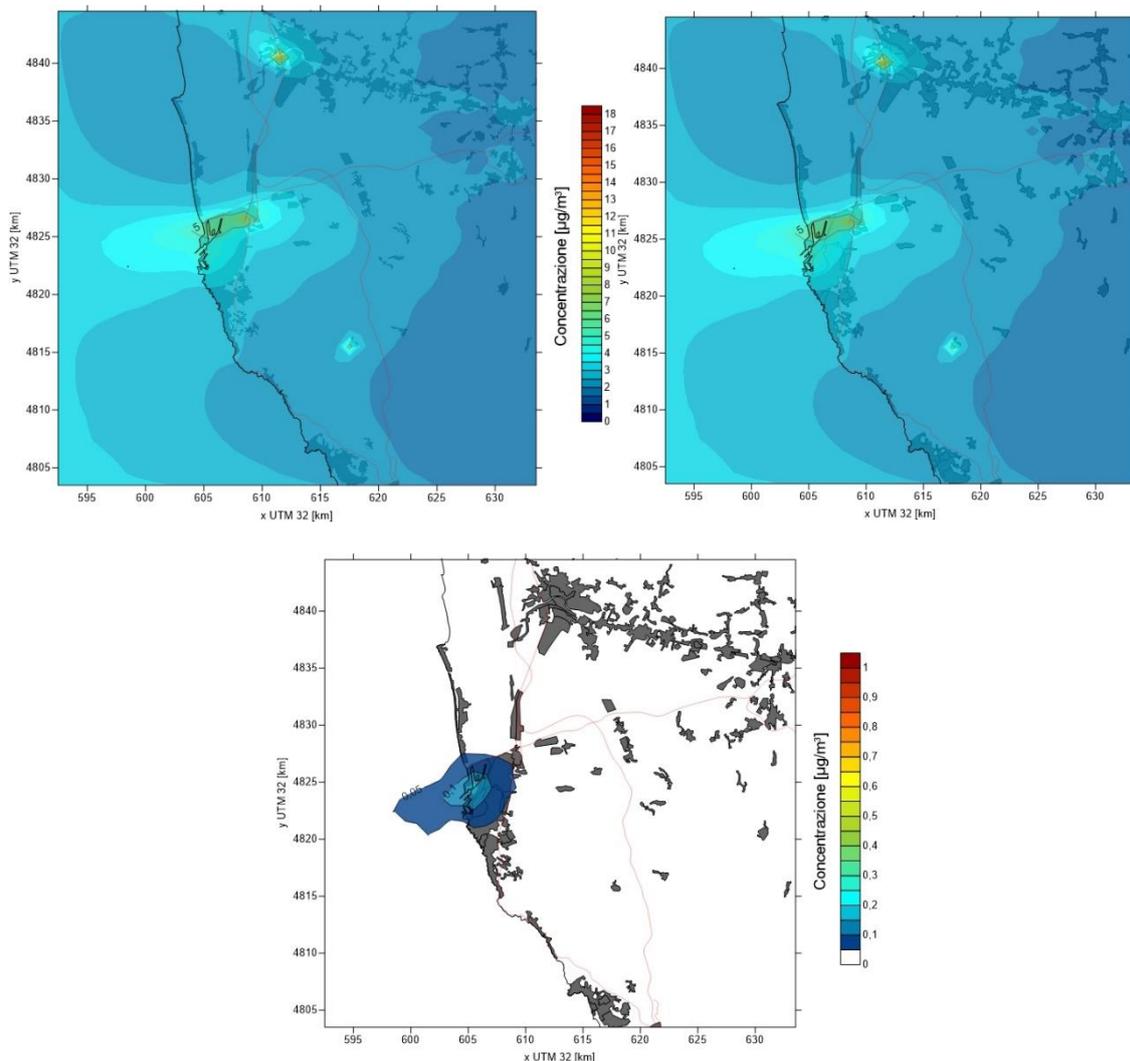


Figura 15. Concentrazioni al suolo di SO₂ simulate per lo scenario emissivo di riferimento e di cantiere – medie il periodo annuale 1/3/2017 – 28/2/2018 e la mappa della differenza.

Nei capitoli 8.1 e 8.2 è possibile consultare le mappe medie annuali di dettaglio sull'area urbana prossima al porto per gli inquinanti di interesse. L'area analizzata nelle mappe racchiude una porzione del territorio ad una distanza massima di circa 3 km dall'area portuale ed è di forte interesse dal punto di vista degli impatti sulla qualità dell'aria perché densamente popolata. Tramite queste mappe è possibile valutare al meglio qual è la ricaduta al suolo per i diversi inquinanti in entrambi gli scenari.

5.2.1 Confronto con le stazioni della rete ARPAT

Analogamente a quanto prodotto nella relazione precedente "R2018.17-Sviluppo ed implementazione di un sistema integrato per la valutazione degli impatti sulla qualità dell'aria, per la gestione degli interventi previsti nel PR del Porto di Livorno", i dati stimati tramite ARIA Regional / FARM lungo l'intero anno considerato sono state messi a confronto con i valori rilevati in corrispondenza delle stazioni della rete regionale di monitoraggio della qualità dell'aria di Arpa

Toscana lungo il medesimo arco di tempo. Le stazioni di monitoraggio fisse che effettuano misure in continuo presenti all'interno del dominio considerato sono localizzate a Livorno e Pisa. La loro posizione sul territorio è riportata in Figura 16, mentre in Tabella 14 ne è indicata la tipologia e gli inquinanti monitorati.

Tabella 14. Stazioni fisse della rete di monitoraggio ARPAT poste all'interno del dominio considerato.

Comune	Stazione	Tipo stazione	Tipo zona	NO ₂	PM _{2,5}	PM ₁₀	O ₃	SO ₂
Livorno	La Pira	Fondo	Urbana	✓		✓		✓
Livorno	Carducci	Traffico	Urbana	✓	✓	✓		
Livorno	Cappiello	Fondo	Urbana	✓	✓	✓		
Pisa	Passi	Fondo	Urbana	✓	✓	✓	✓	
Pisa	Borghetto	Traffico	Urbana	✓	✓	✓		



Figura 16. Localizzazione presso Livorno e Pisa delle stazioni di monitoraggio fisse facenti parte della rete della qualità dell'aria ARPAT.

Nel confronto, è importante tenere presente come un qualsiasi modello a griglia possa mirare a descrivere la qualità dell'aria in termini di condizioni medie su ciascuna delle celle di calcolo (1 km di ampiezza nel caso in esame). Sono pertanto difficilmente riproducibili le situazioni a carattere fortemente "locale" siano esse dovute a conformazioni del territorio o condizioni meteorologiche particolari oppure alla presenza di fonti emissive rilevanti e concentrate. Un classico esempio è la difficile riproduzione dell'andamento delle centraline urbane da traffico, fortemente influenzate dalle emissioni locali del traffico stradale e talvolta da condizioni meteorologiche molto diverse dal contesto anemologico circostante.

In Figura 17 è riportato il confronto tra le medie annuali osservate presso le stazioni della rete regionale ed i corrispondenti valori simulati per lo scenario di riferimento. Per completezza d'analisi si riportano anche i valori modellati per lo scenario di cantiere per l'ampliamento del porto affinché sia possibile determinare o meno lo sfioramento dei limiti normativi per le medie annuali.

Per ciò che riguarda l'NO₂ si rileva generalmente un buon accordo. A Livorno il sistema modellistico riproduce in maniera soddisfacente la differenza tra i livelli più elevati riscontrati nella stazione da traffico di Carducci e quella di fondo urbano di Cappiello, posta in un'area residenziale nella parte meridionale della città. Risulta invece sovrastimato il livello medio misurato presso la stazione di fondo urbano di La Pira, posta in prossimità delle aree portuale ed industriale nella parte settentrionale della città. Osservando le stime ottenute per lo scenario di cantiere si nota che la capacità di riprodurre le differenze di concentrazione fra le diverse stazioni rimane inalterata e non sono presenti criticità a livello normativo. A Pisa il sistema modellistico mette in evidenza la differenza tra i valori della stazione urbana di fondo (Passi) e quella di traffico (Borghetto), sebbene il livello medio presso quest'ultima, paragonabile a quello della stazione da traffico di Livorno, risulti sottostimato. Come per Livorno, la simulazione che considera le emissioni del cantiere non mette in luce particolari criticità.

Per il PM_{2.5} l'accordo tra valori osservati e simulati è ottimo. A causa della sua natura secondaria e ubiquitaria la differenza tra i livelli rilevati presso le stazioni risulta meno marcata che nel caso del biossido di azoto, tuttavia anche per il PM_{2.5} il sistema mette in evidenza in ciascuna area urbana la differenza tra quanto rilevato dalla stazione da traffico e quella di fondo urbano. Meno rilevante, rispetto al biossido di azoto, l'impatto dal cantiere sulle concentrazioni medie di PM_{2.5}. Le emissioni dell'intero cantiere non alterano in maniera significativa i livelli medi annuali del particolato fine su Livorno mentre sulle stazioni di Pisa non si variazioni di alcun tipo della media annuale.

Le variazioni tra i valori rilevati presso le diverse stazioni risultano ancora più contenute nel caso del PM₁₀. Anche in questo caso il sistema modellistico mostra una differenza tra i valori presso le diverse tipologie di stazioni, ma con una generale tendenza a sottostimare i livelli osservati. Considerato l'ottimo accordo riscontrato per il PM_{2.5}, la ragione della sottostima è attribuibile principalmente al contributo della frazione grossolana del particolato e può essere dovuta a diversi fattori, quali una definizione non accurata o un mancato conteggio di sorgenti antropogeniche presenti sul territorio (es. risospensione di polveri causata dal traffico veicolare) od una sottostima del contributo di sorgenti naturali (sali marini e risospensione eolica di componenti terrigene). Come per il particolato fine, la simulazione per lo scenario di cantiere non evidenzia criticità a livello normativo visto il limite impatto sulla media annuale.

L'ozono è rilevato esclusivamente presso la stazione di fondo urbano di Pisa-Passi e risulta in media sovrastimato in maniera significativa da parte del sistema modellistico.

Per quanto riguarda gli ossidi di zolfo i dati disponibili riguardano la sola stazione di La Pira. Le principali emissioni di SO₂ provengono da impianti industriali (nel caso specifico, quelle presenti nell'area a nord di Livorno), e dal traffico navale. Il valore medio osservato risulta sostanzialmente contenuto e viene correttamente riprodotto da parte del sistema modellistico nonostante la sovrastima. La simulazione dello scenario di cantiere porta ad un lieve aumento della concentrazione media di SO₂ ma i livelli assoluti non sono tali da destare preoccupazioni per il superamento dei limiti normativi imposti.

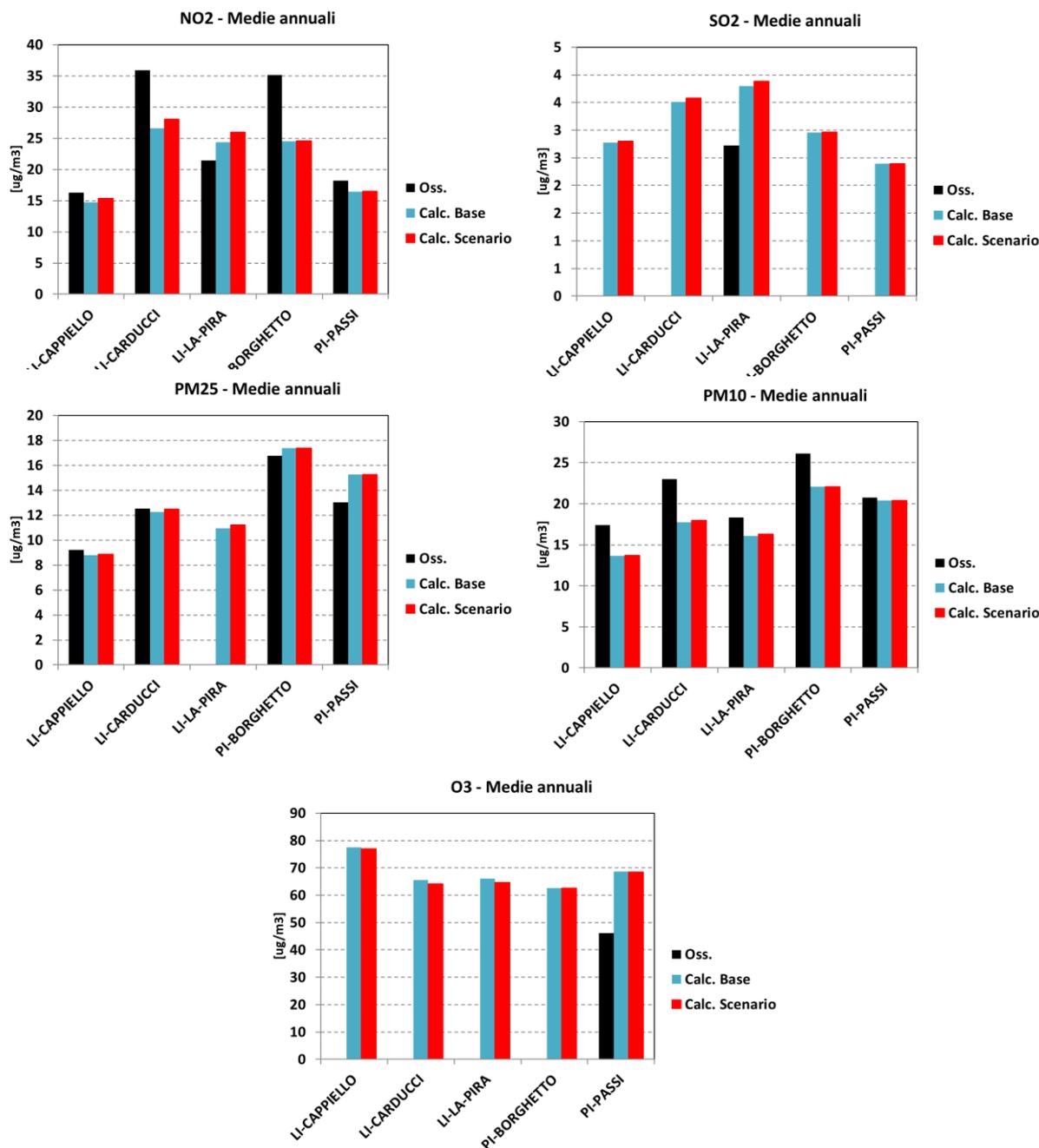


Figura 17. Concentrazioni medie per il periodo annuale 1/3/2017 - 28/2/2018: confronto tra i valori osservati presso le stazioni ARPAT (“Oss.”) e quelli calcolati relativamente allo scenario emissivo di riferimento (“Cal. Base”) e di cantiere (“Calc Scenario”).

A complemento del confronto tra valori osservati e calcolati effettuato sulla base dei livelli medi annuali è stato effettuato un confronto in termini di medie giornaliere lungo tutto il periodo annuale considerato (marzo 2017 – febbraio 2018), in modo da verificare la corrispondenza degli andamenti temporali delle concentrazioni. Nelle Figure 18-22 sono riportati i grafici di confronto tra valori medi giornalieri osservati e modellati sia per lo scenario di riferimento che per quello di cantiere, mentre in Tabella 16 sono riportati i valori dei principali indici statistici (illustrati in Tabella 15) relativi al confronto tra le i valori medi giornalieri osservati e calcolati.

Concentrandosi sullo scenario di riferimento, le serie relative all’NO₂ mostrano una sostanziale coerenza nell’occorrenza dei principali episodi e negli andamenti stagionali, specialmente in corrispondenza delle stazioni pisane. La sovrastima già evidenziata in corrispondenza della postazione di La Pira appare sostanzialmente occorrere durante i mesi primaverili ed estivi, mentre

i livelli di concentrazione sono stimati correttamente durante i mesi autunnali ed invernali. Sulla base delle informazioni relative alle sorgenti presenti in quel periodo, potrebbe esserci la necessità di meglio descrivere il traffico stradale locale (attività per nulla legate al cantiere oggetto dello studio) durante la stagione calda. L'inserimento delle serie temporali ottenute per lo scenario di cantiere fornisce indicazioni utili sulle differenze e sugli impatti di quest'ultimo rispetto allo scenario di riferimento. Le uniche stazioni sulle quali è visibile una differenza significativa sono quelle di Livorno, maggiormente su quelle più vicine al porto (La Pira e Carducci). Ciò che appare evidente sono i valori di concentrazione più elevati nel periodo aprile-settembre in corrispondenza dei picchi già presenti nello scenario di riferimento; la massima differenza riscontrata tra lo scenario di cantiere e quello di riferimento è compresa tra i 15-20 ug/m³ come media giornaliera, pari ad incremento percentuale sulla media giornaliera del 38% rispetto allo scenario di riferimento.

Dall'analisi dell'andamento delle serie temporali e degli indicatori statistici risulta confermato come il sistema modellistico sia in grado di simulare il PM_{2.5} in modo ottimale, riproducendo i valori delle medie giornaliere, gli andamenti stagionali, gli episodi e picchi principali nelle diverse postazioni. Una leggera sovrastima è presente sia durante la prima parte del periodo (marzo) che durante la stagione invernale (dicembre-febbraio), soprattutto sulle stazioni di Pisa. I dati osservati mostrano una variabilità stagionale più pronunciata nelle postazioni pisane rispetto a quelle localizzate nell'aerea di Livorno, con una crescita più evidente dei valori invernali rispetto a quelli primaverili ed estivi. Anche questo aspetto risulta correttamente riprodotto dal sistema modellistico. Come già osservato per le medie annuali, l'impatto del cantiere sui livelli di concentrazione del particolato è limitato e questo aspetto è apprezzabile osservando le serie temporali. Le differenze rispetto allo scenario di riferimento sono poco significative sulle stazioni di Livorno di La Pira e Carducci e del tutto assenti per Coppiello e su Pisa.

Il confronto evidenzia analoghe capacità del sistema modellistico nel riprodurre i livelli e gli andamenti del PM₁₀ senza particolari periodi di sottostima o sovrastima, inclusa la variabilità stagionale meno marcata rispetto alla frazione fine, plausibilmente dovuta al ruolo della frazione grossolana del particolato, il cui contributo risulta più significativo durante la stagione estiva, quando condizioni di maggior ventosità incrementano le emissioni di polveri di origine naturale. Analogamente a quanto visto per il particolato fine, le sorgenti di cantiere non impattano in modo significativo sui livelli di PM₁₀ durante l'intero anno di simulazione. L'incremento percentuale medio sull'intero anno di simulazione, considerando i livelli medi giornalieri, legato alle sorgenti del cantiere, rispetto al caso base, è di circa l'1.5% mentre se si considera il massimo si osserva un impatto di circa l'11% per un giorno specifico.

L'esame delle serie giornaliere di ozono presso Pisa - Passi evidenzia come la sovrastima occorra nelle stagioni primaverile ed estiva, mentre i valori più contenuti durante quelle autunnale ed invernale risultano correttamente riprodotti, così come l'andamento stagionale e le variazioni giornaliere (indice di correlazione). Il cantiere non ha un effetto significativo sui livelli medi giornalieri di ozono.

Per quanto riguarda l'SO₂, gli andamenti temporali presso la stazione Livorno – La Pira confermano l'influenza prevalente dell'impatto al suolo di emissioni di origine industriale. Non è presente una tendenza stagionale bensì episodi di rialzo (sebbene non rilevanti in termini assoluti) variamente distribuiti durante l'anno. Il sistema modellistico sovrastima i livelli medi e la variabilità delle concentrazioni e non identifica in modo ottimale l'occorrenza degli episodi, che potrebbe essere legata a cicli di funzionamento specifici degli impianti industriali. La simulazione dello scenario di cantiere mostra un leggerissimo aumento dei picchi di concentrazione durante il periodo primaverile ed estivo ma senza alterare in modo significativo i livelli medi di SO₂. In termini di incremento percentuale è analogo a quanto osservato per il PM₁₀ ovvero un valore medio incrementale dell'1.8% mentre è un valore massimo di circa il 10%.

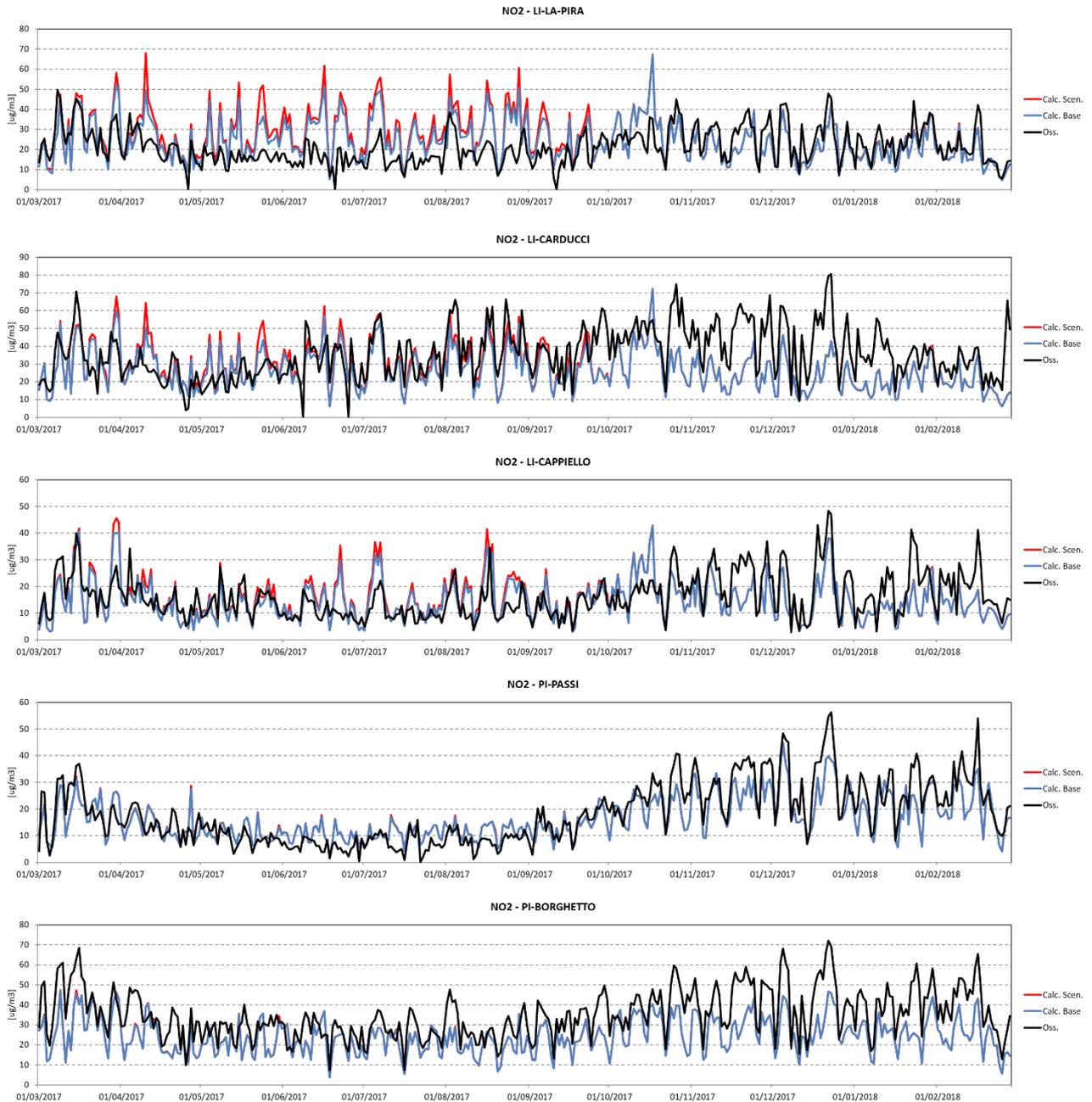


Figura 18. Concentrazioni medie giornaliere di NO₂: confronto tra i valori osservati presso le stazioni ARPAT (“Oss.”) e quelli calcolati per lo scenario di riferimento (“Calc. Base”) e di cantiere (“Calc. Scenario”).

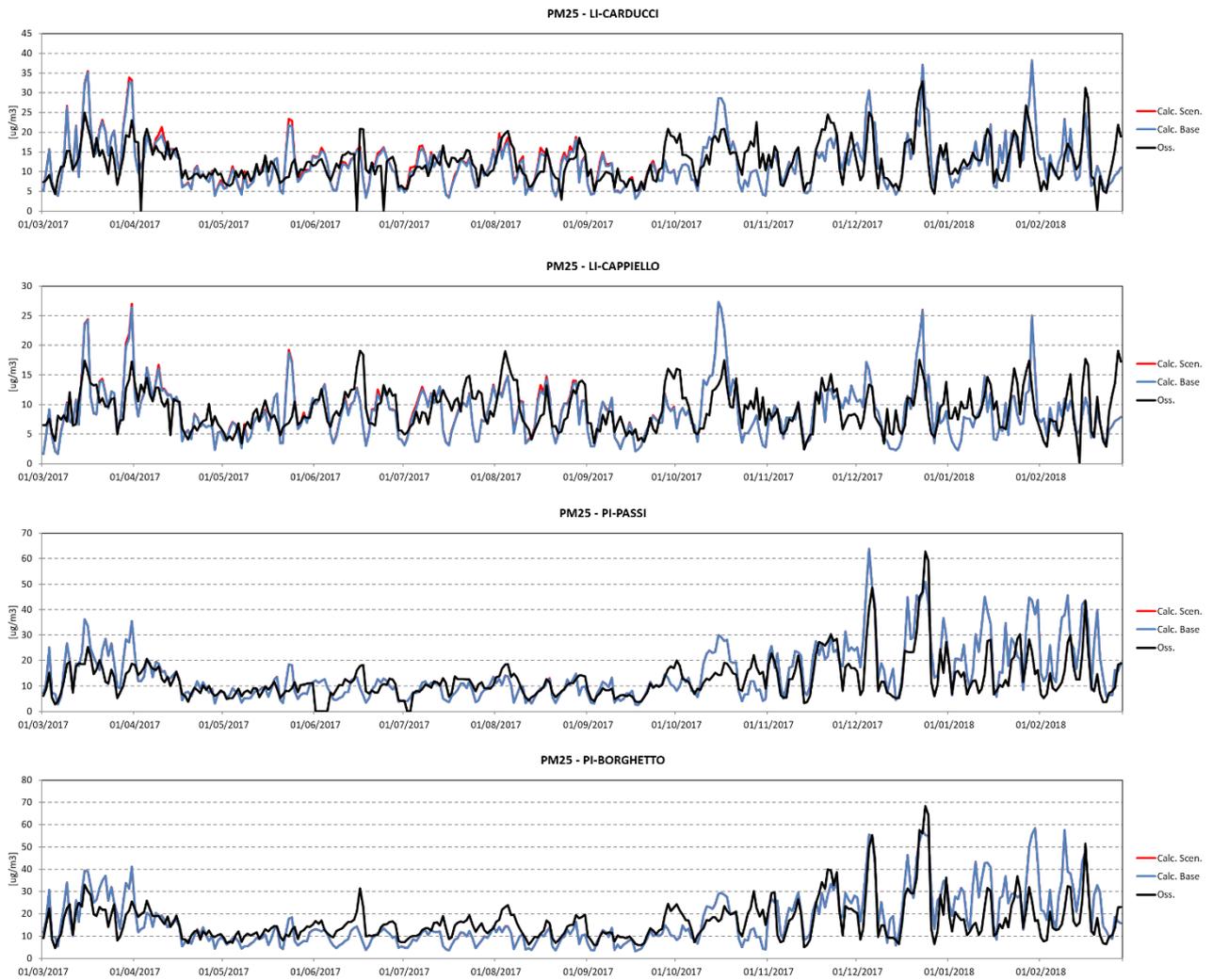


Figura 19. Concentrazioni medie giornaliere di PM_{2.5}: confronto tra i valori osservati presso le stazioni ARPAT e quelli calcolati per lo scenario di riferimento ("Calc. Base") e di cantiere ("Calc. Scenario").

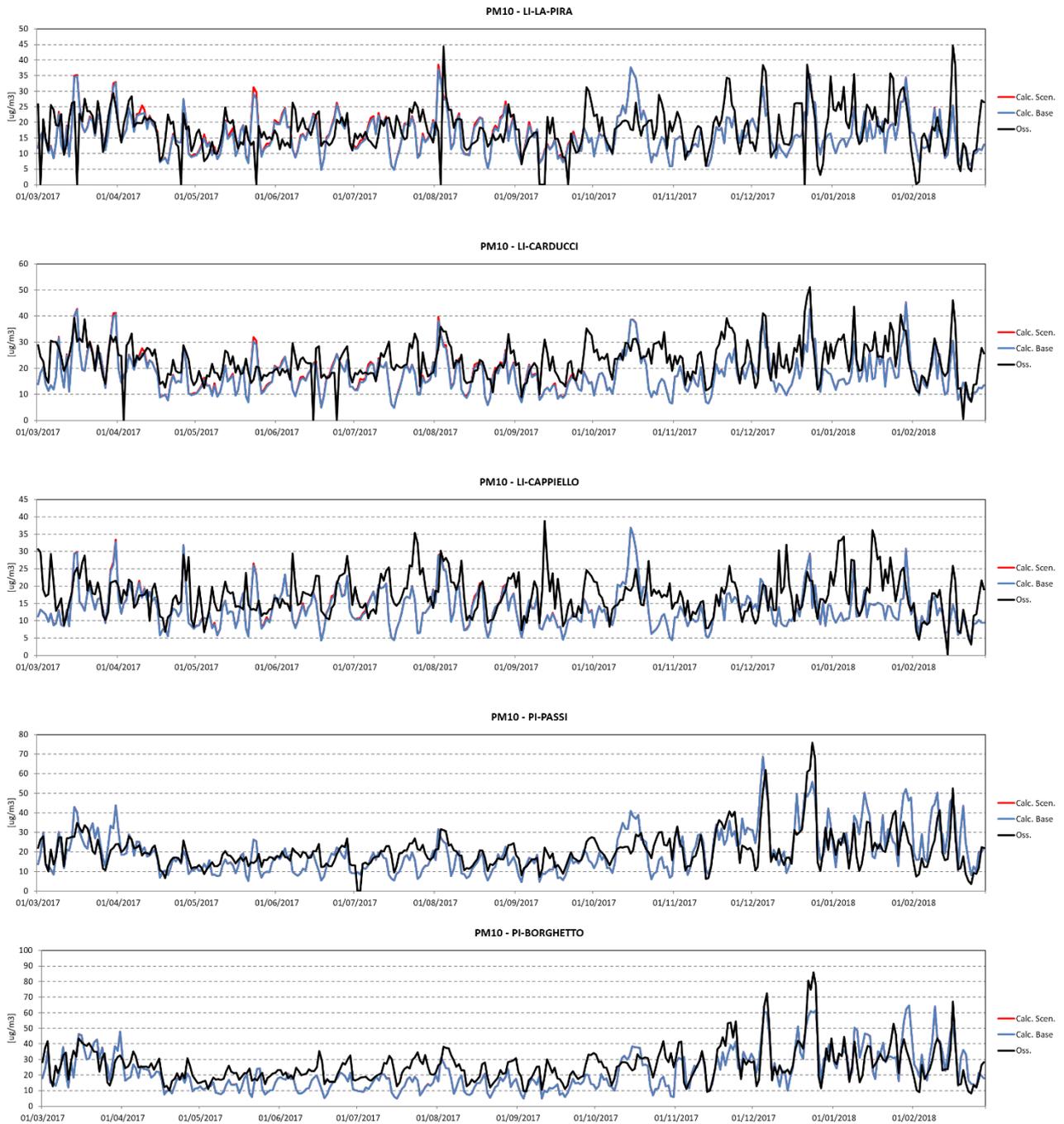


Figura 20. Concentrazioni medie giornaliere di PM₁₀: confronto tra i valori osservati presso le stazioni ARPAT e quelli calcolati per lo scenario di riferimento ("Calc. Base") e di cantiere ("Calc. Scenario").

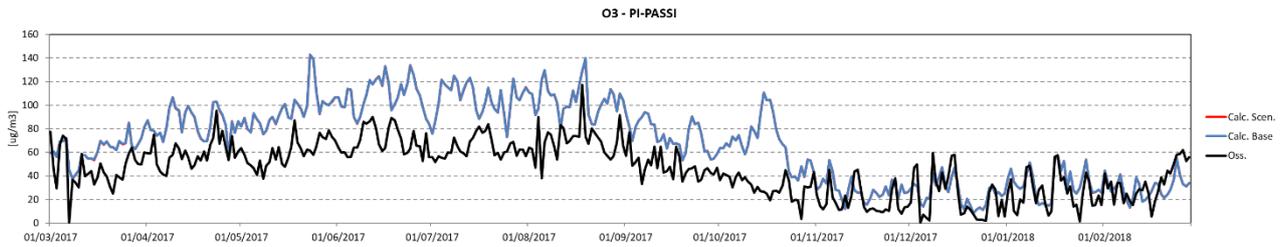


Figura 21. Concentrazioni medie giornaliere di O₃: confronto tra i valori osservati presso la stazione ARPAT di Pisa-Passi e quelli calcolati per lo scenario di riferimento ("Calc. Base") e di cantiere ("Calc. Scenario").

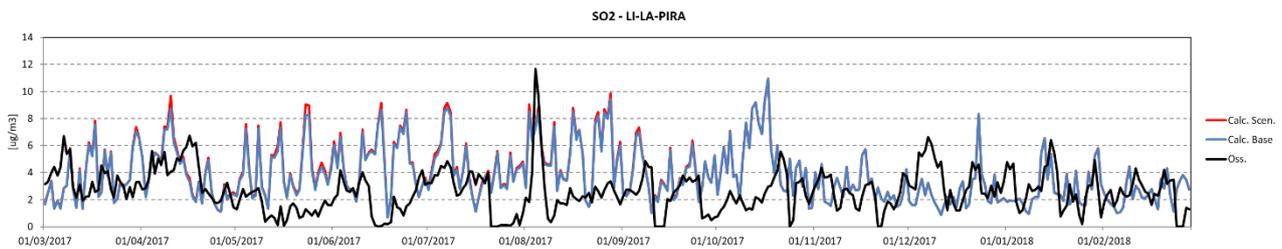


Figura 22. Concentrazioni medie giornaliere di SO₂: confronto tra i valori osservati presso la stazione ARPAT di Livorno-La Pira e quelli calcolati per lo scenario di riferimento ("Calc. Base") e di cantiere ("Calc. Scenario").

Tabella 15. Indicatori statistici utilizzati nel confronto tra valori osservati e calcolati (O_i = dati osservati, C_i = dati calcolati, N = numero totale di dati osservati o calcolati).

Medie dati osservati e calcolati	$\bar{O} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i ; \bar{C} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i$
Deviazioni standard dati osservati e calcolati	$\sigma_o = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} ; \sigma_c = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})^2}$
Mean bias (MB)	$MB = \bar{C} - \bar{O}$
Normalized mean bias (NMB)	$NMB = (\bar{C} - \bar{O}) / \bar{O}$
Root mean square error (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - C_i)^2}$
Correlazione	$R = \frac{\sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})(O_i - \bar{O})}{\sigma_c \sigma_o}$
Index of agreement (IOA)	$IOA = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - C_i)^2}{\sum_{i=1}^N (C_i - \bar{O} + O_i - \bar{O})^2} \right)$

In ottemperanza alle richieste di ARPAT è stato aggiunto anche un ulteriore indicatore per valutare le prestazioni del sistema modellistico ovvero l'Index of Agreement (IOA).

Tabella 16. Indicatori statistici relativi al confronto tra valori osservati e calcolati (scenario di riferimento) delle concentrazioni medie giornaliere di inquinanti presso le stazioni ARPAT all'interno del dominio, per il periodo annuale 1/3/2017 - 28/2/2018.

NO₂

Stazione	Tipo	Media oss.	Media calc.	σ oss.	σ calc.	MB	NMB	RMSE	R	IOA
LI-LA-PIRA	F / U	21.3	26.1	9.0	11.9	4.9	22.9%	10.6	0.47	0.66
LI-CARDUCCI	T / U	35.7	28.2	14.5	12.7	-7.5	-21.1%	16.2	0.48	0.64
LI-CAPPIELLO	F / U	16.3	15.4	8.4	8.3	-0.8	-5.1%	7.4	0.59	0.76
PI-BORGHETTO	T / U	35.1	24.6	12.2	8.9	-10.5	-29.8%	13.6	0.71	0.68
PI-PASSI	F / U	18.2	16.5	11.4	7.9	-1.7	-9.1%	6.6	0.85	0.88

PM_{2,5}

Stazione	Tipo	Media oss.	Media calc.	σ oss.	σ calc.	MB	NMB	RMSE	R	IOA
LI-CARDUCCI	T / U	12.4	12.5	5.1	6.1	0.1	0.4%	4.9	0.63	0.78
LI-CAPPIELLO	F / U	9.2	8.9	3.6	4.4	-0.3	-3.6%	3.9	0.55	0.73
PI-BORGHETTO	T / U	16.8	17.4	9.2	12.0	0.7	3.9%	8.2	0.73	0.84
PI-PASSI	F / U	12.8	15.3	8.2	10.7	2.5	19.6%	7.5	0.75	0.83

PM₁₀

Stazione	Tipo	Media oss.	Media calc.	σ oss.	σ calc.	MB	NMB	RMSE	R	IOA
LI-LA-PIRA	F / U	17.8	16.4	7.2	6.3	-1.4	-7.9%	7.8	0.36	0.62
LI-CARDUCCI	T / U	22.8	18.1	7.3	7.3	-4.8	-20.8%	8.7	0.52	0.66
LI-CAPPIELLO	F / U	17.4	13.8	6.0	5.5	-3.6	-20.8%	7.6	0.34	0.58
PI-BORGHETTO	T / U	26.1	22.1	11.2	12.4	-4.0	-15.3%	9.9	0.72	0.82
PI-PASSI	F / U	20.6	20.4	9.4	11.2	-0.2	-1.1%	8.4	0.68	0.81

SO₂

Stazione	Tipo	Media oss.	Media calc.	σ oss.	σ calc.	MB	NMB	RMSE	R	IOA
LI-LA-PIRA	F / U	2.6	3.9	1.6	2.1	1.3	47.3%	2.7	0.07	0.38

O₃

Stazione	Tipo	Media oss.	Media calc.	σ oss.	σ calc.	MB	NMB	RMSE	R	IOA
PI-PASSI	F / U	45.8	68.6	22.3	33.6	22.8	49.8%	31.0	0.79	0.73

5.2.2 Estrazione dei valori simulati in corrispondenza dei recettori sensibili

Al fine di valutare al meglio le ricadute delle attività di cantiere sull'area urbana di Livorno sono state estratti i livelli di qualità dell'aria simulati in corrispondenza di recettori sensibili quali scuole, parchi pubblici, RSA ed ospedali. In Figura 23 si mostrano i 27 recettori sensibili scelti sul comune di Livorno in un raggio di 3 km dall'area portuale, a parte la scuola dell'infanzia di via Costituzione che si trova in prossimità dell'area di produzione degli accropodi e dell'impianto di betonaggio ed è inserita in un contesto viabilistico d'interesse per il cantiere. Considerando la risoluzione orizzontale della griglia di calcolo di 1 km del sistema modellistico, la posizione dei recettori sensibili permette di mappare al meglio quali sono le ricadute al suolo delle varie attività di cantiere.



Figura 23. Localizzazione dei recettori sensibili

In Tabella 1 si mostra la lista dei recettori sensibili in cui si indica il nome, la tipologia di recettore e le relative coordinate in UTM32 [m]. È evidente l'attenzione particolare alle scuole (da quelle dell'infanzia fino a quelle secondarie) diffuse su tutto il territorio comunale ma la scelta è ricaduta anche su altre strutture quali residenze per anziani (RSA), parchi pubblici dove i momenti di aggregazione sono molteplici e per diverse fasce di età ed ospedali dove risiedono le persone più fragili.

La lista dei recettori sensibili potrebbe essere più lunga data la presenza di altri parchi o altre scuole sul comune di Livorno ma si andrebbero a posizionare in prossimità di quelli già selezionati; considerando però la griglia di calcolo di 1 km per il modello di qualità dell'aria utilizzato per lo studio non si otterrebbero risultati significativamente diversi per tutti quei punti che ricadrebbero nelle stesse celle dei punti selezionati.

Tabella 1. Lista dei recettori sensibili.

Nome	Tipologia	x	y
La Coccinella	Asilo nido	607080	4819802
violla Fabbricotti	Parchi pubblici	606280	4821209
Terme del Corallo	Parchi pubblici	607849	4823503
Pasolini	Parchi pubblici	606801	4820941
Villa MAria	Parchi pubblici	606580	4821805
via della Torretta	Parchi pubblici	606052	4823722
Villa S. Angela	RSA	606559	4822251
Santa Caterina	RSA	605255	4820926
Mondolfi	Scuola infanzia	607468	4824125
San MARco	Scuola infanzia	605784	4823391
San Ferdinando	Scuola infanzia	605556	4823282
Il Flauto Magico	Scuola infanzia	605562	4822193
F.lli Cervi	Scuola infanzia	607255	4821498
Pestalozzi	Scuola infanzia	607479	4821588
Agnoletti	Scuola infanzia	607298	4824517
Le Sorgenti	Scuola infanzia	607708	4823803
Il Piccolo Principe,	Scuola infanzia	606416	4820750
D'Azeglio	Scuola primaria	605458	4822531
Rodari	Scuola primaria	607578	4822487
Lambruschini	Scuola primaria	607149	4820165
Micali	Scuola primaria	605541	4821618
"Palli "Niccolini	Scuola secondaria	606068	4822399
Enriques	Scuola secondaria	605285	4821541
Mazzini	Scuola secondaria	607310	4822832
Galilei	Scuola secondaria	606428	4823422
Ospedale	Ospedali	606990	4822736
via Costituzione	Scuola infanzia	609359	4827435

La Figura 24 mostra il confronto, in ogni recettore sensibile selezionato, dei valori medi annuali simulati per lo scenario di riferimento e quello di cantiere. Sull'asse secondario del grafico è stata riportata anche l'informazione relativa alla differenza fra i due scenari calcolata come "scenario di cantiere – scenario di riferimento"; l'approccio utilizzato è lo stesso delle mappe medie annuali sull'intero dominio di calcolo ovvero che i valori positivi indicano un aumento dei livelli di concentrazione durante il cantiere mentre i valori negativi ne delineano una diminuzione.

Concentrandosi sul biossido di azoto (prima figura), si nota che la variazione massima sulla media annuale è di circa 2.5 ug/m^3 e la si osserva in corrispondenza delle scuole d'infanzia San Marco e San Ferdinando e del parco pubblico di via della Torretta; tutti questi recettori sensibili sono localizzati in prossimità dell'area portuale e di conseguenza più soggetti agli impatti delle attività del cantiere. Nonostante l'incremento percentuale sia significativo (+ 10%) non viene mai superato il limite normativo per il biossido di azoto sulla media annuale di 40 ug/m^3 . In tutti gli altri recettori sensibili, più lontani dall'area portuale, gli impatti del cantiere sono meno significativi, sia dal punto di vista degli incrementi assoluti dei livelli medi annuali di NO_2 , tra 1 e 2 ug/m^3 , che dal punto di vista percentuale, dal 3% all'8%.

Analogamente per il biossido di zolfo si osservano esclusivamente aumenti dei livelli medi annuali su tutti i recettori sensibili e quelli maggiormente soggetti agli impatti dell'area di cantiere sono le scuole dell'infanzia San Marco e San Ferdinando e il parco di via della Torretta; in questo caso sia l'incremento in valore assoluto che in percentuale risulta essere molto contenuto e poco significativo; per quanto riguarda il livello medio annuale di SO_2 , l'incremento è di poco superiore a 0.1 ug/m^3 che equivale ad un incremento percentuale compreso fra il 2% e il 3% per i recettori più critici.

Focalizzando l'attenzione sul particolato, l'analisi si concentrerà esclusivamente sul particolato fine ($\text{PM}_{2.5}$) in quanto la frazione coarse, ovvero quella compresa fra il PM_{10} e il $\text{PM}_{2.5}$, non ha influenzato in maniera significativa i livelli medi annuali del PM e di conseguenza i risultati in termini di confronto

fra i due scenari. Come osservato per il biossido di azoto e di zolfo, i recettori sensibili più influenzati dalle attività dal cantiere sono sempre le due scuole dell'infanzia e il parco pubblico dato la loro vicinanza all'area portuale. I massimi impatti del cantiere sono quantificabili in circa 0.4 ug/m^3 di incremento sulla media annuale che equivale a circa il 2%-3% dei livelli di $\text{PM}_{2.5}$ dello scenario di riferimento. In tutti gli altri recettori sensibili si osserva un incremento dei livelli medi annuali compreso fra l'1% e il 2% rendendo di fatto trascurabile l'impatto delle attività del cantiere. In nessuno dei recettori sensibili si evidenziano livelli medi annuali vicini al limite normativo (25 ug/m^3) anche a valle degli impatti del cantiere.

Per quanto riguarda il PM_{10} , il confronto e la valutazione degli impatti del cantiere sono gli stessi del particolato fine ad esclusione del fatto che i livelli medi annuali sono più alti. Nonostante questo, non si osservano particolari situazioni critiche in termini di superamento del limite normativo.

L'ultimo inquinante d'interesse è l'ozono e solo in questo caso si osserva una riduzione diffusa, seppur contenuta, dei livelli medi annuali. Analogamente a quanto osservato per gli altri inquinanti, le riduzioni più importanti sono visibili sulle due scuole dell'infanzia e sul parco pubblico e corrispondono a circa il 3% dei livelli pre-cantiere mentre su tutti gli altri recettori sensibili le riduzioni sono comprese tra l'1% e il 2%; le riduzioni massime sono di poco superiore ai 2 ug/m^3 mentre mediamente sugli altri recettori sensibili si osservano riduzioni di circa 1 ug/m^3 . Le riduzioni dei livelli medi di ozono sono determinate dalla maggior presenza di NO_x in atmosfera causata dalle attività di cantiere; il rapporto VOC-NO_x in atmosfera viene alterato e questo porta ad un minor accumulo di ozono troposferico o inquinamento fotochimico e ad una riduzione dei fenomeni secondari.

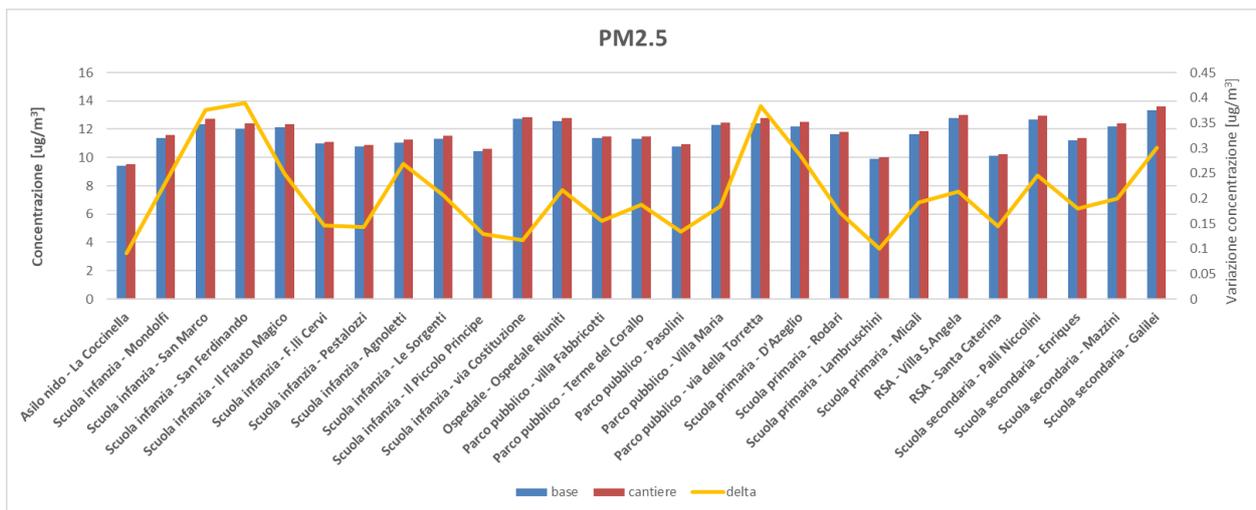
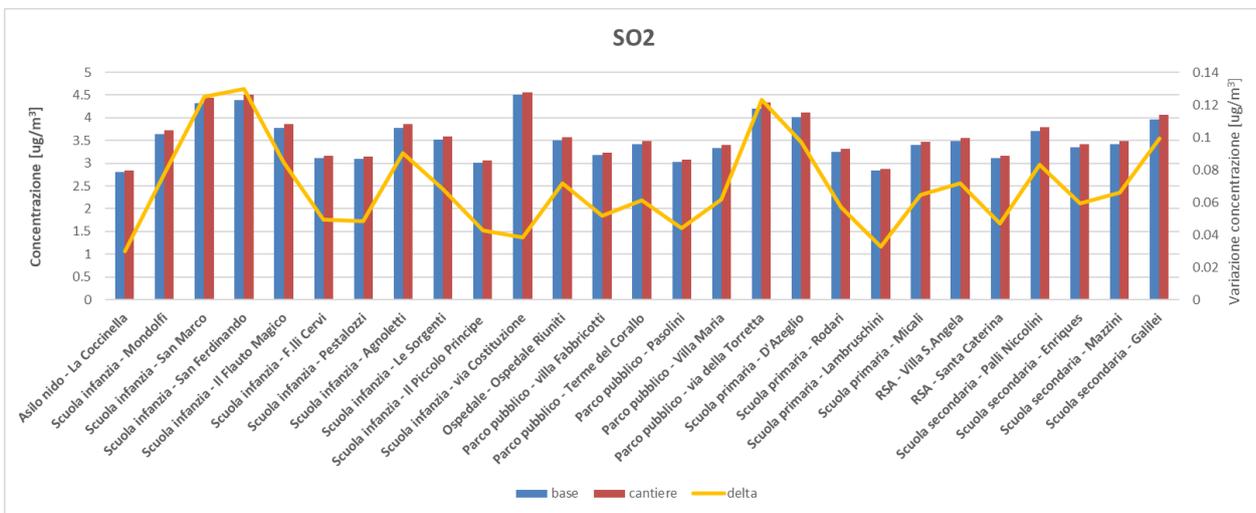
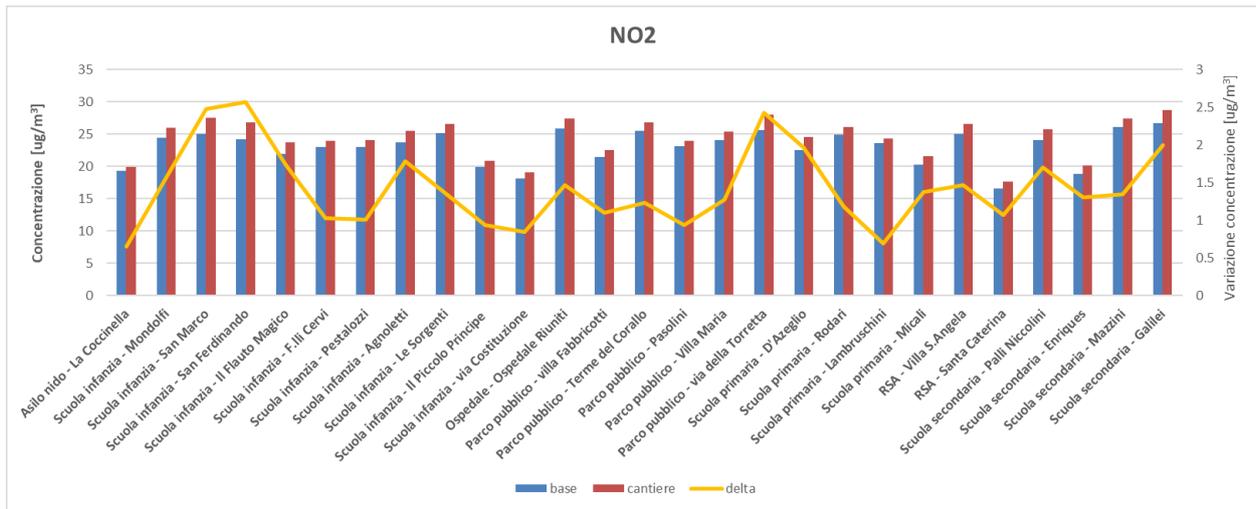




Figura 24. Confronto dei valori medi annuali al suolo simulati per lo scenario di riferimento (barra blu) e quello di cantiere (barra rossa) in corrispondenza dei recettori sensibili e la relativa differenza (linea gialla) per gli inquinanti di interesse.

Complessivamente, le attività del cantiere non generano un impatto significativo dal punto di vista del peggioramento della qualità dell'aria nella maggior parte dei recettori sensibili scelti per l'analisi; solo quelli più prossimi all'area di cantiere ovvero le scuola dell'infanzia San Marco e San Ferdinando e il parco pubblico via della Torretta sono caratterizzati da aumenti leggermente significativi dei livelli di concentrazione di tutti gli inquinanti, escluso l'ozono per il quale si osservano delle riduzioni. L'unico inquinante per il quale i livelli medi annuali aumentano al più del 10% è il biossido di azoto ma esclusivamente nell'area in prossimità del porto.

In tutti i recettori sensibili non si evidenziano criticità dal punto di vista normativo sia per lo scenario di riferimento che per lo scenario di cantiere.

5.3 Simulazione dello scenario di esercizio

Il sistema ARIA Regional / FARM configurato per simulare gli impatti sulla qualità dell'aria delle varie attività antropiche e naturali prima, e del cantiere poi, è stato predisposto anche per simulare gli effetti del porto di Livorno in fase di esercizio. Il risultato finale delle attività di cantiere sarà quello di aprire un ulteriore ingresso (a nord) per l'ingresso delle navi che porterà ad una modifica delle traiettorie in ingresso e uscita al porto. Questa nuova simulazione ha come obiettivo quello di valutare l'impatto di tale modifica sui livelli di qualità dell'aria in corrispondenza delle centraline ARPAT e dei recettori sensibili descritti nel paragrafo precedente. La risoluzione spaziale del sistema ARIA Regional / FARM è sempre pari a 1 km.

Le Figure 25-29 mostrano le mappe delle medie annuali delle concentrazioni al suolo dei principali inquinanti di interesse risultanti sul dominio in corrispondenza dello scenario di riferimento e dello scenario emissivo di esercizio. Nelle figure seguenti si mostrano anche le mappe delle differenze sulle medie annuali fra lo scenario di esercizio e quello di riferimento evidenziando l'impatto della nuova imboccatura del porto sull'intero dominio di calcolo; valori positivi indicano un aumento delle concentrazioni e quindi peggioramento della qualità dell'aria mentre valori negativi equivalgono ad una riduzione dei livelli di concentrazione.

Le mappe assolute dei vari inquinanti e delle differenze mostrano una sostanziale uguaglianza dei valori assoluti e della loro distribuzione spaziale. Osservando con attenzione le mappe delle differenze si possono notare due aree ben distinte, una più vicina all'area del porto in cui gli impatti della nuova imboccatura sono positivi ovvero che generano un aumento dei livelli medi di concentrazione e una più lontana in cui sono negativi (miglioramento della qualità dell'aria) dovuti ad una diversa allocazione della stessa massa iniziale generata dalla crociera che va verso la nuova imboccatura. Ad ogni modo tali differenze sono poco significative in quanto i valori assoluti sono molto bassi (minori di $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per qualsiasi inquinante) e non generano situazioni di criticità nell'area urbana di Livorno. Questo aspetto verrà approfondito meglio nel paragrafo successivo in cui saranno descritte le estrazioni dei valori simulati nei recettori sensibili e nelle centraline ARPAT.

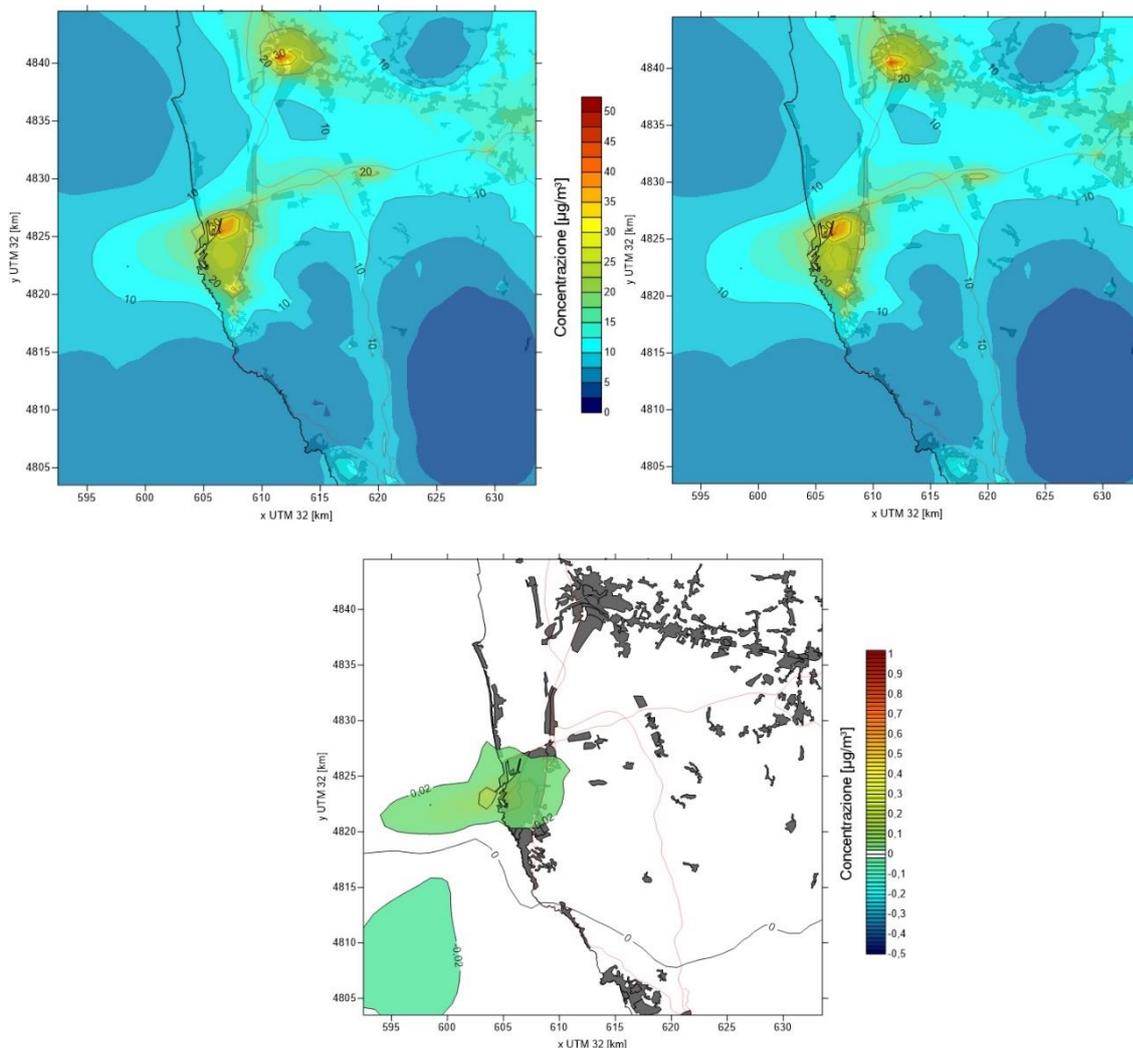


Figura 25. Concentrazioni al suolo di NO₂ simulate per lo scenario emissivo di riferimento e di esercizio – medie il periodo annuale 1/3/2017 – 28/2/2018 e la mappa della differenza.

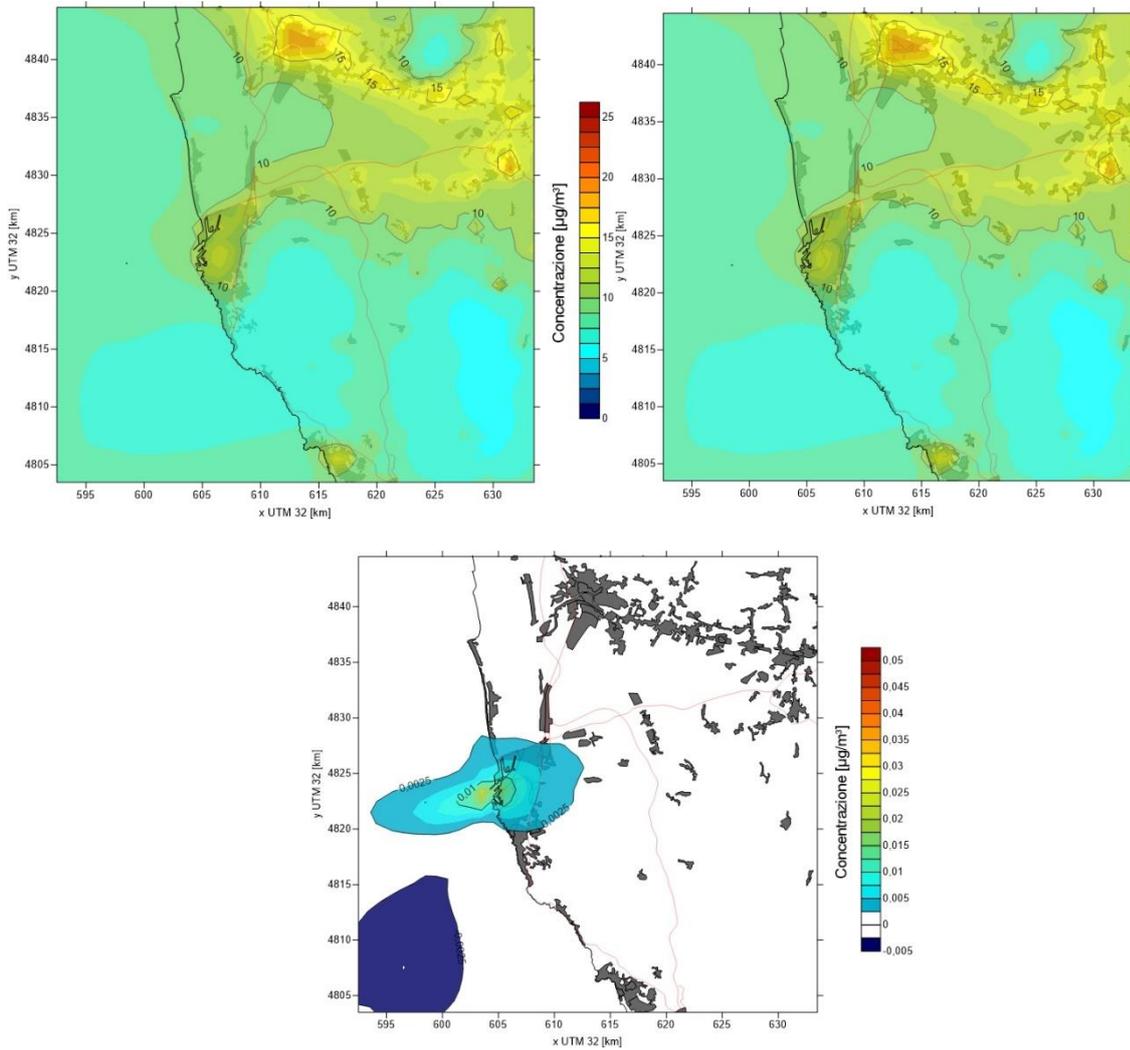


Figura 26. Concentrazioni al suolo di PM_{2.5} simulate per lo scenario emissivo di riferimento e di esercizio – medie il periodo annuale 1/3/2017 – 28/2/2018 e la mappa della differenza.

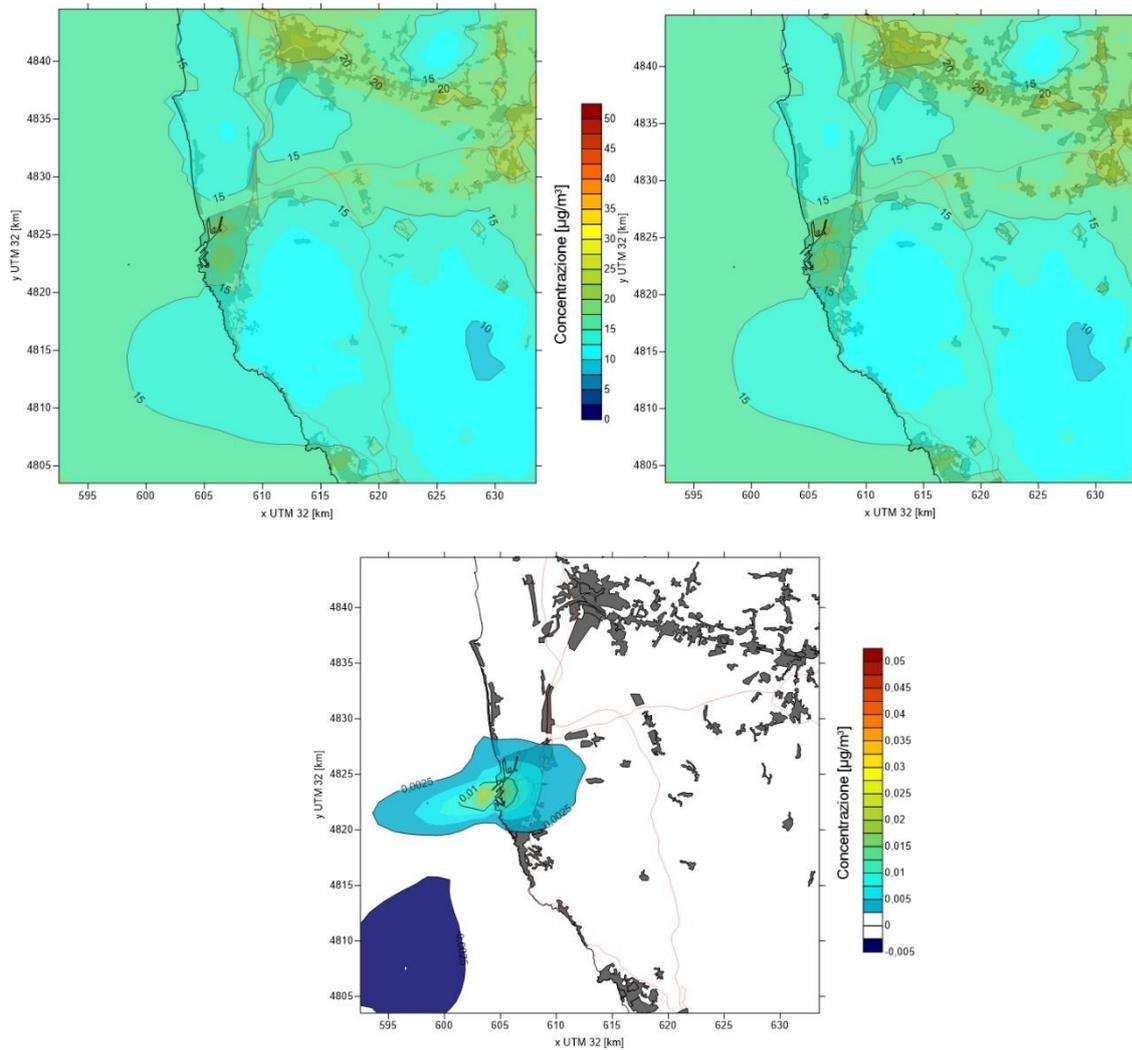


Figura 27. Concentrazioni al suolo di PM₁₀ simulate per lo scenario emissivo di riferimento e di esercizio – medie il periodo annuale 1/3/2017 – 28/2/2018 e la mappa della differenza.

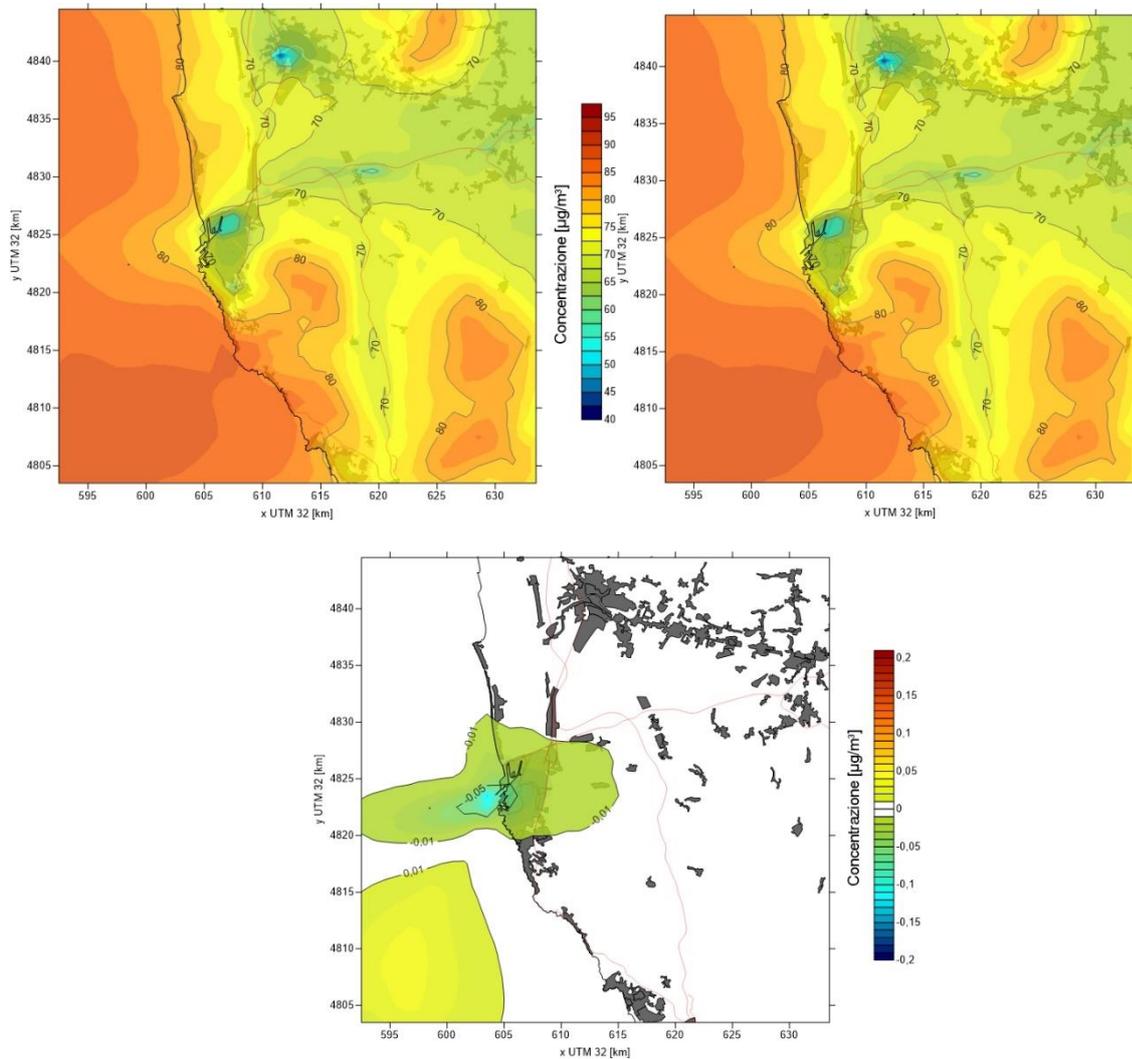


Figura 28. Concentrazioni al suolo di O₃ simulate per lo scenario emissivo di riferimento e di esercizio – medie il periodo annuale 1/3/2017 – 28/2/2018 e la mappa della differenza.

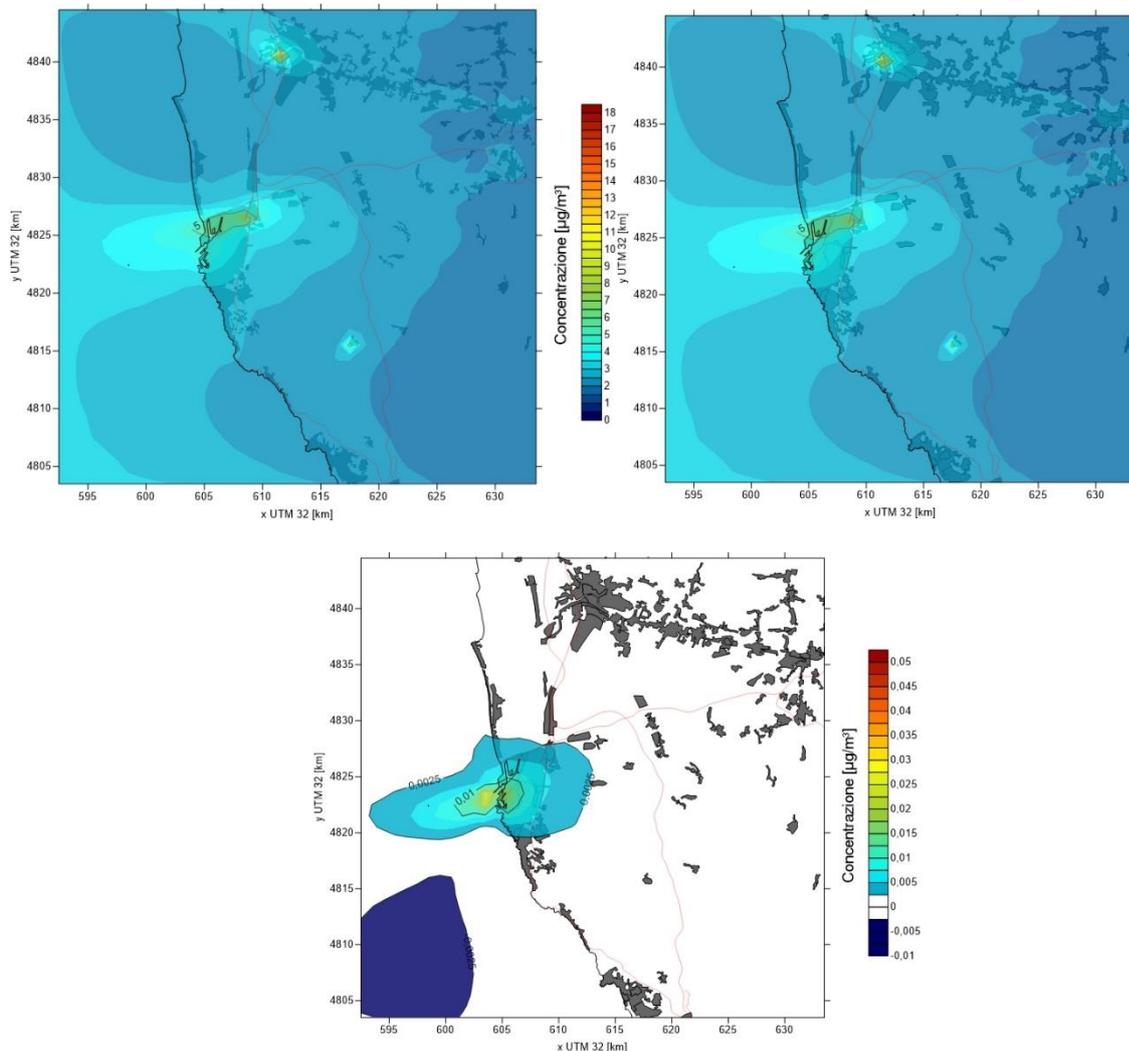


Figura 29. Concentrazioni al suolo di SO₂ simulate per lo scenario emissivo di riferimento e di esercizio – medie il periodo annuale 1/3/2017 – 28/2/2018 e la mappa della differenza.

Nel capitolo 8.3 è possibile consultare le mappe medie annuali di dettaglio sull'area urbana prossima al porto per gli inquinanti di interesse. L'area analizzata nelle mappe racchiude una porzione del territorio ad una distanza massima di circa 3 km dall'area portuale ed è di forte interesse dal punto di vista degli impatti sulla qualità dell'aria perché densamente popolata. Tramite queste mappe è possibile valutare al meglio qual è la ricaduta al suolo per i diversi inquinanti in entrambi gli scenari.

5.3.1 Estrazione dei valori simulati in corrispondenza delle stazioni ARPAT e dei recettori sensibili

Analogamente a quanto fatto per lo scenario di cantiere, per valutare l'impatto dello scenario di esercizio sui livelli di qualità dell'aria sono stati estratti i valori simulati in corrispondenza delle stazioni ARPAT e dei recettori sensibili descritti nel paragrafo precedente. Gli inquinanti d'interesse sono sempre NO₂, SO₂, PM_{2.5}, PM₁₀ e O₃ e tali valori vengono confrontati con quello dello scenario di riferimento per cercare di capire quale sarà l'impatto nel futuro della nuova configurazione del porto. In questa fase di confronto non verranno utilizzati i dati misurati in corrispondenza delle centraline ARPAT in quanto il modello è stato validato nel precedente paragrafo.

In Figura 1 si mostrano i risultati del confronto fra scenario di riferimento e scenario di esercizio in corrispondenza delle centraline ARPAT e dei recettori sensibili. Come si può notare, le differenze

fra le medie annuali tra i due scenari sono minime in tutti i recettori e per tutti gli inquinanti; l'asse secondario che identifica il valore della differenza fra i due scenari presenta valori assoluti molto bassi in tutti i casi e, a livello percentuale, tale differenza non supera mai l'1% rispetto allo scenario di riferimento (sia in positivo che in negativo). Nonostante via siano punti in cui le ricadute sono maggiori (punti più vicini all'area portuale), la significatività dei possibili incrementi/decrementi sui livelli di qualità dell'aria è trascurabile.

È evidente che in fase di esercizio la modifica delle rotte delle navi a seguito della nuova imboccatura del porto non ha ricadute significative sui livelli di qualità dell'aria in nessun punto del dominio di calcolo.



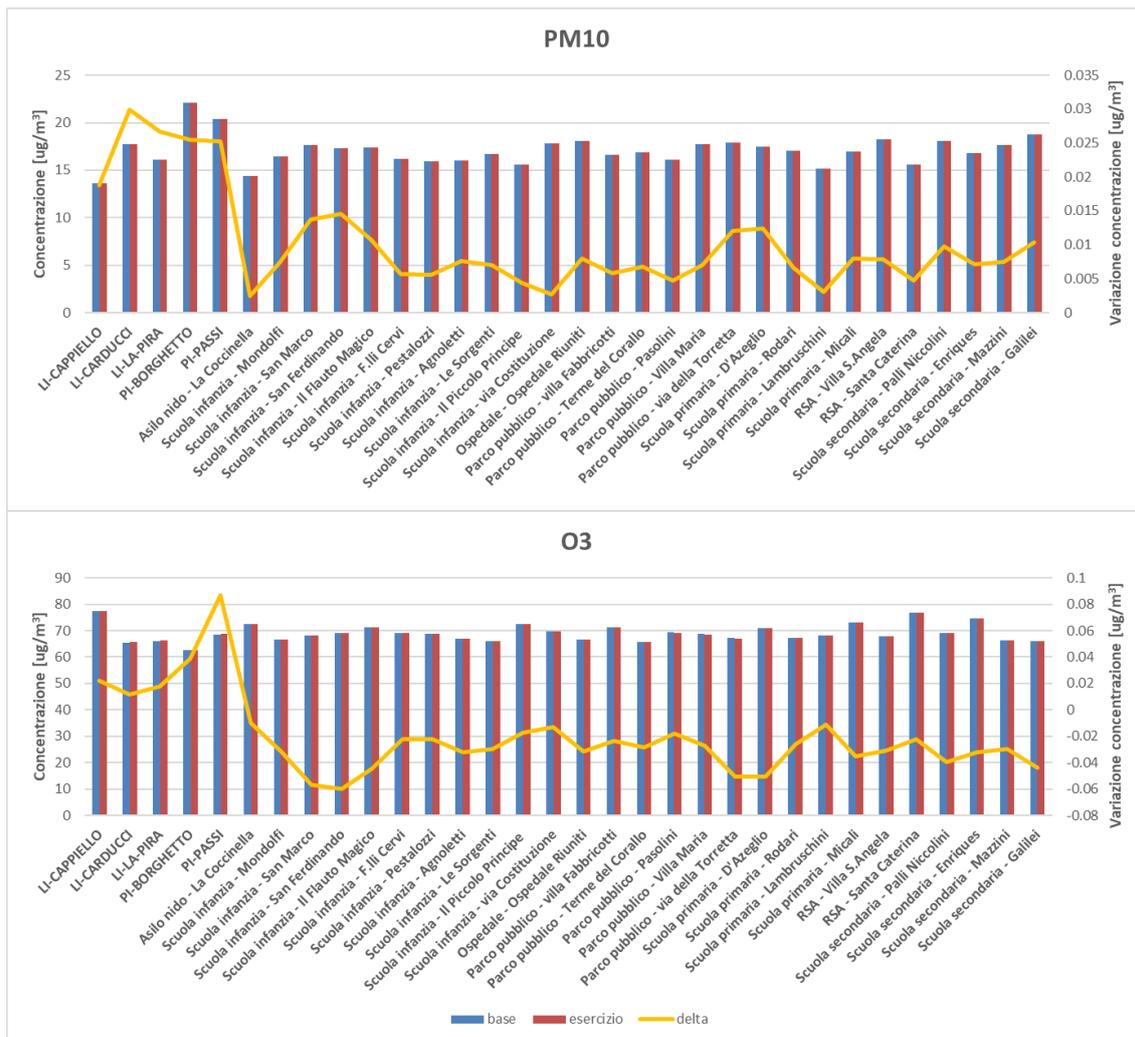


Figura 1. Confronto dei valori medi annuali al suolo simulati per lo scenario di riferimento (barra blu) e quello di esercizio (barra rossa) in corrispondenza dei recettori sensibili e la relativa differenza (linea gialla) per gli inquinanti di interesse

A complemento del confronto tra valori calcolati per lo scenario di riferimento e di esercizio è stato effettuato un confronto in termini di medie giornaliere lungo tutto il periodo annuale considerato (marzo 2017 – febbraio 2018), in modo da verificare la corrispondenza degli andamenti temporali delle concentrazioni. Nelle Figure 30-34 sono riportati i grafici di confronto tra valori medi giornalieri dei due scenari.

È alquanto evidente quanto già discusso nel paragrafo precedente ovvero che gli impatti generati dalla nuova imboccatura del porto che permette l’ingresso delle navi anche nell’area nord del porto sono quasi nulli; le serie temporali delle medie giornaliere per lo scenario di esercizio si sovrappongono quasi perfettamente a quelle dello scenario di riferimento indipendentemente dall’inquinante considerato.

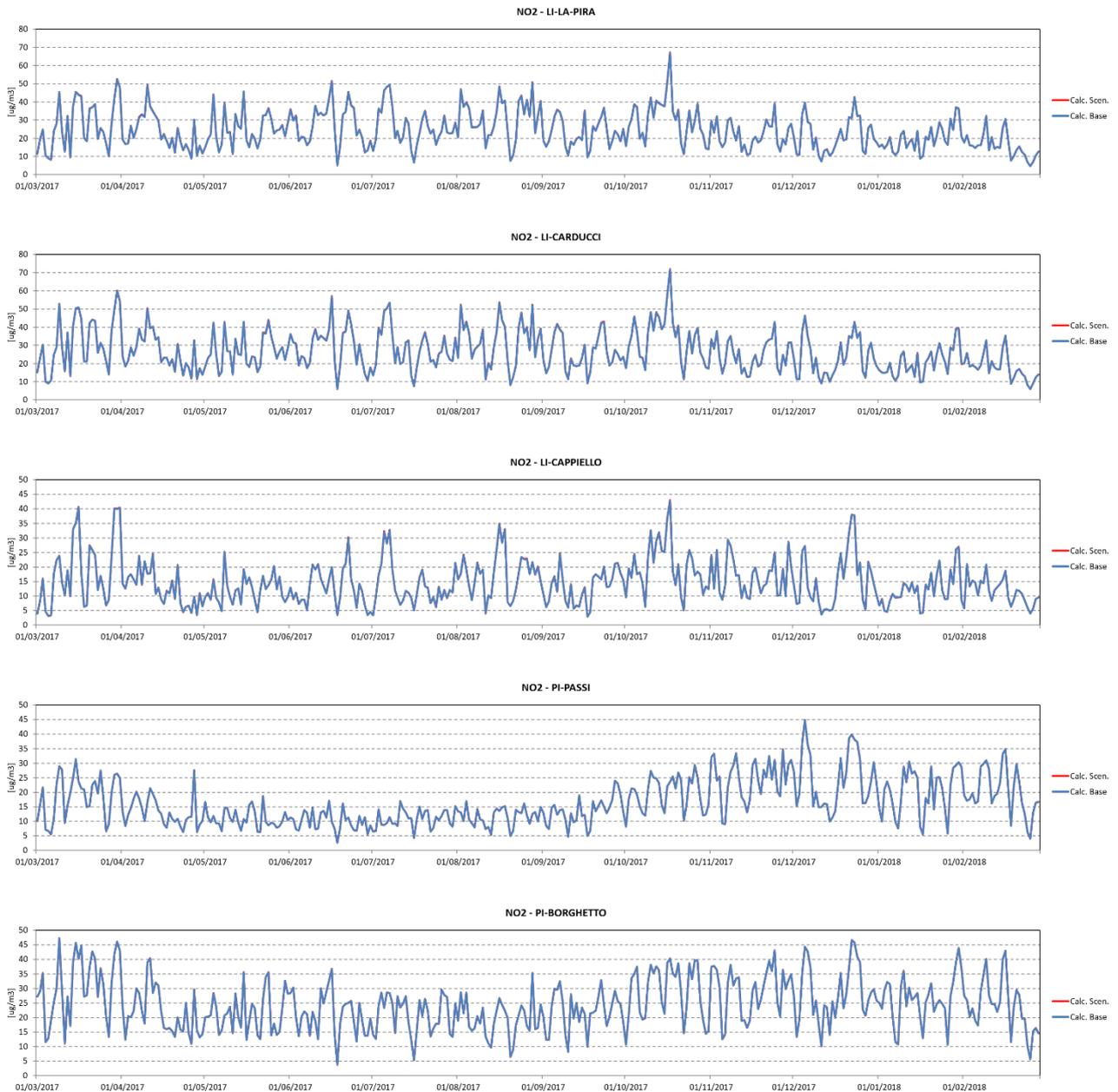


Figura 30. Concentrazioni medie giornaliere di NO₂: confronto tra i valori calcolati per lo scenario di riferimento ("Calc. Base") e di esercizio ("Calc. Scenario") in corrispondenza delle stazioni ARPAT.

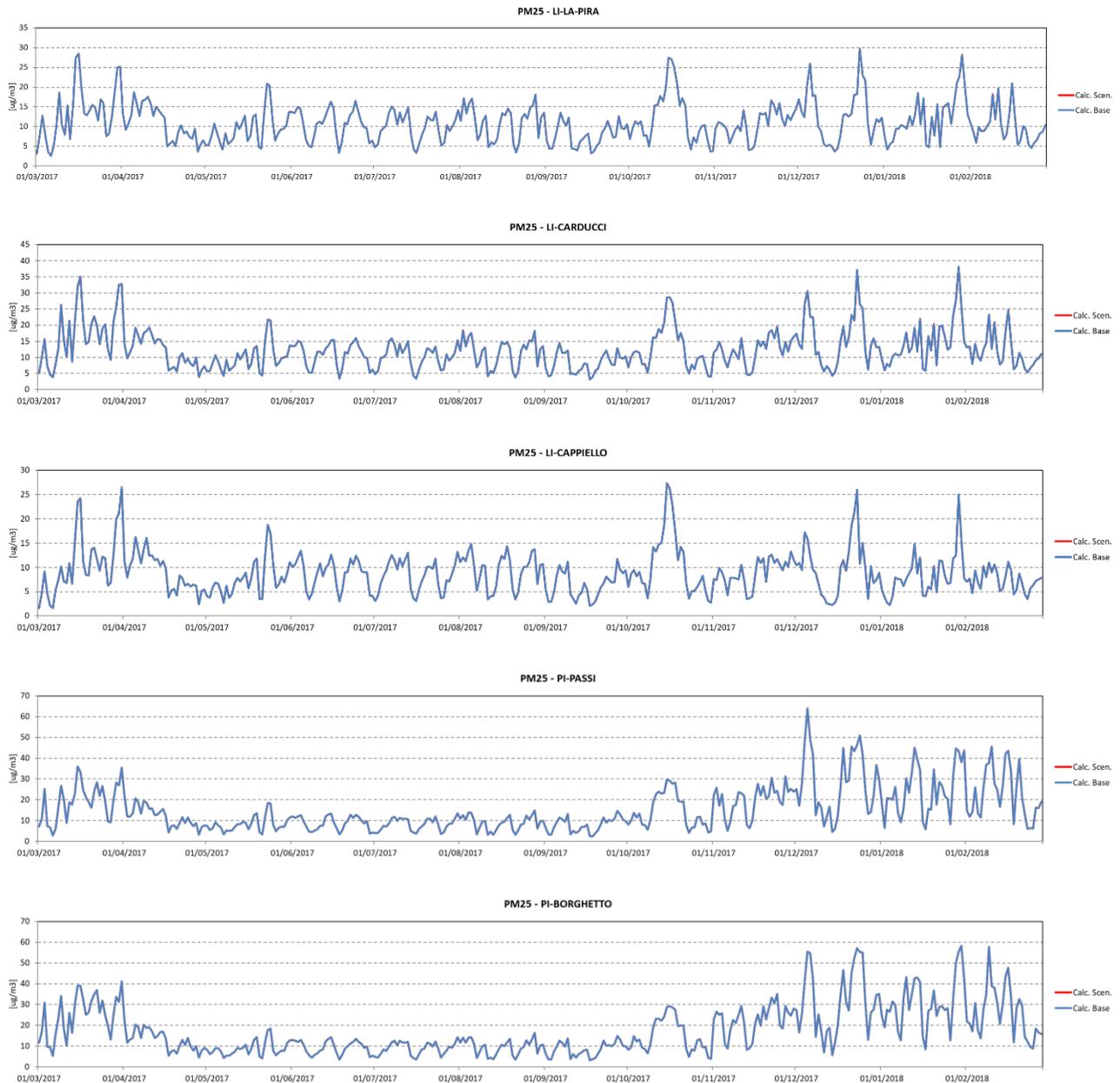


Figura 31. Concentrazioni medie giornaliere di PM_{2.5}: confronto tra i valori calcolati per lo scenario di riferimento ("Calc. Base") e di esercizio ("Calc. Scenario") in corrispondenza delle stazioni ARPAT.

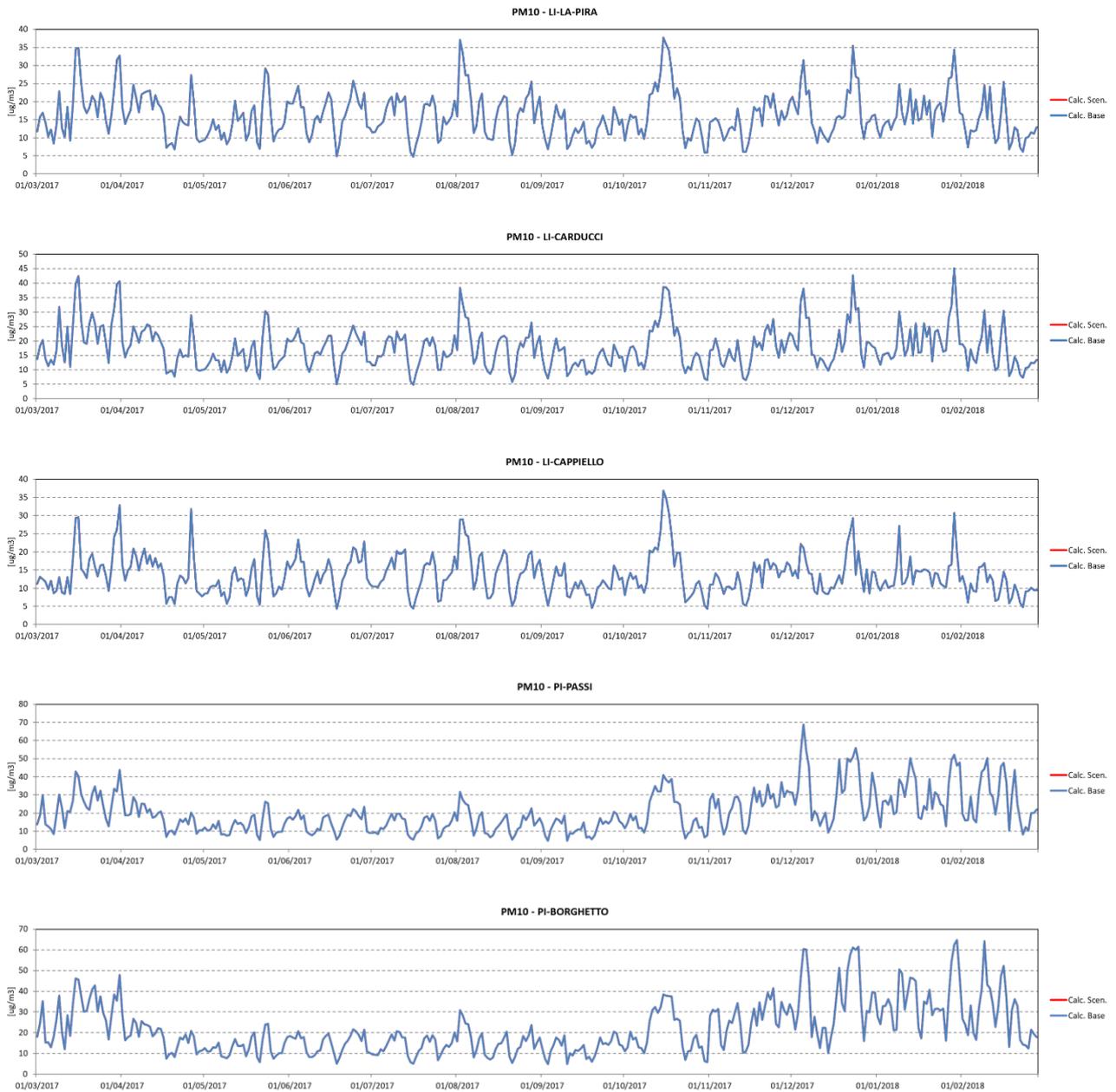


Figura 32. Concentrazioni medie giornaliere di PM₁₀: confronto tra i valori calcolati per lo scenario di riferimento ("Calc. Base") e di esercizio ("Calc. Scenario") in corrispondenza delle stazioni ARPAT.

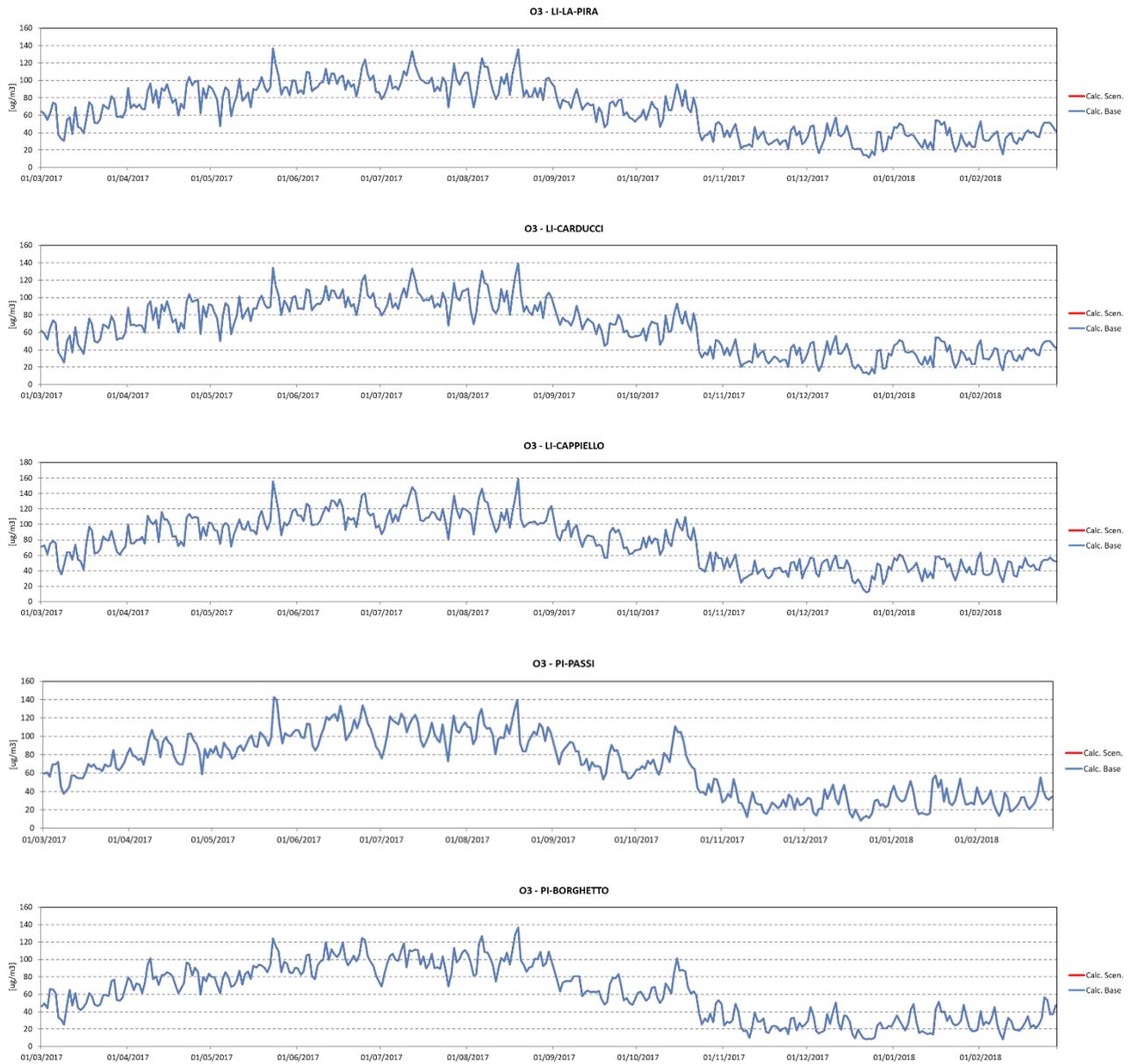


Figura 33. Concentrazioni medie giornaliere di O₃: confronto tra i valori calcolati per lo scenario di riferimento ("Calc. Base") e di esercizio ("Calc. Scenario") in corrispondenza delle stazioni ARPAT.

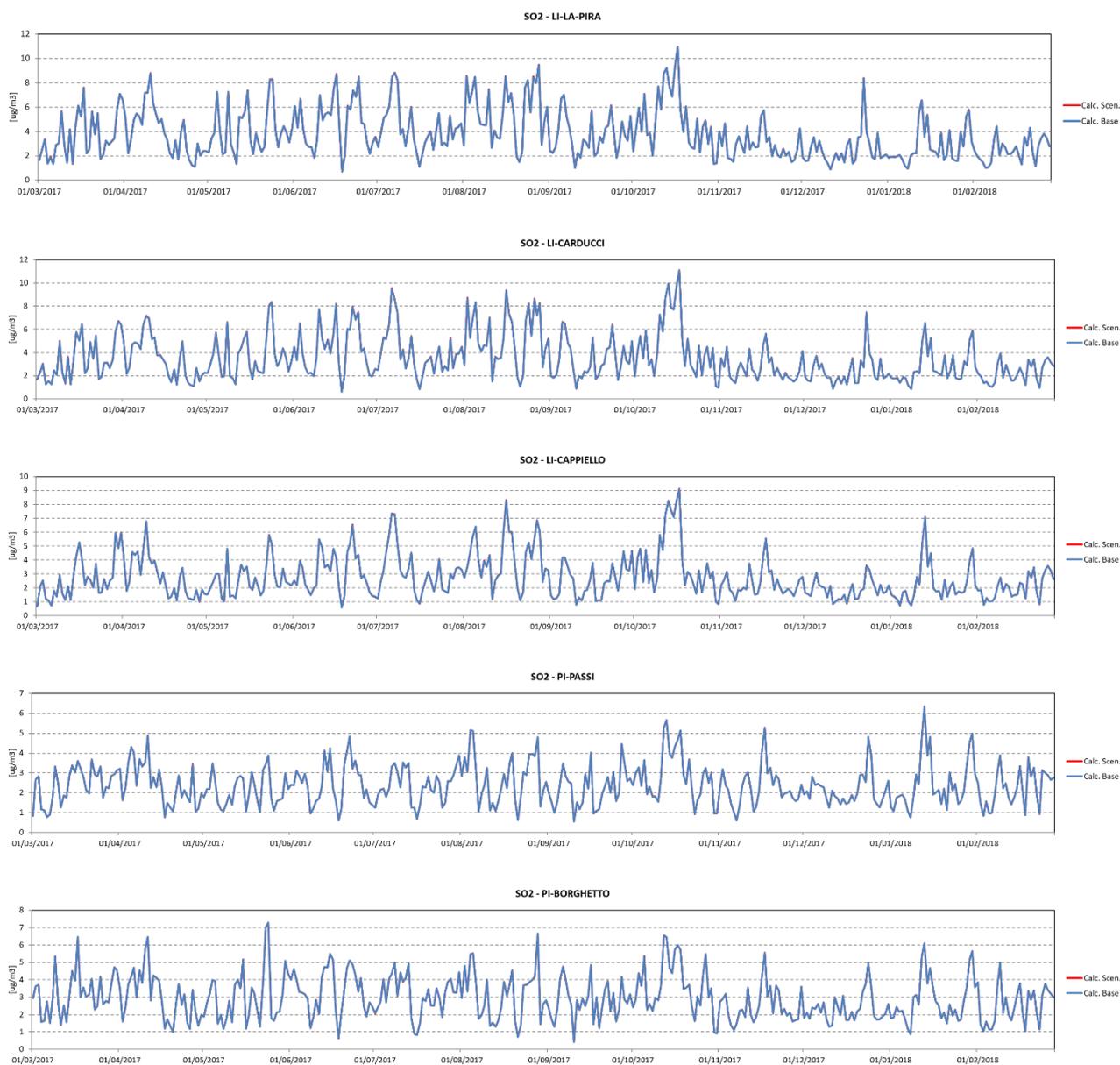


Figura 34. Concentrazioni medie giornaliere di SO₂: confronto tra i valori calcolati per lo scenario di riferimento ("Calc. Base") e di esercizio ("Calc. Scen") in corrispondenza delle stazioni ARPAT.

5.4 Confronti con i dati delle campagne

Il confronto delle concentrazioni al suolo simulate dal sistema modellistico è stato successivamente esteso ai dati risultanti dalle campagne di monitoraggio condotte da CNR-IBIMET ed ARPA Toscana a partire da fine ottobre 2017 a fine ottobre 2018.

La posizione dei punti di misura è indicata in Figura 35.

IBIMET ha condotto una campagna mediante utilizzo di 6 stazioni di qualità dell'aria low-cost (AIRQino), in corrispondenza dei punti indicati in figura come SMART 02, 06, 07, 08, 11 e 13 ed un laboratorio mobile (AIRQLab), su indicazione di ARPAT posizionato continuamente in corrispondenza della stazione SMART02. Il periodo di acquisizione delle stazioni AIRQino si estende da ottobre/novembre 2017 ad ottobre 2018, per il laboratorio AIRQLab i periodi di misura effettivi corrispondono al 22/01/2018–26/06/2018 e 20/09/2018–31/10/2018 per gli inquinanti gassosi ed al 22/01/2018–23/05/2018 per il particolato.

In concomitanza, il laboratorio mobile ARPAT ha effettuato campagne di misura alternate tra i siti di Darsena Toscana Ovest (corrispondente a SMART06) e Fortezza Vecchia (corrispondente a SMART08), nei seguenti periodi:

- Darsena Toscana: 22/11/2017–11/02/2018; 06/05/2018–27/05/2018; 01/08/2018–20/08/2018;
- Fortezza Vecchia: 26/10/2017–20/11/2017; 13/02/2018–24/02/2018; 12/04/2018–02/05/2018; 19/07/2018–31/07/2018.

Per una descrizione esaustiva della modalità di effettuazione delle campagne ed un esame dei risultati si rimanda ai rispettivi rapporti.

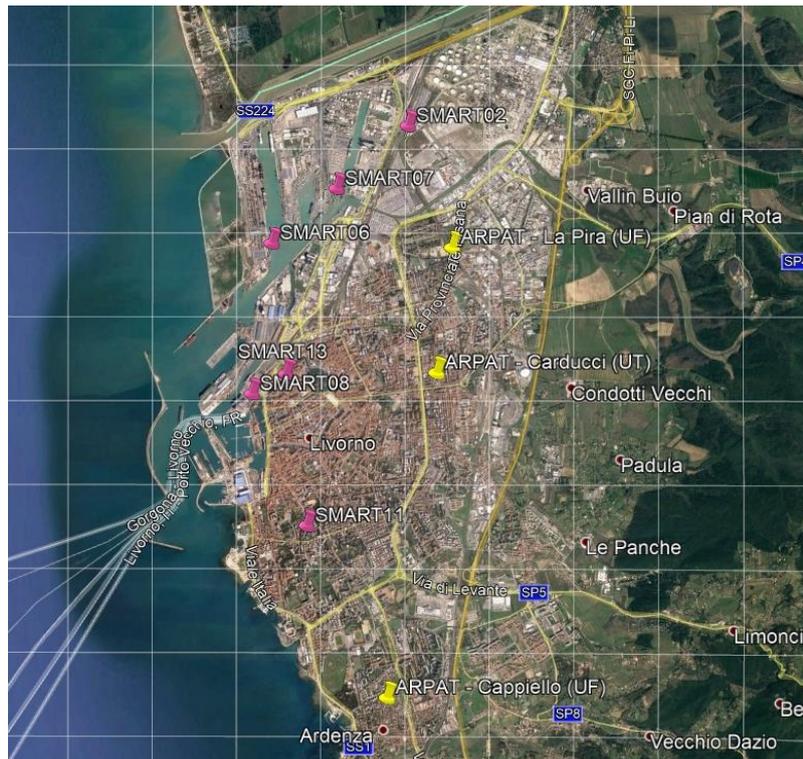


Figura 35. Localizzazione delle stazioni di monitoraggio IBIMET ed ARPAT.

La Figura 36 mostra il confronto tra i valori medi per il periodo 1/11/2017 - 30/8/2018 misurati dalle centraline AIRQino e quelli modellati per tutti gli scenari (riferimento, cantiere ed esercizio) in corrispondenza degli stessi punti. Il periodo temporale si estende dall'inizio delle campagne sino alla data cui è stato possibile estendere le simulazioni meteorologiche. I dati di NO₂ e PM delle centraline AIRQino sono stati ricalibrati sulla base di un confronto diretto tra i dati rilevati dalle centraline SMART06 e SMART08 e le misure di riferimento effettuate dal laboratorio mobile ARPAT in una serie di periodi presso i siti di Fortezza Vecchia (corrispondente a SMART08) e Darsena Toscana Ovest (corrispondente a SMART06). Sebbene le misure delle stazioni della rete AIRQino non siano direttamente confrontabili con quelle delle stazioni fisse di ARPAT, in Figura 36 è comunque mostrato come riferimento il confronto sul medesimo periodo dei dati modellati a fronte dei valori rilevati dalle stazioni fisse di ARPAT, in analogia a quanto già mostrato in precedenza per l'anno meteorologico di riferimento.

Pur nei limiti derivanti da una parte dal procedimento di calibrazione tra siti differenti e dall'altra dalla capacità discriminativa legata alla risoluzione del modello, la concordanza tra i valori osservati e calcolati risulta buona per i diversi inquinanti nella maggior parte dei siti. Si nota in particolare l'ottimo accordo del modello, per tutti gli inquinanti analizzati, con le osservazioni della postazione SMART11, il cui posizionamento permette di considerarla come indicatore delle concentrazioni nell'area di background urbano esposta alle emissioni della porzione sud del porto.

Le discrepanze più significative riguardano la sovrastima degli ossidi di azoto in corrispondenza della centralina SMART07, ed una sottostima delle concentrazioni di particolato in corrispondenza delle centraline più in prossimità della zona della raffineria nella parte nord di Livorno (SMART02, SMART06 e SMART07), probabilmente attribuibili ad una non ottimale rappresentazione del ruolo delle emissioni del polo industriale alla risoluzione del modello reattivo.

La tendenza del modello alla sovrastima delle concentrazioni di NO₂ nella postazione SMART07 potrebbe indurre ad ipotizzare una parziale sovrastima delle emissioni nella parte nord del porto industriale (allocazione errata di un'emissione diffusa come il traffico urbano o di un'emissione puntuale di tipo industriale). D'altra parte, l'accordo mostrato dal modello con le osservazioni di NO₂ delle postazioni SMART02, SMART06 e AIRQLab (Figura 37) porta ad ipotizzare che il compromesso raggiunto fra la scelta della risoluzione spaziale e l'allocazione della griglia di tutte le emissioni locali sia favorevole al fine di ottenere risultati soddisfacenti. Si ricorda altresì che la risoluzione spaziale non permette di discriminare gli effetti di sorgenti locali su postazioni la cui distanza reciproca è dell'ordine o inferiore al passo griglia del modello reattivo (come nel caso delle postazioni SMART06 e 07 o SMART 08 e 13).

Le concentrazioni misurate di PM₁₀ e PM_{2.5} sono ben riprodotte dal modello reattivo solo in corrispondenza della postazione SMART08, oltre che per tutte le postazioni ARPAT, mentre risultano sottostimate per le altre postazioni SMART. La sottostima rilevabile per le postazioni localizzate nella zona nord del porto non è invece confermata dal confronto con i dati di particolato rilevati dal laboratorio AIRQLab durante il periodo freddo, che indicano uno scostamento di segno opposto (per il PM₁₀). Anche in questo caso le discrepanze potrebbero essere quindi attribuite alla risoluzione del modello che non permette descrivere gli impatti diretti delle emissioni a breve distanza, ma fornisce una stima d'insieme dell'impatto sull'area portuale monitorata nel suo complesso dalle diverse postazioni.

I livelli di particolato rilevati in corrispondenza della stazione posta in una zona residenziale più all'interno (SMART11) risultano invece correttamente rappresentati, analogamente a quanto avviene per la stazione di fondo urbano ARPAT (Cappiello) posta nella parte sud dell'area urbana.

Risulta infine ottima la riproduzione da parte del sistema modellistico dei livelli medi di ozono rilevati dalle centraline SMART, considerando che per tale inquinante i valori misurati non sono stati ricalibrati.

Analogamente a quanto osservato per i valori medi annuali e le serie temporali sulle medie giornaliere, gli impatti delle emissioni legate al cantiere prima e alla fase di esercizio poi risultano poco significativi in corrispondenza delle stazioni analizzate.

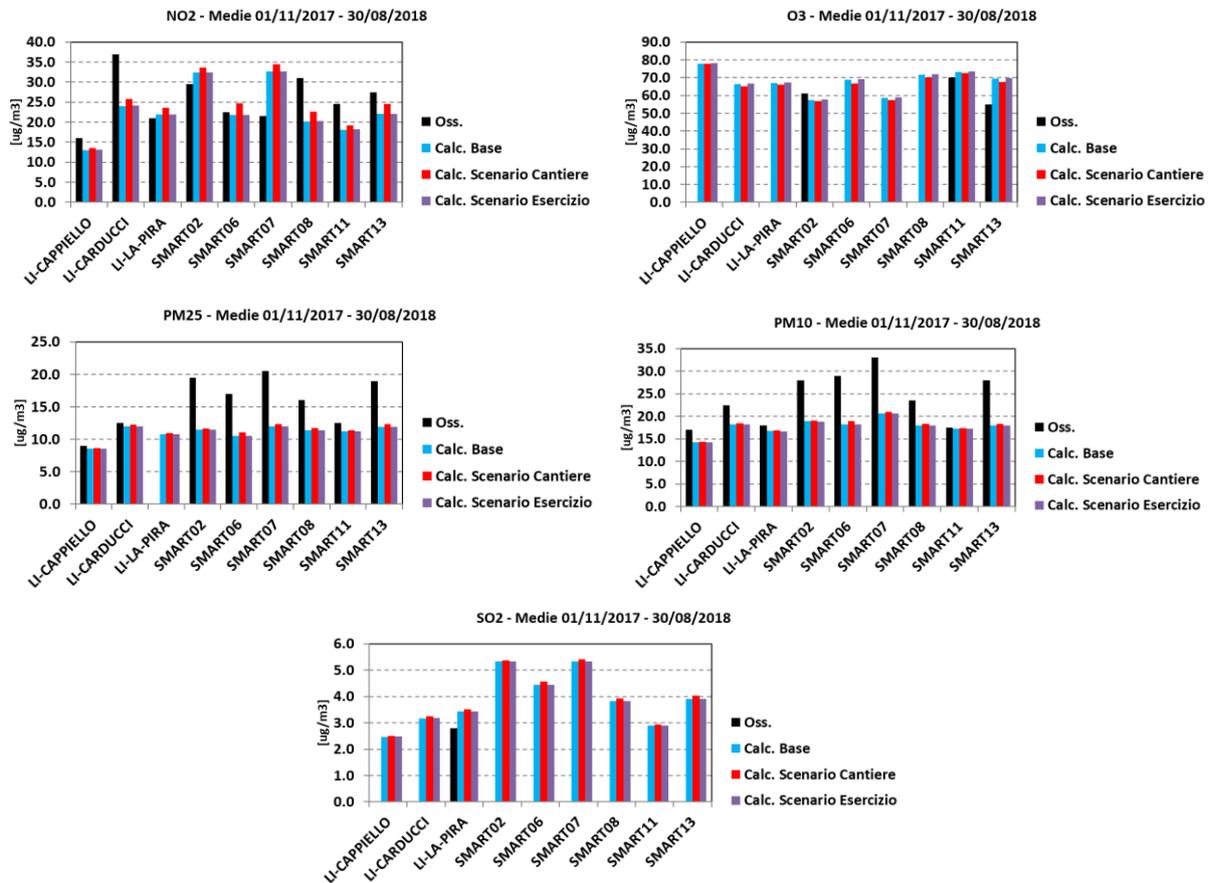


Figura 36. Concentrazioni medie per il periodo 1/11/2017 - 30/08/2018: confronto tra i valori osservati presso le centraline AIRQino ed ARPAT e quelli modellati (riferimento, cantiere e esercizio).

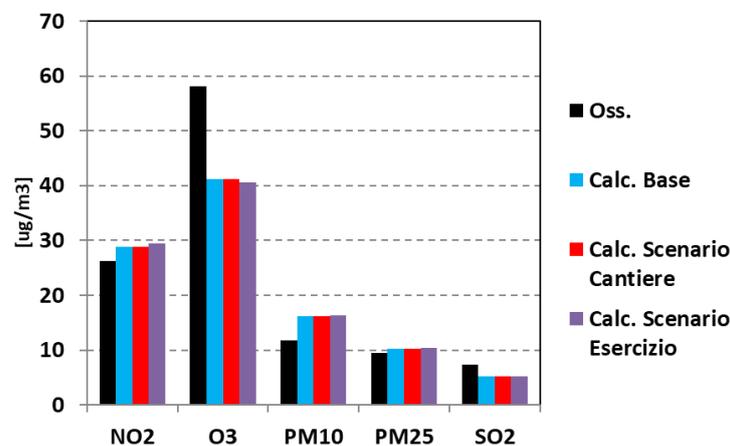


Figura 37. Confronto tra i valori medi delle concentrazioni rilevate dalla stazione AIRQLab nel periodo 22/01/2018-15/04/2018 e quelli modellati (riferimento, cantiere e esercizio).

Conclusa l'analisi della simulazione di entrambi gli scenari (riferimento e cantiere) rispetto ai dati osservati nelle campagne di misura, in Figura 38 si mostra il confronto per i primi 8 mesi del 2018 (scadenza del periodo di simulazione) dei risultati del modello con i dati osservati nella stazione provinciale di Collesalveti, per la precisione una sua frazione di nome Stagno (LI-ENI-STAGNO). Dal nome è facile intendere che si trova vicino alla raffineria ENI nella zona nord di Livorno e monitora un'area urbana industriale. Nonostante la difficoltà di rappresentare al meglio i fenomeni locali di un'area industriale, i livelli medi di NO_2 e SO_2 risultato riprodotti in maniera soddisfacente e gli impatti delle emissioni legate al cantiere non modificano in maniera sostanziale i livelli di concentrazione. Per quanto riguarda l' NO_2 le sorgenti legate al cantiere apportano un contributo

medio annuale pari al 6% mentre per gli ossidi di zolfo di circa il 2%. Nonostante non si possa parlare di impatto non significativo per l'NO₂ è altresì importante sottolineare che non si evidenziano criticità in termini di superamento dei limiti normativi. Le misure di particolato non sono disponibili così come quelle dell'ozono

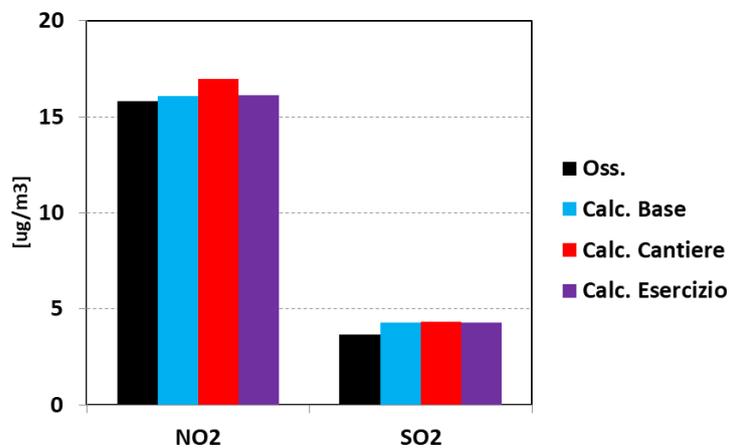


Figura 38. Confronto tra i valori medi delle concentrazioni rilevate dalla stazione LI-ENI-STAGNO nel periodo 01/01/2018–31/08/2018 e quelli modellati (riferimento, cantiere e esercizio).

6 Conclusioni

Partendo dal sistema modellistico integrato messo a punto e configurato per l'area livornese in ottemperanza agli adempimenti connessi alle prescrizioni della VAS del nuovo Piano Regolatore Portuale (PRP) limitatamente alle emissioni in atmosfera e alla qualità dell'aria, ARIANET è stata incaricata di aggiornare ed integrare il dataset emissivo al fine di valutare l'impatto delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa nella sua fase di cantiere. In aggiunta allo scenario di cantiere è stato deciso di simulare l'impatto della fase di esercizio del porto di Livorno in cui è previsto l'ingresso delle navi anche dalla nuova imboccatura del porto nell'area nord.

Il sistema è composto da tre principali componenti, dedicate alla modellazione meteorologica, emissiva e di qualità dell'aria, che sono alimentate da basi dati che descrivono la conformazione del territorio, le emissioni legate alle attività presenti su di esso, nonché gli apporti ai livelli di fondo delle concentrazioni dati dalle sorgenti più lontane.

Per la componente meteorologica e di qualità dell'aria sono stati utilizzati modelli tridimensionali allo stato dell'arte, configurati in modo da permettere di effettuare simulazioni sul dominio di lato 40 km e di risoluzione 1 km che include il porto di Livorno, il resto del territorio comunale, la fascia costiera che si estende da Rosignano Solvay sino ad oltre Marina di Pisa ed un entroterra che giunge nella parte settentrionale sino a Pisa. Il dominio scelto consente sia di considerare le aree potenzialmente interessate da impatti significativi delle attività portuali sulla qualità dell'aria, sia di includere nelle simulazioni modellistiche i possibili contributi delle sorgenti poste nelle aree circostanti.

Il modello di qualità dell'aria scelto per l'implementazione su tale dominio è di tipo tridimensionale reattivo: attraverso un'opportuna descrizione delle condizioni al contorno (concentrazioni evolutive degli inquinanti ai bordi del dominio) è in grado di considerare la possibile influenza delle sorgenti poste a maggiori distanze (al di fuori del dominio) sulla formazione degli inquinanti secondari (ozono, particolato secondario, ecc.).

Per produrre campi meteorologici sull'area di interesse consistenti con l'evoluzione a scala sinottica il modello meteorologico è stato configurato su tre domini di calcolo innestati, che coprono a risoluzione via via crescente l'Europa continentale e Mediterraneo centro-occidentale, l'Italia centro-settentrionale, ed infine l'area di Livorno alla risoluzione di 1 km.

Per il database emissivo il punto di partenza è rappresentato dal più recente Inventario Regionale delle Sorgenti di Emissioni in atmosfera (IRSE, Regione Toscana) relativo all'anno 2017, integrato in seconda battuta con la descrizione di sorgenti particolarmente significative in relazione al porto di Livorno, modellando le emissioni sulla base dei dati locali di dettaglio disponibili: nello specifico per le emissioni associate al traffico navale è stato implementato un modello emissivo alimentato dai dati forniti dall'ADSP circa i movimenti dei natanti nel corso di un anno di riferimento e ad informazioni complementari circa i mezzi di supporto utilizzati per ciascuna tipologia in fase di manovra, mentre per le emissioni da traffico stradale relative ad una porzione della rete di accesso al porto ed ai movimenti sui piazzali della Stazione Marittima sono stati usati rispettivamente i risultati di uno studio di traffico condotto dall'Università di Pisa redatto sui movimenti forniti dall'ADSP.

Oggetto specifico del presente lavoro è la valutazione dell'impatto delle attività di cantiere per la realizzazione delle opere marittime di difesa e dei dragaggi previsti nella nuova prima fase di attuazione della Piattaforma Europa; in questo contesto sono state stimate le emissioni prodotte dai mezzi, sia terrestri che navali, operanti nei semestri 5 e 6 (3° anno di cantiere), valutati come più impattanti in base alle attività che verranno svolte. A completamento del lavoro, si è deciso di valutare anche l'impatto, in fase di esercizio, dell'apertura della nuova bocca di porto nell'area a nord ipotizzando che non vi saranno variazioni nel traffico navale dopo il completamento della Piattaforma Europa.

Grazie alle informazioni fornite dai progettisti e dal RTI Imprese appaltatrici delle opere in progetto è stato possibile rappresentare con elevato livello di dettaglio i movimenti di trasporto dei materiali e le aree di manovra interessate dalle diverse fasi operative, e la specificità delle tipologie di mezzi

che verranno usati ha trovato rispondenza nell'applicazione di fattori di emissione diversificati che rendono possibile individuare il peso, a livello emissivo, delle varie categorie.

Per l'operatività del sistema si sono infine considerati gli apporti dalle principali sorgenti naturali: i composti volatili organici emessi dalla vegetazione (emissioni biogeniche), modellati sulla base della copertura vegetativa e delle condizioni meteorologiche, gli aerosol marini emessi a seguito dell'azione eolica, stimati in funzione dell'umidità relativa e dell'intensità del vento, e le polveri di origine desertica, il cui trasporto a lunga distanza è tenuto in conto tramite le condizioni al contorno mutate dal modello globale dal servizio europeo CAMS/Copernicus.

Il sistema modellistico è stato applicato per ricostruire le concentrazioni complessive degli inquinanti sul dominio di analisi lungo un intero anno di riferimento, da marzo 2017 a febbraio 2018, in modo da coprire lo spettro delle condizioni emissive e meteo-dispersive che si presentano nelle diverse stagioni. Oltre a simulare lo *scenario di riferimento*, il quale considera tutte le sorgenti naturali ed antropiche presenti sul territorio a valle dell'aggiornamento dell'inventario delle emissioni all'anno 2017, lo scopo di questo lavoro è altresì valutare gli impatti sui livelli di concentrazione del *cantiere* per la costruzione delle opere foranee e i dragaggi in attuazione della 1° fase del PRP. Le concentrazioni simulate dei principali macroinquinanti (NO_2 , $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , O_3 e SO_2) sono state messe a confronto con i valori rilevati in corrispondenza delle stazioni fisse della rete regionale di monitoraggio della qualità dell'aria di Arpa Toscana lungo il medesimo arco di tempo. Il confronto è valido per lo scenario di riferimento, il quale a sua volta è stato confrontato con lo scenario di cantiere per evidenziare eventuali criticità causate dalle attività di terra o mare legate ad esso. L'ulteriore scenario simulato è quello di *esercizio*, il quale considera tutte le sorgenti antropiche e naturali presenti sul territorio, analogamente a quello di riferimento, ad eccezione dell'ingresso al porto che prevede non solo l'ingresso da sud ma anche da nord una volta terminati i lavori della Piattaforma Europa. Al fine di valutare al meglio l'impatto sull'area urbana di Livorno delle attività di cantiere e di esercizio, sono stati estratti i valori di concentrazione calcolata in corrispondenza di una serie di recettori sensibili scelti con i progettisti che comprendono asili nidi, scuole a partire dall'infanzia fino a quelle secondarie, ospedali, RSA e parchi pubblici collocati per la maggior parte in un buffer di 3 km dall'area portuale.

Per integrare le informazioni fornite dalle stazioni fisse, a partire da fine ottobre 2017 a fine ottobre 2018, CNR-IBIMET in coordinamento con ARPA Toscana ha condotto una campagna di monitoraggio della qualità dell'aria nella città di Livorno, mediante l'utilizzo di 6 stazioni di qualità dell'aria low-cost (AIRQino) e di un laboratorio mobile (AIRQLab). In concomitanza, ARPAT ha anch'essa effettuato una campagna di monitoraggio mediante laboratorio mobile, posizionato in corrispondenza di due postazioni delle centraline AIRQino.

Il confronto è stato effettuato tra le misure e il modello sulla base dei livelli medi annuali ed in termini di medie giornaliere, in modo da verificare la corrispondenza degli andamenti temporali delle concentrazioni.

Per ciò che riguarda l' NO_2 l'accordo è generalmente buono, sia nell'andamento stagionale che nei singoli episodi, così come delle differenze tra i livelli più elevati riscontrati nelle stazioni fisse da traffico e quelle di fondo urbano a Livorno e Pisa (Carducci vs. Cappiello e La Pira, Borghetto vs. Passi).

Anche per quanto concerne il particolato, l'analisi dell'andamento delle serie temporali e degli indicatori statistici mostra come il sistema modellistico sia in grado di ben simulare gli andamenti stagionali ed i principali episodi, con una tendenza alla sottostima nel caso del PM_{10} .

I livelli medi di SO_2 risultano anch'essi ben riprodotti con l'eccezione dell'andamento stagionale, fortemente influenzato da sorgenti locali non opportunamente descritte. I valori medi di ozono simulati sono coerenti con quanto indicato dalle centraline AIRQino.

A Livorno le discrepanze più significative si riscontrano nella parte settentrionale della città, con una sovrastima dell' NO_2 in corrispondenza della postazione di La Pira durante i mesi primaverili ed estivi, mentre i valori di particolato simulati risultano inferiori a quelli rilevati dalle centraline AIRQino poste più in prossimità della zona della raffineria.

Il buon accordo riscontrato relativamente a gran parte dei siti e degli indicatori ha mostrato come il sistema modellistico nel suo complesso sia in grado di riprodurre i livelli medi e la variabilità delle concentrazioni di inquinanti primari e secondari nelle diverse zone del dominio, ed in particolare a Livorno.

Per quanto riguarda lo scenario di cantiere, il cui obiettivo è quello di quantificare gli impatti generati dalle sorgenti legate ai lavori in progetto, si può osservare che i livelli di concentrazione non variano in maniera significativa, sia sulle media annuali che quelle giornaliere per i diversi inquinanti. Gli effetti maggiori sono visibili nell'area adiacente al porto, così come confermato dalle serie temporali delle medie giornaliere estratte in corrispondenza delle stazioni più vicine al cantiere, La Pira e Carducci, in cui si notano dei picchi più alti rispetto allo scenario di riferimento (incremento massimo della media giornaliera per l'NO₂ del 38% e del 10% circa per il PM_{2.5} e il PM₁₀); osservando le medie annuali non si apprezzano variazioni significative (incremento medio annuale per l'NO₂ di circa l'1.5% e circa il 2% per il particolato) dei livelli di concentrazione per qualsiasi inquinante causate dalle sorgenti di cantiere sia esse navali o terrestre che siano.

La simulazione dello scenario di cantiere porta di fatto alla conclusione che gli impatti generati dalle sorgenti specifiche del cantiere non modificano in maniera sostanziale la qualità dell'aria in termini medi annuali e giornalieri. Tramite il confronto fra lo scenario di cantiere e quello di riferimento in corrispondenza dei recettori sensibili si evince che, per la quasi totalità dei punti, gli impatti generati dalle attività di cantiere sono alquanto trascurabili e poco significativi in termini di media annuale indipendentemente dall'inquinante considerato. I punti soggetti agli impatti maggiori sono quelli in prossimità dell'area di cantiere come osservato per le scuole dell'infanzia San Marco e San Ferdinando e il parco pubblico di via della Torretta, soprattutto per il biossido di azoto il cui incremento percentuale rispetto allo scenario di riferimento si aggira intorno al 10%.

Per quanto riguarda lo scenario di esercizio, il cui obiettivo è quello di valutare gli impatti generati dalla modifica della traiettoria di ingresso delle navi al porto (ingresso da sud e da nord), si osserva che i livelli di concentrazione simulati e confrontati con quelli dello scenario di riferimento non presentano differenze sensibili e significative per tutti gli inquinanti d'interesse. Si conclude che la nuova rotta percorsa dalle navi in ingresso al porto dopo la realizzazione della Piattaforma Europa non genera impatti negativi significativi sulla qualità dell'aria dell'intero dominio di calcolo. Anche tramite il confronto effettuato in corrispondenza dei recettori sensibili fra lo scenario di riferimento e quello di esercizio si evince che gli impatti generati dalla nuova rotta sono prossimi allo zero in termini di media annuale indipendentemente dall'inquinante che si considera.

Il sistema, costituito dal software modellistico configurato e validato, corredato dalle basi dati annuali su base oraria realizzate per la ricostruzione della situazione attuale e futura ("scenario di riferimento", "scenario di cantiere" e "scenario di esercizio") è quello installato su un server di calcolo ad alte prestazioni presso l'Autorità Portuale di Livorno grazie al precedente lavoro ARIANET (2018).

Grazie allo sforzo precedente tale configurazione è stata utile come punto di partenza per l'aggiornamento dello scenario di riferimento e la valutazione dello scenario di cantiere e di esercizio. L'analisi dei valori simulati è stata realizzata predisponendo esclusivamente gli scenari emissivi di interesse e facendo ripartire il sistema modellistico.

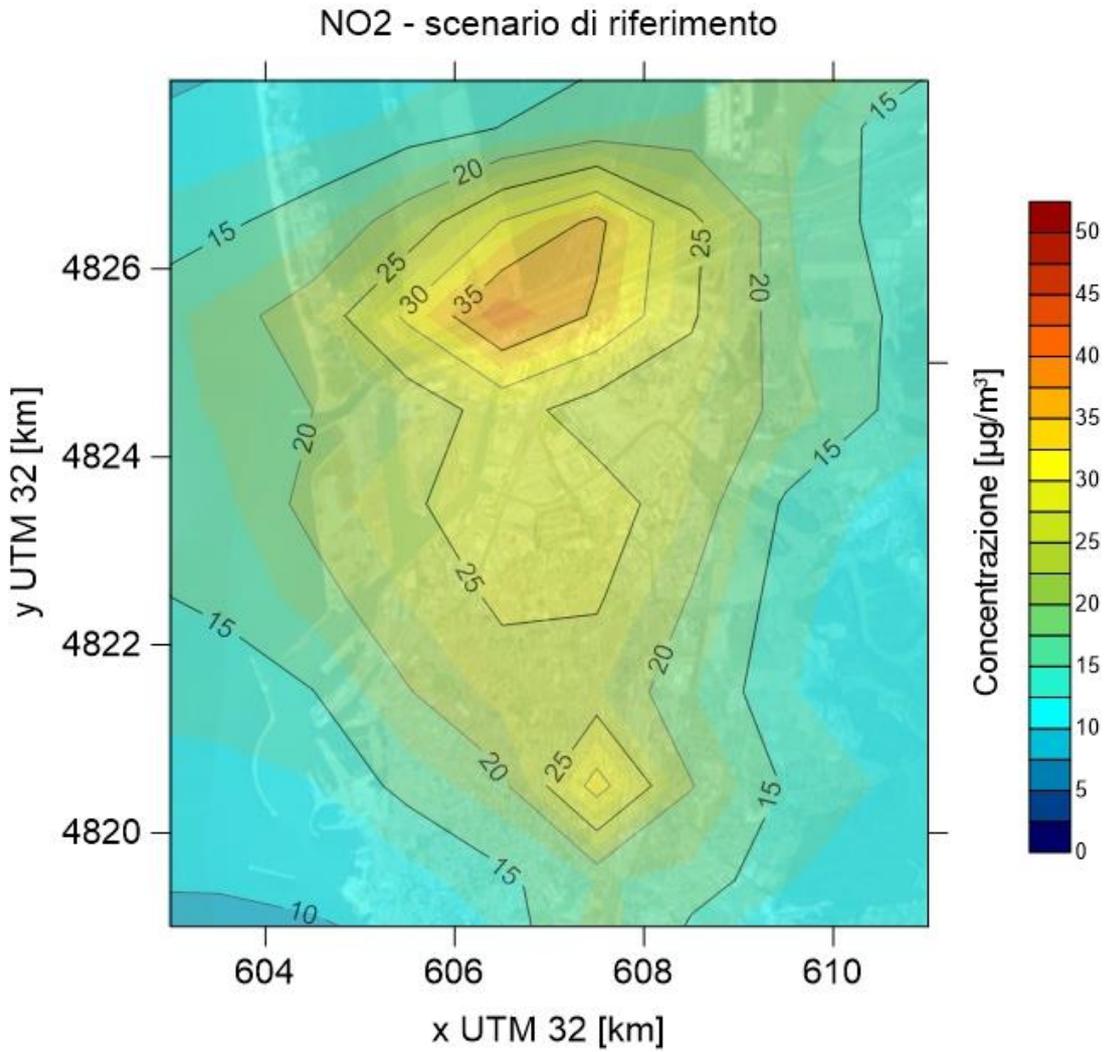
Le modalità scelte per la descrizione della componente emissiva di cantiere, effettuata in coerenza con l'inventario regionale delle emissioni, fanno sì che in futuro sarà possibile accogliere sia aggiornamenti o proiezioni future dell'inventario regionale, sia variazioni delle sorgenti derivanti dal futuro assetto dell'area di cantiere.

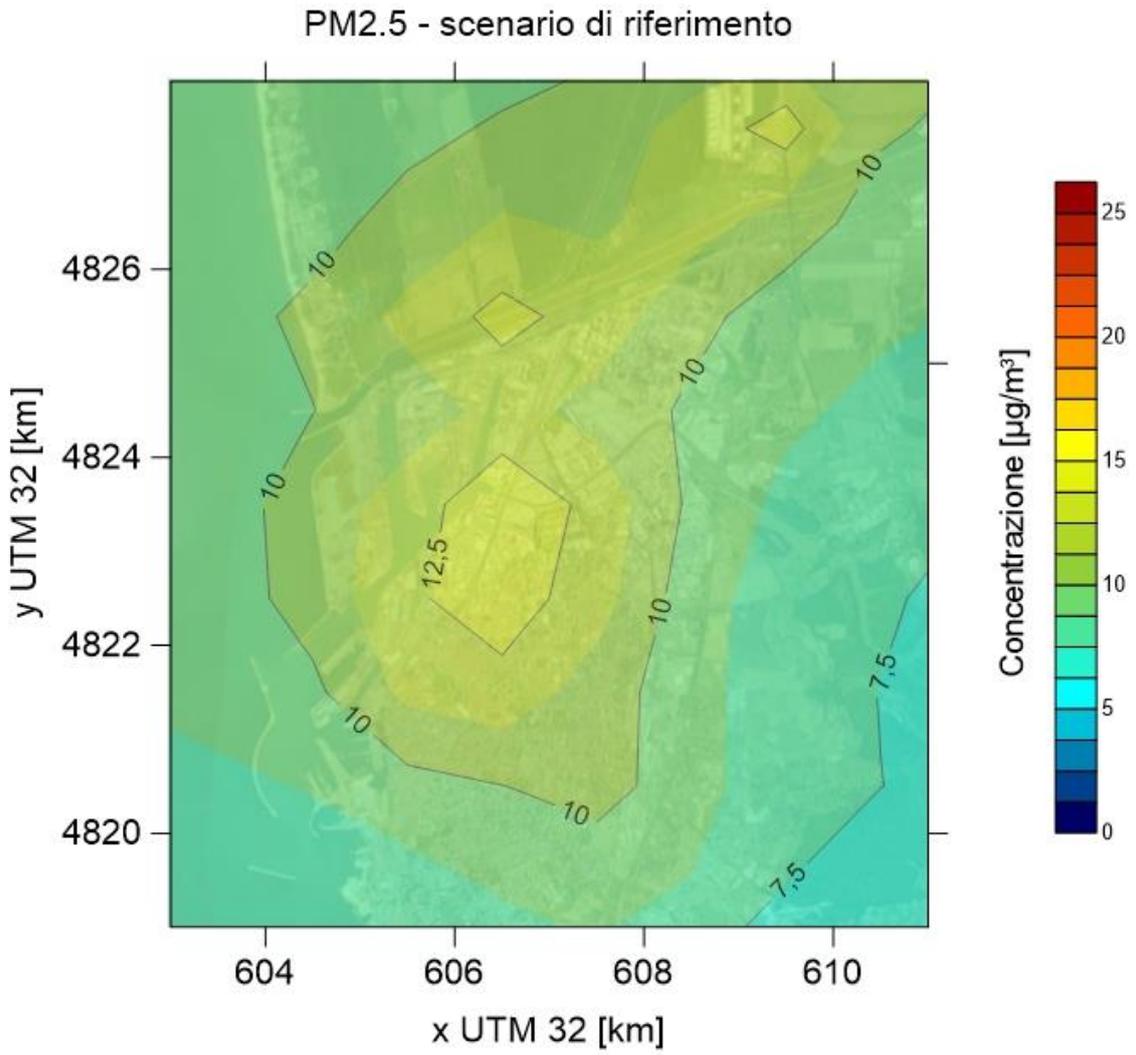
7 Bibliografia

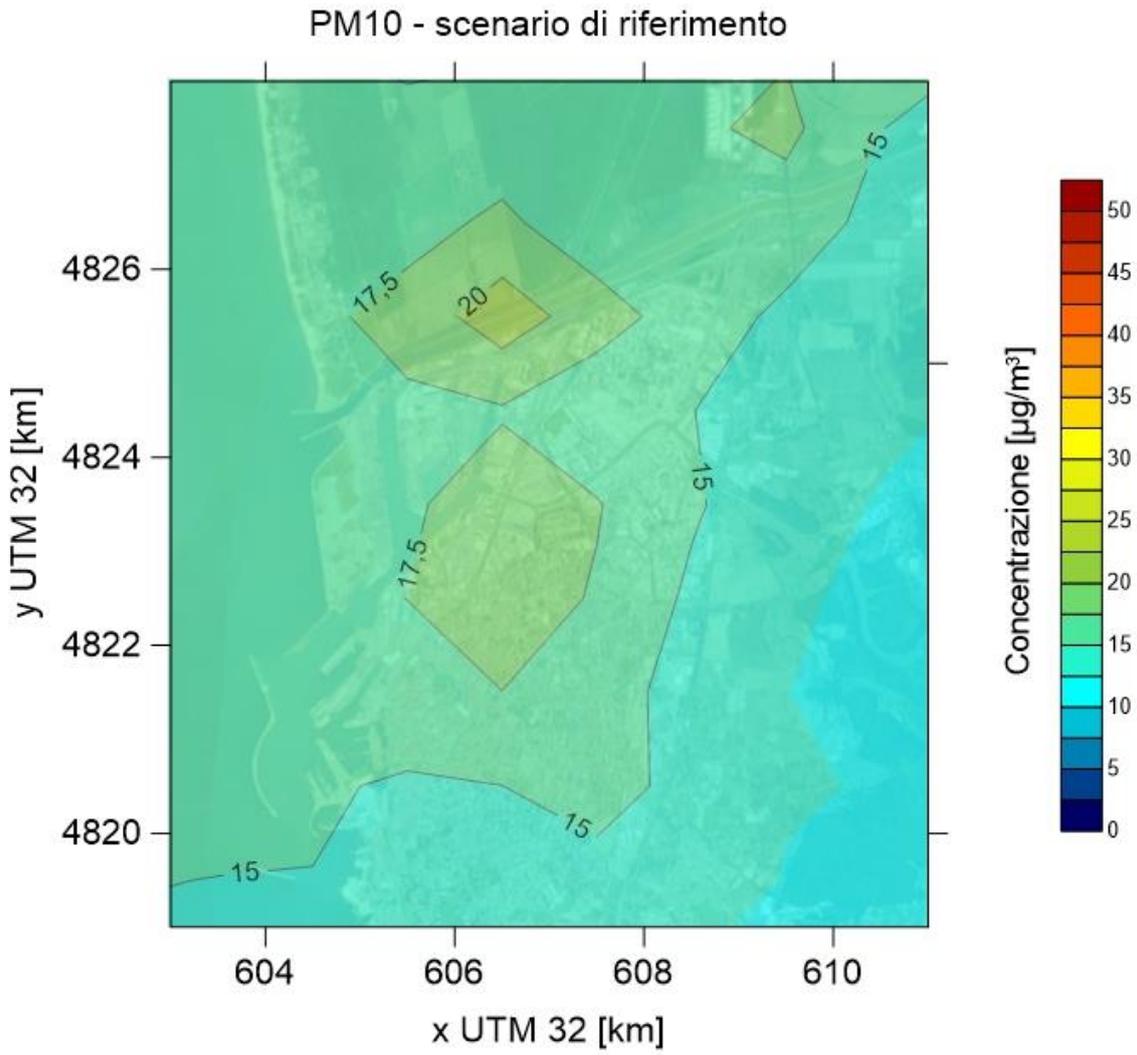
- ARIANET (2015) SURFPro3 (SURface-atmosphere interFace PROcessor, Version 3) Reference guide. <http://95.228.102.186/trac/SURFPro>.
- ARIANET (2018) Sviluppo ed implementazione di un sistema integrato per la valutazione degli impatti sulla qualità dell'aria, per la gestione degli interventi previsti nel PR del Porto di Livorno.
- Baklanov, A., Hänninen, O., Slørdal, L. H., Kukkonen, J., Bjergene, N., Fay, B., Finardi, S., Hoe, S. C., Jantunen, M., Karppinen, A., Rasmussen, A., Skouloudis, A., Sokhi, R. S., Sørensen, J. H., (2007) Integrated systems for forecasting urban meteorology, air pollution and population exposure. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 855–874, 2007 (www.atmos-chem-phys.net/7/855/2007/)
- Bao X, Zhang F (2013) Evaluation of NCEP-CFSR, NCEP-NCAR, ERA-Interim, and ERA-40 reanalysis datasets against independent sounding observations over the Tibetan Plateau. *J Clim* 26:206–214. doi:10.1175/JCLI-D-12-00056.1
- Betts, A. K., M. Kohler, and Y. Zhang, 2009: Comparison of river basin hydrometeorology in ERA-Interim and ERA-40 reanalysis with observations. *J. Geophys. Res.*, 114, D02101, doi:10.1029/2008JD010761.
- ARIANET (2018) R2018.17-Sviluppo ed implementazione di un sistema integrato per la valutazione degli impatti sulla qualità dell'aria, per la gestione degli interventi previsti nel PR del Porto di Livorno.
- Chen, G., T. Iwasaki, H. Qin, and W. Sha, 2014: Evaluation of the Warm-Season Diurnal Variability over East Asia in Recent Reanalyses JRA-55, ERA-Interim, NCEP CFSR, and NASA MERRA. *J. Climate*, 27(14), 5517–5537 (DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00005.1).
- Dee, D. P., and Coauthors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137, 553–597.
- EMEP/EEA (2019) EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 9. Technical guidance to prepare national emission inventories. European Environment Agency, Report No 13/2019. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>
- Guenther, A., Geron, C., Pierce, T., Lamb, B., Harley, P., and Fall, R., Natural Emissions of Non-Methane Volatile Organic Compounds, Carbon Monoxide, and Oxides of Nitrogen from North America, *Atmospheric Environment*, 34, 2205–2230, 2000.
- Guenther, A., Karl, T., Harley, P., Wiedinmyer, C., Palmer, P.I., and Geron, C., Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature), *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 3181–3210, 2006.
- Hodges, K. I., R. W. Lee, and L. Bengtsson, 2011: A comparison of extratropical cyclones in recent reanalyses ERA-Interim, NASA MERRA, NCEP CFSR, and JRA-25. *J. Climate*, 24, 4888–4906.
- Kukkonen, J., Olsson, T., Schultz, D. M., Baklanov, A., Klein, T., Miranda, A. I., Monteiro, A., Hirtl, M., Tarvainen, V., Boy, M., Peuch, V.-H., Poupkou, A., Kioutsioukis, I., Finardi, S., Sofiev, M., Sokhi, R., Lehtinen, K. E. J., Karatzas, K., San José, R., Astitha, M., Kallos, G., Schaap, M., Reimer, E., Jakobs, H., and Eben, K., 2012: A review of operational, regional-scale, chemical weather forecasting models in Europe, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 1–87, doi:10.5194/acp-12-1-2012. (<http://www.atmos-chem-phys.net/12/1/2012/>)
- Mooney, P. A., F. J. Mulligan, and R. Fealy, 2010: Comparison of ERA-40, ERA-Interim and NCEP/NCAR reanalysis data with observed surface air temperatures over Ireland. *Int. J. Climatol.*, 31, 545–557, doi:10.1002/joc.2098.
- Pratelli I.A., Mannucci F., Masi C.A., Sechi P., Zanobetti D. (2017) *Sviluppo di un modello previsionale del traffico veicolare indotto relativo al porto di Livorno e della sua cintura stradale*. Università di Pisa, Polo Sistemi Logistici, Laboratorio LOGIT. Rapporto 24/11/2017.
- Szczypta, C., and Coauthors, 2011: Verification of the new ECMWF ERA-Interim reanalysis over France. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 647–666, doi:10.5194/hess-15-647-2011.
- Walko R.L., Tremback C.J., Pielke R.A., Cotton W.R. (1995) An interactive nesting algorithm for stretched grids and variable nesting ratios. *J. Appl. Meteor.* 34, 994–999.
- Zhang, K.M., Knipping E.M., Wexler A.S., Bhave P.V., Tonnesen, G.S. (2005) Size distribution of sea-salt emissions as a function of relative humidity. *Atmospheric Environment*, 39, 3373–3379.

8 Materiale supplementare

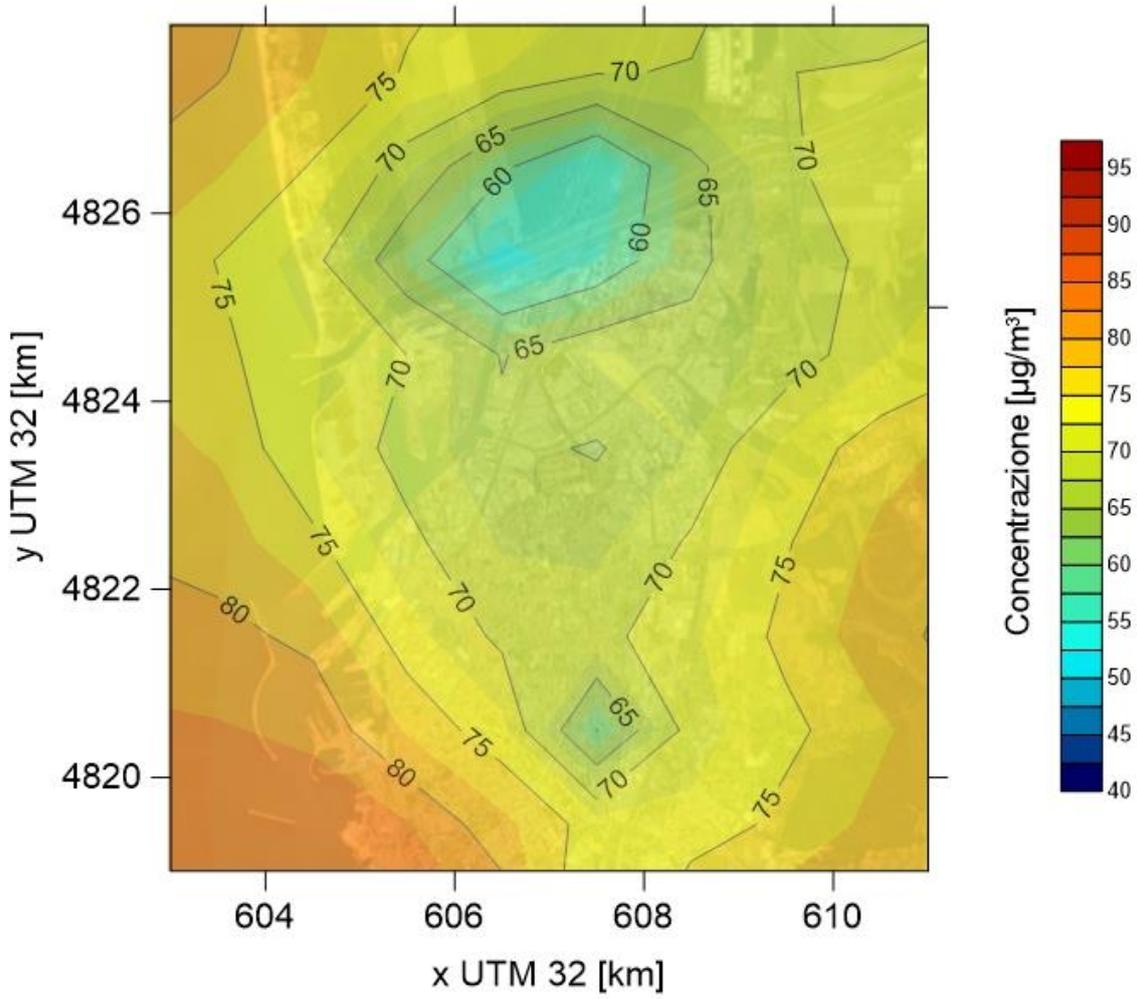
8.1 Mappe della media annuale - scenario di riferimento – dettaglio urbano

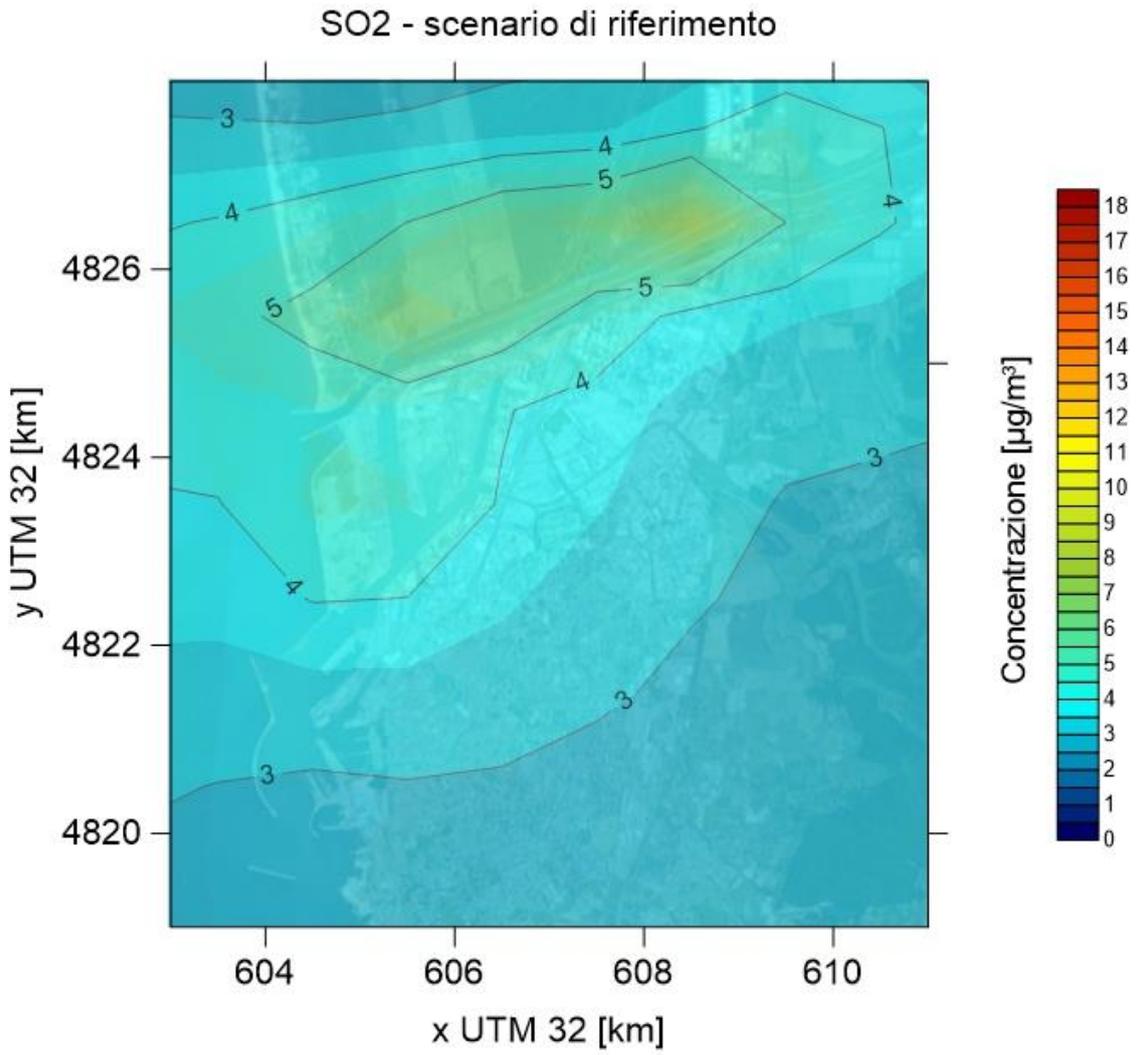




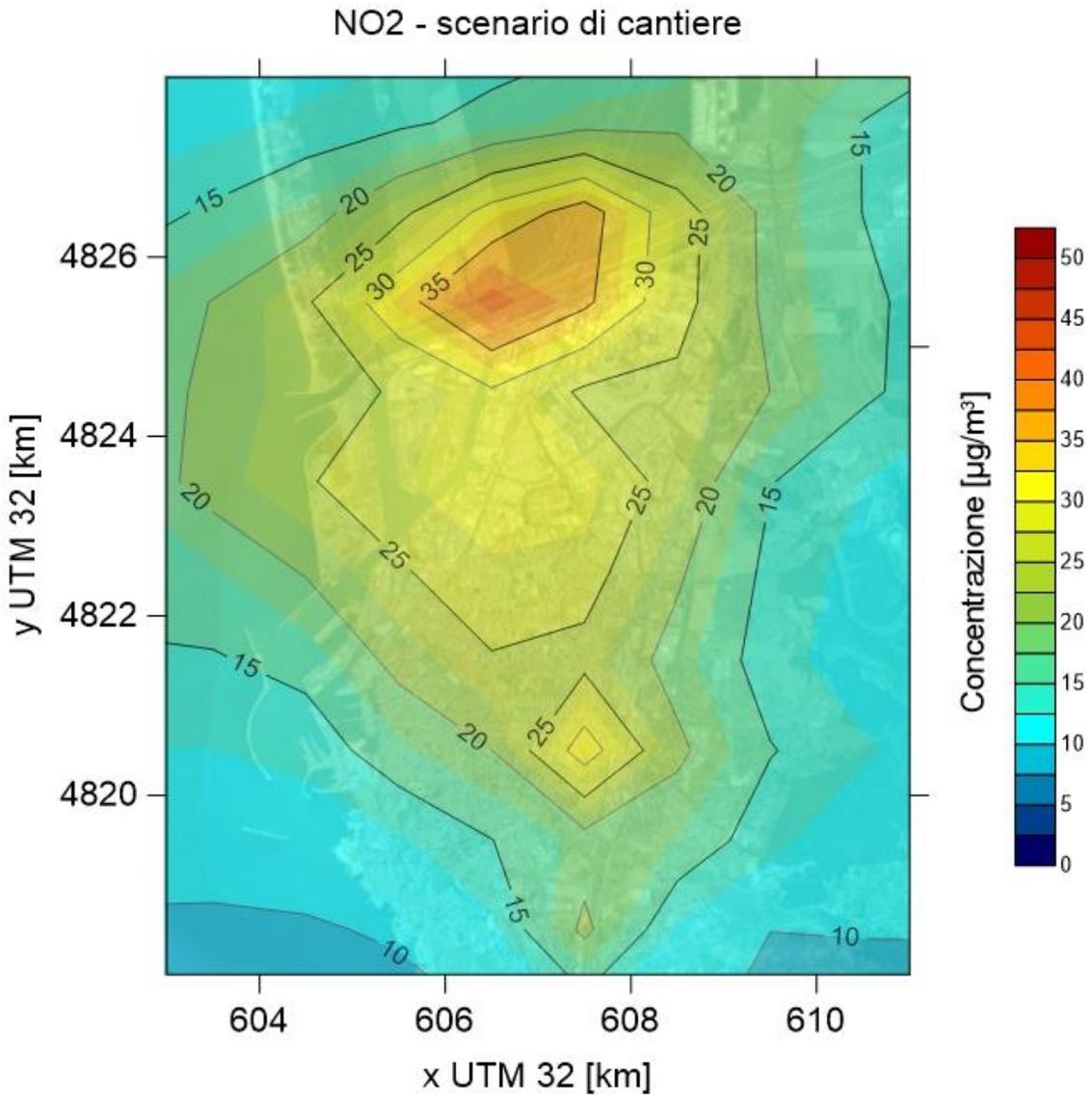


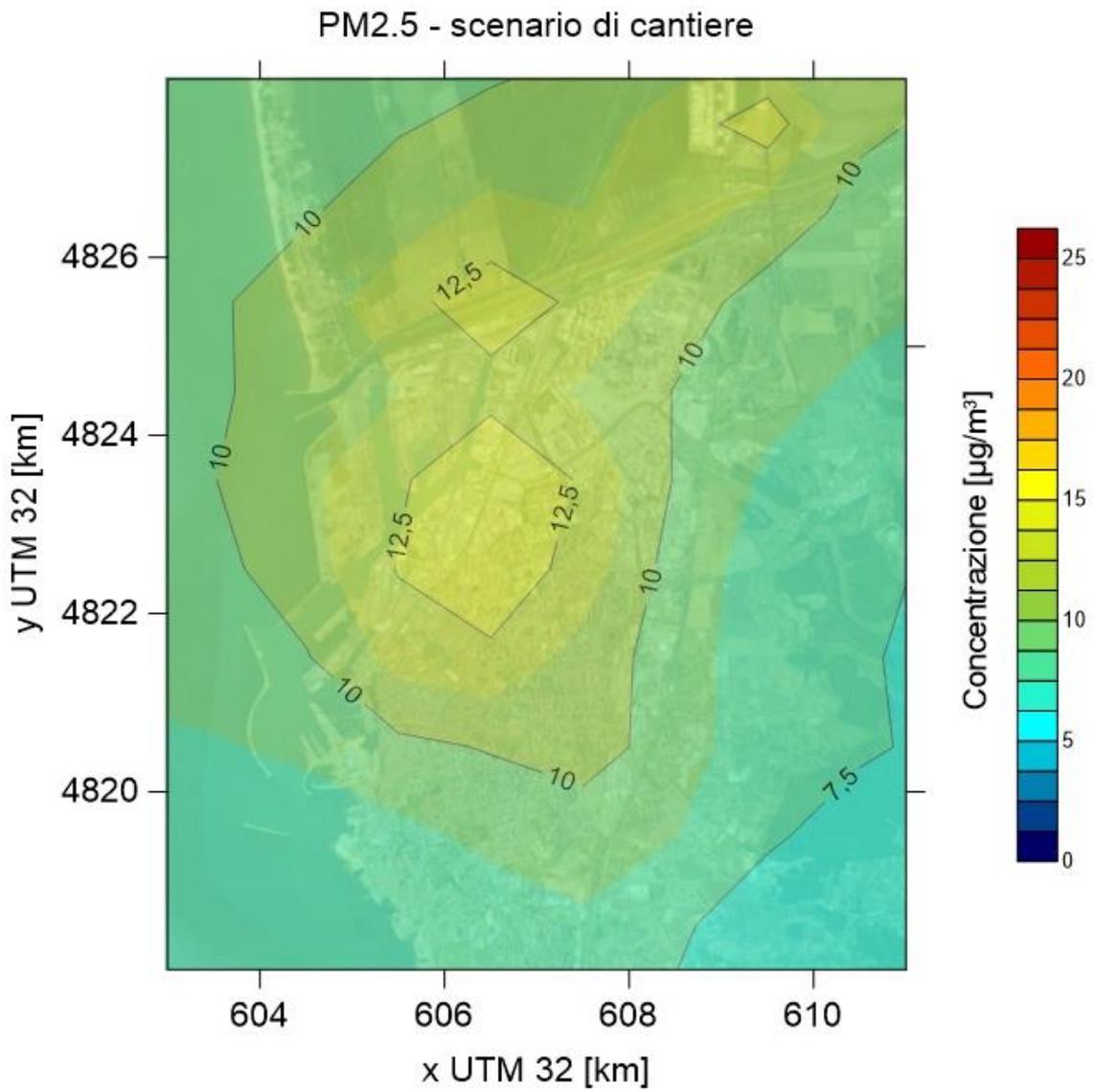
O3 - scenario di riferimento

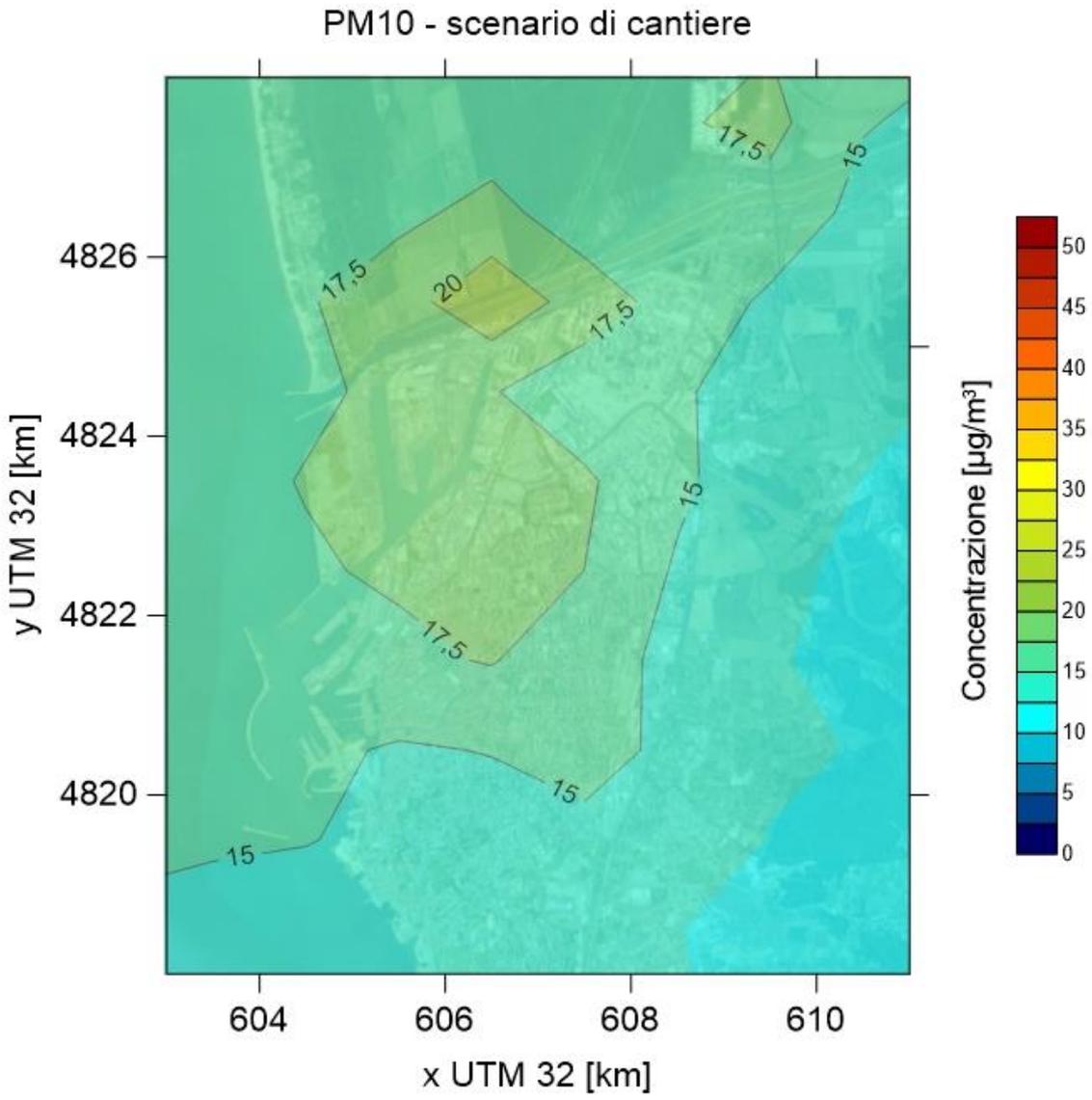


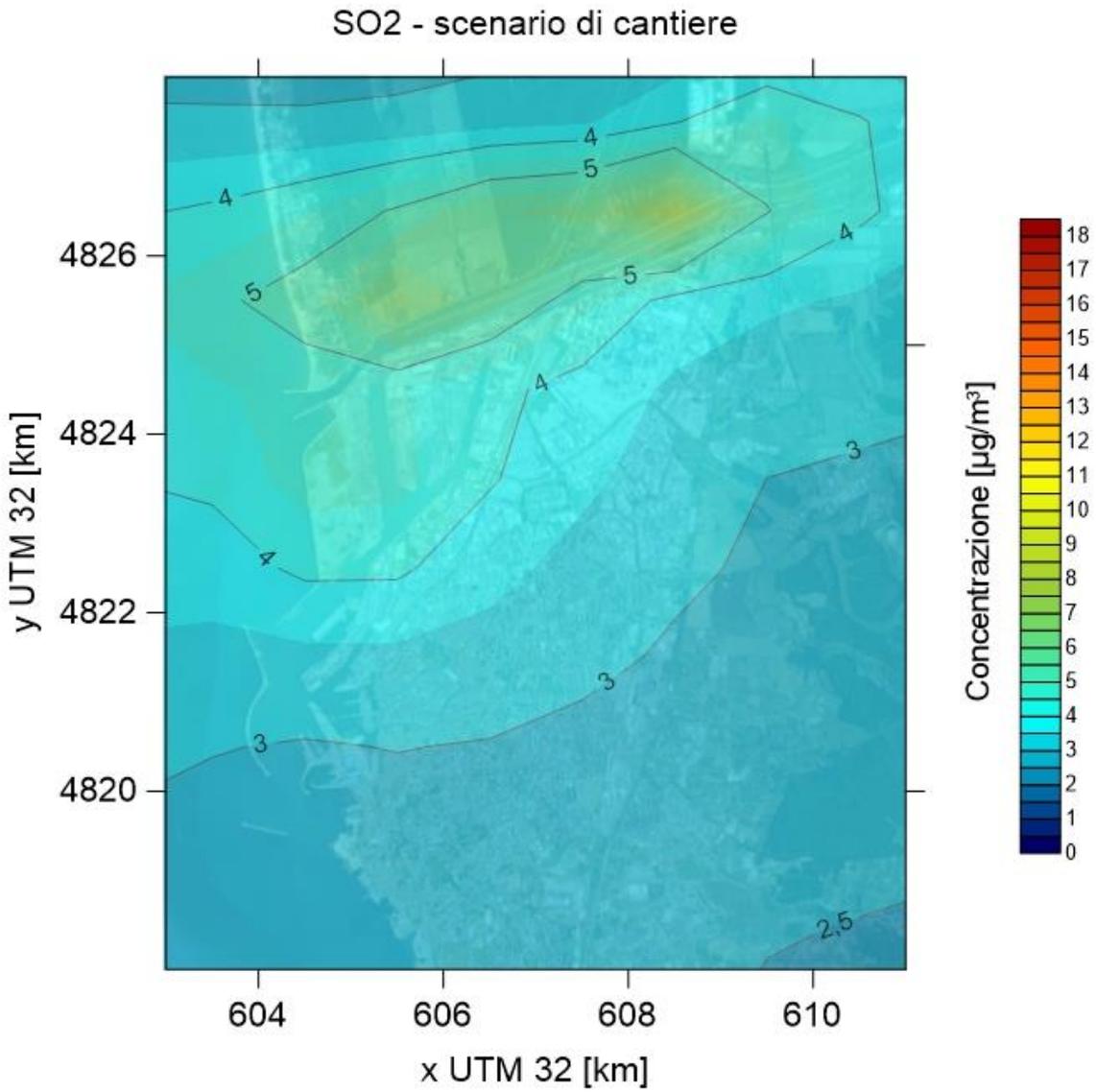


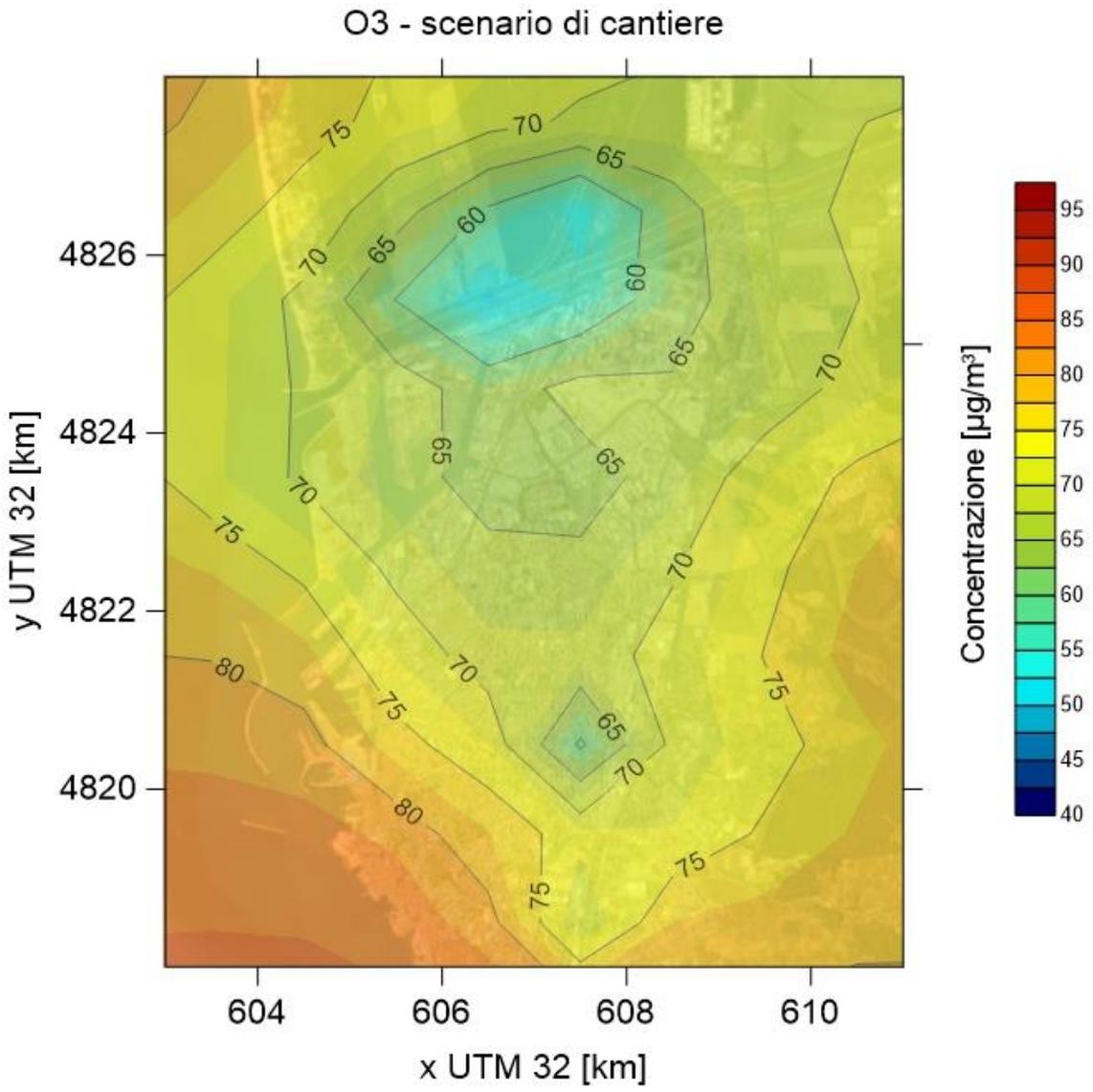
8.2 Mappe della media annuale - scenario di cantiere – dettaglio urbano





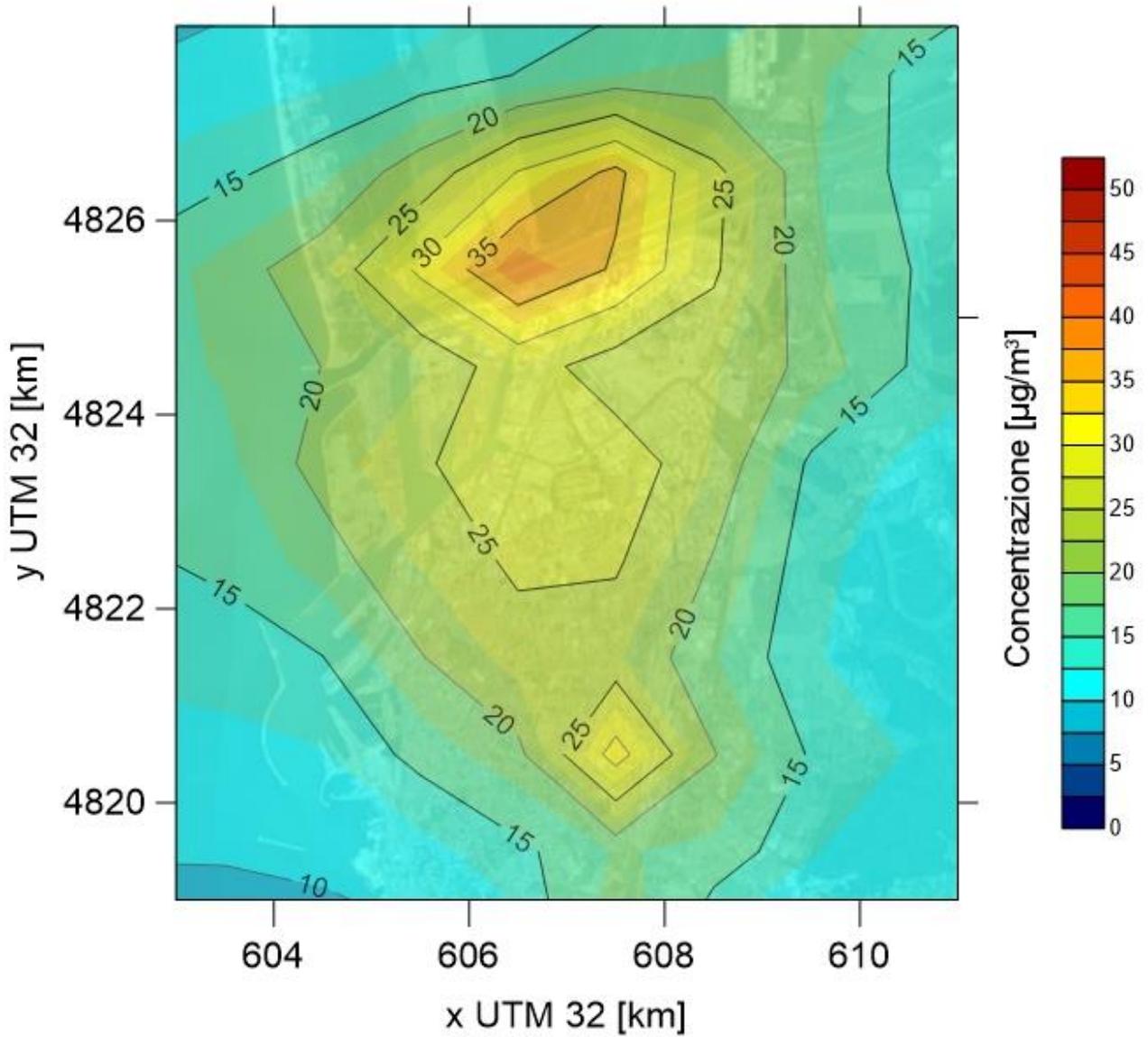




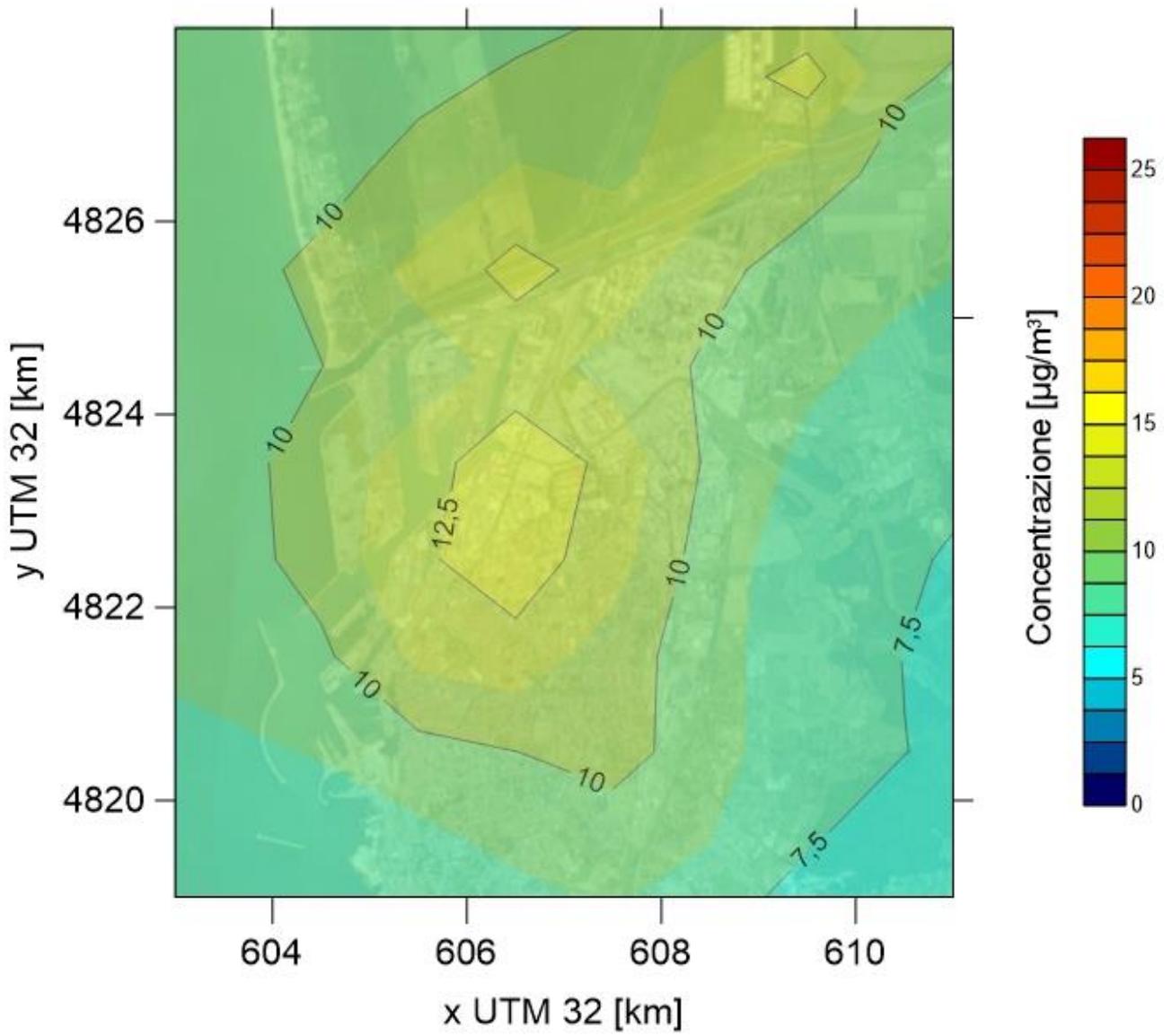


8.3 Mappe della media annuale - scenario di esercizio – dettaglio urbano

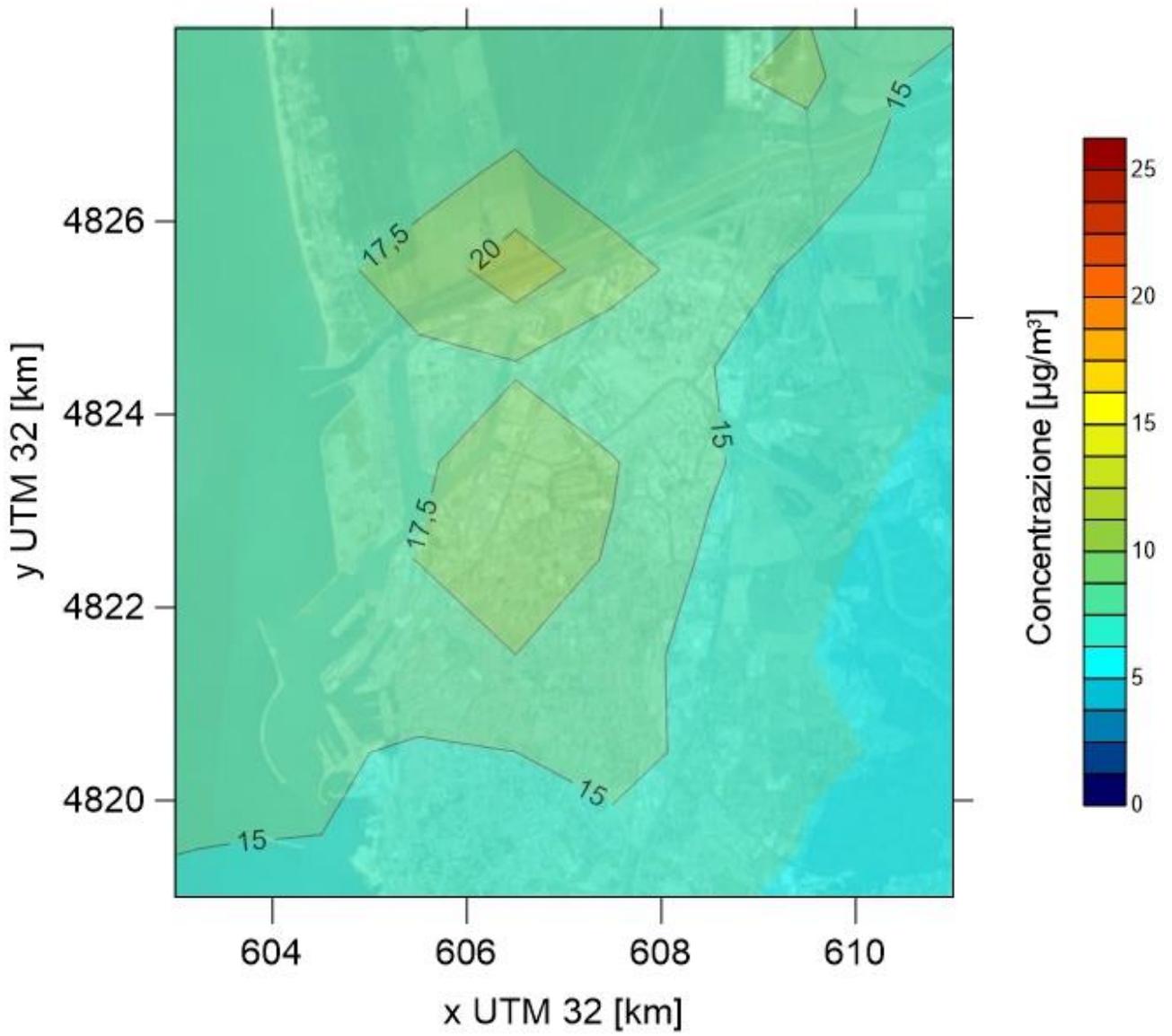
NO2 - scenario di esercizio



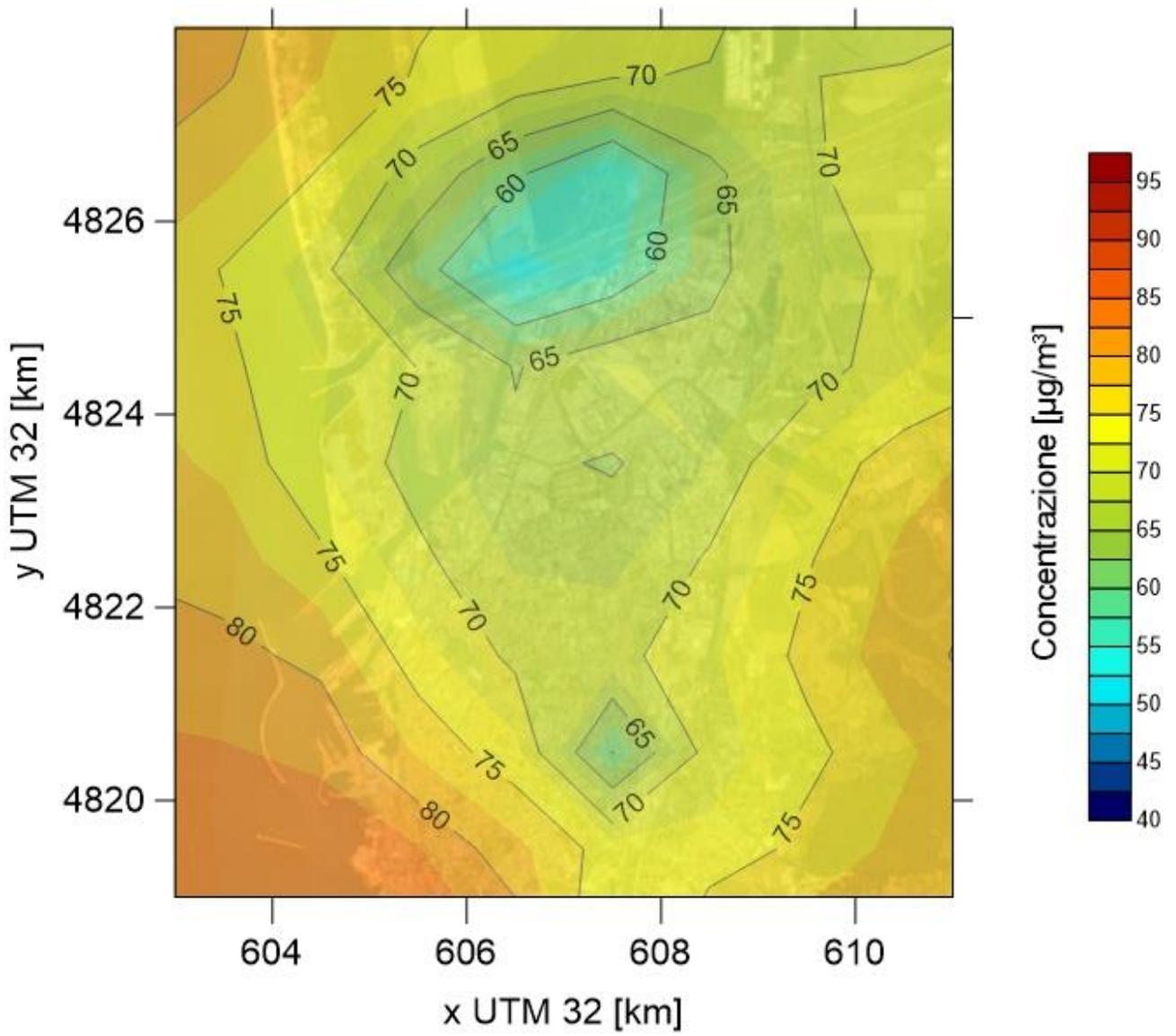
PM2.5 - scenario di esercizio



PM10 - scenario di esercizio



O3 - scenario di esercizio



SO2 - scenario di esercizio

