

Proponente:



Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti



ENTE NAZIONALE PER L'AVIAZIONE CIVILE



Toscana Aeroporti S.p.A.

via del Termine, 11
50127 FIRENZE (ITALIA)
Rif.: Aeroporto Pisa
Tel: 050\849 111 - Fax: 050\598097

PH Progettazione e Manutenzione Aeroporto Pisa: Ing. Pasquale Tirota
Responsabile di Commessa e Project Manager: Ing. Federico Cecchetti

Studi Ambientali e Coordinamento Attività Specialistiche



MANCINO
studiotecnico

MANCINO STUDIO TECNICO
(head) via Filippo Comidoni, 5 - 56125 - Pisa
(executive) via di Tegulaia, 3/C - 56121 - Ospedaletto Pisa

Tel/Fax: 050\988 355
w: www.MancinoStudioTecnico.TK

Dott. Arch. Marco Mancino
Pianificatore Territoriale - O.A. - P.n.1060

Consulenza e Supporto Specialistico:



ARIANET

Alessandro Nanni
Cristina Pozzi
Paola Radice
Camillo Silibello

ARIANET srl
via Gian Giacomo Gilino 9, Milano
Tel/Fax: 02-27007255

Procedimento:

Verifica di assoggettabilità a V.I.A.
art. 20 D.lgs. 152/2006 ss.mm.ii.

MASTERPLAN 2014-2028
Aeroporto Internazionale G. Galilei - Pisa

Oggetto: Integrazioni volontarie al procedimento
Aggiornamento Relazione simulazioni
impatto atmosferico scenario 2028

Titolo:

Relazione

Scala:

Cod. Elab.: 39_AMB_ATM_R01_INT

REV.	DATA	FILE	OGGETTO	Elaborato N°:
00	Lug. 15	Relazione.pdf	Aggiornamento Relazione	01
Cod. progetto:		Redatto:	Verificato:	Approvato:
...				

Relazione

R2015.08

Luglio 2015

Autori: A. Nanni, C. Pozzi, P. Radice, C. Silibello

CONTENTS

1	Introduzione.....	3
2	Approccio metodologico	4
3	Caratterizzazione dell'area di indagine	5
4	Caratterizzazione meteorologica	6
4.1	Vento	7
4.2	Temperatura	8
4.3	Nuvolosità e calcolo della radiazione	9
4.4	Stabilità atmosferica	10
4.5	Altezza dello strato rimescolato	11
5	Principali inquinanti atmosferici.....	13
5.1.1	Il monossido di carbonio	13
5.1.2	Gli ossidi di azoto.....	13
5.1.3	Il particolato	14
5.1.4	Il benzene	14
5.1.5	Il biossido di carbonio (CO ₂).....	15
5.2	Inquadramento normativo	15
5.2.1	Normativa europea	15
5.2.2	Normativa nazionale.....	15
5.3	Relazione semiempirica tra le concentrazioni in aria di NO _x e NO ₂	17
5.4	Monitoraggio dell'inquinamento atmosferico nei confini del sedime aeroportuale	18
6	Stima dei livelli di fondo ambientale	21
6.1	Caratterizzazione dello stato di Qualità dell'aria: il concetto di monitoraggio integrato	21
6.2	Metodologia di integrazione misure-modello	22
6.3	Osservazioni utilizzate	23
6.4	Campi MINNI	24
6.5	Stima dei livelli di fondo	25
7	Stima delle emissioni aeroportuali.....	33
7.1	Approccio metodologico alla stima delle emissioni degli aerei commerciali	33
7.2	Attività aeroportuale di Pisa San Giusto.....	34
7.3	Tempi caratteristici di fase (TIM)	35
7.4	Caratterizzazione della flotta	36
7.5	Database ICAO dei fattori di emissione	37
7.6	Calcolo delle emissioni	37
7.6.1	Correlazione tra "smoke number" ed emissione di PM ₁₀	38
7.7	Contributi alle emissioni delle fasi LTO	40
7.8	Sorgenti emissive diverse dagli aeromobili.....	41

7.8.1	Ground Support Equipment (GSE)	41
7.8.2	Centrali termiche	43
7.8.3	Parcheggi	44
7.8.4	Depositi di carburante	46
7.8.5	Mezzi cargo	48
7.9	Sintesi delle emissioni simulate	50
8	Simulazioni modellistiche di dispersione	53
8.1	Descrizione del modello ARIA Impact	53
8.2	Ripartizione delle emissioni nelle sorgenti virtuali utilizzate	55
8.3	Descrizione delle simulazioni e risultati	56
8.3.1	Simulazione per l'anno 2014	57
8.3.2	Simulazione per l'anno 2028	64
8.3.3	Differenziale di impatto	71
9	Incidenza del futuro assetto aeroportuale sulle aree d'interesse naturalistico	77
10	Risultati in corrispondenza dei recettori	79
11	Stima del contributo aeroportuale alle emissioni di gas climalteranti	82
12	Conclusioni	83
	BIBLIOGRAFIA	84

1 Introduzione

Nell'ambito della procedura di verifica di assoggettabilità a VIA dell'espansione dell'aeroporto Galileo Galilei di Pisa all'anno 2028 secondo il Piano di Sviluppo Aeroportuale (Masterplan) approvato da ENAC nel maggio 2014, ARIANET aggiornava un precedente studio d'impatto atmosferico relativo allo stato 2014 estendendone l'orizzonte temporale al 2028.

Dopo avere acquisito il parere della Regione Toscana su tale procedimento, redatto anche sulla base del parere di ARPAT (nota prot. n. 2015/0002837 del 16.1.2015), il Ministero dell'Ambiente ha fatto sue le osservazioni di ARPAT che riguardano anche lo studio d'impatto atmosferico e richiesto altri approfondimenti.

Questi ulteriori approfondimenti riguardano:

- la verifica di compatibilità del progetto con la presenza del Parco naturale di Migliarino, San Rossore, Massaciuccoli, considerata solo marginalmente dal dominio di calcolo dello studio del 2014 e non in diretta corrispondenza con le rotte di atterraggio e decollo;
- la verifica di compatibilità del progetto con i limiti di qualità dell'aria fissati per legge, tramite sovrapposizione del differenziale d'impatto dell'aeroporto al 2028 rispetto allo stato attuale e di un fondo ambientale stimato utilizzando dati e metodi ufficiali e consolidati.

Il presente documento intende per coerenza integrare i risultati degli studi atmosferici precedenti e le risposte a queste richieste di approfondimento e alle osservazioni ARPAT, trattate anche nel merito, punto per punto in altro complementare documento ARIANET (R2015.09).

Costituisce parte integrante alla documentazione fornita, come allegato, il manuale utente del software modellistico ARIA Impact utilizzato per le simulazioni di dispersione.

2 Approccio metodologico

Nella relazione verrà riportata la metodologia con la quale sono state stimate le emissioni in atmosfera, avvalendosi dei dati di attività forniti dalle stesse autorità aeroportuali, ed applicandovi fattori di emissione riconosciuti a livello internazionale.

L'uso di metodologie modellistiche diffusionali, per lo studio degli impatti sull'ambiente atmosferico d'impianti industriali o di infrastrutture per il trasporto, è ormai pratica raccomandata anche in Italia. Tale genere di studi è, anzi, richiesto sempre più spesso dall'Amministrazione Pubblica, come documento d'indagine, per il comparto ambientale, allegato al fascicolo tecnico per l'iter d'autorizzazione alla realizzazione di nuovi impianti (V.I.A.), o alla rilevante modifica di quelli già esistenti.

Le citate metodologie modellistiche consistono sostanzialmente in programmi software che simulano la dispersione degli inquinanti in atmosfera, sulla base di algoritmi dal solido fondamento scientifico e di una serie di parametrizzazioni semiempiriche, necessarie a collegare le equazioni generali della fisica dell'atmosfera alle particolari condizioni meteorologiche e geomorfologiche del sito di studio. Tramite tali parametrizzazioni, il modello matematico fornisce una soluzione numerica semplificata al complesso problema fisico di determinare, supposte note la meteorologia, la conformazione del terreno e la varietà delle emissioni inquinanti, la distribuzione spaziale e temporale sul territorio dell'inquinamento atmosferico. Tale soluzione rimane comunque in grado di fornire utilissime informazioni non solo al tecnico ambientale o al progettista ma anche all'Amministrazione chiamata a valutare l'opera a scopo pianificatorio.

La simulazione matematica del trasporto e della diffusione degli inquinanti segue differenti approcci, in base alle caratteristiche del sito in esame (costiero o continentale, piatto o complesso, con insediamenti abitativi di bassa o alta densità, ecc.) e delle emissioni (prevalentemente diffuse o concentrate in punti isolati, oppure dovute alla presenza di importanti sorgenti mobili, ecc.). Nella scelta della metodologia più appropriata, inoltre, svolgono una funzione decisiva il livello di dettaglio delle informazioni meteorologiche disponibili, le prestazioni dell'hardware e gli obiettivi delle elaborazioni.

In sintesi il problema può essere suddiviso nelle seguenti fasi:

- una prima fase consiste nella caratterizzazione del sito di studio da un punto di vista meteorologico;
- nella seconda fase si individuano le sorgenti inquinanti e se ne stima l'attività emissiva;
- una terza fase riguarda il calcolo della dispersione a breve e medio raggio.

3 Caratterizzazione dell'area di indagine

L'aeroporto di Pisa è un aeroporto militare aperto al traffico civile ed è attualmente caratterizzato da due piste lunghe rispettivamente 3000 e 2800 metri che si sviluppano su un asse Nord Est – Sud Ovest. Il complesso aeroportuale si trova a circa un chilometro a sud dal centro cittadino; a ovest dell'aeroporto, a una distanza minima di 2.9km, si trova il Parco naturale di Migliarino, San Rossore, Massaciuccoli, area di particolare pregio naturalistico che si estende tra le città di Viareggio a nord e Livorno a sud; le rotte degli aeromobili che decollano o atterrano verso /da sud-ovest intercettano i confini del Parco a distanze comprese tra circa 4km e 9km dalla testa pista quando rispettivamente, in base alle procedure ufficiali ICAO, gli aerei sono a quote superiori a 250m e 160m.

Tra gli interventi programmati nell'ambito dello sviluppo dello scalo c'è la realizzazione di un collegamento tra le estremità sud-occidentali delle due piste con conseguente arretramento di 400m del punto di stacco in fase di decollo verso la città.

Il dominio di indagine è un'area di 10X10Km², ad un dettaglio di 100m.

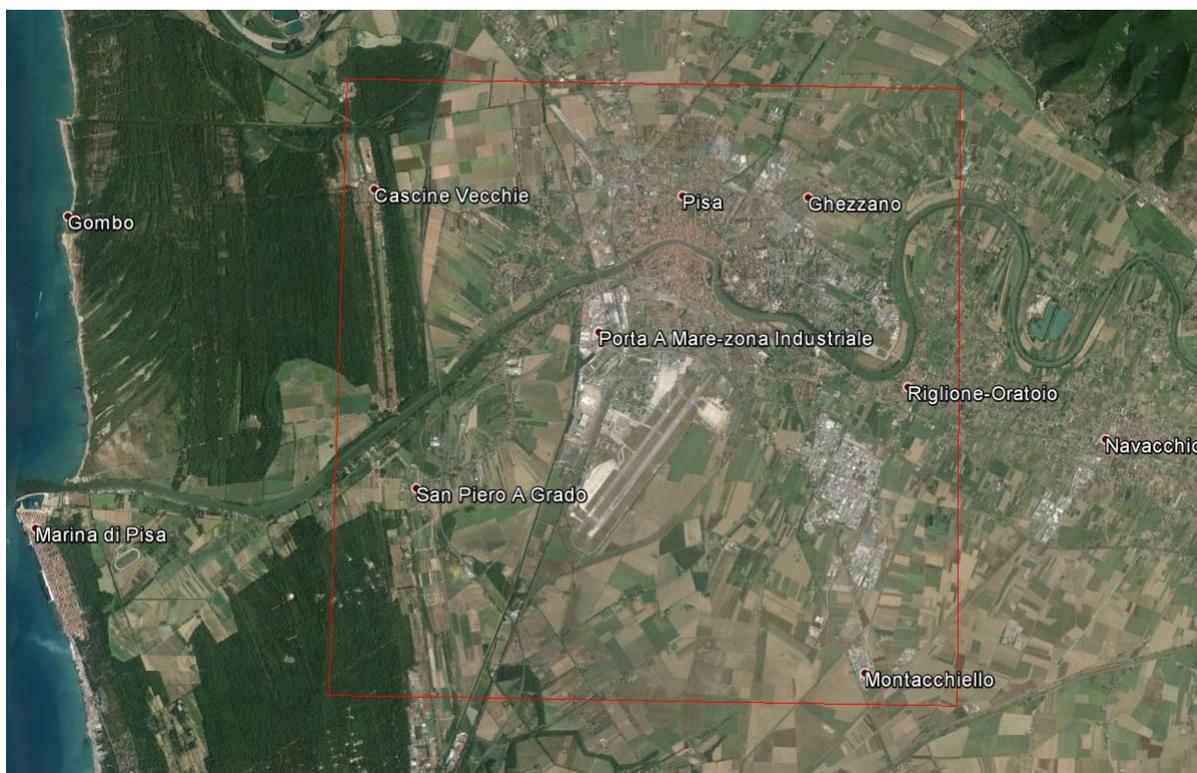


Figura 1. Area di indagine

4 Caratterizzazione meteoclimatica

La meteorologia riveste un ruolo fondamentale per la rappresentazione dei fenomeni di trasporto e dispersione degli inquinanti in atmosfera. Per caratterizzare la meteoclimatologia locale, sono state acquisite ed elaborate due serie meteorologiche annuali derivanti dalla medesima stazione synop dell'aeroporto di Pisa e gestita dall'Aeronautica Militare. I dati sono stati acquisiti da UCAR (University Corporation for Atmospheric Research - <http://dss.ucar.edu/>) che ha in linea, liberamente accessibile, una base dati meteorologica con i dati di tutte le stazioni meteorologiche mondiali che afferiscono alla WMO (World Meteorological Organization).

Le due serie meteorologiche, pur corrispondenti ai medesimi sensori, sono diverse in termini di report trasmessi:

- la serie tipo “synop” (codice WMO: 16158) ha frequenza tri-oraria e presenta le osservazioni di velocità e direzione del vento, visibilità, tempo presente e passato, pressione al livello del mare ed alla quota stazione, temperatura dell'aria e di bulbo umido, nuvolosità totale, precipitazione cumulata su 6 ore;
- la serie tipo “metar” (codice WMO: LIRP) ha frequenza mezz'oraria e presenta le osservazioni di velocità e direzione del vento, visibilità, tempo presente, temperatura dell'aria e di bulbo umido.

Le due serie sono complementari, nel senso che ove la scadenza delle osservazioni coincida, esse corrispondono, altrimenti la serie metar, che come detto ha frequenza mezz'oraria, va a riempire le lacune (solo per certe variabili) presenti nella synop, tri-oraria.

L'intervallo di dati acquisito, anno 2007, presenta elevate percentuali di disponibilità dei dati (frequenza tri-oraria), attorno al 98.6% per tutti i parametri disponibili (direzione e velocità del vento, temperatura, nuvolosità). Per quanto riguarda la velocità del vento la percentuale di disponibilità non include gli zeri, considerati non attendibili; la disponibilità della precipitazione a 6 ore non è invece determinabile in quanto alla precipitazione nulla è assegnato il codice di dato mancante.

La disponibilità di dati validi nella serie metar risulta di nuovo piuttosto buona ed oscilla tra il 68.6% della direzione del vento ed il 98.7% della temperatura.

Questa buona copertura temporale dei dati meteorologici autorizza a colmare le lacune ancora presenti nella base dati, una volta unite le due serie temporali, mediante procedure d'interpolazione.

Tra le variabili meteorologiche a disposizione, particolare attenzione è stata posta nell'analisi di quelle direttamente coinvolte nelle simulazioni modellistiche di dispersione, ovvero:

- Vento.
- Temperatura;
- Nuvolosità;
- Categoria di stabilità atmosferica.

4.1 Vento

La Figura 2 presenta la rosa dei venti annuale relativa all'intero anno 2007. I venti provengono essenzialmente da est-sud-est e da ovest. Le calme di vento (velocità al di sotto di 1m/s), che rappresentano circa il 21.8% mostrano una distribuzione maggiormente polarizzata da est-sud-est.

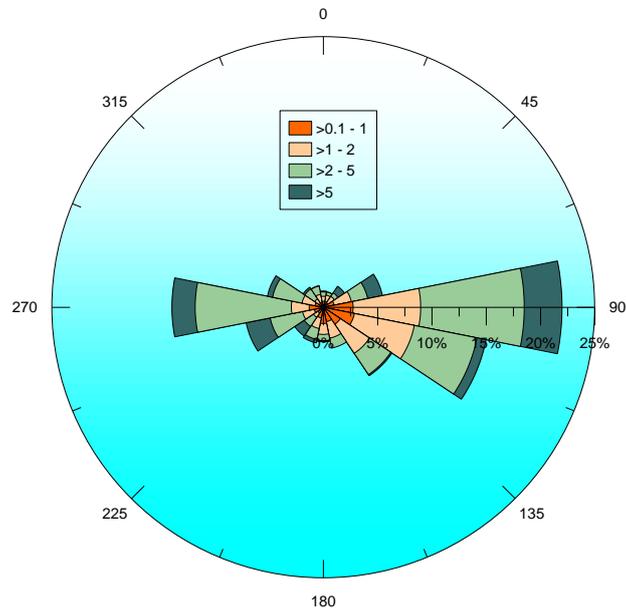


Figura 2. Aeroporto di Pisa S. Giusto - Rosa dei venti anno 2007 (percentuale delle calme: 21.8%).

4.2 Temperatura

L'andamento mensile delle temperature media, minima e massima è riportato in Figura 3. A livello generale, possiamo osservare come la temperatura media calcolata su tutto l'anno presenti una escursione termica contenuta, passando da una temperatura di 5.7°C misurata nel mese di gennaio ai 22.9°C di luglio. L'escursione termica assoluta è invece stimata in circa 38°C (dal valore minimo di -4.0°C misurato a dicembre al valore massimo, pari ai 34.0°C, di luglio). L'anno presenta una trascurabile anomalia termica a marzo quando la massima è risultata inferiore rispetto a febbraio.

La Figura 4 presenta l'analogo andamento termico ora per ora. La temperatura è minima poco prima dell'alba, tra le 5 e le otto, massima tra le 13 e le 14.

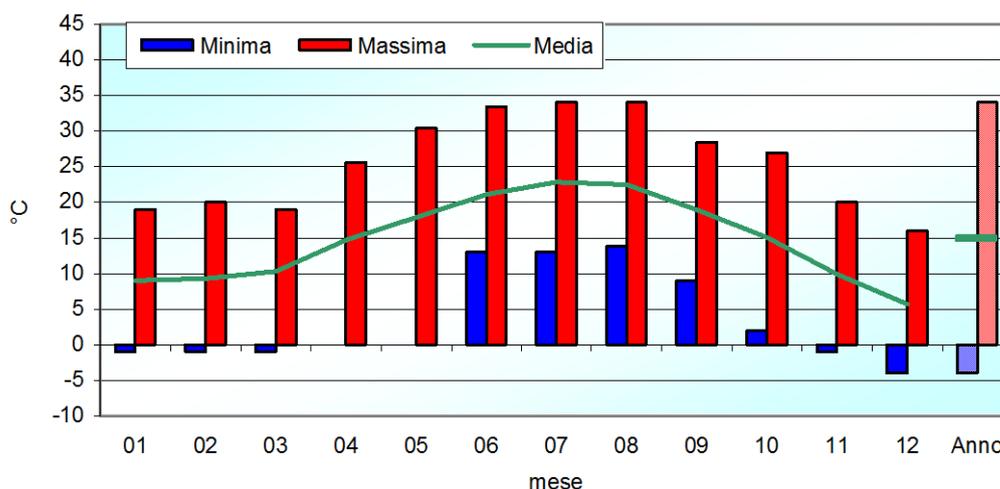


Figura 3. Andamento mensile della temperatura media, minima e massima

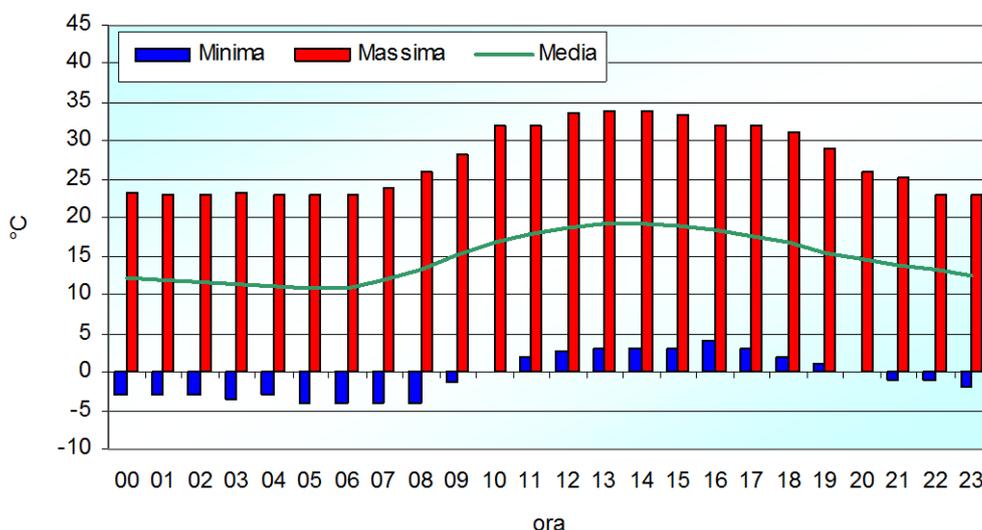


Figura 4. Andamento orario della temperatura media, minima e massima

4.3 Nuvolosità e calcolo della radiazione

La stazione synop di Pisa fornisce i dati di nuvolosità, espressa in ottavi:

- 8 ottavi: cielo totalmente coperto senza alcuna zona di sereno (COPERTO);
- 5, 6 o 7 ottavi: cielo quasi totalmente coperto da nubi, con limitati spazi di sereno (MOLTO NUVOLOSO)
- 3 o 4 ottavi: cielo coperto da nuvolosità per circa metà superficie (NUVOLOSO)
- 1 o 2 ottavi: cielo quasi interamente sgombro di nubi (POCO NUVOLOSO)
- 0 ottavi: cielo totalmente o quasi sgombro da nubi (SERENO).

Dalla Figura 5 si evince come la nuvolosità media risulti minima in luglio e massima in gennaio, con un massimo relativo anche a maggio.

In base alla nuvolosità è possibile stimare la radiazione solare al suolo (considerando la radiazione incidente teorica che dipende dalla latitudine) necessaria per determinare la stabilità atmosferica; la Figura 6 presenta gli andamenti giornalieri medio calcolato su tutto l'anno, massimo del mese di giugno e minimo del mese di dicembre. Il massimo raggiunge mediamente nel mese di giugno un livello pari a 896.7W/m^2 (alle ore 12); il minimo di dicembre è pari, alla stessa ora, a 176.8W/m^2 . La media delle ore 12 presenta una leggera anomalia legata alla maggiore nuvolosità registrata in quell'ora.

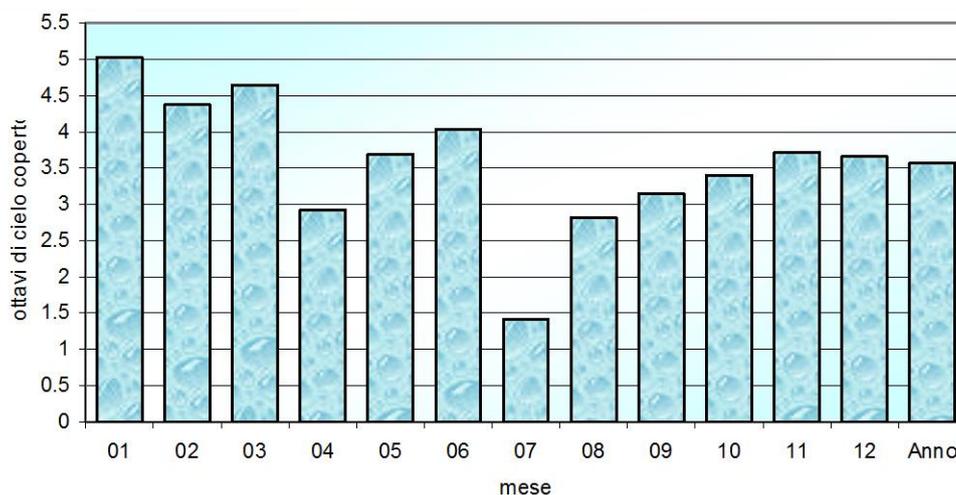


Figura 5. Andamento mensile della nuvolosità media

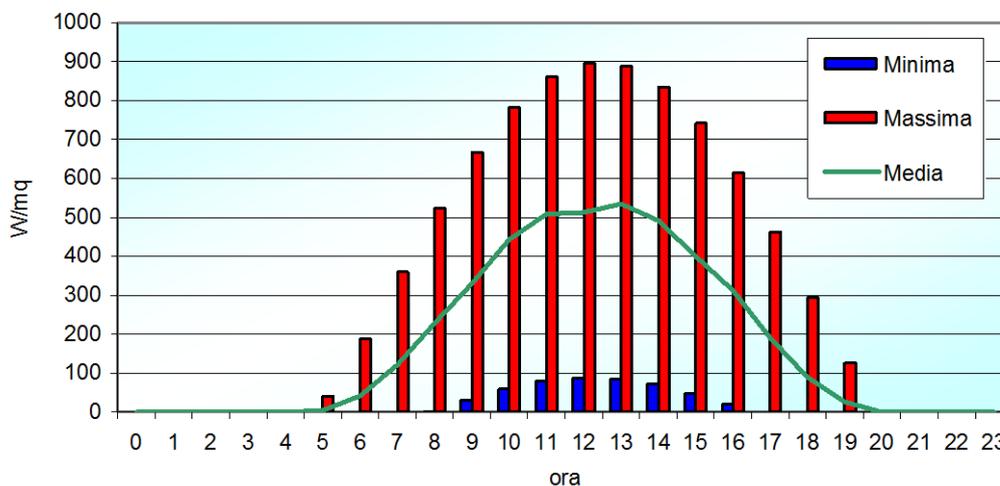


Figura 6. Andamento giornaliero della radiazione totale: media annuale, minima, registrata nel mese di dicembre e massima relativa a giugno.

4.4 Stabilità atmosferica

In base alla velocità del vento ed alla radiazione totale incidente, nel corso delle ore diurne, o alla copertura nuvolosa, nel corso della notte, è stata calcolata la stabilità atmosferica, parametro necessario ai fini del calcolo della turbolenza e, dunque, della dispersione degli inquinanti. La stabilità è stata parametrizzata tramite le classi di Pasquill, secondo cui:

- un'atmosfera con caratteristiche prevalentemente convettive è detta instabile, e viene rappresentata con le classi di stabilità A e B;
- al diminuire della turbolenza si avranno le classi C e D diurne e D ed E notturne, che esprimono, rispettivamente, un'atmosfera debolmente instabile, neutra e moderatamente stabile;
- nei casi in cui ci si trovi in presenza di un'atmosfera particolarmente stabile, tipica delle notti con vento debole (inferiore a 2m/s) e cielo sereno, si utilizza la classe F, che può essere caratterizzata addirittura da forti gradienti verticali di inversione termica, con turbolenza praticamente assente e forte attitudine al ristagno atmosferico.

Nel caso di condizioni instabili, gli inquinanti sono facilmente dispersi in atmosfera, per effetto della turbolenza convettiva e/o meccanica. In condizioni stabili, d'altra parte, gli inquinanti tendono a rimanere confinati in uno stretto strato atmosferico, all'altezza della sorgente che li emette, a causa della scarsa capacità di diluizione. La classe D (neutra) corrisponde a situazioni sia di cielo coperto, con o senza precipitazioni, sia di vento forte (>6 m/s), con prevalenza quindi di turbolenza di natura meccanica.

Per approfondimenti circa lo schema di calcolo delle categorie di stabilità atmosferica si rimanda al manuale utente di ARIA Impact in allegato (par. 5.4.1, p. 112).

L'andamento annuale (Tabella 1) mostra la massima frequenza per la categoria D (31.2%) e la F (30.0%), mentre la categoria meno rappresentata è la A (6.2%). A livello stagionale, la F non presenta grande variabilità, la D è più frequente in autunno, la C decisamente più frequente in primavera ed estate. L'andamento giornaliero della distribuzione di stabilità atmosferica è riportato in Figura 7, dove è evidente l'effetto del rinforzo pomeridiano dei venti (aumenta la frequenza della classe C, diminuisce quella della A).

Tabella 1. Distribuzione stagionale e annuale delle classi di stabilità atmosferica

Stagione	A	B	C	D	E	F
Inverno	4.4%	9.3%	7.4%	36.3%	13.2%	29.2%
Primavera	8.6%	13.6%	22.0%	21.3%	6.5%	28.0%
Estate	8.5%	9.6%	23.6%	22.5%	4.1%	31.8%
Autunno	3.4%	7.4%	7.4%	44.7%	6.3%	30.8%
Anno	6.2%	10.0%	15.1%	31.2%	7.5%	30.0%

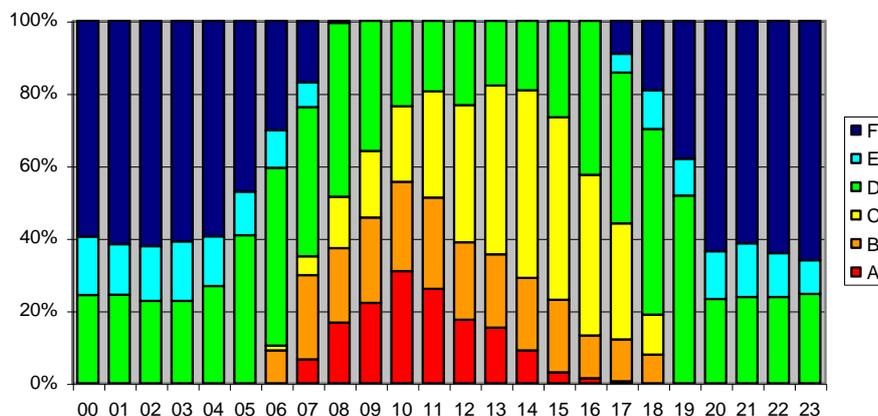


Figura 7. Andamento giornaliero della stabilità atmosferica.

4.5 Altezza dello strato rimescolato

Una grandezza meteorologica importante ai fini del calcolo modellistico della dispersione atmosferica è Z_i , altezza dello strato di rimescolamento o PBL ("Planetary Boundary Layer"), cioè di quel primo strato atmosferico a contatto con il terreno entro cui sono confinati gli inquinanti atmosferici (con un profilo verticale della concentrazione praticamente uniforme) emessi al suolo. L'altezza del PBL è determinata dall'intensità della turbolenza atmosferica innescata dagli effetti termici del riscaldamento della superficie terrestre e da quelli meccanici dovuti all'attrito dell'aria con la superficie terrestre: sarà dunque maggiore di giorno, in presenza di forte radiazione solare, o con il vento forte, minore di notte oppure in condizioni di calma di vento e suolo freddo (nebbie).

Questa grandezza non è rilevata direttamente dalle stazioni meteorologiche ma stimata indirettamente a partire da altri parametri meteorologici (i profili verticali di vento o temperatura, i flussi di calore sensibile o latente al suolo e così via).

Il metodo utilizzato nel presente studio per stimare, ora per ora, Z_i è tratto dal preprocessore meteorologico METPRO sviluppato da EPA (Paine, 1988). Ulteriori approfondimenti sull'argomento sono contenuti nel manuale utente di ARIA Impact (par. 5.9, p. 132).

Questo metodo suddivide le condizioni meteorologiche in diurne e notturne.

Di notte, Z_i è determinata tramite la formula di Nieuwstadt (1981) e Zilitinkevich (1972):

$$\frac{Z_i}{L_{mo}} = \frac{0.3u_*}{fL_{mo} \left(1 + 1.9 \frac{Z_i}{L_{mo}} \right)}$$

dove: f è il parametro di Coriolis;

L_{mo} è la lunghezza di Monin-Obukhov;

u_* è la velocità di attrito.

Sempre di notte ma in condizioni neutre (L_{mo} molto grande), Z_i è determinata dalla seguente formula:

$$Z_i = \frac{0.3u_*}{fL_{mo}}$$

Di giorno, Z_i è calcolata mediante l'equazione di bilancio termico al suolo, in base all'assunto che il riscaldamento del suolo dà vita ad uno strato adiabatico dal suolo fino a Z_i . In sostanza, la formula utilizzata è la seguente (Panofsky and Dutton, 1984):

$$Z_i = \left(\frac{2 \int_{t_0}^t H dt}{c_p \rho (\gamma_d - \gamma)} \right)^{1/2}$$

dove: H è il flusso di calore superficiale;

t_0 è l'ora dell'alba;

c_p e ρ sono rispettivamente il calore specifico a pressione costante e la densità dell'aria;

γ e γ_d sono rispettivamente i gradienti verticale di temperatura all'alba ed adiabatico.

Il calcolo di Z_i è infine limitato inferiormente a 100m e superiormente a 5000m.

La Figura 8 presenta gli andamenti orari medio, minimo e massimo di Z_i nel periodo esaminato. Si distinguono chiaramente i due regimi notturno e diurno. Gli elevati valori notturni sono legati alle situazioni di neutralità (cielo coperto, vento forte). Mediamente, invece, i valori diurni sono superiori a quelli notturni. I massimi diurni sono legati alle situazioni instabili (vento debole, cielo sereno) così come i valori minimi notturni alle situazioni stabili.

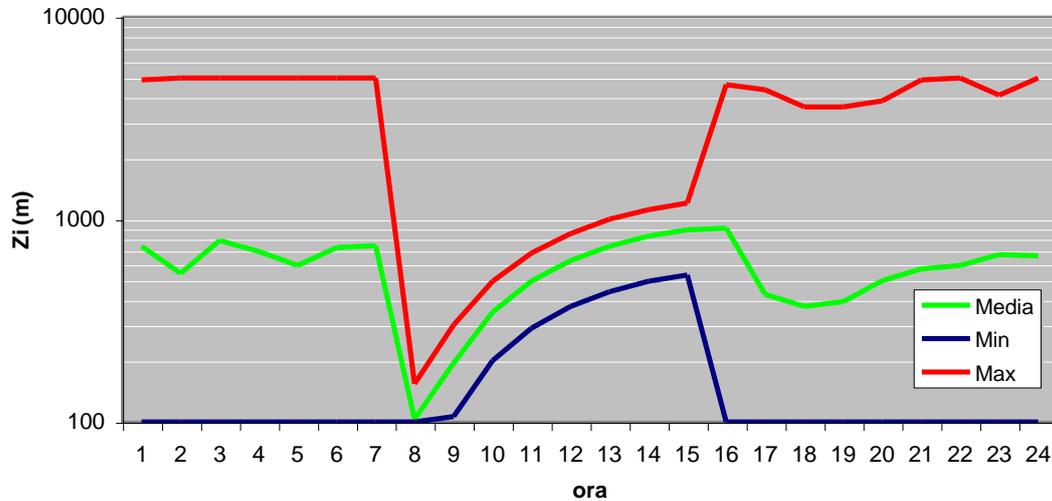


Figura 8. Andamento orario della altezza di rimescolamento media, minima e massima nel periodo di simulazione

5 Principali inquinanti atmosferici

La presenza di un'elevata densità di attività antropiche ed emissive in un ambiente con caratteristiche di dispersione atmosferica non pronunciate, può generare variazioni significative della qualità dell'aria in ambito locale. Tipici esempi di infrastrutture in cui sono rilevabili criticità ambientali sono le aree urbane, le reti stradali e i poli industriali. Le conseguenze di un'alterazione della qualità dell'aria sono possibili rischi per la salute, danni alla vegetazione ed agli ecosistemi.

In particolare i motori degli aerei producono ossido di azoto (NO_x), idrocarburi (HC), monossido di carbonio (CO), e particolato. Non ultimo causano una produzione di anidride carbonica (CO₂), che, a livello mondiale nel 2012 risultava essere circa l'1.4% delle emissioni globali.

Gli effetti legati a tali inquinanti riguardano:

- Qualità dell'aria locale (a quote basse)
- Cambiamenti climatici

Le caratteristiche degli inquinanti atmosferici considerati in questo studio sono qui di seguito descritte brevemente.

5.1.1 Il monossido di carbonio

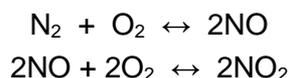
Il monossido di carbonio è un composto inodore, incolore e insapore; è gassoso a temperature superiori a -192 °C; non è apprezzabilmente solubile in acqua, ed ha un peso pari al 96,5% del peso dell'aria. La formazione di ossidi di carbonio può avvenire secondo i seguenti processi:

- combustione incompleta di carbonio o di composti contenenti carbonio
- reazione a elevata temperatura tra CO₂ e composti contenenti carbonio
- dissociazione ad elevate temperature di CO₂ in CO e O

La sorgente più importante è costituita dai mezzi di trasporto; fra questi, si distinguono gli autoveicoli a benzina; il trattamento dei rifiuti, variamente articolato sul territorio nazionale, comprende l'incenerimento di rifiuti urbani, agricoli e industriali.

5.1.2 Gli ossidi di azoto

In termini d'inquinamento atmosferico, gli ossidi di azoto che destano più preoccupazione sono NO ed NO₂. Tali prodotti giungono dalla reazione di due gas (N₂ e O₂) comunemente presenti nell'aria nelle percentuali di circa 80% e 20% rispettivamente. I due gas reagiscono però solo ad elevate temperature formando monossido di azoto, il quale, ossidandosi a sua volta, forma biossido di azoto secondo le seguenti reazioni:



Ne consegue che le combustioni hanno come reazioni collaterali le due riportate sopra.

Oltre che per le sue caratteristiche di tossicità (piuttosto ridotte) NO è importante in quanto entra nel ciclo fotolitico dell'azoto. Tale fenomeno è una conseguenza diretta della interazione tra luce solare e NO₂. Le fasi del ciclo sono:

- NO₂ assorbe energia dal sole sotto forma di luce ultravioletta;
- l'energia assorbita scinde le molecole di NO₂ in molecole di NO e atomi di ossigeno O; l'ossigeno atomico prodotto è molto reattivo;

- gli atomi di ossigeno atomico reagiscono con l'ossigeno atmosferico (O_2) per produrre ozono (O_3), un inquinante secondario;
- l'ozono reagisce con NO per dare NO_2 e O_2 e il ciclo si chiude.

Se il ciclo avvenisse effettivamente così, NO_2 si convertirebbe in NO per convertirsi nuovamente in NO_2 senza modifiche nelle concentrazioni dei due composti a regime. Ma gli idrocarburi presenti nell'atmosfera interferiscono nel ciclo permettendo che NO si converta più rapidamente in NO_2 di quanto NO_2 venga dissociato in NO e O, con un conseguente accumulo di NO_2 e di ozono.

La maggior fonte di inquinamento da NO_x sono i trasporti. In particolare i motori diesel producono più ossidi di azoto dei motori a benzina, poiché utilizzano miscele molto povere in termini di rapporto aria-combustibile. Molto elevata è anche l'emissione dovuta a combustione in impianti fissi, specialmente impianti termoelettrici.

5.1.3 Il particolato

L'insieme complessivo delle particelle presenti in atmosfera prende il nome di PTS (Particolato Totale Sospeso). Con la terminologia aerosol atmosferici si intende l'insieme delle particelle la cui dimensione può variare da qualche decimo a qualche centinaio di micron (μm). Particelle di diametro inferiore a $2.5\mu m$ (generalmente indicate con la sigla $PM_{2.5}$) sono dette particolato fine (fine particles), quelle di dimensione superiore genericamente polveri (coarse particles). Si definisce inoltre la classe PM_{10} che rappresenta la porzione di particolato con diametro inferiore ai $10\mu m$ e sulla quale è attualmente concentrata l'attenzione in termini sia scientifici sia legislativi.

I particolati presenti in atmosfera provengono anche da processi naturali, quali le eruzioni vulcaniche e l'azione del vento sulla polvere e sul terreno, processi che solo raramente provocano vero e proprio inquinamento (tranne localmente, a fronte di eventi particolarmente intensi). La sorgente principale è infatti da ricercarsi nelle attività dell'uomo, tipicamente l'industria (costruzioni e fonderie) e i processi di combustione incompleta (fumi). Per quanto riguarda gli impianti di combustione fissi, il maggior contributo è fornito dalle centrali termoelettriche. Il traffico contribuisce all'inquinamento dell'aria da particolato sia a causa del processo di combustione, sia attraverso la lenta polverizzazione della gomma dei pneumatici, dei freni e dell'asfalto; nondimeno, anche il risollevarsi della polvere depositata al suolo dovuto al moto dei veicoli (risospensione) produce un contributo emissivo rilevante. Il diametro delle particelle in sospensione è indicativamente correlato alla fonte di provenienza, come indicato in Tabella 2.

Tabella 2. Dimensioni ed emissioni di particolato

Diametro	Provenienza
$>10\ \mu m$	processi meccanici (es. erosione del vento, macinazione e diffusione), polverizzazione di materiali da parte di veicoli;
tra $1\mu m$ e $10\mu m$	provenienza da particolari tipi di terreno, da polveri e prodotti di combustione di determinate industrie e da sali marini in determinate località;
tra $0.1\mu m$ e $1\mu m$	combustione ed aerosol fotochimici;
$<0.1\ \mu m$	particelle non sempre identificabili chimicamente, originate apparentemente quasi del tutto da processi di combustione.

5.1.4 Il benzene

Fra i composti organici non metanici (NMVOC) assume particolare importanza il benzene; è un composto naturale del petrolio e dei suoi derivati, e si forma anche, come sottoprodotto, durante il ciclo di produzione delle benzine, ad opera di precursori a base aromatica e naftenica che sono naturalmente presenti nel greggio. A causa della sua naturale opposizione all'ossidazione, il benzene è rilasciato in seguito al processo di combustione, nonché a seguito dei processi evaporativi. La sorgente naturale di maggior rilievo è la combustione incontrollata di piante e di residui di agricoltura.

Il benzene è una sostanza cancerogena che può produrre, a lungo termine, una varietà di tumori che comprendono linfomi e leucemia.

Secondo le stime dell'ANPA relative agli anni 1994, 1996 e 1997, circa l'80% del contributo proviene dal traffico veicolare, il 13.4% da altre fonti mobili ed il restante 6.2% da altre attività come processi industriali e uso dei solventi.

5.1.5 Il biossido di carbonio (CO₂)

I gas serra, e tra essi la CO₂, sono i gas atmosferici che assorbono la radiazione infrarossa e che per questo causano l'effetto serra lasciando passare l'energia solare e intrappolando parte del calore creato dai raggi del sole.

Circa il 30% delle radiazioni infrarosse si diffonde nello spazio. Parte dell'energia solare che raggiunge il nostro pianeta viene riflessa verso l'atmosfera sotto forma di radiazioni infrarosse, parte viene assorbita dalla Terra, parte viene intrappolata come calore e irradiata dai gas serra. Le navi che bruciano combustibile, gli aerei e le industrie che rilasciano anidride carbonica, il taglio delle foreste e il consumo di combustibili fossili aumentano l'effetto serra. Mari e oceani si riscaldano, l'acqua evapora e il calore così formato viene intrappolato dai gas serra.

L'impatto della aviazione ad alta quota è legato appunto alla produzione di anidride carbonica, che contribuisce in modo sostanziale ad intrappolare la radiazione infrarossa della luce solare, riflettendola nuovamente verso la superficie terrestre (il cosiddetto effetto serra), impedendo, così, alla Terra di raffreddarsi. Ciò provoca un rapido riscaldamento del pianeta, al quale gli ecosistemi non hanno il tempo necessario per adattarsi.

L'entità di questo effetto è ancora in discussione, ma la diffusa convinzione che stiamo in effetti attraversando una fase di riscaldamento generalizzato del clima terrestre ha portato molti Paesi del mondo a siglare il Protocollo di Kyoto, un accordo in cui si impegnano a limitare e ridurre le emissioni di CO₂.

L'incidenza della CO₂ prodotta dal traffico aereo è inferiore al 2% del totale emesso in modo antropico; nell'ottica di ridurre le emissioni di gas serra la tecnologia si sta muovendo per ottenere riduzioni efficaci nell'uso del carburante.

5.2 Inquadramento normativo

5.2.1 Normativa europea

Attualmente le direttive di riferimento sono le seguenti:

- Dir 96/62/CE ("Direttiva madre") - In materia di valutazione e di gestione della qualità dell'aria ambiente;
- Dir 99/30/CE - Concernente i valori limite di qualità dell'aria ambiente per il biossido di zolfo, il biossido d'azoto, gli ossidi d'azoto, le particelle e il piombo;
- Dir 2000/69/CE - Concernente i valori limite per il benzene e il monossido di carbonio nell'aria ambiente;
- Dir 2002/03/CE - Concernente i valori limite per l'ozono.
- Dir 2008/50/CE - Relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa.

5.2.2 Normativa nazionale

Per il caso italiano attualmente le direttive di riferimento sono:

- DPCM 28/3/1983 - Limiti massimi di accettabilità delle concentrazioni e di esposizione relativi ad inquinanti dell'aria nell'ambiente esterno;

- DPR 203/88 (relativamente agli impianti preesistenti) ed altri decreti attuativi - Attuazione Direttive n. 80/779, 82/884, 84/360, 85/203 concernenti norme in materia di qualità dell'aria relativamente a specifici agenti inquinanti e di inquinamento prodotto dagli impianti industriali ai sensi dell'art. 15 della Legge 16/4/87 n. 183;
- DM 20/5/1991 - Criteri per l'elaborazione dei piani regionali per il risanamento e la tutela della qualità dell'aria;
- DM 15/4/1994 - Norme tecniche in materia di livelli e di stati di attenzione e di allarme per gli inquinanti atmosferici nelle aree urbane, ai sensi degli artt. 3 e 4 del DPR 24 maggio 1988, n. 203 e dell'art. 9 del DM 20 maggio 1991;
- DM 25/11/1994 - Aggiornamento delle norme tecniche in materia di limiti di concentrazione e di livelli di attenzione e di allarme per gli inquinanti atmosferici nelle aree urbane e disposizioni per la misura di alcuni inquinanti di cui al decreto ministeriale 15 aprile 1994;
- DM 16/5/1996 - Attivazione di un sistema di sorveglianza di inquinamento da ozono;
- DL 4/8/99 n. 351 - Attuazione della direttiva 96/62 in materia di valutazione e gestione della qualità dell'aria;
- DM 2/4/2002 n.60 - Decreto concernente i valori limite di qualità dell'ambiente per alcuni inquinanti; in particolare, in recepimento delle successive Direttive CE, abroga alcuni articoli del DPR 203/88 fissando nuovi limiti per il biossido di zolfo, gli ossidi di azoto, le particelle, il piombo, il benzene ed il monossido di carbonio;
- DM 1/10/2002 n.261 - Regolamento recante le direttive tecniche per la valutazione preliminare della qualità dell'aria ambiente, i criteri per l'elaborazione del piano e dei programmi di cui agli articoli 8 e 9 del decreto legislativo 4 agosto 1999, n. 351;
- DL 21/05/2004 n. 183 – Attuazione della direttiva 2002/3/CE relativa all'ozono nell'aria;
- DL 03/08/2007 n. 152 - Attuazione della direttiva 2004/107/CE concernente l'arsenico, il cadmio, il mercurio, il nichel e gli idrocarburi policiclici aromatici nell'aria ambiente.
- DLGS 155/2010 - Attuazione della direttiva 2008/50/CE relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa;

I diversi limiti attualmente in vigore per i vari inquinanti sono riassunti in Tabella 3.

Tabella 3. Limiti alle concentrazioni di inquinanti dell'aria indicati dal D.Lgs. 155/2010 in recepimento della dir. 2008/50/CE.

Inquinante	Tipo di limite	Limite	Tempo di mediazione dati
Biossido di azoto NO₂	valore limite orario per la protezione della salute umana	200 µg/m ³ (da non superare più di 18 volte l'anno)	media oraria
	valore limite annuale per la protezione della salute umana	40 µg/m ³	media annuale
PM10 Particolato fine	valore limite giornaliero per la protezione della salute umana	50 µg/m ³ (da non superare più di 35 volte l'anno)	media nelle 24 ore
	valore limite annuale per la protezione della salute umana	40 µg/m ³	media annuale
Monossido di carbonio – CO	valore limite per la protezione della salute umana	10 mg/m ³	media massima giornaliera su 8 ore
Benzene	valore limite annuale per la protezione della salute umana	5 µg/m ³	media annuale

5.3 Relazione semiempirica tra le concentrazioni in aria di NO_x e NO_2

Considerando come inquinanti atmosferici gli ossidi di azoto, i limiti di legge riguardano principalmente il biossido di azoto (NO_2) piuttosto che la miscela complessiva degli ossidi di azoto (NO_x); poiché le metodologie modellistiche utilizzate nello studio trattano il solo inquinamento primario, e dunque gli ossidi di azoto nel loro complesso, si pone il problema di riportare i risultati modellistici di NO_x in NO_2 in modo da verificare l'impatto dell'opera in relazione ai limiti di legge.

La miscela inquinante NO_x in aria è composta in massima parte di due gas, monossido (NO) e biossido di azoto, in misura variabile che dipende tra l'altro dal sito, dalla meteorologia e dalla distanza dalle eventuali principali sorgenti. Più in dettaglio, le reazioni fotochimiche che avvengono in atmosfera, e che portano alla trasformazione di NO in NO_2 e viceversa, dipendono tra l'altro dai seguenti fattori:

- ✓ temperatura dell'aria;
- ✓ presenza ed intensità della luce solare;
- ✓ presenza di altri gas (ozono e composti organici) che interagiscono con tali trasformazioni;
- ✓ relativa composizione della miscela NO_x presente all'emissione.

La composizione degli NO_x dipende quindi fortemente dalla distanza dalle eventuali sorgenti, in quanto essi sono un prodotto della combustione ad alta temperatura, l' NO è presente all'emissione in frazione preponderante (anche oltre il 90%) e tale frazione tende a diminuire velocemente mentre l'aria contenente il gas emesso è trasportata lontano, risultando all'osservazione generalmente compresa tra il 25% ed il 75%.

Per calcolare la frazione di NO_2 in funzione dei livelli di NO_x è stato adottato il metodo ARM2, in linea con le indicazioni di US-EPA incluso nell'ultima versione di AERMOD, che rivede e corregge il metodo ARM ("Ambient Ratio Method"). L'approccio del metodo ARM2 appare più cautelativo rispetto al metodo semiempirico basato sulla curva polinomiale di quarto ordine del logaritmo in base 10 della concentrazione di NO_x (Derwent & Middleton, 1996, Dixon et al., 2000) e sembra applicabile, secondo le indicazioni US-EPA, anche alle emissioni incluse nello studio.

In sostanza, detta $[\text{NO}_2]$ la concentrazione di biossido di azoto (misurata in ppb o in $\mu\text{g}/\text{m}^3$) e $[\text{NO}_x]$ la concentrazione in aria di ossidi di azoto (misurata rispettivamente in ppb o in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ NO_2 -equivalenti), è possibile stabilire la seguente relazione:

$$y = -1.1723\text{E-}17x^6 + 4.2795\text{E-}14x^5 - 5.8345\text{E-}11x^4 + 3.4555\text{E-}08x^3 - 5.6062\text{E-}06x^2 - 2.7383\text{E-}03x + 1.2441\text{E+}00$$

Dove x è la concentrazione di $[\text{NO}_x]$ e y il rapporto tra le concentrazioni $[\text{NO}_2] / [\text{NO}_x]$ in ambiente.

Sono stati elaborati i dati della stazione di Pisa – Borghetto (gestita da ARPAT e classificata come di fondo urbano) relativi all'anno 2007 ed a partire dai valori di NO_x monitorati son stati stimati i valori di NO_2 sulla base della curva ARM2. La Figura 9 presenta l'andamento della curva a confronto con la dispersione dei valori misurati nella stazione.

Come si può osservare, la curva teorica tende sempre a sovrastimare i valori di NO_2 , tanto più al crescere delle concentrazioni di NO_x . Poiché la curva teorica rappresentata sarà utilizzata per stimare i livelli di NO_2 a fronte di quelli di NO_x calcolati modellisticamente, il calcolo di tali livelli sarà dunque ampiamente peggiorativo in corrispondenza delle concentrazioni di NO_x più elevate.

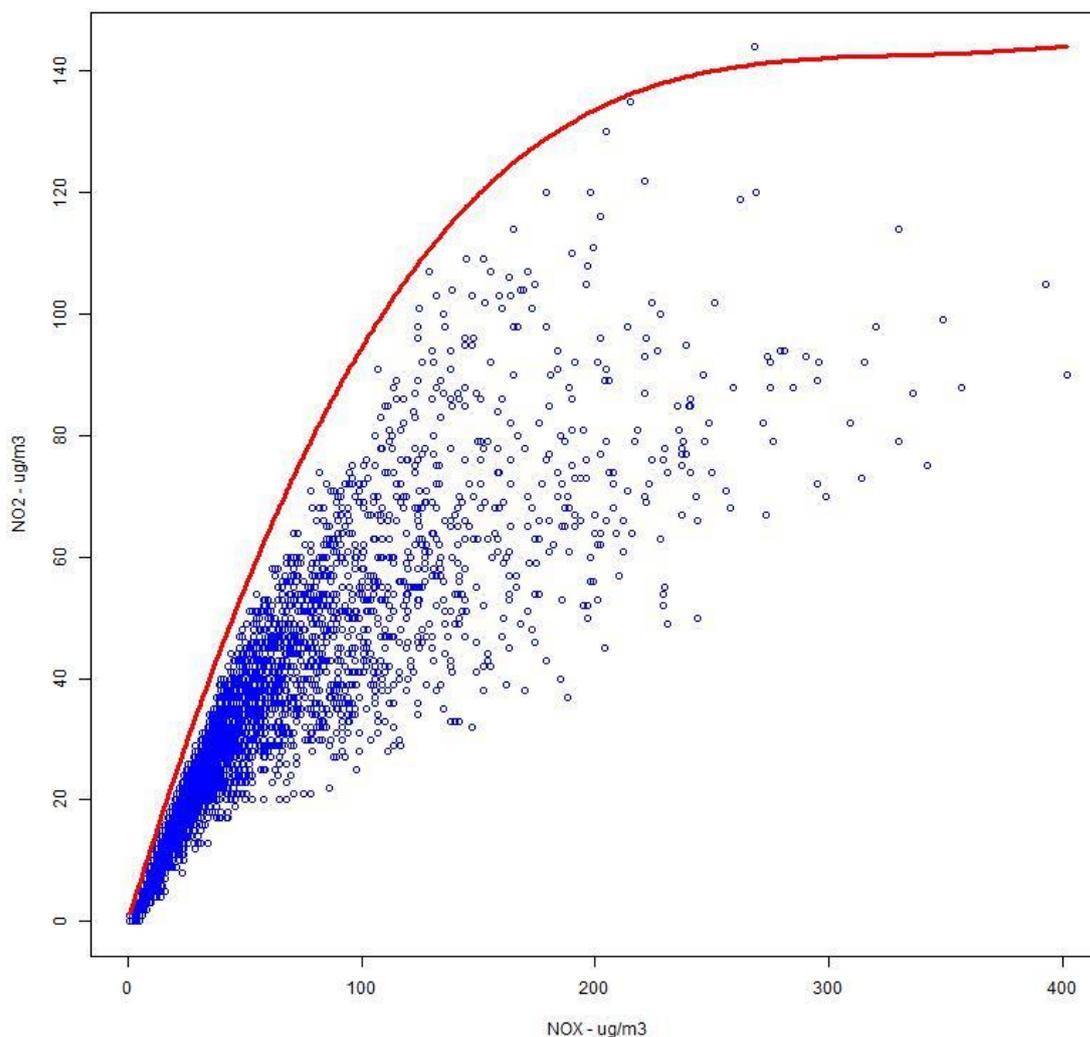


Figura 9. Concentrazioni di NO₂ e NO_x (µg/m³) misurate (bianco) e curve di regressione caratteristiche della stazione di Pisa – Borghetto: verde=intero anno; blu=periodo invernale; rosso=periodo estivo.

5.4 Monitoraggio dell'inquinamento atmosferico nei confini del sedime aeroportuale

Per caratterizzare lo stato attuale di qualità dell'aria e gli effetti sanitari dell'inquinamento atmosferico sulla popolazione, la Regione Toscana ha incaricato ARPAT di effettuare attività di monitoraggio secondo le metodologie sviluppate da ESCAPE (European Study of Cohorts for Air Pollution Effects), sia all'interno del sedime aeroportuale e area limitrofa, sia nell'area urbana della città di Pisa. In questo modo son stati quindi forniti dati significativi per descrivere l'impatto aeroportuale sulla qualità dell'aria.

Le campagne di misura si sono svolte in tre diverse stagioni dell'anno (estate, autunno, inverno) nel biennio 2011-2012 con campionamenti condotti all'interno del sedime aeroportuale (11 siti lungo le piste e nei punti di manovra) ed in circa 54 siti distribuiti nell'area urbana. Si è poi indagato anche il contributo dell'aeroporto nell'immissione in area ambiente della frazione di particolato fine e ultrafine e dei metalli in esso contenuti. Il confronto dei dati urbani con quelli registrati nel sedime aeroportuale, ha così permesso di valutare l'apporto dato dall'attività aeroportuale alla qualità dell'aria

Gli inquinanti monitorati sono i seguenti:

- Benzene, Toluene, Etilbenzene, para-meta-orto Xilene (BTEX);
- Aldeidi;
- Biossido di Azoto – NO₂;
- Polveri sottili (PM₁₀);
- Metalli aerodispersi;

I risultati del monitoraggio sono qui presentati sinteticamente per gli inquinanti d'interesse (NO₂, benzene e polveri), si rimanda agli specifici rapporti di misura per i dettagli degli altri inquinanti (ARPAT, 2013 – Impatto dell'aeroporto di Pisa sulla qualità dell'aria).

Come si deduce dalla tabella sottostante i valori di NO₂ registrati per tutte e tre le campagne, nella parte del sedime aeroportuale lungo le piste risultano molto bassi, addirittura più bassi dei valori registrati nei siti di fondo; ciò a conferma di quanto riportato in letteratura che i maggiori effetti dell'attività aeroportuale relativamente agli NO_x si registrano a quote superiori a 300 m.

Tabella 4. Medie di concentrazione di NO₂ aggregate per zona di campionamento nelle 3 stagioni

NO ₂ [µg/m ³]	estate 2011	autunno 2011	inverno 2012
alto traffico	43	70	59
fondo e basso-medio traffico	17	44	37
Aeroporto limitrofo	17	39	34
Aeroporto SAT	24	46	33
Aeronautica (piste)	10	32	20

Anche per il benzene le concentrazioni riscontrate all'interno del sedime aeroportuale e nelle zone limitrofe ad esso, sono sempre inferiori a quelle riscontrate nei siti urbani sia di alto traffico, che di fondo e medio-basso traffico.

Tabella 5. Medie di concentrazione di C₆H₆ aggregate per zona di campionamento nelle 3 stagioni

C ₆ H ₆ [µg/m ³]	estate 2011	autunno 2011	inverno 2012
Città	-	2.8	3.4
Aeroporto - limitrofo	2.4	2.2	2.3

Per quanto riguarda il particolato atmosferico campionato (PM₁₀) si riportano graficamente gli andamenti della concentrazione rilevata nel corso delle due campagne effettuate presso l'aeroporto di Pisa (autunnale: novembre 2011, invernale: marzo 2012) suddivisi nelle fasce giorno e notte (Figura 10).

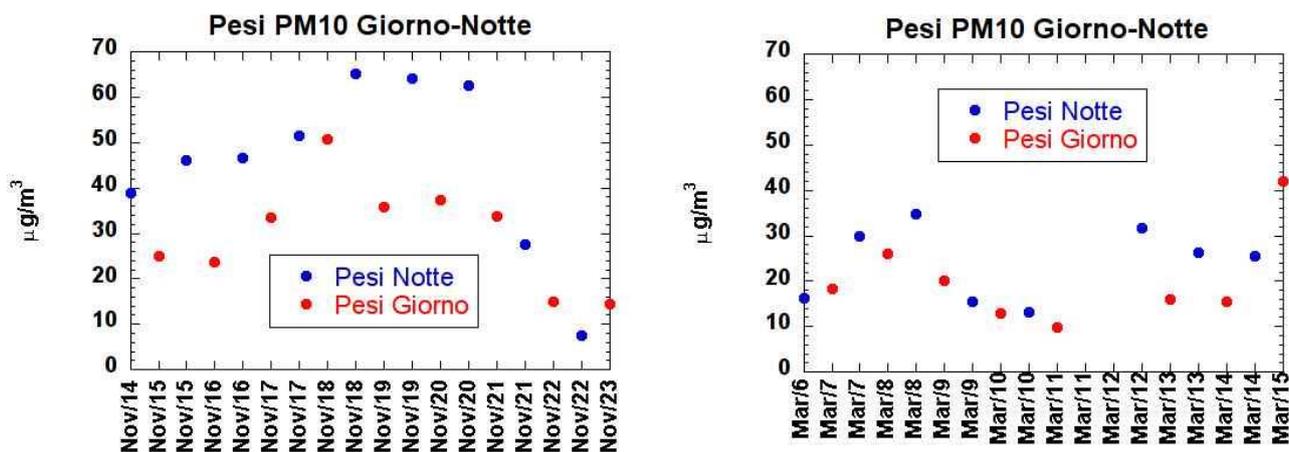


Figura 10. Profili temporali del PM₁₀ divisi per campagne di campionamento distinti tra il giorno (7-19) e la notte (19-7)

Il PM₁₀ mostra una marcata differenza stagionale (37 µg/m³ media in novembre contro 22 µg/m³ in marzo) nonché un netto trend giorno-notte con concentrazioni notturne superiori anche di oltre il 50% rispetto a quelle diurne (soprattutto in autunno).

Complessivamente i livelli d'inquinamento rilevati mostrano che l'aeroporto non impatta in maniera rilevante sulla qualità dell'aria dell'ambiente urbano mentre il monitoraggio del particolato atmosferico in prossimità della pista ha consentito di evidenziare la significativa variabilità dei livelli di inquinamento in funzione dei parametri meteorologici, in quanto non è stata individuata una correlazione tra particolato e il numero dei voli.

6 Stima dei livelli di fondo ambientale

6.1 Caratterizzazione dello stato di Qualità dell'aria: il concetto di monitoraggio integrato

Mediante l'effettiva integrazione di modelli numerici e informazioni sperimentali è possibile migliorare la descrizione dello stato della qualità dell'aria nelle diverse zone del territorio. Secondo lo spirito della "Guidance on Assessment under the EU Air Quality Directives - FINAL DRAFT" [...there is an almost continuous spectrum of combinations of measurements and other assessment methods. Neither of the two extremes is useful for investigating the state of compliance in a zone: 100% measuring (i.e. doing measurements that are not generalised at all) gives incomplete information, while, at the other extreme, 100% modelling (i.e. applying models that have not in any sense been validated) gives unreliable information. So, a useful assessment comprises elements of both] (Figura 11).

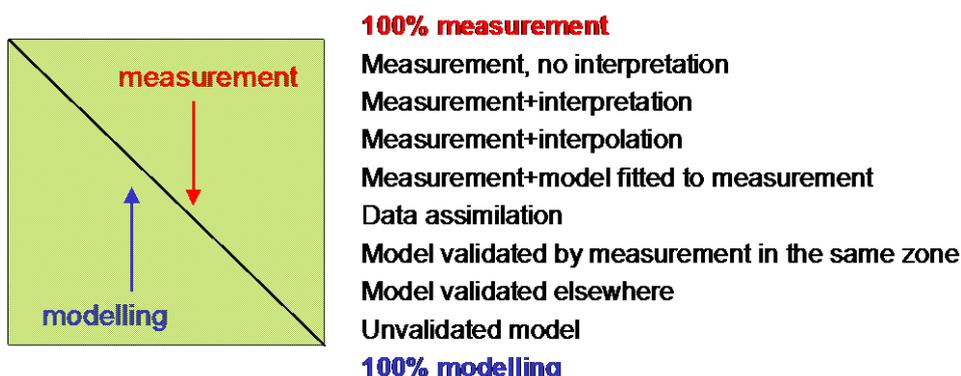


Figura 11. Integrazione di modelli numerici ed informazioni sperimentali
 (<http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/guidanceunderairquality.pdf>)

Sulla base di tali considerazioni, la direttiva 2008/50/CE (recepita dal D. lgs. 155/ 2010) prevede l'utilizzo di tecniche di modellazione in combinazione alle misurazioni in siti fissi ai fini della valutazione della qualità dell'aria ambiente nelle aree ove il livello degli inquinanti è inferiore alla cosiddetta soglia di valutazione superiore.



Figura 12. Zone di conformità/non conformità relativamente la valore limite e uso di tecniche di modellazione in relazione alle soglie di riferimento superiore ed inferiore

Coerentemente con tale approccio, la caratterizzazione dello stato attuale della qualità dell'aria nelle aree coinvolte dall'espansione dell'aeroporto Galileo Galilei di Pisa è stata effettuata

integrando i rilevamenti presso le stazioni della rete regionale di monitoraggio ed i risultati di simulazioni modellistiche tridimensionali annuali effettuate nell'ambito del Progetto Nazionale MINNI (MINNI, <http://www.minni.org/>; D'Elia *et al.*, 2009; Mircea *et al.*, 2014). I risultati di tali simulazioni sono stati recentemente utilizzati dal Ministero per la Salute nell'ambito del progetto VIAS (<http://www.vias.it/>).

Nel presente studio sono stati utilizzati i campi MINNI relativi all'anno 2007 e le considerazioni che seguono si riferiscono pertanto a tale anno. Le informazioni sperimentali sono state estratte dalla Banca Dati BRACE che contiene le informazioni sulle reti, sulle stazioni e sui sensori di misura utilizzati per il monitoraggio della qualità dell'aria e i relativi dati di concentrazione degli inquinanti (<http://www.brace.sinanet.apat.it/web/struttura.html>). I campi di concentrazione risultanti dall'integrazione delle due fonti di informazione sono stati ottenuti mediante l'utilizzo di tecniche di assimilazione dati che si collocano come intermedie nello spettro di possibilità previste nelle linee guida sopra citate (si veda la Figura 12). Mediante tali tecniche è quindi possibile calcolare gli indici statistici previsti dal suddetto D. lgs. 155 sul territorio in esame estendendo così la significatività dei dati sperimentali che avrebbero, altrimenti, valenza strettamente locale.

6.2 Metodologia di integrazione misure-modello

Al fine di meglio integrare i risultati di simulazione modellistiche con i dati sperimentali forniti dalle reti di monitoraggio, ARIANET ha messo a punto tecniche di "analisi oggettiva" basate sul metodo di Bratseth alle Correzioni Successive (Bratseth, 1986, di seguito SCM). Per una trattazione più dettagliata si rimanda a Silibello *et al.* (2014). Mediante tale metodo il campo iniziale prodotto dal modello di dispersione (detto anche "campo di background") viene iterativamente modificato nei punti griglia utilizzando una somma ponderata delle differenze tra le osservazioni ed i valori stimati nella precedente iterazione. I pesi utilizzati dipendono dalla densità delle osservazioni e delle distanze, orizzontali e verticali tra le osservazioni ed i punti griglia. Il campo prodotto viene detto "campo di analisi". I pesi $\rho_{i,j}$ associati a tali distanze sono dati dalle seguente relazione:

$$\rho_{i,j} = \exp\left(-\frac{\Delta h_{i,j}^2}{R_h^2}\right) \exp\left(-\frac{\Delta z_{i,j}^2}{R_z^2}\right)$$

ove $\Delta h_{i,j}^2$ e $\Delta z_{i,j}^2$ indicano rispettivamente i quadrati delle distanze orizzontale e verticale tra l'osservazione *i*-esima e la cella *j*-esima ed i raggi *R* (specifici per ogni dimensione) costituiscono dei parametri definiti dall'utente. Nella implementazione di tale metodo, è stata inclusa la possibilità di aggiungere nei pesi $\rho_{i,j}$ termini associati a metriche complementari basate sull'uso del suolo (nel caso si voglia decorrere punti vicini aventi diverse tipologie di uso del suolo, ad esempio traffico urbano e zona agricola) o altre variabili spaziali caratteristiche della simulazione modellistica o del dominio d'indagine (distribuzione delle sorgenti, distanza da una particolare sorgente, ecc.). In questa applicazione il termine $\rho_{i,j}$ è dato dalla seguente espressione:

$$\rho_{i,j} = \exp\left(-\frac{\Delta h_{i,j}^2}{R_h^2}\right) \exp\left(-\frac{\Delta z_{i,j}^2}{R_z^2}\right) \exp\left(-\frac{\Delta c_{i,j}^2}{L_c^2}\right)$$

ove $\Delta c_{(i,j)}$ rappresenta la differenza di concentrazione calcolata dal modello tra la cella *j*-esima e la cella *i*-esima contenente la misura e L_c il raggio di correlazione di questa seconda metrica espresso in $\mu\text{g m}^{-3}$. I termini orizzontali e verticali (funzioni di tipo Gaussiano che tendono asintoticamente a zero all'aumentare delle distanze tra le osservazioni e i punti griglia) vengono così amplificati al crescere della differenza tra le concentrazioni stimate dal modello, conducendo al risultato che osservazioni/celle vicine aventi valori di concentrazione modellistici differenti risultano di fatto come se fossero più distanti. Questa metrica può essere molto utile a patto che il dataset delle sorgenti che ha prodotto i campi di concentrazione sia completo e ben distribuito sul territorio e che il modello di calcolo sia in grado di trattare compiutamente le trasformazioni

chimico-fisiche che avvengono in atmosfera e che danno luogo alla formazione/distruzione degli inquinanti cosiddetti secondari (NO₂, O₃, particolato atmosferico, ecc.).

Il metodo SCM considera inoltre la presenza di errori sia nelle osservazioni sia nel campo di background. Tale informazione viene inclusa in un parametro (ϵ^2) che è dato dal rapporto della varianza dell'errore di misura rispetto alla varianza dell'errore del modello ($\epsilon^2 = \sigma_o^2 / \sigma_B^2$). E' prassi attribuire a tale parametro un valore molto piccolo (tipicamente 0.1) che implica l'assunzione che le osservazioni siano più accurate del campo di background. Nel combinare misure e risultati modellistici è importante considerare gli errori associati alla cosiddetta "mancanza di rappresentatività". Tali errori possono essere definiti come "*the typical deviances or differences that occur between model calculated and observed concentrations, if their spatial and/or temporal positions, or averaging characteristics, do not match*" (Walker *et al.*, 2006). Tali errori di rappresentatività sono inclusi nel suddetto parametro ϵ^2 così come descritto in Silibello *et al.* (2014).

Nell'ambito del presente studio la combinazione di informazioni modellistiche e sperimentali e l'individuazione dei parametri ottimali è stata effettuata applicando il metodo SCM nella implementazione che considera la rappresentatività spaziale delle stazioni unitamente alla metrica basata sulle differenze di concentrazione.

6.3 Osservazioni utilizzate

Le osservazioni utilizzate per lo studio sono state scelte tra quelle appartenenti al dataset nazionale BRACE (Banca dati Relazionale Atmosfera Clima Emissioni) strumento realizzato nell'ambito della rete SINA (Sistema Informativo Ambientale) per favorire la condivisione delle informazioni ambientali e territoriali e migliorarne la fruibilità a livello nazionale ed europeo, in adempimento alla normativa sullo scambio dei dati di qualità dell'aria (Decisioni 97/101/CE 2001/752/CE) e di valutazione e gestione della qualità dell'aria ambiente (Direttiva 96/62/CE).

La banca dati BRACE contiene le informazioni sui metadati (reti, stazioni e analizzatori utilizzati per il monitoraggio della qualità dell'aria) e i relativi dati di concentrazione degli inquinanti con riferimento all'intervallo degli anni 2002 - 2013 in corrispondenza delle stazioni rappresentate in Figura 13. Da tale banca dati sono state quindi estratte le informazioni sperimentali relative alle stazioni di misura presenti nell'area di impatto dell'aeroporto Galileo Galilei di Pisa al fine di poter stimare i livelli di fondo sui quali sovrapporre i livelli associati alle attività associate a tale aeroporto.



Figura 13. Distribuzione delle stazioni appartenenti alla rete nazionale che afferisce al dataset Brace

6.4 Campi MINNI

Per la caratterizzazione della qualità dell'aria a livello regionale sono stati utilizzati i campi di concentrazione relativi all'anno 2007 prodotti dal sistema modellistico atmosferico (SMA), realizzato da ENEA ed ARIANET nell'ambito del Progetto **MINNI** (Modello Integrato Nazionale a supporto della Negoziazione Internazionale sui temi dell'Inquinamento Atmosferico). Per una descrizione dettagliata di tale sistema si rimanda al sito web: <http://www.minni.org/sistema/sistema-modellistico-atmosferico>. Il SMA produce, su base temporale oraria, campi di concentrazione sia sull'intero territorio nazionale, alla risoluzione di 12 km, sia su 5 sottodomini alla risoluzione di 4km (**Figura 14**). In tale studio sono stati utilizzati i campi relativi al sottodominio relativo all'Italia Centrale (CIO) al fine di determinare gli indici statistici di qualità dell'aria per gli inquinanti considerati nello studio.

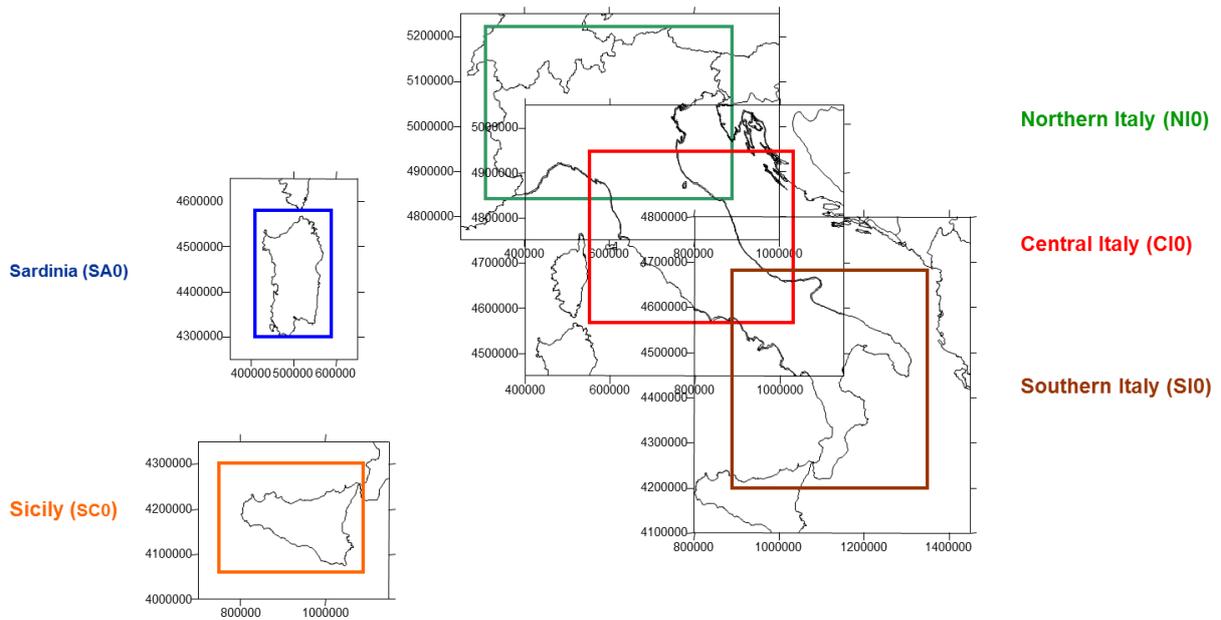


Figura 14. Sottodomini MINNI

6.5 Stima dei livelli di fondo

Le mappe relative agli indici statistici di qualità dell'aria, ottenuti nell'ambito del Progetto MINNI per l'anno 2007, costituiscono i campi di background che sono stati utilizzati per produrre, sulla base delle informazioni sperimentali estratte dal database BRACE, i corrispondenti campi di analisi che rappresentano i livelli di fondo sui quali sovrapporre i contributi derivanti dalle attività aeroportuali. Di seguito vengono prodotte, per i diversi inquinanti considerati nello studio ed i diversi indici statistici di qualità dell'aria, le mappe e i confronti tra i valori osservati e stimati rispettivamente dal SMA MINNI ed il metodo di assimilazione dati SCM. Per tali analisi non sono state incluse stazioni da traffico sia perché obiettivo di tale attività è fornire una stima dei livelli di fondo nell'area di studio sia perché la risoluzione spaziale del SMA MINNI non è paragonabile con la rappresentatività spaziale di tali stazioni. A completamento di tali confronti sono riportati i valori dell'indice di RMSE (Root Mean Square Error) così calcolato:

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - o_i)^2}$$

ove f_i =valori simulati, o_i =osservazioni, N = siti di monitoraggio. Tale indice fornisce una indicazione della performance del modello ed assume valori compresi tra $[0, +\infty)$ (un modello "perfetto" avrebbe valori pari a 0).

Nelle figure seguenti (16-29) sono riportate per i diversi inquinanti e i relativi indici statistici sia le mappe sia i confronti tra i corrispondenti valori misurati e calcolati dal SMA MINNI e dal metodo di assimilazione dati SCM.

Dall'esame di tali figure risulta già una buona performance del SMA MINNI e, come atteso, un ulteriore miglioramento in termini di RMSE (ovvero valori inferiori per tale parametro) utilizzando il metodo SCM. La distribuzione spaziale di tali mappe, in particolare per gli ossidi di azoto e il particolato atmosferico, presenta i valori più elevati lungo le principali arterie stradali ed i maggiori centri abitati (valori particolarmente elevati si stimano per l'area portuale di Livorno). Per quanto concerne infine le aree interne al Parco Regionale Migliarino, San Rossore, Massaciuccoli si stimano per la maggior parte valori inferiori al limite di protezione della vegetazione che è pari a $30 \mu\text{g m}^{-3}$ di NO_x). Per quanto riguarda infine il benzene (C_6H_6) e il monossido di carbonio(CO) si stimano livelli inferiori ai valori limiti stabiliti per tali inquinanti.

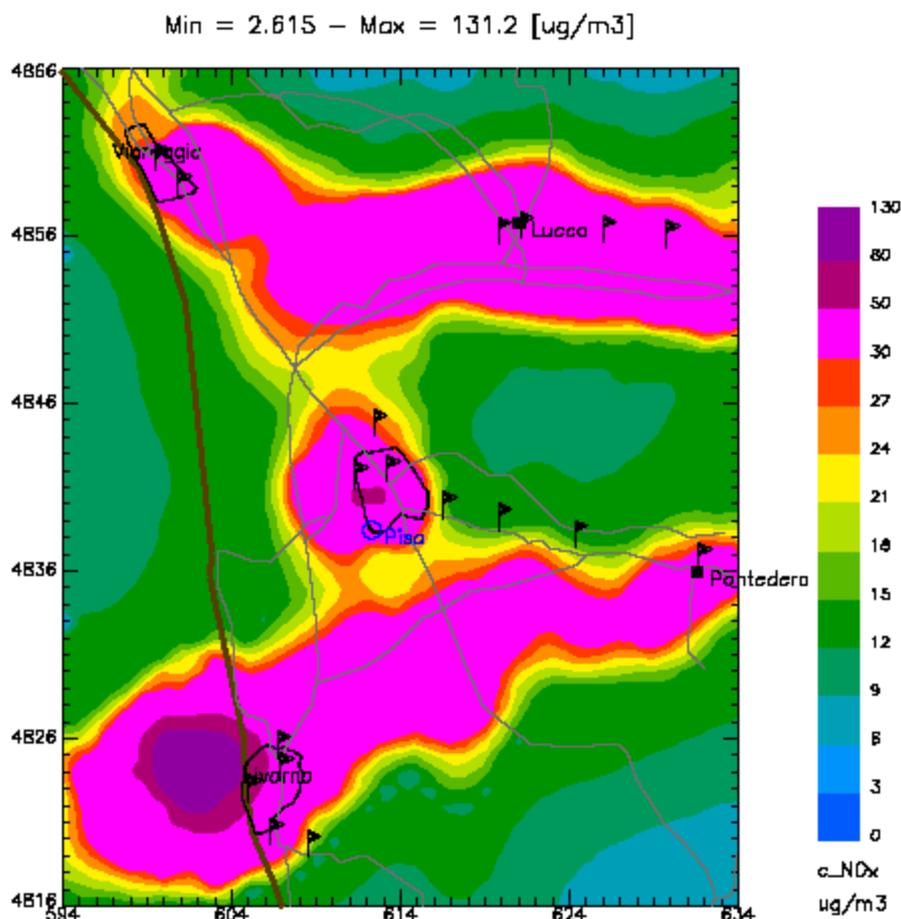


Figura 15. Concentrazioni medie annuali di NOx (limite di legge per la protezione della vegetazione: $30 \mu\text{g m}^{-3}$). Nella figura sono riportate le stazioni di misura presenti nel database Brace e l'Aeroporto di Pisa.

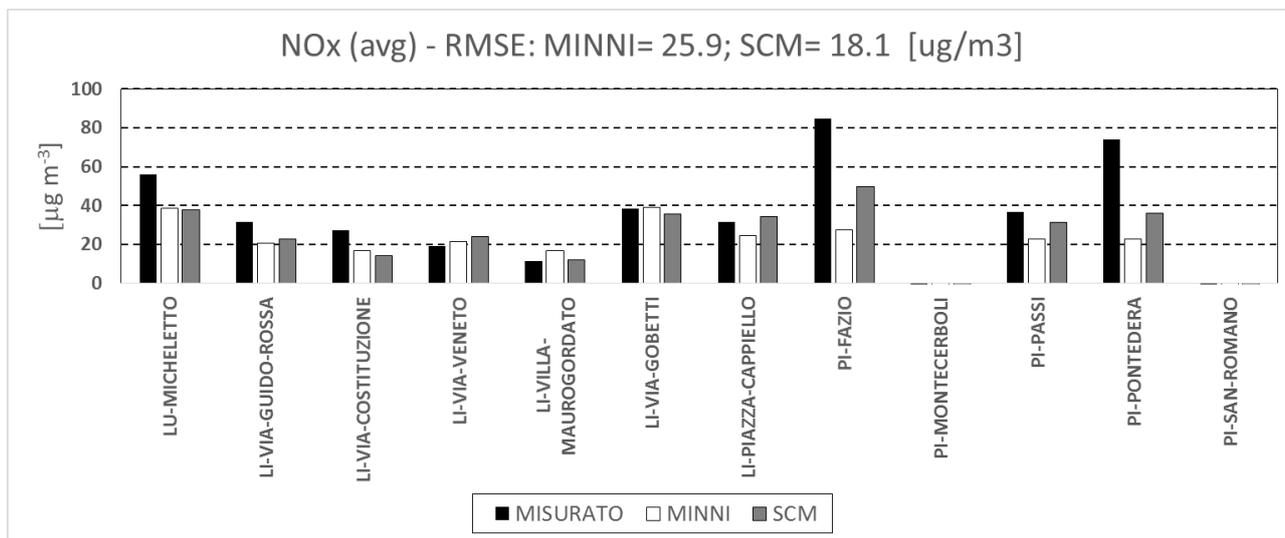


Figura 16. Confronto tra le concentrazioni medie annuali di NOx misurate ed stimate dal sistema modellistico atmosferico MINNI e dal metodo SCM. Il grafico riporta l'indice statistico di performance RMSE.

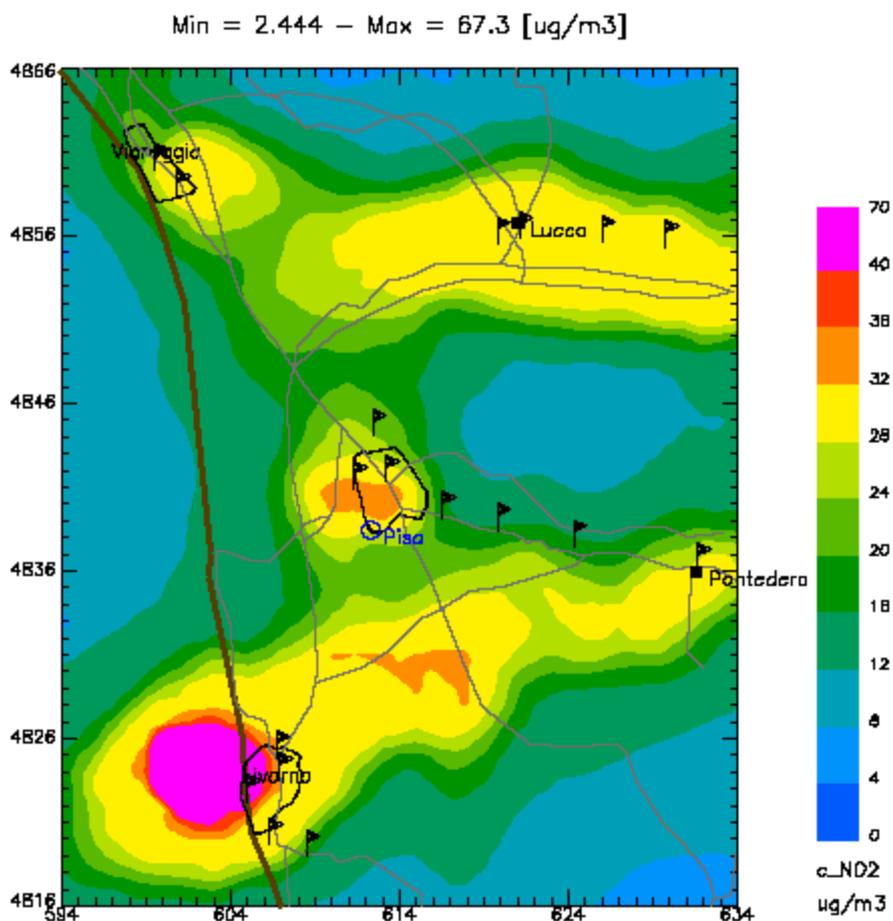


Figura 17. Concentrazioni medie annuali di NO_2 (limite di legge: $40 \mu\text{g m}^{-3}$). Nella figura sono riportate le stazioni di misura presenti nel database Brace e l'Aeroporto di Pisa.

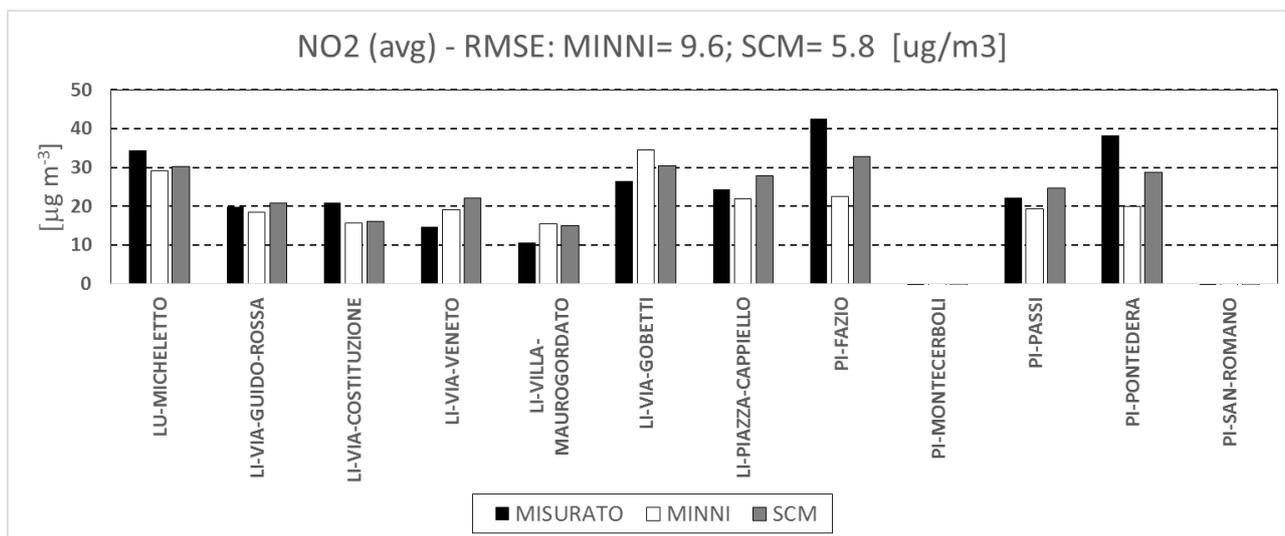


Figura 18. Confronto tra le concentrazioni medie annuali di NO_2 misurate ed stimate dal sistema modellistico atmosferico MINNI e dal metodo SCM. Il grafico riporta l'indice statistico di performance RMSE.

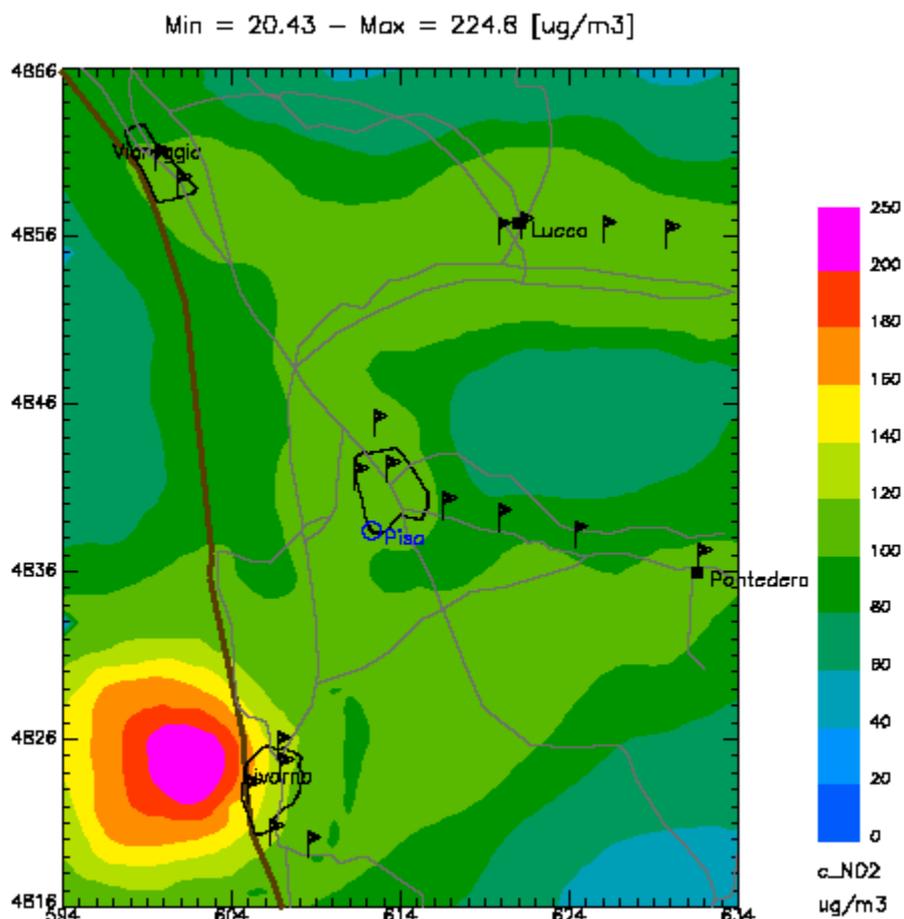


Figura 19. Valore limite di NO_2 da non superare più di 18 volte per anno civile (limite di legge: $200 \mu\text{g m}^{-3}$). Nella figura sono riportate le stazioni di misura presenti nel database Bracc e l'Aeroporto di Pisa.

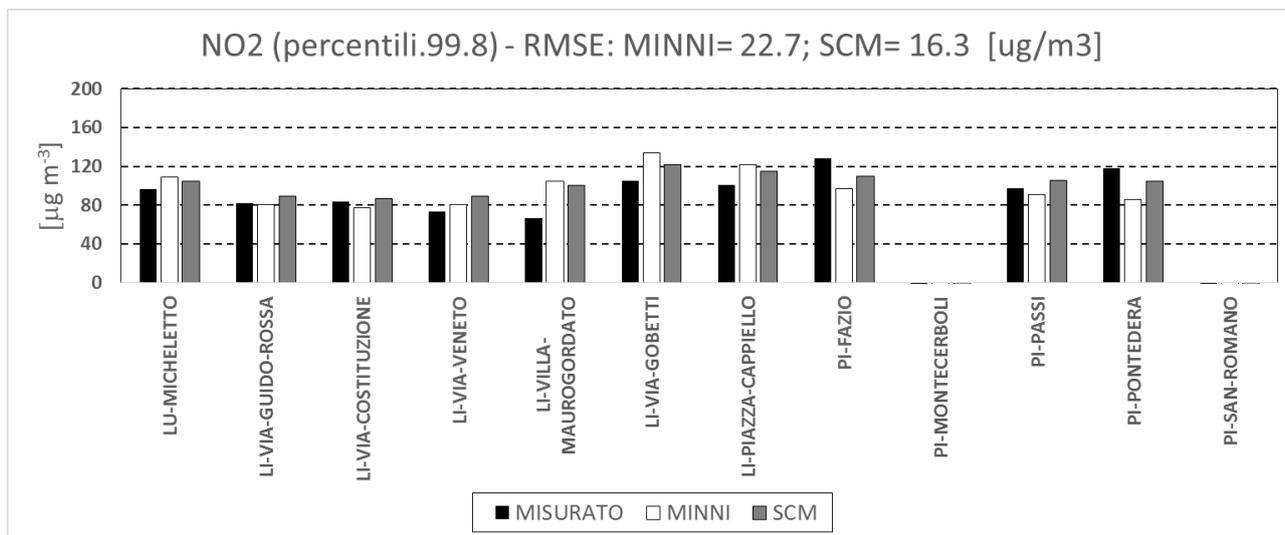


Figura 20. Confronto tra il 99.8 percentile di NO_2 misurate ed stimate dal sistema modellistico atmosferico MINNI e dal metodo SCM. Il grafico riporta l'indice statistico di performance RMSE.

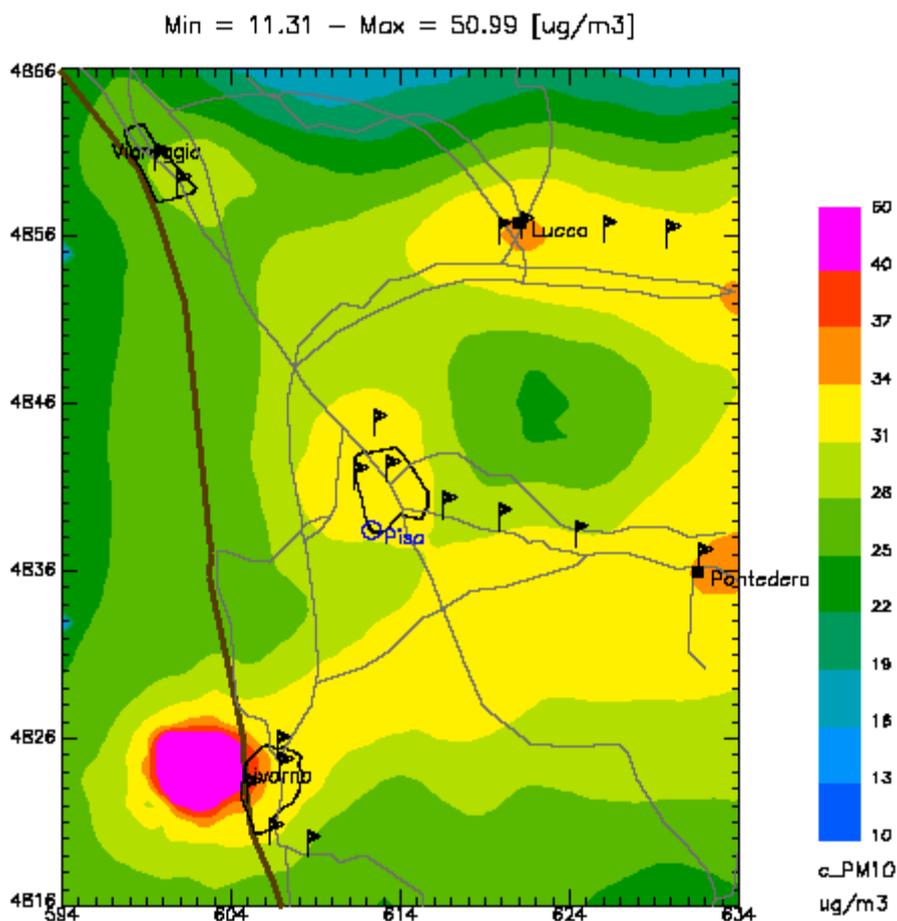


Figura 21. Concentrazioni medie annuali di PM_{10} (limite di legge: $40 \mu\text{g m}^{-3}$). Nella figura sono riportate le stazioni di misura presenti nel database Brace e l'Aeroporto di Pisa.

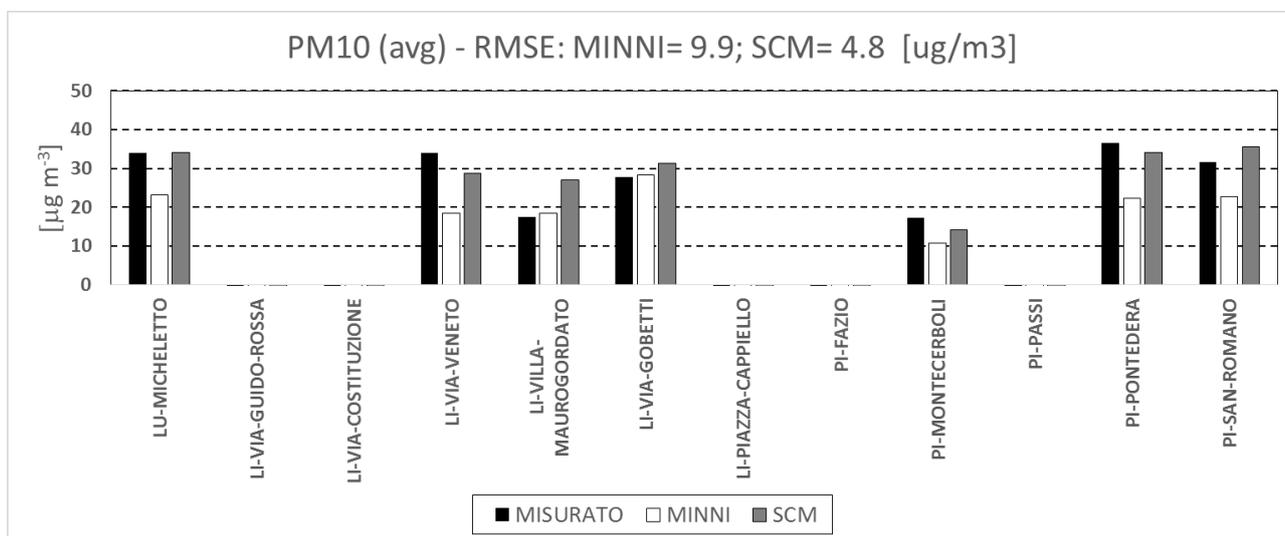


Figura 22. Confronto tra le concentrazioni medie annuali di PM_{10} misurate ed stimate dal sistema modellistico atmosferico MINNI e dal metodo SCM. Il grafico riporta l'indice statistico di performance RMSE.

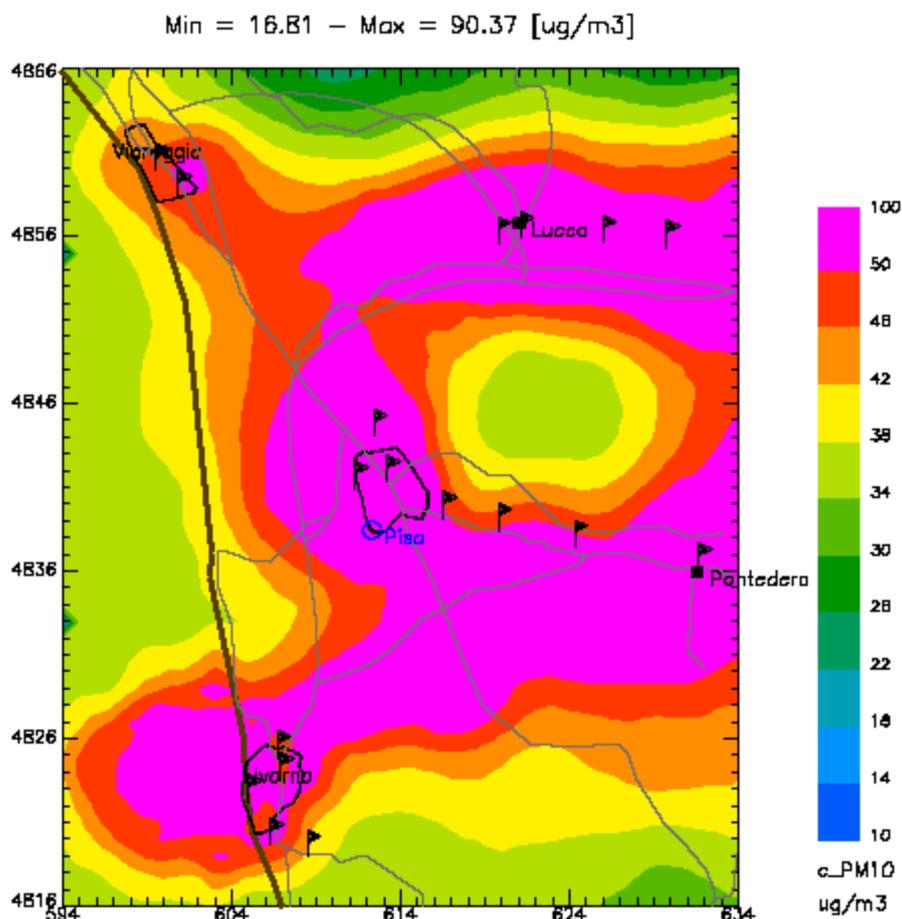


Figura 23. Valore limite di PM₁₀ da non superare più di 35 volte per anno civile (limite di legge: 50 µg m⁻³). Nella figura sono riportate le stazioni di misura presenti nel database Brace e l'Aeroporto di Pisa.

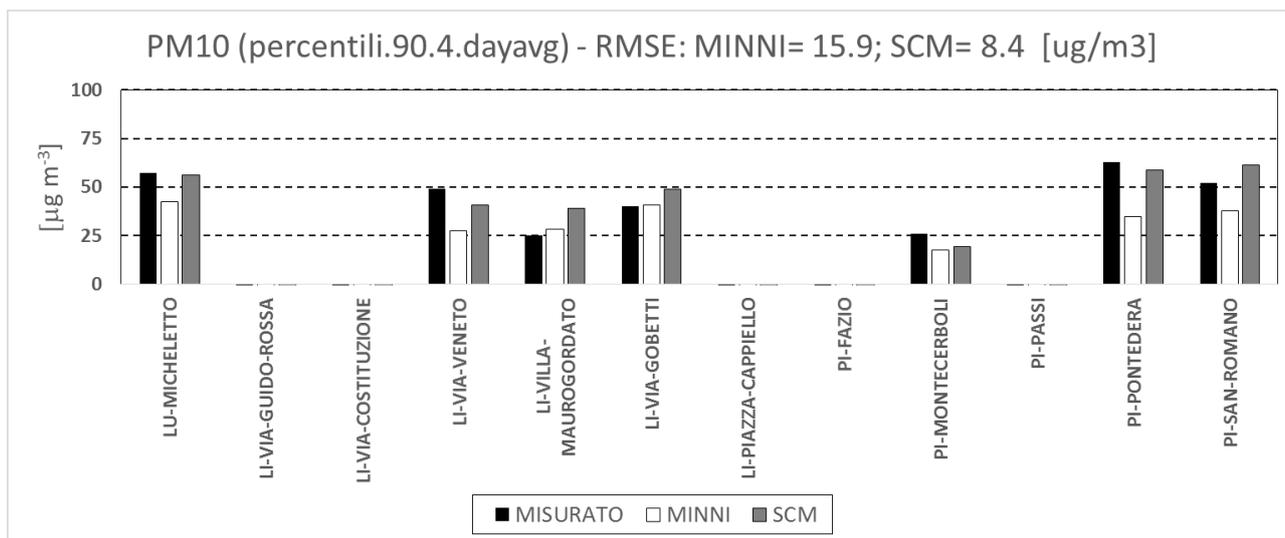


Figura 24. Confronto tra il 90.4 percentile delle medie giornaliere di PM₁₀ misurate ed stimate dal sistema modellistico atmosferico MINNI e dal metodo SCM. Il grafico riporta l'indice statistico di performance RMSE.

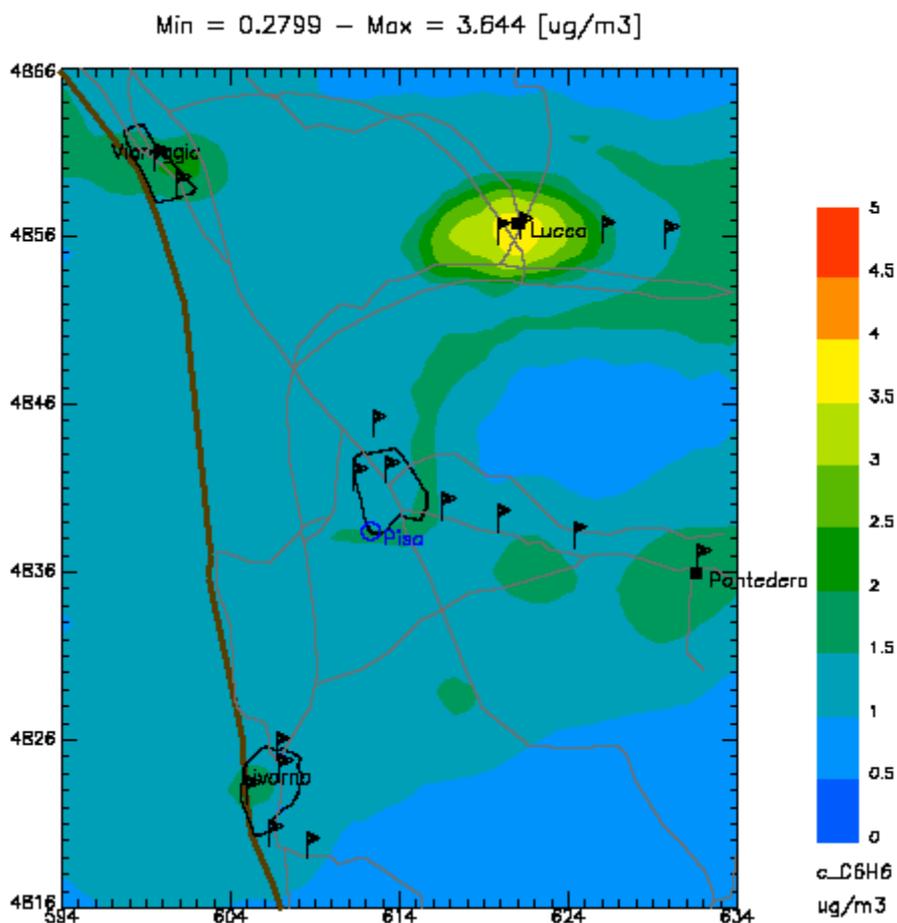


Figura 25. Concentrazioni medie annuali di C_6H_6 (limite di legge: $5 \mu\text{g m}^{-3}$). Nella figura sono riportate le stazioni di misura presenti nel database Brace e l'Aeroporto di Pisa.

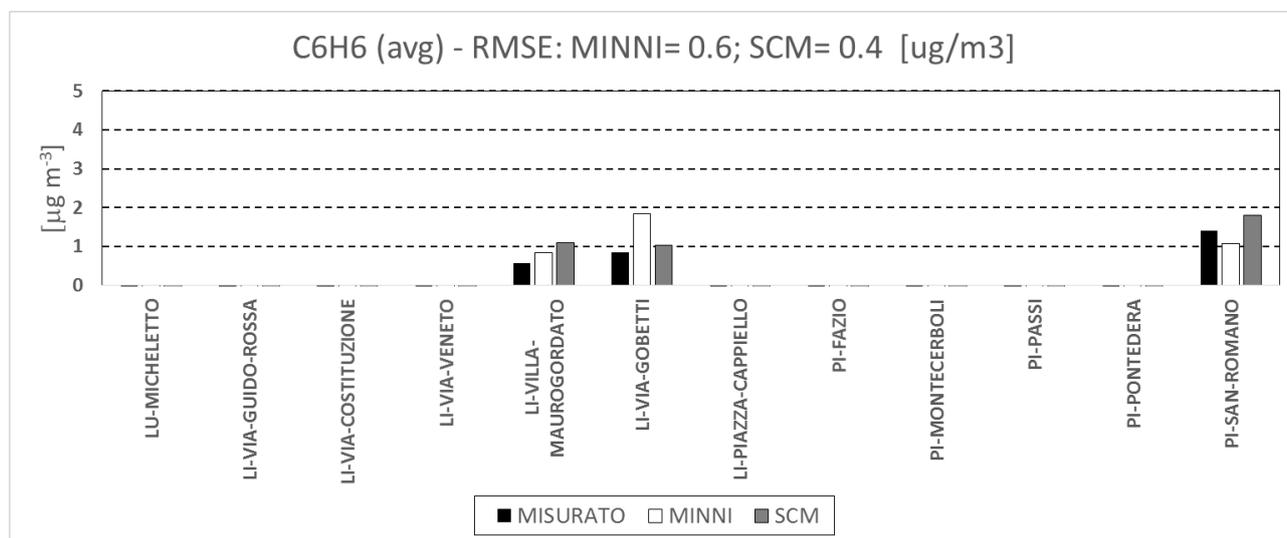


Figura 26. Confronto tra le concentrazioni medie annuali di C_6H_6 misurate ed stimate dal sistema modellistico atmosferico MINNI e dal metodo SCM. Il grafico riporta l'indice statistico di performance RMSE.

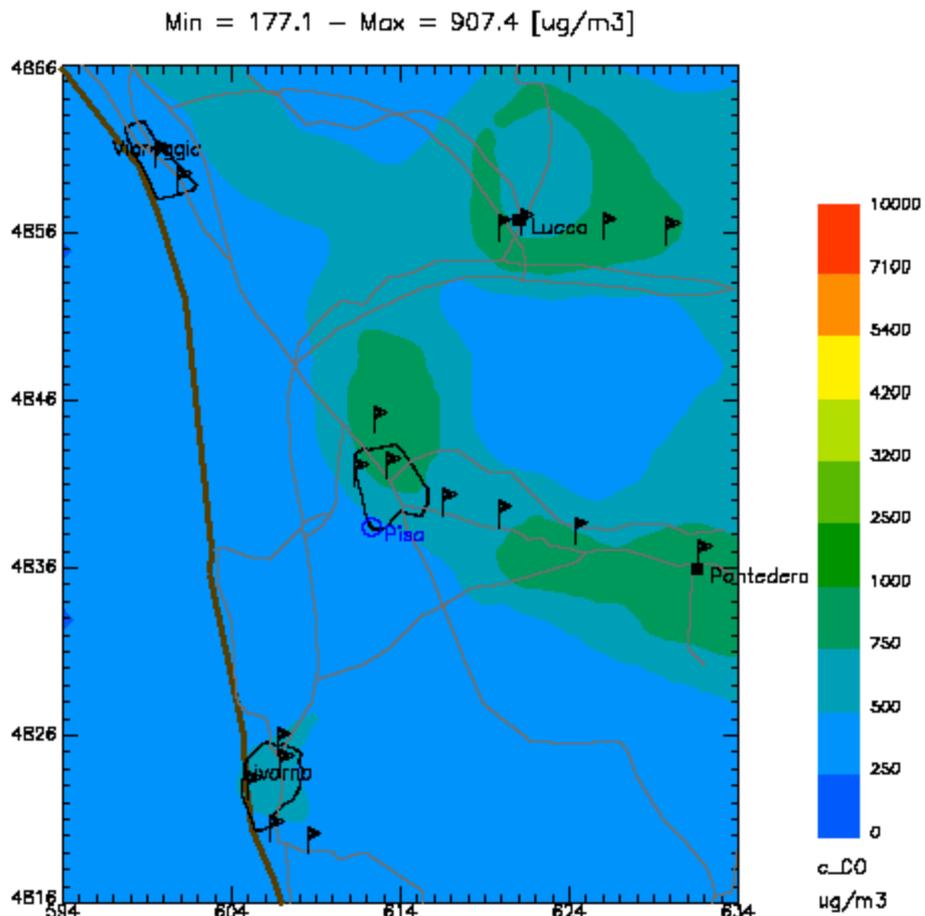


Figura 27. Concentrazioni massime giornaliere calcolate su 8 ore di CO (limite di legge: $10 \mu\text{g m}^{-3}$ che corrispondono a $10000 \mu\text{g m}^{-3}$)

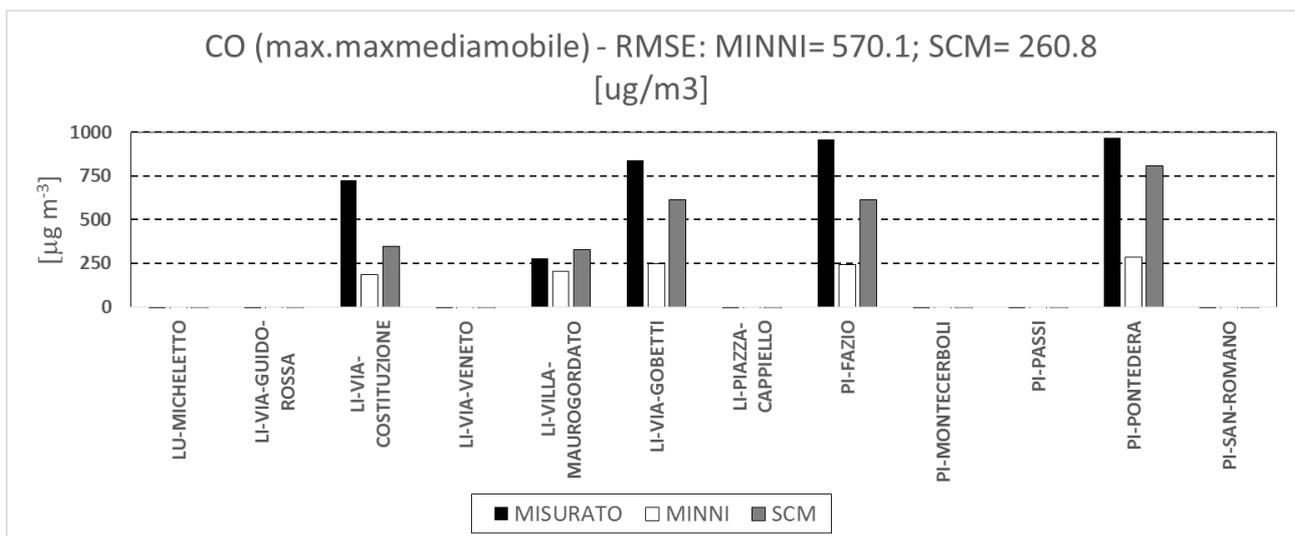


Figura 28. Confronto tra le concentrazioni massime giornaliere calcolate su 8 ore di misurate ed stimate dal sistema modellistico atmosferico MINNI e dal metodo SCM. Il grafico riporta l'indice statistico di performance RMSE.

7 Stima delle emissioni aeroportuali

Secondo lo studio ARPAT “L’impatto dell’attività aeroportuale sulla città di Pisa” (ARPAT 2013) le principali sorgenti emissive della città di Pisa, sono rappresentate dal traffico urbano e riscaldamento domestico a cui vanno aggiunti i contributi dei grossi impianti industriali (Saint Gobain e Gerresheimer) e quello dell’aeroporto Galileo Galilei, tutti posizionati circa 2 km a sud dal centro cittadino. Gli impianti Saint Gobain e Gerresheimer sono entrambi installazioni per la produzione di vetro soggetti alla disciplina AIA (D.Lgs 3 aprile 2006, n.152 e smi parte II. Titolo III - bis).

Analizzando i dati dell’inventario delle emissioni in atmosfera della Regione Toscana relativo al 2007 si osserva come sul comune di Pisa i contributi maggiori per NOx e ossidi di zolfo provengono dai comparti industriali, mentre per quanto riguarda CO e PM10 la sorgente principale è il traffico stradale.

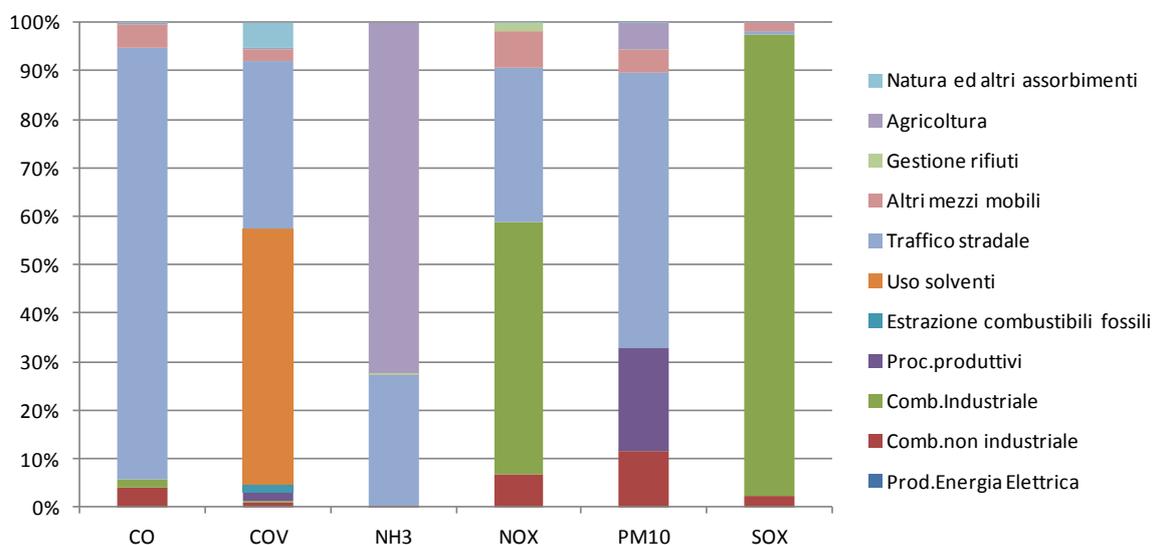


Figura 29. Contributo dei diversi comparti alle emissioni totali sul comune di Pisa.

Nell’inventario emissivo regionale il contributo delle emissioni aeroportuali (altri mezzi mobili) sul totale delle emissioni prodotte nel comune di Pisa varia tra lo 0.7% del PM10 e circa il 4.8% del CO.

Analizzando le emissioni di biossido di carbonio il contributo aeroportuale è pari a poco più del 5% sul totale.

7.1 Approccio metodologico alla stima delle emissioni degli aviogetti commerciali

La forte crescita dei movimenti nell’aeroporto di Pisa S.Giusto registrata negli ultimi anni, oltre a significare un potenziale beneficio di origine economica, dall’altro pone nuove problematiche circa l’impatto che i movimenti aerei e le corrispondenti attività correlate a terra possono avere sull’ambiente.

Per il 2028, anno di riferimento del presente studio, secondo il nuovo masterplan dell’aeroporto si prevede una ulteriore crescita dei volumi di traffico e, di conseguenza, delle emissioni legate agli aeromobili ed a tutte le attività connesse; in quest’ottica sono stati elaborati i dati riguardanti il traffico aereo e la composizione della flotta degli ultimi 5 anni (2009-2014) e le previsioni fino al 2028 al fine di poter fare una stima di quello che saranno le emissioni aeroportuali.

L’approccio scelto si rifà alla letteratura internazionale ed a fattori di emissione riconosciuti dall’intera comunità scientifica.

L'indicatore di attività di un aeromobile è il cosiddetto ciclo LTO (Landing and TakeOff cycle), inteso come il ciclo completo di tutti i movimenti di un aereo su uno scalo, cioè la somma del movimento di discesa a terra dell'aereo sino al raggiungimento, da parte dello stesso aereo in seguito al successivo decollo, della altitudine di crociera. Le emissioni considerate sono dunque esclusivamente quelle contenute entro lo strato di rimescolamento dell'atmosfera, quelle cioè in grado di influenzare le concentrazioni al suolo. Altre attività emissive di un aeromobile, come per esempio il volo all'altitudine di crociera, esulano dallo scopo del presente studio.

Le fasi di un LTO sono così identificabili:

- discesa e atterraggio ("approach"): fase che comprende la discesa da un'altezza di 3000ft fino al raggiungimento della pista;
- movimento a terra e attesa successivi all'atterraggio ("taxi in/idle"): percorso compiuto a terra, dall'uscita dalla fase di atterraggio vera e propria alla destinazione ai gates;
- movimento a terra e attesa precedenti il decollo ("taxi out/idle"): percorso inverso rispetto a quanto appena descritto, dai gates alla pista di decollo;
- decollo ("take off"): movimento compiuto dall'aeromobile dall'istante in cui comincia a spostarsi lungo la pista finché raggiunge una quota massima convenzionale di 1000 ft;
- salita ("climb out"): procedura di salita, si svolge completamente in atmosfera convenzionalmente tra circa 1000 e 3000ft di quota.

Ognuna di queste fasi è caratterizzata da determinati tempi di svolgimento (TIM, Time In Mode) e da specifici fattori di emissione, caratteristici anche per tipologia di motore considerato.

Gli inquinanti che vengono considerati in uno studio di questo tipo sono gli idrocarburi (con particolare rilievo posto su benzene), il monossido di carbonio, gli ossidi di azoto, il biossido di zolfo ed il particolato.

In realtà le sostanze che possono rappresentare una criticità sono solo NO_x , essenzialmente legati alla potenza dei motori ed alla temperatura di combustione, e HC, che vengono emessi nelle fasi in cui l'emissione risulta poco efficiente.

In base alla metodologia EPA (vedere come riferimento, EPA 1999), dunque, una volta determinato il numero di LTO e definita la flotta di aerei presente, si associano tempi caratteristici di ciascuna fase di un LTO ai fattori di emissioni, e si stimano le emissioni in base all'attività, ai TIM ed ai tipi di motore.

7.2 Attività aeroportuale di Pisa San Giusto

Come già descritto, il rateo di emissione di un particolare inquinante da un motore di aviogetto è direttamente legato alla sua attività. Importanti componenti dell'attività di un aviogetto sono sia la frequenza dei voli (in termini di numero di LTO) sia le fasi caratteristiche di ciascun LTO. Allo scopo di stimare le emissioni inquinanti da un sistema aeroportuale, l'attività di volo commerciale è quindi quantificata in LTO.

Per il 2028 SAT ha fornito una serie di informazioni relative al numero di voli commerciali mensili e settimanali previsti a regime, di cui si presenta di seguito un estratto e da cui si evincono anche le informazioni relative alla modulazione di un ulteriore 10% di velivoli generali.

Etichette di riga	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	Totale complessivo	gen+dic	giu+lug+ago+sett
00	36	11	17	16	28	34	39	42	61	50	25	19	379	27	44
01	3	2		2		3	6	5	9	3	0	2	34	2	6
02	3			0		2	3		3	2	0		13	2	2
03				0	0		2	2	2	3	2		8	0	1
04	3			2	3		0	2					11	2	0
05	0			2	5	16	17	13	13	3	0	0	67	0	14
06	119	127	135	260	276	274	274	287	246	243	97	61	2.399	90	270
07	177	165	212	160	150	176	248	249	201	202	179	166	2.283	172	218
08	88	47	67	143	138	172	182	196	183	161	88	110	1.575	99	183
09	110	89	133	389	387	379	443	451	417	379	160	155	3.493	132	423
10	204	207	208	398	382	426	514	509	418	379	252	255	4.154	230	467
11	293	270	318	284	360	385	426	400	337	326	213	251	3.863	272	387
12	257	210	307	381	414	422	348	353	393	367	266	268	3.985	262	379
13	301	270	326	348	362	346	312	331	346	320	263	259	3.783	280	334
14	233	248	270	266	315	301	337	338	320	293	260	277	3.458	255	324
15	233	208	288	342	384	376	453	451	396	400	266	293	4.091	263	419
16	108	94	157	252	310	315	326	334	304	271	158	191	2.821	150	320
17	139	111	146	150	201	230	221	215	174	165	92	99	1.943	119	210
18	224	223	266	183	224	221	210	213	186	201	130	144	2.426	184	208
19	216	219	241	285	310	323	351	370	331	271	219	185	3.322	201	344
20	168	122	154	298	337	349	407	407	329	302	191	193	3.258	180	373
21	141	125	158	312	307	343	368	406	354	332	147	144	3.139	143	368
22	99	97	119	196	215	233	237	263	251	208	105	100	2.123	100	246
23	121	118	130	205	237	249	265	244	226	218	122	97	2.231	109	246
Totale comp	3.277	2.962	3.653	4.872	5.345	5.577	5.987	6.080	5.500	5.099	3.239	3.269	54.858	3.273	5.786

Figura 30. Distribuzione MVT 2028 Numero medio voli mensili commerciali (fonte: Pisa International Airport)

Per l'anno 2028 si stiamo un numero medio di passaggi giornalieri pari a 165 (dato comprensivo dell'aviazione generale);

Per l'anno 2014 le emissioni relative traffico aereo sono state calcolate in proporzione al minor numero di passaggi registrato (volumi al 2014 pari al 71.8% di quelli previsti per il 2028).

7.3 Tempi caratteristici di fase (TIM)

Poiché i motori degli aeromobili operano a regimi praticamente standard nel corso di ogni fase di un LTO, le emissioni possono essere calcolate, con buona precisione, sulla base di specifici fattori di emissione per ciascuna fase.

Per quanto concerne i tempi di durata caratteristici di ciascuna fase, essi sono stati derivati nello specifico per Pisa San Giusto sulla base di quanto esistente in letteratura e di quanto direttamente comunicato; rispetto al 2014, nel 2028 l'assetto sarà caratterizzato da un arretramento di 400m del punto di avvio della fase di decollo degli aeromobili; in fase di taxi precedente al decollo verso la città, pertanto, il tempo di IDLE OUT04R aumenterà di 21 secondi.

In sintesi, i tempi caratteristici adottati sono presentati come segue:

Tabella 6. Tempi caratteristici fasi LTO

Fase LTO	Tempo caratteristico (s)
APP	239
IDLE IN04R	300
IDLE OUT22L	300
IDLE OUT04R	501
T/O04R	96
T/O22L	96
C/O04R	26
C/O22L	26

I tempi forniti dall'autorità aeroportuale sono stati armonizzati con quanto presente nel database EDMS (http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/aep/models/edms_model/) tenendo in considerazione le classi di aeromobili più rappresentative.

Durata e comportamenti nelle operazioni con aviogetto a terra dipendono considerevolmente dalle specifiche procedure di ogni aeroporto. Il tempo di decollo è invece praticamente standard per ogni tipo di apparecchio e di aeroporto, così come quello di atterraggio. Il tempo di durata della fase di salita è invece legato allo spessore dello strato di rimescolamento, parametro meteorologico indiretto (cioè non direttamente misurabile) tanto fondamentale quanto difficilmente stimabile con accuratezza. Esso varia con il tipo di suolo, la stagione, la nuvolosità e l'altezza del sole sull'orizzonte; quanto maggiore è lo spessore assunto di tale strato, tanto maggiore è la quantità di massa complessiva emessa in un ciclo LTO. Seguendo le indicazioni EPA, per lo spessore dello strato rimescolato è stato assunto un valore costante pari a 915m (3000ft), corrispondente, approssimativamente, al valore diurno estivo, in condizioni favorevoli al formarsi di elevati livelli di ozono, inquinante fotochimico secondario di cui gli NO_x sono precursori. Ai fini del calcolo delle emissioni, tale valore deve intendersi quindi come conservativo.

7.4 Caratterizzazione della flotta

Per l'assegnazione dei fattori di emissione più corretti, è necessario caratterizzare al meglio la flotta di aeromobili in attività.

Raggruppando gli aerei in alcune categorie rappresentative, in Figura 31 si riportano a titolo esemplificativo i dati forniti da SAT per l'aviazione commerciale.

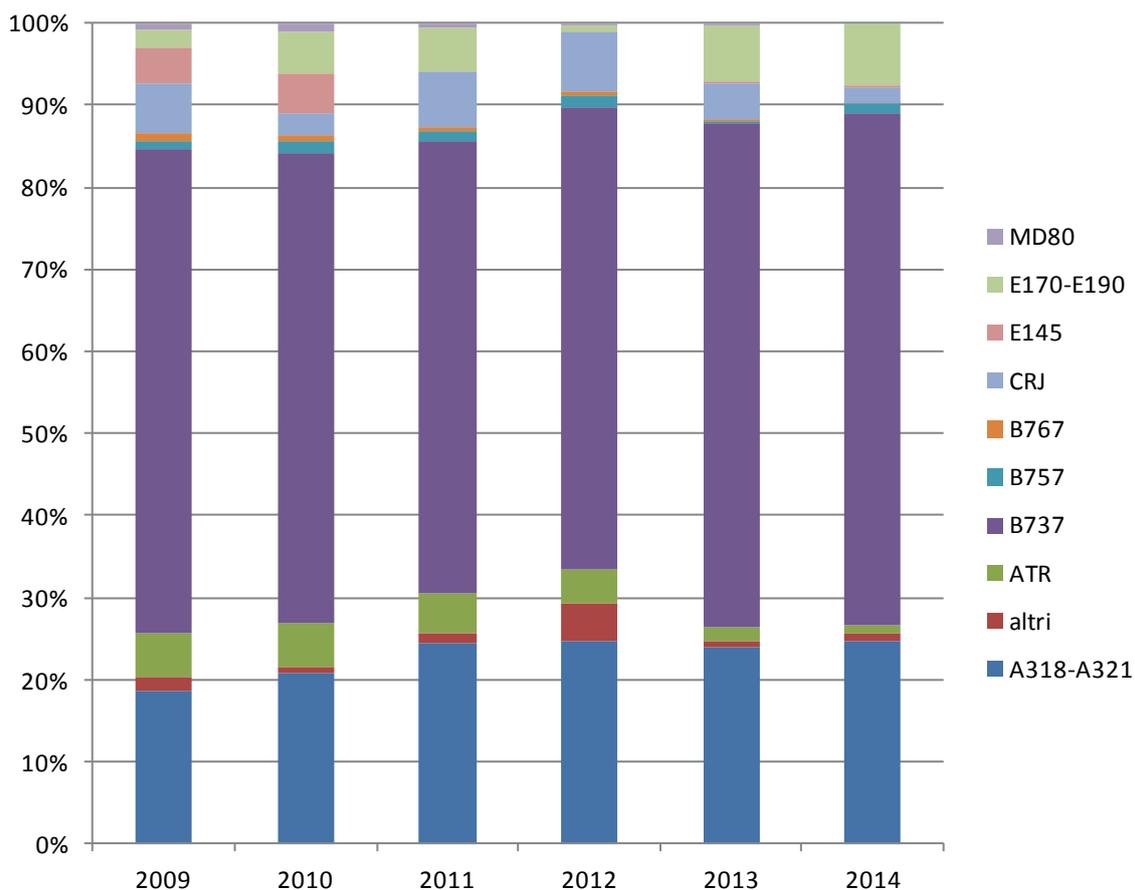


Figura 31. Distribuzione percentuale degli aviogetti commerciali

Come si osserva dalla Figura 31 nel corso degli anni la composizione della flotta ha subito alcune variazioni, con la diminuzione, ad esempio, dei velivoli assimilabili al modello E145 (Embraer ERJ 145). Tra i modelli che maggiormente usufruiscono dello scalo pisano ci sono il B737 (Boeing 737),

l'aereo passeggeri più prodotto nella storia dell'aviazione, e gli A318-A321 (Airbus della famiglia A320).

7.5 Database ICAO dei fattori di emissione

Nel 1993 l'ICAO (International Conference of Aviation Organizations) ha fissato in un protocollo gli standard per la certificazione, obbligatoria, dei propulsori per gli aeromobili per uso commerciale e civile.

In particolare il protocollo fissa i valori standard per:

- Idrocarburi;
- Ossidi di azoto;
- Monossido di carbonio;
- Smoke Number (termine adimensionale indice delle emissioni di PM10 basato sulla riflettanza di un filtro di carta misurata prima e dopo il passaggio di un campione di volume noto di fumo (<http://www.caa.co.uk/docs/702/070716%20Introduction.pdf>)).

In base alle emissioni misurate e catalogate, ed a prove in cui si valutava il consumo di combustibile per singola fase e per tipologia di motore, si è giunti a determinare, per la maggior parte dei motori in circolazione, i fattori di emissione (chiamati nel database ICAO "Emission Index") espressi in massa di inquinante prodotto (in grammi) per ogni chilogrammo di combustibile utilizzato.

Tali caratteristiche variano per numero e tipo di motore usato, e sono raccolte (e disponibili attraverso il web) nell' "ICAO engine exhaust emissions data bank"; questo archivio costituisce una delle più complete raccolte di fattori di emissione da aeromobili, ed è compilata ed aggiornata sulla base delle informazioni direttamente fornite dai principali produttori mondiali di apparecchi.

Ciò che risulta più complicata è invece l'associazione tipo di motore - aviogetto, quasi mai univoca, che ha portato a considerare le diverse tipologie di motore utilizzabili, ed ottenendo infine un valor medio per tipologia di aereo.

7.6 Calcolo delle emissioni

La conoscenza del numero di cicli LTO per ogni ora e della tipologia degli aeromobili che fanno scalo a Pisa, ha consentito di stimare con esattezza le emissioni orarie, suddivise per singole fasi.

Grazie ai fattori di emissione ICAO è possibile stimare CO, HC e NO_x, mentre per la parte relativa al particolato, a partire dallo Smoke Number, per ottenere una stima del PM10 (che in realtà, da studi, risulta essere per la maggior parte PM2.5) si applica un'approssimazione di primo ordine che permette la correlazione dell'emissione di particolato con lo tale indice.

Per quanto riguarda il tipo di composti organici volatili emessi, non sono state fatte molte misure sui gas esausti prodotti dalle turbine degli aeromobili, ed il riferimento rimane lo studio di Shareef et al., (1988) riportato dal Emission Inventory Guidebook e qui riportato in Tabella 7; si può osservare come la parte di idrocarburi costituita dal benzene rappresenti circa il 2% delle emissioni totali.

Tabella 7. Profilo di speciazione idrocarburi volatili da aeromobili (CORINAIR, 2007)

Compound in VOC profile	Percentage of total VOC (weight)	
	Commercial aircraft	General aviation
Ethylene	17.4	15.5
Formaldehyde	15.0	14.1
C ₆ H ₁₈ O ₃ Si ₃	9.1	11.8
Methane	9.6	11.0
Propene	5.2	4.6
Acetaldehyde	4.6	4.3
C ₈ H ₂₄ O ₄ Si ₄	2.9	4.2
Ethyne	4.2	3.7
Acetone	2.4	2.9
Glyoxal	2.5	2.5
Acrolein	2.3	2.1
Butene	2.0	1.8
Benzene	1.9	1.8
1,3-butadiene	1.8	1.6
Methyl glyoxal	2.0	1.8
n-dodecane	1.1	1.2
Butyraldehyde	1.2	1.2
Others	< 1	< 1
Total	100.0	100.0

7.6.1 Correlazione tra "smoke number" ed emissione di PM10

La metodologia è una combinazione degli studi di Doppelheuer (1997, 1999, 2000), Hagen (1992, 1996, 1998), Petzold (1998, 1999) e Whitefield (2001), in cui si ipotizza la correlazione tra cambiamenti nella massa di particolato emessa e variazioni dello Smoke Number. Per determinare tale correlazione sono stati usati i dati raccolti negli studi di Champagne (1971), Whyte (1982) e Hurley (1993), i cui risultati sono riportati nella Figura 32.

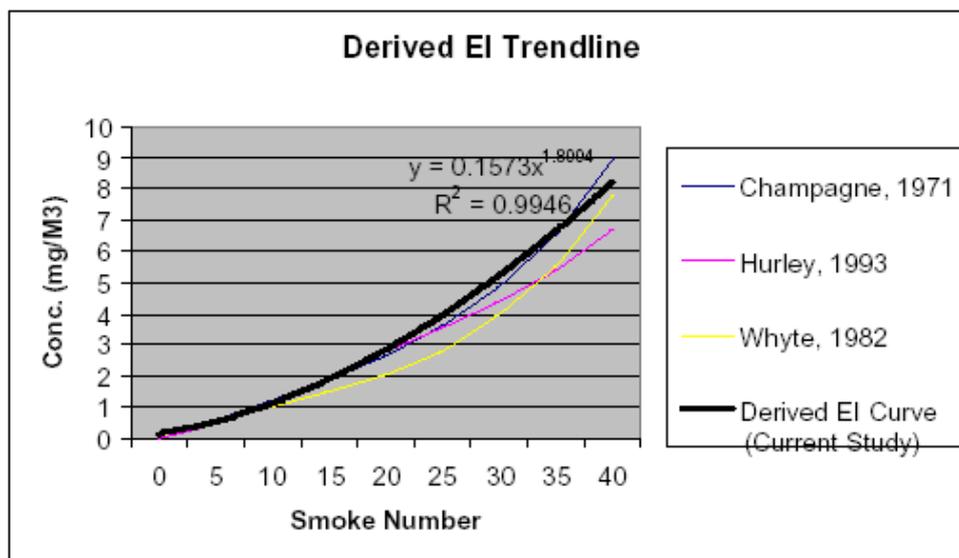


Figura 32. Curva di correlazione derivata dai diversi studi citati (fonte: Wayson R.L, et al., 2003)

Partendo da tali considerazioni l'equazione risultante per la stima del PM prodotto da aerei commerciali e civili è la seguente:

$$ER_{j\text{Mass of PM}} = 0.6 \times (SN)^{1.8} \times (FF)$$

dove:

$ER_{j\text{Mass of PM}}$:= rateo di emissione, misurato in mg di PM emesso al secondo per tipologia (j) di motore;

SN = Smoke Number riportato nel database ICAO;

FF = flusso di combustibile misurato in chilogrammi/sec riportato nel database ICAO.

Il prodotto del fattore di emissione per il tempo relativo ad ogni singola fase può dunque seguire lo stesso approccio adottato per gli altri inquinanti; la massa totale di particolato risulterà dunque:

$$M_{\text{total}} = \sum_i \sum_j (ER_{j\text{Mass of PM}}) (N_i) (N_{ei}) (TIM_i)$$

dove:

M_{total} = massa totale (mg)

N_i = numero di aerei considerati

N_{ei} = numero di motori considerati per l'aereo i-esimo

TIM_i = tempo per ogni fase relativa all'aereo i-esimo

In Figura 33 è riportata la comparazione della stima fatta con il metodo riportato e con 14 punti di misura; pur ricordando che si tratta di un'approssimazione di primo grado e considerando che molti miglioramenti potranno essere conseguiti con l'acquisizione di dataset più completi di misure di PM, il risultato mostrato è da considerarsi più che accettabile

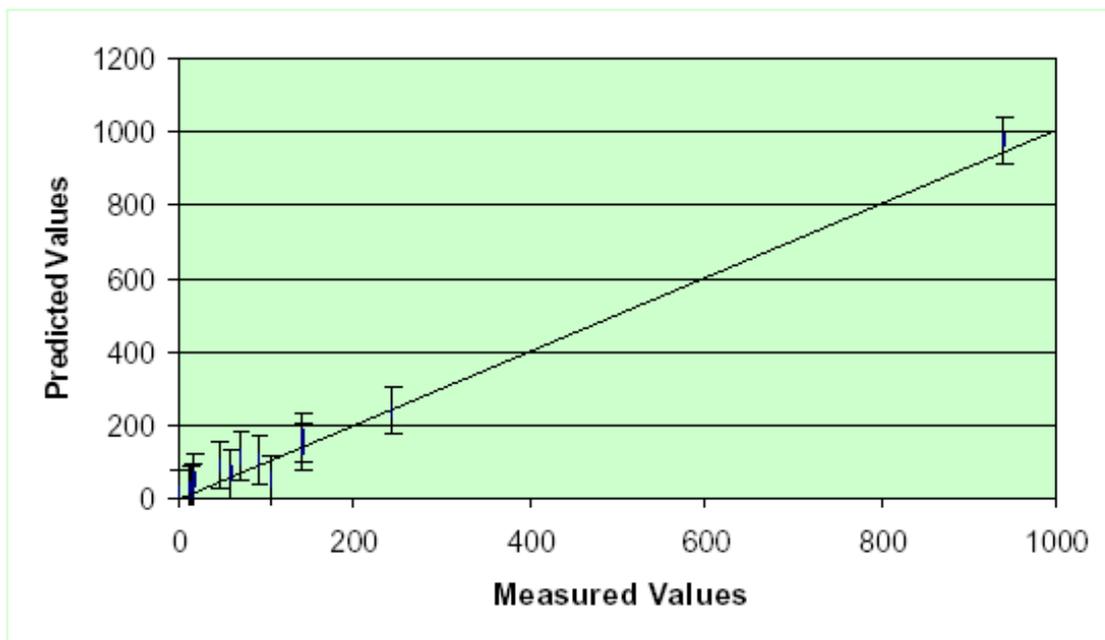


Figura 33. Correlazione tra l'approssimazione di primo grado e i dati misurati (mg/s) (fonte: Wayson R.L, et al., 2003)

7.7 Contributi alle emissioni delle fasi LTO

In Figura 34 si riportano i contributi delle fasi LTO all'emissione totale dei singoli inquinanti.

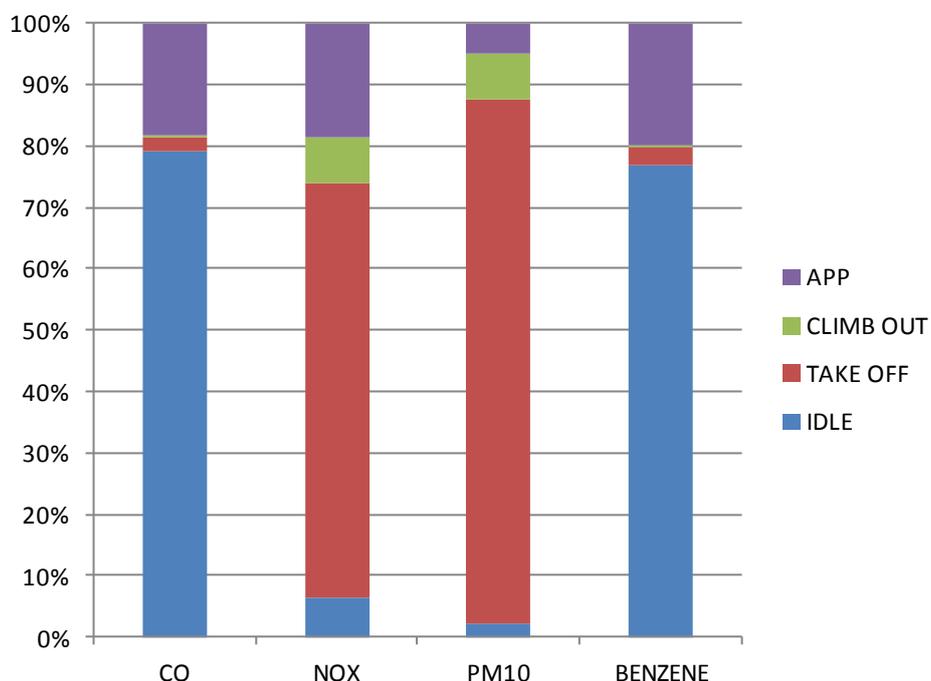


Figura 34. Contributo delle diverse fasi LTO all'emissione degli inquinati considerati nell'anno 2028.

Come già accennato in precedenza, la fase in cui viene emessa la maggior parte di ossidi di azoto e di particolato è il decollo (Take Off), in cui si produce, rispettivamente, il 67% ed l'64% delle

emissioni totali; per gli idrocarburi ed il monossido di carbonio la fase più importante è quella di attesa (IDLE) in cui viene prodotto oltre l'80% dell'inquinante, mentre circa il 14% è prodotto durante l'atterraggio (APP).

7.8 Sorgenti emissive diverse dagli aeromobili

Oltre alle emissioni esauste dagli aeromobili in attività sull'aeroporto, altre sorgenti emissive sono state considerate e in particolare:

- mezzi di supporto a terra per i velivoli (detti Ground Support Equipment, GSE);
- parcheggi di autovetture di breve e lungo termine;
- centrali termiche presenti;
- deposito di carburanti;
- mezzi pesanti dedicati alla movimentazione delle merci e il trasporto dei carburanti.

Le unità di potenza ausiliaria (APU, Auxiliary Power Unit) non sono considerate nel calcolo delle emissioni in quanto completamente elettrificate.

7.8.1 Ground Support Equipment (GSE)

All'arrivo dell'aeromobile a terra inizia una serie di operazioni che prevede la presenza di numeroso personale a terra con altrettanti mezzi in movimento. Tra i diversi interventi si possono sintetizzare i principali:

- movimentazione di scale, qualora l'aereo non sia dotato delle proprie scalette per la discesa del personale e dei passeggeri, che possono essere dotate di motori diesel (per aerei di grandi dimensioni) o portate a mano per velivoli di dimensioni minori;
- uso di autobus, solitamente diesel, per accompagnare i passeggeri da/verso i gate;
- intervento di autobotti (diesel) per il rifornimento degli aerei;
- invio di mezzi con tecnici deputati al controllo del corretto funzionamento ed altri per gli addetti alla sicurezza;
- movimentazione di nastri trasportatori e camioncini (belt loaders o baggage loaders) per i bagagli;
- presenza dei mezzi destinati a rifornire il servizio catering e per la pulizia dei servizi igienici;
- possibile uso di mezzi destinati a muovere l'aereo da e verso la definitiva posizione di parcheggio;
-

Il parco dei mezzi e delle attrezzature (GSE) utilizzate da SAT per le operazioni di assistenza agli aeromobili è costituito da:

- n° 64 mezzi alimentati a gasolio;
- n° 18 mezzi alimentati a benzina verde, compreso scooter;
- n° 51 mezzi alimentati elettricamente;
- n°12 trainati+barre

La stima delle emissioni atmosferiche riguarda i soli mezzi alimentati a gasolio o a benzina, elencati insieme a tutti gli altri veicoli e dettagliati per tipo, marca, modello e alimentazione (ALLEGATO B - GSE 2014.pdf).

In accordo con tali informazioni ai fini della stima delle emissioni per il 2014 sono stati considerate le unità ausiliarie di generazione di energia alimentate a gasolio (motogeneratori ATES) che in prospettiva al 2028 sono destinate ad essere progressivamente elettrificate, a partire da quelle maggiormente utilizzate il cui rinnovo avrà un impatto maggiore in termini di benefici ambientali, e pertanto non considerate nella stima delle emissioni.

Per i mezzi tipici di un aeroporto (air starter, automezzi, cestelli, mezzi anti congelamento, loader, motogeneratori, nastri, scale passeggeri, montacarichi, spazzaneve, tbl) sono stati utilizzati i fattori di emissione specifici per tipologia contenuti nel database del modello EDMS v. 5.0.2 (g / HP*ora) , riferiti all'anno 2028 (Tabella 8)

Tabella 8. Fattori di emissione specifici (g/HPhr) (fonte: EDMS v.5.0.2)

YEAR	TYPE	FUEL	CO_G_HPHR	HC_G_HPHR	NOX_G_HPHR	PM_G_HPHR
2028	Air Conditioner	D	0.09804	0.132078	0.282132	0.010376
2028	Air Start	D	0.136769	0.134336	0.520154	0.018438
2028	Aircraft Tractor	D	0.147063	0.134237	0.365537	0.016832
2028	Baggage Tractor	D	0.39206	0.132072	0.282788	0.010204
2028	Belt Loader	D	0.263914	0.132094	0.293613	0.010707
2028	Bobtail	D	0.160983	0.133156	0.333877	0.016556
2028	Cabin Service Truck	D	0.131317	0.132194	0.180902	0.011556
2028	Cargo Loader	D	0.258942	0.134666	0.319316	0.01642
2028	Cargo Tractor	D	0.623988	0.144188	0.585134	0.047646
2028	Cart	D	0	0	0	0
2028	Catering Truck	D	0.131317	0.132194	0.180902	0.011556
2028	Deicer	D	0	0	0	0
2028	Fork Lift	D	0.384912	0.16236	0.584476	0.052399
2028	Fuel Truck	D	0.130274	0.131992	0.180819	0.011283
2028	Hydrant Truck	D	0.147609	0.135945	0.246115	0.012224
2028	Lavatory Truck	D	0.139811	0.134146	0.211357	0.011787
2028	Lift	D	0.383688	0.162145	0.582147	0.052189
2028	Other	D	0.156893	0.132835	0.324419	0.015331
2028	Passenger Stand	D	0.147521	0.135924	0.245669	0.012214
2028	Service Truck	D	0.13228	0.132435	0.184907	0.011399
2028	Sweeper	D	0.623875	0.144181	0.585524	0.047963

I dati di potenza e fattore di carico necessari per valutare le emissioni dei mezzi sono stati ricavati dai dati forniti da SAT per lo studio del 2008, estrapolando i dati relativi ai nuovi mezzi da quelli riferiti a veicoli di analoga destinazione d'uso, e sono riportati nella tabella seguente.

Tabella 9. Potenze e fattori di carico (fonte: SAT)

TYPE	HORSE POWER	LOAD FACTOR
Air Start	425	0.9
Aircraft Tractor	617	0.8
Baggage Tractor	71	0.55
Belt Loader	71	0.5
Cargo Loader	80	0.5
Catering Truck	71	0.53
Deicer	263	0.95

Fork Lift	55	0.3
Generator	158	0.82
Hydrant Truck	235	0.7
Lift	115	0.5
Passenger Stand	65	0.57
Sweeper	53	0.51

Per automezzi e bus ci si è basati sui fattori di emissione (g/km) estratti dal database Copert 4 v.10.

Tabella 10. Fattori di emissione (g/km) (fonte: COPERT 4 v.10)

CATEGORY	CO	NOX	NMVOG	PM10
unit	g/km	g/km	g/km	g/km
MOTO	2.03	0.227	0.796	0.0123
AUTO diesel	0.452	0.331	0.0975	0.0228
AUTO benzina	2.03E+00	1.35E-01	2.91E-01	1.46E-02
AUTOBUS	1.49	0.8	0.0369	0.107

I dati di percorrenza relativi ai mezzi comuni son stati attinti dal database fornito da SAT per lo studio del 2008.

Tabella 11. Percorrenze (km/anno) (fonte:SAT)

modello	categoria	km / anno
AUTOMEZZI	AUTO diesel	20200
AUTOMEZZI FIAT PANDA 4 POSTI B	AUTO benzina	12148
AUTOMEZZI FIAT PANDA VAN B	AUTO benzina	11145
AUTOMEZZI RENAULT KANGOO 4X4 B	AUTO benzina	32116
AUTOMEZZI SAAB 9.5SW FRICTION TESTER B	AUTO benzina	1302
BUS	AUTOBUS	11264
CICLOMOTORE PIAGGIO SCOOTER FREE B	MOTO	4237

Tra il 2014 e il 2028 è prevista una sostituzione del parco mezzi a benzina a favore di quelli elettrici che porterà ad una riduzione di consumi da 120000 l/a a 10000 l/a, con conseguente riduzione delle emissioni inquinanti prodotte da questa categoria di mezzi di rampa.

Per tutti i mezzi di più recente introduzione è stato estrapolato un dato basandosi su attrezzature di tipo analogo. Son quindi state calcolate le emissioni annuali relative a ciascun mezzo, associate spazialmente alla pista aeroportuale e modulate in analogia all'attività dei velivoli

7.8.2 Centrali termiche

Le Centrali Energetiche presenti sono impiegate per il riscaldamento degli ambienti, la produzione di acqua calda per usi igienico sanitari e per l'autoproduzione di energia elettrica (Cogenerazione) e sono tutte alimentate a gas naturale.

Dai documenti forniti da SAT si evince come i piani di sviluppo 2015-2018 prevedano l'ampliamento delle superfici coperte con l'inserimento di una nuova Centrale Termica (NCT), a servizio della nuova costruzione e in sostituzione della Centrale Termica dell'Aerostazione CT-A, caratterizzata da una potenzialità di 5,1 MWt. Il suo utilizzo sarà principalmente deputato alla sostituzione della CT-A per le utenze ad alta temperatura dell'attuale Aerostazione e fungerà da integrazione/emergenza per le utenze a bassa temperatura della nuova costruzione.

Nel 2028, anno di riferimento del presente studio, le centrali CTA, CTB, CTE non saranno più in funzione; l'impianto di cogenerazione (COGE) funzionerà a tenore massimo per tutti i 365 giorni dell'anno mentre la NCT funzionerà al 50% della sua potenzialità durante i 150 giorni della stagione invernale e al 25% per il restante periodo dell'anno.

Queste informazioni, insieme al consumo di metano riportato in Tabella 12, sono state usate per l'applicazione dei fattori di emissione più aggiornati (EEA, 2013).

Le emissioni delle centrali termiche sono state quindi calcolate applicando fattori di emissione di combustione del metano in centrali termiche e applicando opportune modulazioni temporali.

Tabella 12. Quadro emissivo e parametri di uscita fumi delle centrali.

	rif.	Utenza	Altezza (m)	Diametro (m)	Temp (K)	Vel (m/sec)	Pot. Termica Nom. Installata (kW)		Consumo Metano (m3/anno)		Fattore di utilizzo rispetto a 2014	NOX (t/anno)		CO (t/anno)		PM10 (t/anno)	
							2014	2028	2014	2028		2028	2014	2028	2014	2028	2014
1	CTA	Aerostazione					2224	-	5 540	-	0.00	6.7E-03		4.8E-03		3.8E-02	
2	CTB	Ex Merci					930	-	-	-	0.00						
3	CTC	Officina Mezzi	6	0.25	409	0.06	105	105	19 000	13 300	0.70	2.3E-02	1.6E-02	1.6E-02	1.1E-02	1.3E-01	9.2E-02
4	CTD	Catering	5	0.2	373	0.16	190	190	7 000	4 900	0.70	8.4E-03	5.9E-03	6.0E-03	4.2E-03	4.8E-02	3.4E-02
5	CTE	Edificio A	20	0.15	373	8.01187	1000	1000	3 081	3 081	1.00	3.7E-03	3.7E-03	2.7E-03	2.7E-03	2.1E-02	2.1E-02
6	CTF	VV.F	8.5	0.3	373	0.12	291	291	20 000	14 000	0.70	2.4E-02	1.7E-02	1.7E-02	1.2E-02	1.4E-01	9.7E-02
7	CTG	Cargo	20	0.3	373	0.86	2250	2 250	34 200	61 560	1.80	4.1E-02	7.4E-02	3.0E-02	5.3E-02	2.4E-01	4.3E-01
8	COGE	Cogeneratore	25	0.3	373	11.91799	2855	2 855	2 450 000	2 450 000	1.00	1.9E+00	1.9E+00	1.7E+00	1.7E+00	1.2E-03	1.2E-03
9	NCT	Ampl+ Aerost	20	0.3	373	0.9	0	5 100	-	290 000		3.5E-01		2.5E-01		2.0E+00	
totale									2 538 821	2 836 841		2.05	2.41	1.77	2.03	0.61	2.67

7.8.3 Parcheggi

Tra le emissioni diffuse da considerare ci sono quelle prodotte dal traffico veicolare nei parcheggi, costituito essenzialmente da mezzi privati dei passeggeri che si servono di auto privata o a noleggio e degli addetti aeroportuali. Dalle comunicazioni fornite da SAT esistono diverse aree adibite a parcheggio, localizzate in Figura 35 e raggruppate per gli scopi modellistici all'interno di un'unica sorgente emissiva.



Figura 35. Planimetria indicativa dell'ubicazione dei parcheggi al 2028

Dalle comunicazioni fornite da SAT per ciascun'area adibita a parcheggio, le caratteristiche di capienza e di utilizzo effettivo previste per il 2028 sono così sintetizzabili:

	posti auto	ingressi/gg	distanza From-To Est		distanza From-To Ovest	
			ingresso	uscita	ingresso	uscita
P2	1078	555	1 020	450	330	1 050
P3	326	2 467	1 070	245	380	845
P4	3099	126	1 045	1 000	1530	1 600
P5 (ex Aviaz. Gener.)	126	89	205	165	680	760
P7 (area ex borgo Cariola)	254	75	405	365	880	960
P8 (Rent a Car e porzione fast park)	230	89	235	195	710	790
RENT A CAR (fast park dal 2023)	1803	602	235	195	710	790
P Addetti Aeroportuali	300	568	905	890	215	280
P6 bus	24	8	135	95	610	690

Per calcolare le emissioni dei veicoli che insistono sui parcheggi son state considerate le seguenti informazioni:

- è stata considerata la distanza totale percorsa dai veicoli all'interno di ciascun area di parcheggio tra l'istante di ingresso e quello di uscita (la massima considerando in ogni caso gli accessi Est e Ovest);
- sono stati individuati i flussi giornalieri (ingressi/giorno) ed il numero di veicoli parcheggiati (posti auto * percentuale di utilizzo);

- è stata caratterizzata la flotta dei veicoli circolanti sulla base del database ACI relativo alla Regione Toscana per l'anno 2013, proiettata all'anno 2028 sulla base di un trend di rinnovo del parco; la distribuzione dei veicoli nelle varie categorie COPERT è in seguito avvenuta anche considerando la variazione di percorrenza annuale media per età dei veicoli.
- È stata introdotta una riduzione omogenea relativa all'uso del mezzo privato (-7.38 %) legata all'intervento People Mover previsto in progetto.

Le emissioni veicolari associate ai parcheggi per lo scenario 2014 sono state calcolate in proporzione al minor volume di traffico aereo (71.8% di quanto previsto per il 2028) considerando la domanda base in assenza dell'intervento People Mover, ipotizzando un legame diretto tra gli utenti delle aree di sosta e i viaggiatori aeroportuali.

Percorrenze veicolari effettive, numero di mezzi in sosta e composizione della flotta, unitamente a ipotesi sulla velocità di percorrenza dei mezzi e altri parametri meteorologici sito specifici, hanno permesso di alimentare il software TREFIC che implementa la metodologia COPERT4 v.10. Questa metodologia include le emissioni dei veicoli stradali in moto e parcheggiati, in quest'ultimo caso limitate ai composti organici volatili per via di perdite evaporative. Sono quindi state calcolate le emissioni aggregate per l'area comprendente l'insieme dei parcheggi in progetto.

7.8.4 Depositi di carburante

Ad ogni atterraggio è necessario integrare la quantità di carburante contenuta nei serbatoi degli aeromobili (mediamente si stima un rifornimento per aeromobile pari a 5000 lt); per questo motivo c'è la necessità di disporre, nei pressi delle piazzole di sosta degli aerei, di serbatoi di combustibile, di dimensioni adeguate al numero di aerei in passaggio e dislocati in aree ad essi destinate.

Nell'anno di riferimento del presente studio, i depositi carburanti avio saranno 3 per una volumetria complessiva di 1350 mc, e saranno collocati all'estremità nord del sedime aeroportuale, così come riportato in Figura 36



Figura 36. Planimetria dell'ubicazione dei depositi di carburante

Il rifornimento di carburante avverrà mediante il supporto di autobotti, che percorreranno il tracciato rappresentato in Figura 37 per raggiungere i depositi provenendo dalla viabilità ordinaria.



Figura 37. Percorso indicativo effettuato dalle autobotti per rifornire il deposito di carburante

SAT ha fornito il numero di viaggi giornalieri per il 2028 in riferimento al periodo di massima attività del terminal (estate), considerati rappresentativi per tutto il corso dell’anno in ottica cautelativa:

	2028 (previsione)	tot
SUMMER: giugno-agosto	lunedì-venerdì	22
	sabato	19
	domenica	16

Anche per questi mezzi le emissioni son state stimate mediante l’utilizzo del programma TREFIC, associandoli come categoria emissiva a veicoli pesanti articolati di capacità 34-40 ton, classe normativa euro VI, e spazialmente associate alla sorgente lineare presentata nella figura precedente.

Anche per le autobotti per la stima delle emissioni al 2014 si è partiti dalle emissioni relative al 2028 e si è applicata la stessa riduzione dichiarata per i volumi di traffico aereo, assumendo proporzionalità tra essi e la richiesta di rifornimenti.

7.8.5 Mezzi cargo

Per il rifornimento di merci è prevista una flotta specifica in movimento verso / da il Cargo village, lungo il percorso rappresentato in Figura 38:



Figura 38. Percorso indicativo effettuato dai mezzi cargo per la distribuzione delle merci.

Anche per questi mezzi è stato fornito il numero di movimenti previsti nel 2028, qui sintetizzati come totale giornaliero ma dettagliati ora per ora nei documenti. Le tabelle riportano il dato di picco stimato per il periodo estivo, cautelativamente considerato rappresentativo per tutto l’anno :

2028	TIPOLOGIA	TOTALE giornaliero
DESCRIZIONE		
voli gommati Cargo Handling	autotreni	4
Cargo Handling sfuso	navette tipo ducato	30
voli CARGO Cargo Handling	autotreni	2
navette Fed Ex su Cargo Handling	mvt furgoni	8
navette Fed Ex magazzino Fed Ex	mvt furgoni	78
Navette DHL magazzino DHL	mvt cassonati (800kg di carico)	56
veicoli operatori Cargo Village	mvt auto	142

Sulla base della tipologia i mezzi son stati associati alle tipologie Copert disponibili, considerando per le auto una distribuzione analoga a quella utilizzata per i parcheggi, per i veicoli commerciali leggeri (furgoni, navette e cassonati) la classe diesel normata Euro VI e per i mezzi pesanti (autotreni) la classe di articolati con capacità 34-40 ton normati euro VI.

Come dato ulteriore di attività è stata fornita la distanza percorsa da ciascun mezzo che opera il trasporto merci (Tabella 13) utile per applicare precisamente i fattori di emissione Copert 4 v.10 (g/km).

Tabella 13. Distanze medie percorse dai mezzi cargo per accedere all'area di carico-scarico

2028	m
distanze coperte in INGRESSO	180
distanze coperte in USCITA	180

Le emissioni totali stimate, considerando velocità medie di percorrenza di 20 km/h nel tratto di accesso-uscita dall'area di carico-scarico, son state anche in questo caso associate alla sorgente lineare presentata nella figura soprastante (Figura 38). Per l'anno 2014 le emissioni relative al rifornimento merci sono state calcolate in proporzione al minor traffico aereo considerato (volumi al 2014 pari al 71.8% di quelli previsti per il 2028).

7.9 Sintesi delle emissioni simulate

A conclusione del presente capitolo, le seguenti tabelle riassumono complessivamente le emissioni degli inquinanti considerati prodotte dalle differenti tipologie di sorgenti all'interno del sedime aeroportuale.

Tabella 14. Riepilogo delle caratteristiche emissive delle varie sorgenti presenti all'interno del sistema aeroportuale di Pisa San Giusto (t/anno) (situazione al 2028).

	CO	NO _x	PM10	C ₆ H ₆
Stazionamento e movimento nei parcheggi	12.4	9.3	0.6	0.03
Impianti termici	2.0	2.4	2.7	0.0
Autobotti e deposito	16.0	42.3	1.7	0.7
Operazioni di supporto a terra	5.7	6.3	0.0	0.4
Cargo	0.0	0.0	0.0	0.0
Aerei in fase di attesa	207.9	24.9	0.0	0.4
Aerei in fase di decollo	5.4	257.8	0.5	0.0
Aerei in fase di salita	1.1	27.8	0.0	0.0
Aerei in fase di atterraggio	47.8	71.4	0.0	0.1
TOTALE	298.4	442.2	5.6	1.6

Tabella 15. Riepilogo delle caratteristiche emissive delle varie sorgenti presenti all'interno del sistema aeroportuale di Pisa San Giusto (t/anno) (situazione attuale 2014).

	CO	NO _x	PM10	C ₆ H ₆
Stazionamento e movimento nei parcheggi	9.5	7.2	0.5	0.02
Impianti termici	1.8	2.0	0.6	0.0
Autobotti e deposito	11.5	30.4	1.3	0.5
Operazioni di supporto a terra	8.9	9.0	0.2	0.3
Cargo	0.0	0.0	0.0	0.0
Aerei in fase di attesa	149.3	17.9	0.0	0.3
Aerei in fase di decollo	3.9	185.1	0.4	0.0
Aerei in fase di salita	0.8	20.0	0.0	0.0
Aerei in fase di atterraggio	34.4	51.3	0.0	0.1
TOTALE	220.1	323.0	3.0	1.2

Per valutare complessivamente il contesto emissivo si può fare riferimento alle proiezioni delle emissioni calcolate con il modello GAINS-Italia, nella sua versione più aggiornata disponibile; in particolare per la Regione Toscana si può fare riferimento allo scenario NEC_SEN_2014 in cui le

emissioni, calcolate tenendo conto dello Scenario Energetico Nazionale aggiornato al 2014 e sono state armonizzate con l'inventario regionale.

Nel complesso si evince che il comparto aeroportuale della regione Toscana (composto essenzialmente dall'aeroporto di Firenze e da quello di Pisa) rappresenta un contributo alle emissioni di tutti gli inquinanti considerati inferiore all'1%; pertanto, pur registrando un aumento nel corso degli anni di tali emissioni, se confrontato con i trend generali in diminuzione delle emissioni complessive regionali (così come riportato in Figura 39, con l'eccezione del biossido di azoto per il quale si stima una inversione di tendenza per alcuni settori produttivi), si può concludere come i livelli d'inquinamento atmosferico sono attesi rimanere uguali o inferiori rispetto agli attuali.

emissioni regionali (kt/anno)

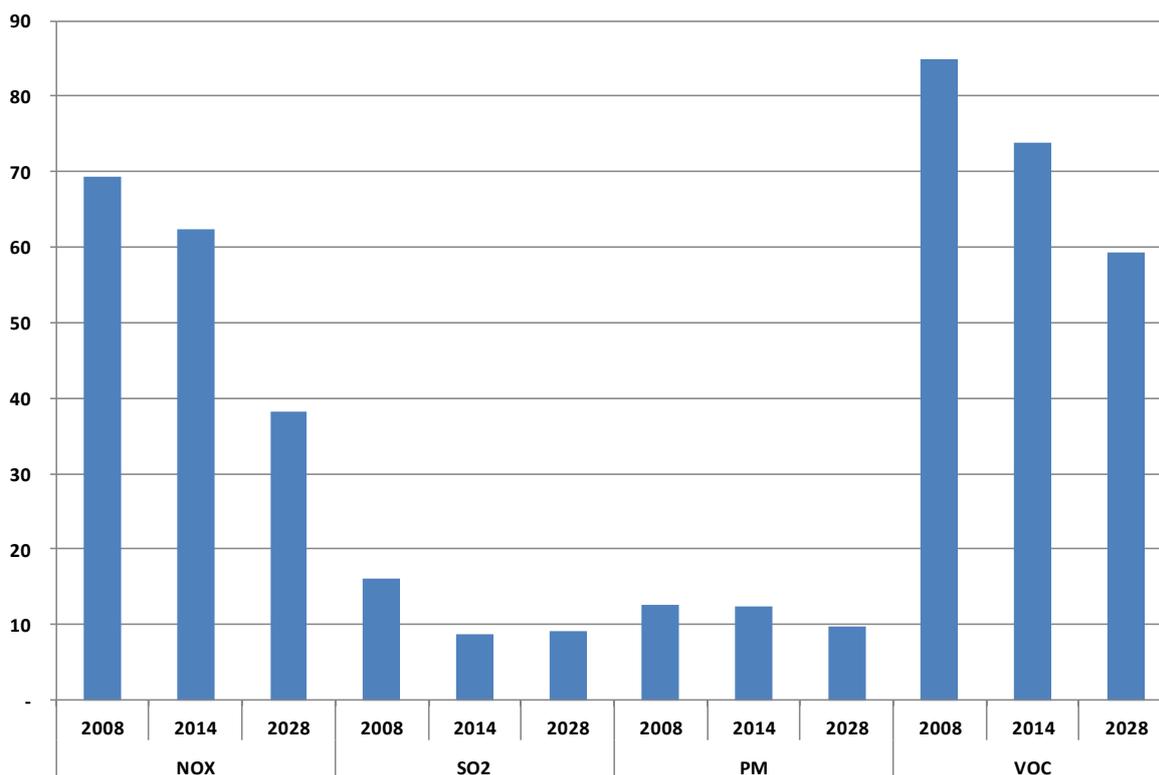


Figura 39. Trend di evoluzione delle emissioni inquinanti atmosferiche in Regione Toscana secondo il modello GAINS-Italia.

8 Simulazioni modellistiche di dispersione

A partire dai dati meteorologici analizzati nel capitolo 4 e dall'insieme di emissioni sintetizzate nel paragrafo 7.9, il calcolo delle concentrazioni in aria al suolo dovute al sistema aeroportuale di Pisa San Giusto è stato effettuato utilizzando un modello matematico diffusionale di tipo gaussiano, denominato ARIA Impact, e caratterizzando opportunamente la distribuzione spaziale delle sorgenti.

La versione del software utilizzata in questo studio è la 1.8, rilasciata nel dicembre 2013. Per maggiori approfondimenti circa gli algoritmi implementati nel modello si rimanda al manuale d'uso fornito in allegato.

8.1 Descrizione del modello ARIA Impact

ARIA Impact è composto da un modulo amichevole d'interfaccia a finestre grafiche e di un modello gaussiano coerente con le raccomandazioni della US E.P.A. (Environmental Protection Agency).

Le equazioni di base del modello gaussiano sono quelle classiche che descrivono la dispersione rettilinea di un pennacchio in condizioni stazionarie. Tali equazioni, con alcune modifiche, sono usate per trattare diverse tipologie di sorgenti, classificabili in tre categorie principali: sorgenti di tipo puntiforme, sorgenti di tipo areale e sorgenti di tipo lineare.

L'equazione gaussiana di base, relativa ad una sorgente puntiforme con pennacchio stazionario, utilizzata per il calcolo della concentrazione media oraria ad una distanza sottovento x e ad una distanza laterale y , è la seguente:

$$\chi = \frac{QKVD}{2\pi u_s \sigma_y \sigma_z} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2}$$

dove:

χ	concentrazione oraria	(massa per unità di volume)
Q	rateo di emissione	(massa per unità di tempo)
K	coefficiente per trasformazione le concentrazioni nelle unità di misura desiderate	
V	termine di dispersione verticale	
D	termine di decadimento	
σ_y	deviazione standard della distribuzione laterale delle concentrazioni (m)	
σ_z	deviazione standard della distribuzione verticale delle concentrazioni (m)	
u_s	velocità del vento media alla quota di rilascio	(m/s)

Il termine di dispersione verticale V , include gli effetti dovuti all'altezza fisica del camino, all'innalzamento del pennacchio (Briggs, 1975), alla quota dei recettori, allo strato di rimescolamento, alla deposizione secca, ecc.

Dalla formula si può comprendere come, per basse velocità del vento, la concentrazione calcolata assuma valori molto elevati; la letteratura ha evidenziato che per $u_s < 1$ m/s tali valori sono sovrastimati. Per questo motivo, ARIA Impact include un algoritmo di calcolo specifico (della classe dei modelli "a puff") per basse velocità del vento, in grado di migliorare il valore calcolato, in cui

sostanzialmente la velocità del vento u_s viene sostituita con un coefficiente di dispersione longitudinale σ_x .

La velocità del vento, se necessario, viene estrapolata alla quota di emissione secondo la seguente legge di potenza:

$$u_s = u_m \left(\frac{h_s}{z_m} \right)^p$$

dove u_m è la velocità del vento misurata alla quota z_m , mentre all'esponente p , in mancanza di informazioni fornite dall'utente, vengono assegnati dal modello valori standard funzione della categoria di stabilità.

I parametri di dispersione orizzontale e verticale del pennacchio per una sorgente puntiforme, sono rappresentati nei grafici seguenti in funzione della distanza sottovento, della categoria di stabilità secondo Pasquill o McElroy e dell'opzione "rural" o "urban" mode. In Figura 40 sono riportate curve classiche dei coefficienti di dispersione orizzontale e verticale.

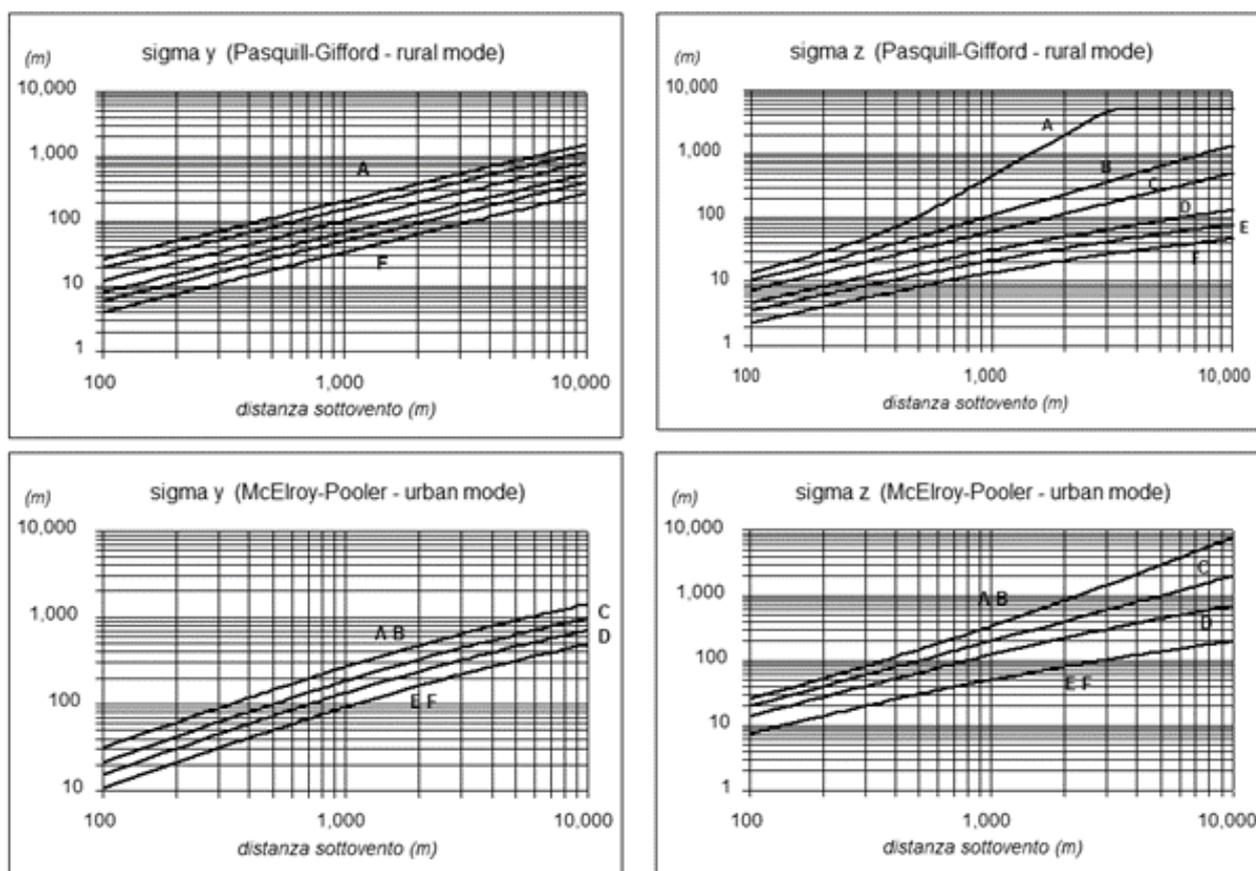


Figura 40. Parametri di dispersione orizzontale e verticale

Il modello gaussiano adottato è un modello analitico, determina cioè in maniera esatta la concentrazione d'inquinante al suolo sulla base della formula presentata. Non avendo quindi da risolvere numericamente equazioni differenziali in un dominio discreto, non è affetto dall'incertezza numerica che deriva, nel caso di modelli avanzati, dalla risoluzione del dominio discreto adottato. Tuttavia, la risoluzione del grigliato di calcolo delle concentrazioni e la dimensione delle sorgenti influenzano le concentrazioni massime calcolate, in quanto introducono una distanza minima recettore - sorgente tanto maggiore quanto maggiore è il passo di griglia: in questo senso, permane una incertezza numerica nel calcolo delle concentrazioni massime, incertezza che si riduce rapidamente con la distanza dalla sorgente.

Nel caso di venti deboli, in luogo del modello a pennacchio viene, come detto, utilizzata una formulazione a puff gaussiani. Il sovrainnalzamento viene calcolato utilizzando la formula di Holland e l'emissione viene poi discretizzata tramite la generazione a cadenza regolare (tipicamente dell'ordine delle decine di secondi, in funzione della velocità del vento, per assicurare la continuità del pennacchio) di un certo numero di puff. La simulazione della dispersione avviene mediante il calcolo delle traiettorie dei loro centri di massa (trasporto da parte del vento) e della diffusione attorno ad essi. La velocità orizzontale utilizzata corrisponde a quella in corrispondenza del baricentro del puff; la velocità verticale nel caso di particolari è data invece dalla combinazione della componente verticale del vento e della velocità di sedimentazione, funzione della granulometria.

La concentrazione dei puff intorno ai loro centri di massa è assunta di tipo gaussiano, con distribuzione caratterizzata dagli scarti orizzontale e verticale. Tali scarti evolvono nel tempo, per simulare la diffusione del pennacchio nell'atmosfera circostante, sulla base delle formule dei coefficienti di dispersione. Il calcolo è effettuato in funzione della stabilità atmosferica e della distanza percorsa dal puff a partire dal suo rilascio in corrispondenza della sorgente.

La modellizzazione a puff coincide con quella a pennacchio rettilineo quando il vento è uniforme su tutto il dominio di calcolo, la velocità verticale è nulla, il terreno è pianeggiante ed il flusso d'uscita al camino è costante.

8.2 Ripartizione delle emissioni nelle sorgenti virtuali utilizzate

Il set di sorgenti virtuali simulate è stato scelto, in tipo, numerosità e dimensioni, sulla base dell'entità delle emissioni stimate, disaggregate per fase LTO, e delle rotte di decollo/atterraggio previste.

Le rotte sono state seguite grosso modo fino all'uscita degli aviogetti dallo strato rimescolato, fissato a 915m (3000ft).

Per quanto riguarda il loro percorso, l'atterraggio è stato sempre considerato da sud, mentre i decolli sono suddivisi nelle due direzioni in base ai dati forniti.

Tutte le rotte sono state considerate rettilinee e con gradiente di salita costante pari al minimo stabilito nelle procedure anti-rumore. In particolare, in conformità con quanto previsto dal piano di mitigazione dell'impatto acustico sulla città di Pisa, le sorgenti in cui sono state discretizzate le emissioni atmosferiche inquinanti degli aeromobili in fase di decollo (TO - Take Off) e salita (CO - Climb Out) verso la città (direzione 04) seguono il profilo di salita "ICAO A" più ripido rispetto a quello standard contenuto nella AIP (Aeronautical Information Publication); il gradiente di salita utilizzato più che doppio rispetto all'AIP è stato determinato considerando che, secondo il profilo ICAO A, l'altezza di 1000m (convenzionalmente pari allo spessore del PBL nella metodologia ICAO di stima delle emissioni atmosferiche) è raggiunta a una distanza orizzontale di circa 6km.

La tabella seguente riassume i parametri caratteristici delle varie rotte.

Tabella 16. Parametri caratteristici delle rotte durante il periodo invernale

Periodo	Rotta	Atterraggio/Decollo	Direzione del moto	Ripartizione voli	Gradiente di salita/discesa
invernale	04R	A	NE	100%	5.1%
	04R	D	NE	46%	16.7%
	22L	D	SW	54%	5.5%
estivo	04R	A	NE	100%	5.1%
	04R	D	NE	57%	16.7%
	22L	D	SW	43%	5.5%

Ogni rotta è stata suddivisa in un numero opportuno di sorgenti volumetriche, in modo che la distanza tra due baricentri successivi fosse pari alla risoluzione della griglia di calcolo (100m). La Figura 41 mostra una rappresentazione della proiezione orizzontale sul dominio di calcolo delle sorgenti utilizzate:

- I cerchi rosa e mattone rappresentano la discretizzazione delle rotte di decollo e salita in sorgenti volumetriche;
- I quadrati blu rappresentano la discretizzazione della rotta di atterraggio;
- I cerchi verdi localizzano i camini delle centrali termiche;
- L'area rossa rappresenta la sorgente parcheggi;
- L'area azzurra rappresenta la sorgente che include le attività a terra (fasi di taxi in e out), mezzi di supporto, depositi di carburante e attività di rifornimento;
- Le linee gialle e verdi rappresentano i percorsi rispettivamente dei mezzi pesanti di trasporto verso l'area cargo e delle autobotti.

Le due sorgenti areali sono state considerate al suolo.

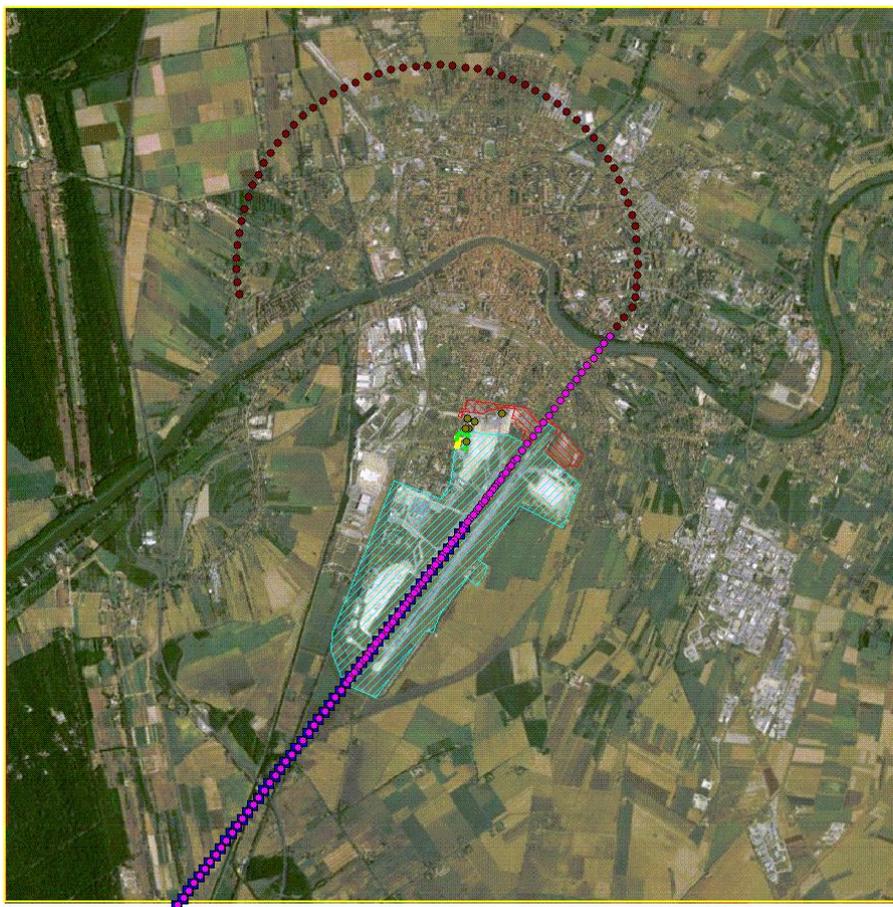


Figura 41. Mappa 2D delle sorgenti simulate

8.3 Descrizione delle simulazioni e risultati

Si sono calcolate le concentrazioni in aria al suolo dovute al sistema aeroportuale di Pisa San Giusto per gli anni 2014 e 2028, calcolando per ciascun periodo gli indicatori statistici per tutti gli inquinanti esaminati da confrontare con i limiti di legge. Le emissioni, assegnate in valore orario a ciascuna sorgente, sono quelle determinate come descritto nel corso della seconda fase del presente studio. Tali emissioni sono state disaggregate sia temporalmente sia spazialmente sulle rotte considerate, sulla base degli effettivi passaggi di aeromobili, così come derivato dai dati SAT.

In Figura 42 si riportano i profili di disaggregazione temporale ottenuti sulla base del traffico previsto sull'aeroporto dal Masterplan, applicati alle sorgenti per rappresentare al meglio l'effettiva attività dello scalo nel corso dei mesi.

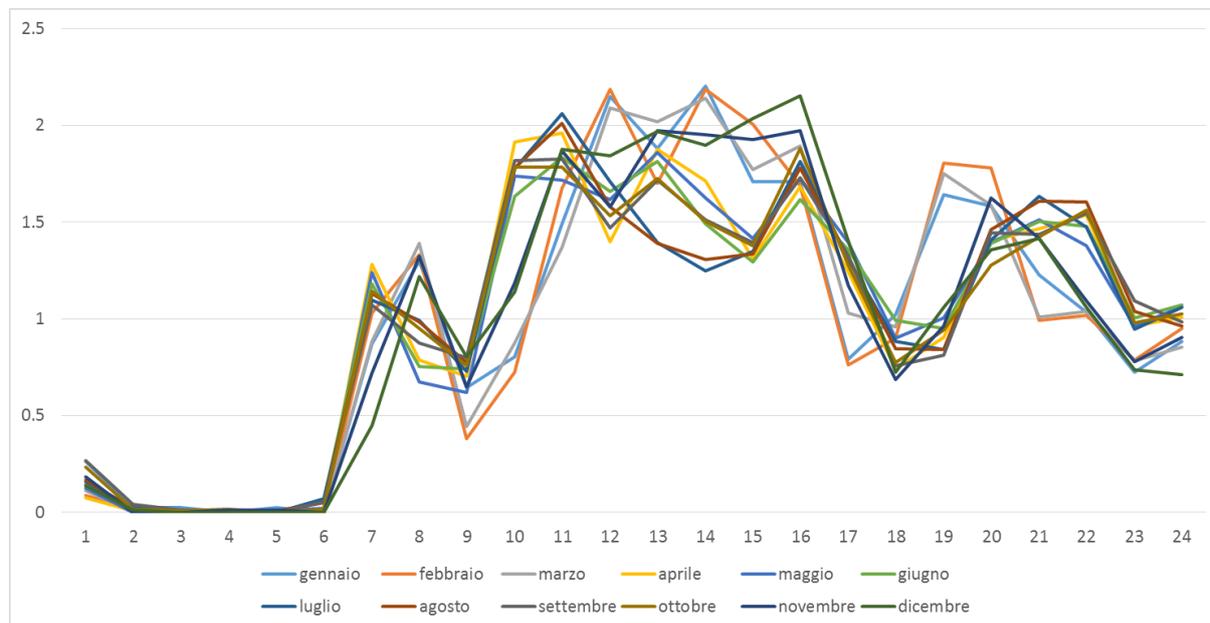


Figura 42. Profili di modulazione oraria utilizzati nello studio di dispersione.

8.3.1 Simulazione per l'anno 2014

In base ai fattori di forma presentati in Figura 42, alle condizioni meteorologiche ed alle caratteristiche emissive, sono state fatte le simulazioni per l'intero anno 2014, i cui risultati sono riportati dalla Figura 43 alla Figura 48 mentre in Tabella 17 sono sintetizzati i massimi di griglia.

Le mappe d'isoconcentrazione ottenute sono commentate singolarmente in seguito e nel complesso non presentano particolari criticità, sia sul dominio in generale che per quanto riguarda le ricadute sull'abitato della città di Pisa.

Tabella 17. Sintesi delle concentrazioni stimate dal modello ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – anno 2014

Inquinante	Parametro	Massimo di griglia
NO ₂	Media annuale	6.04
	99.8 percentile orario	94.3
Benzene	Media annuale	0.02
CO	Massimo delle medie 8-orarie	36.8
PM10	Media annuale	2.1
	90.4 percentile giornaliero	4.8

Il massimo delle medie 8-orarie di CO, come previsto dal D.Lgs. 155/2010, risulta assai basso (raggiungendo un massimo di griglia pari a 36.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) e tale da non impensierire rispetto ai livelli limite pari a 10 mg (10000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Figura 43). I livelli relativamente più elevati si concentrano lungo lo sviluppo longitudinale della pista.

La media annuale di NO₂ (Figura 44) si assesta ben al di sotto del limite di legge raggiungendo un massimo di griglia pari a 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ verso l'estremità SW della pista perché influenzata dagli atterraggi (che sono stati assegnati per il 100% da quella direzione) e i decolli (che verso quella

direzione sono stati associati a un gradiente di salita inferiore). Riguardo ai risultati del 99.8 percentile del NO_2 , (Figura 45) si raggiunge un valore massimo assoluto di $94.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in corrispondenza di quasi tutta l'area delle piste, ben al di sotto del limite di legge pari a $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A questo proposito si tenga presente che le concentrazioni di NO_2 non derivano direttamente dalle simulazioni modellistiche ma sono ricavate utilizzando la curva di regressione presentata nel paragrafo 5.3 che come detto porta a stimare i massimi livelli di concentrazione di NO_2 possibili. Le concentrazioni calcolate mostrano però un decadimento piuttosto rapido, dato che in corrispondenza della città si registrano livelli attorno a $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Per quanto riguarda le concentrazioni di particolato, i valori medi simulati restano ben al di sotto del limite di legge ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) presentando un massimo di griglia di $2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e si concentrano nei pressi delle centrali poste a nord delle piste (Figura 46), come del resto i valori del 90.4 percentile delle medie giornaliere, che raggiungono un massimo di $4.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sempre localizzato nella stessa area (Figura 47)

Il benzene, emesso per la maggior parte durante la fase di attesa degli aeromobili e di refilling dei depositi di carburante da parte delle autobotti, raggiunge un massimo delle medie orarie sul periodo pari a $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 48), e mostra una distribuzione pressoché omogenea entro il perimetro dell'aeroporto.

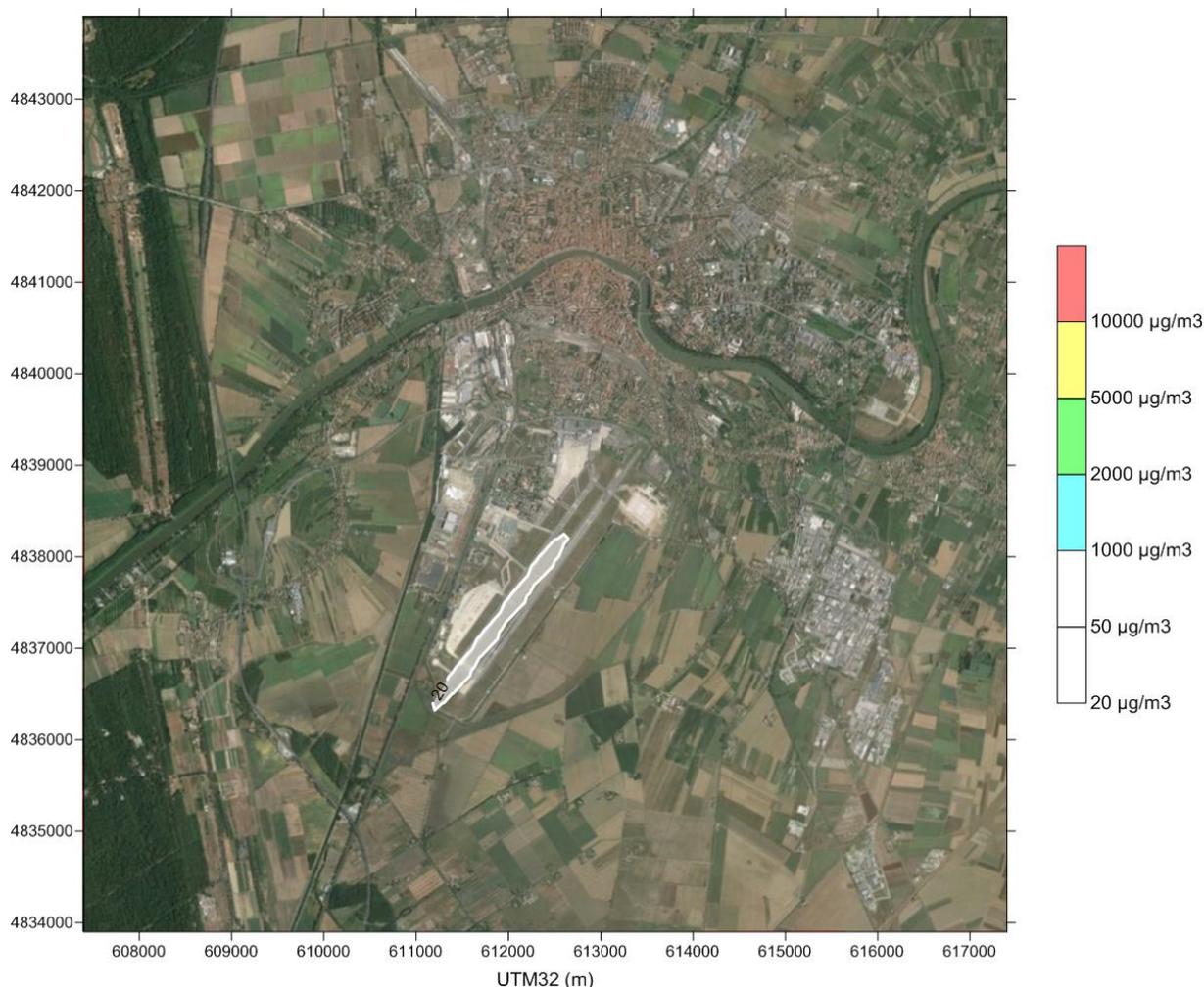


Figura 43. Massima media mobile 8-oraria giornaliera di CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – anno 2014



Figura 44. Media annuale di NO₂ (µg/m³) – anno 2014

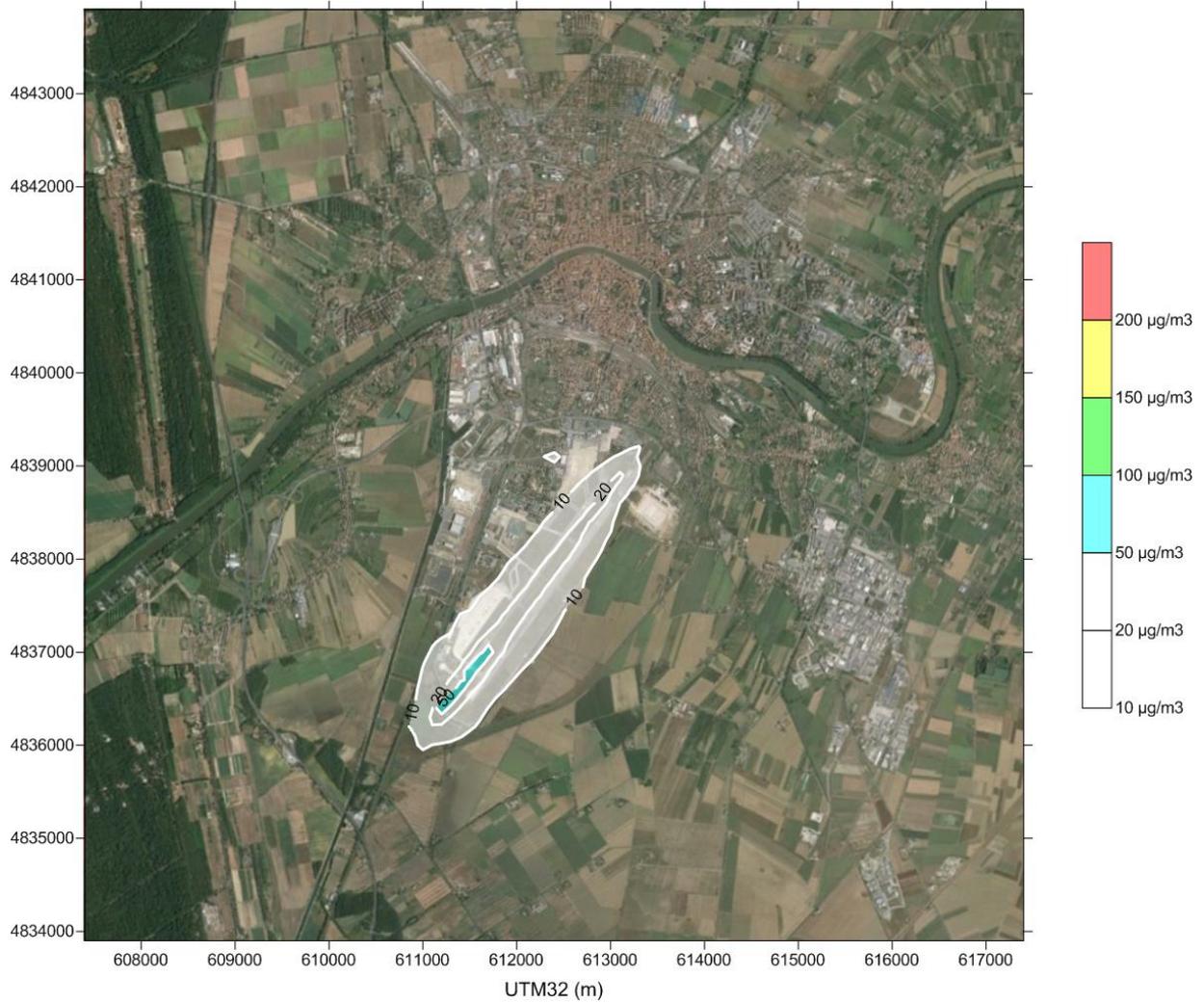


Figura 45. 99.8° percentile delle concentrazioni medie orarie di NO₂ (µg/m³) -anno 2014

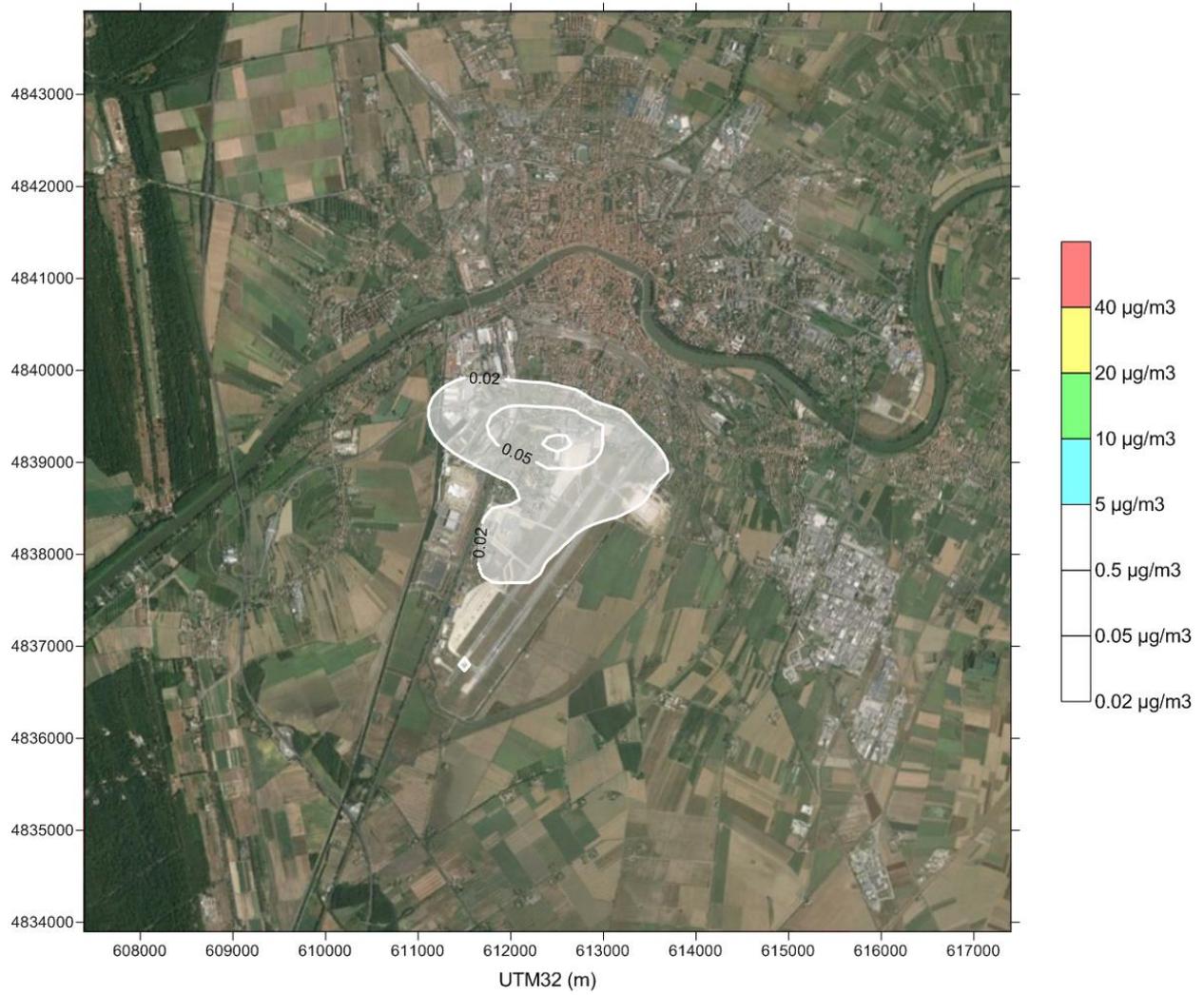


Figura 46. Media annuale di PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – anno 2014

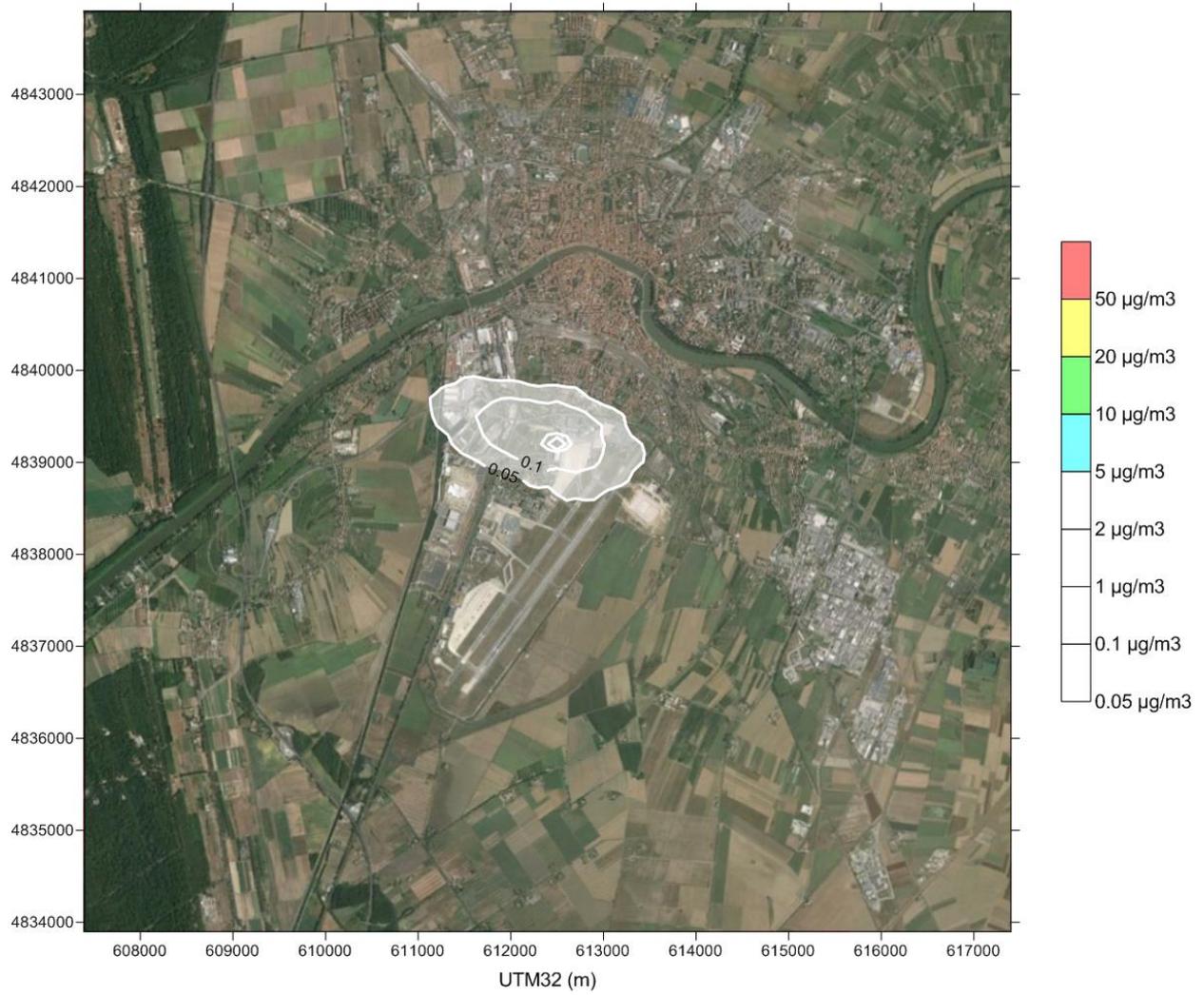


Figura 47. 90.4° percentile delle concentrazioni giornaliere di PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - anno 2014

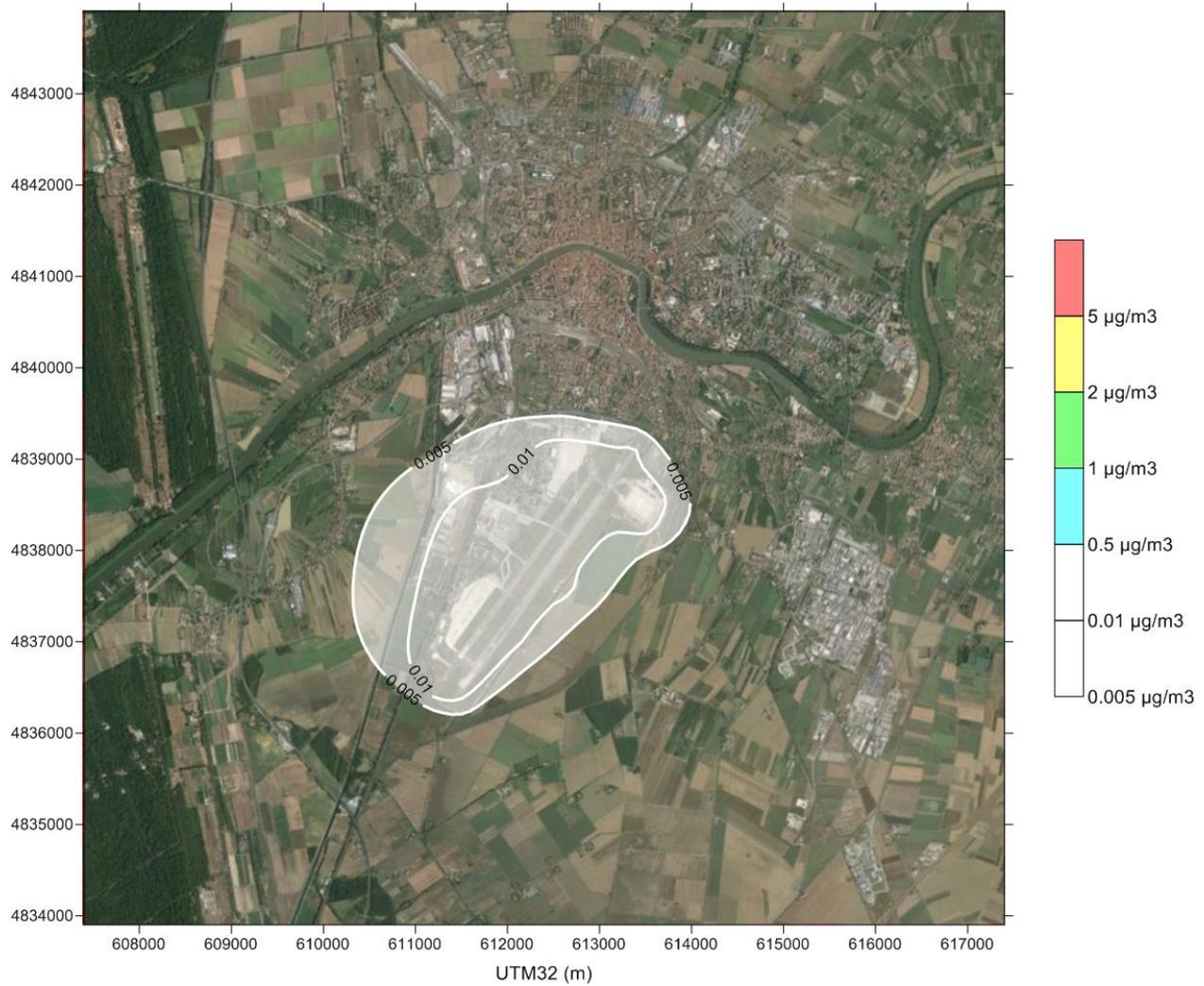


Figura 48. Concentrazioni medie annua $\mu\text{g}/\text{m}^3$ di benzene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – anno 2014

8.3.2 Simulazione per l'anno 2028

Analogamente a quanto fatto per il 2014, in base ai fattori di forma presentati in Figura 42, alle condizioni meteorologiche ed alle caratteristiche emissive relative alle ipotesi future, sono state fatte le simulazioni per l'intero anno 2028, i cui risultati sono riportati dalla Figura 49 alla Figura 54, mentre in Tabella 18 sono sintetizzati i massimi di griglia.

Tabella 18. Sintesi delle concentrazioni stimate dal modello ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Inquinante	Parametro	Massimo di griglia
NO₂	Media annuale	8.0
	99.8 percentile orario	114.2
Benzene	Media annuale	0.015
CO	Massimo delle medie 8-orarie	45.4
PM10	Media annuale	1.6
	90.4 percentile giornaliero	3.56

Le mappe d'isoconcentrazione ottenute per l'anno 2028 non presentano particolari criticità in generale e nello specifico per quanto riguarda le ricadute sull'abitato della città di Pisa, nonostante le attività aeroportuali incrementino indicativamente del 30%.

In particolare le concentrazioni di CO calcolate dal modello raggiungono un massimo di griglia pari a $45.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, pertanto non in grado di impensierire rispetto ai livelli limite (Figura 49). I livelli si estendono maggiormente lungo l'asse della pista, evidenziando l'impatto degli aeromobili in fase di atterraggio (che sono stati assegnati per il 100% da quella direzione) e decollo (che verso quella direzione sono stati associati a un gradiente di salita inferiore).

Per quanto riguarda il biossido di azoto non si registra alcuna criticità nè sulla media (massimo di griglia pari a $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Figura 50) nè per il 99.8 percentile delle concentrazioni medie orarie (valore massimo assoluto di griglia $114 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Figura 51), concentrazioni ricavate a partire dai risultati di dispersione di NOx utilizzando la curva di regressione presentata nel paragrafo 5.3 che tende a sovrastimare i livelli di concentrazione elevati. I valori relativamente più alti per il biossido di azoto si concentrano all'interno e nelle immediate vicinanze del perimetro aeroportuale, mostrando livelli trascurabili in corrispondenza dell'abitato ($0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per la media e $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per il percentile).

I valori medi delle concentrazioni di particolato hanno un massimo pari a $1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e si concentrano nella parte nord del sedime aeroportuale (Figura 52) in corrispondenza delle centrali termiche, presso cui si registra anche il massimo valore del 90.4 percentile delle concentrazioni giornaliere, pari a $3.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ben inferiore al limite di legge (Figura 53).

Il benzene presenta concentrazioni trascurabili (Figura 54) mostrando una distribuzione pressoché omogenea entro il perimetro dell'aeroporto.

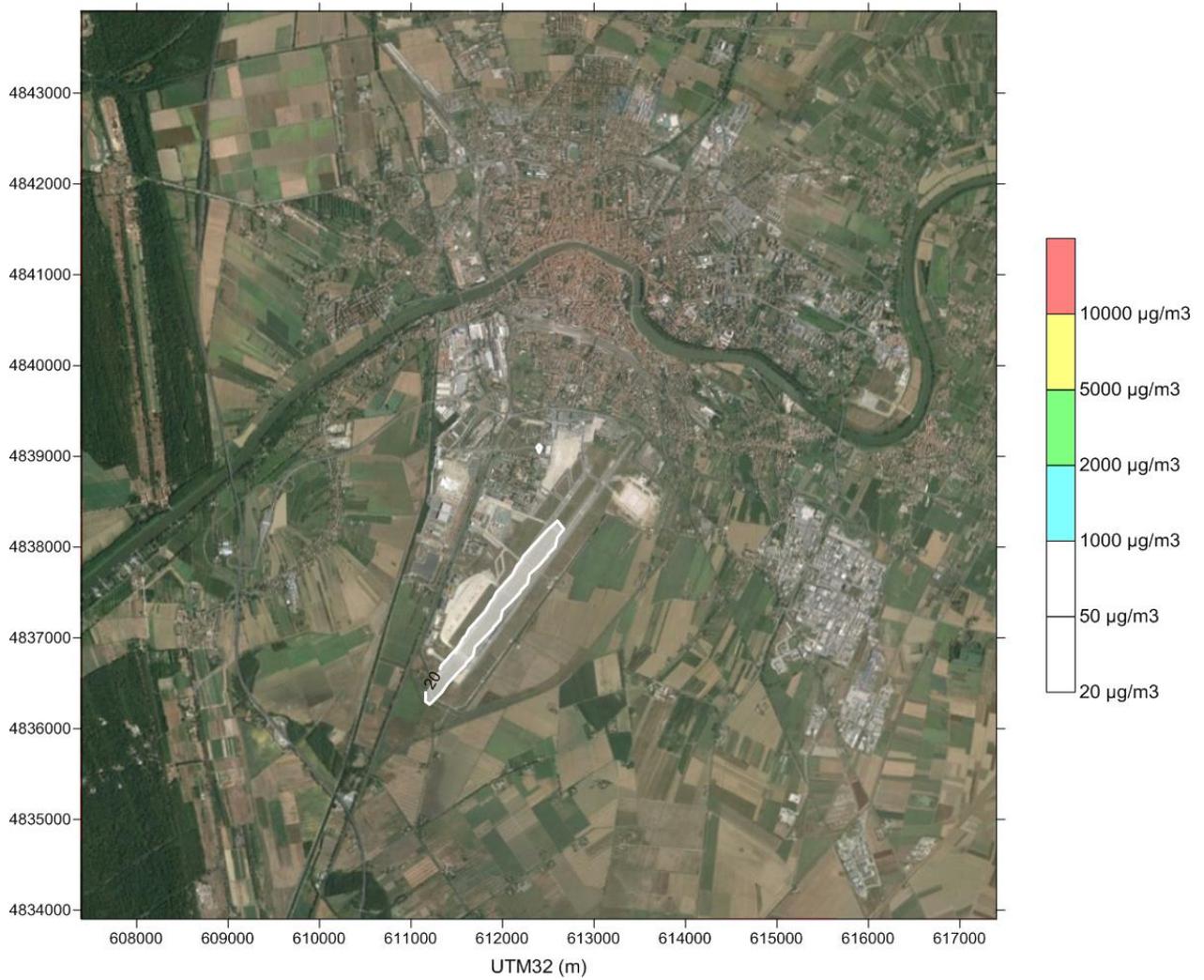


Figura 49. Massima media mobile 8-oraria giornaliera di CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – anno 2028



Figura 50. Media annuale di NO₂ (µg/m³) – anno 2028

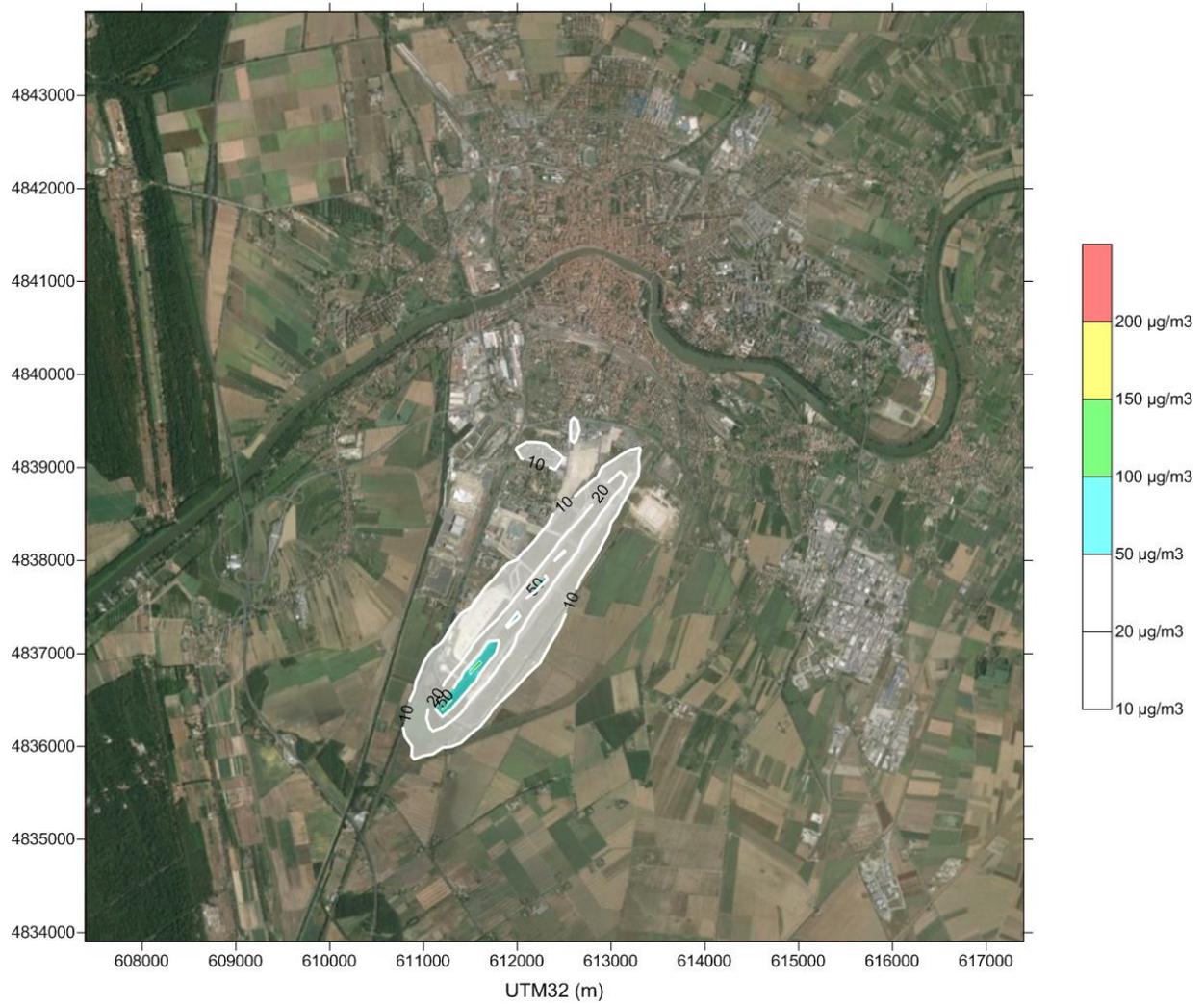


Figura 51. 99.8° percentile delle concentrazioni orarie di NO₂ (µg/m³) – anno 2028

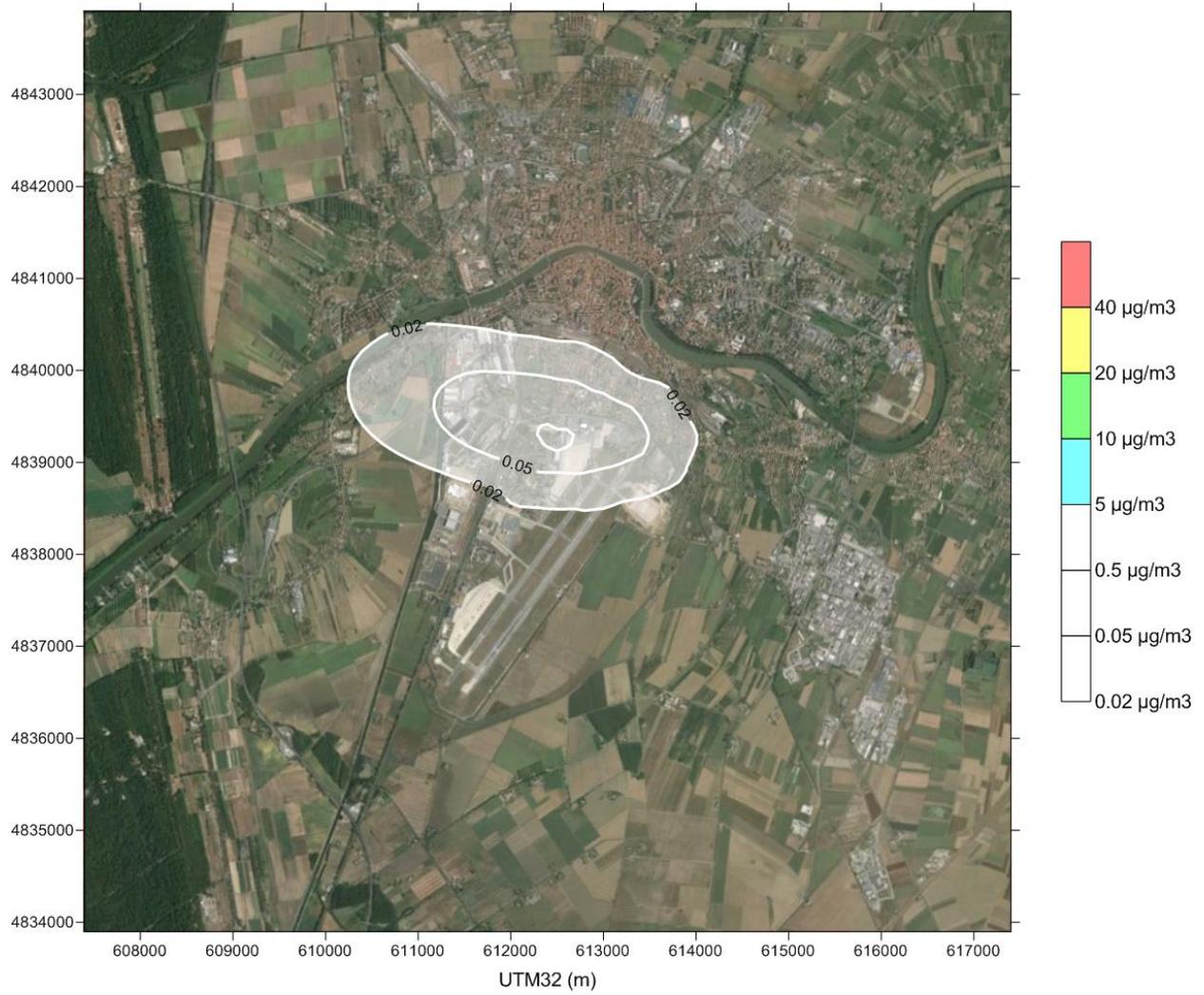


Figura 52. Media annuale di PM10 (µg/m³) – anno 2028

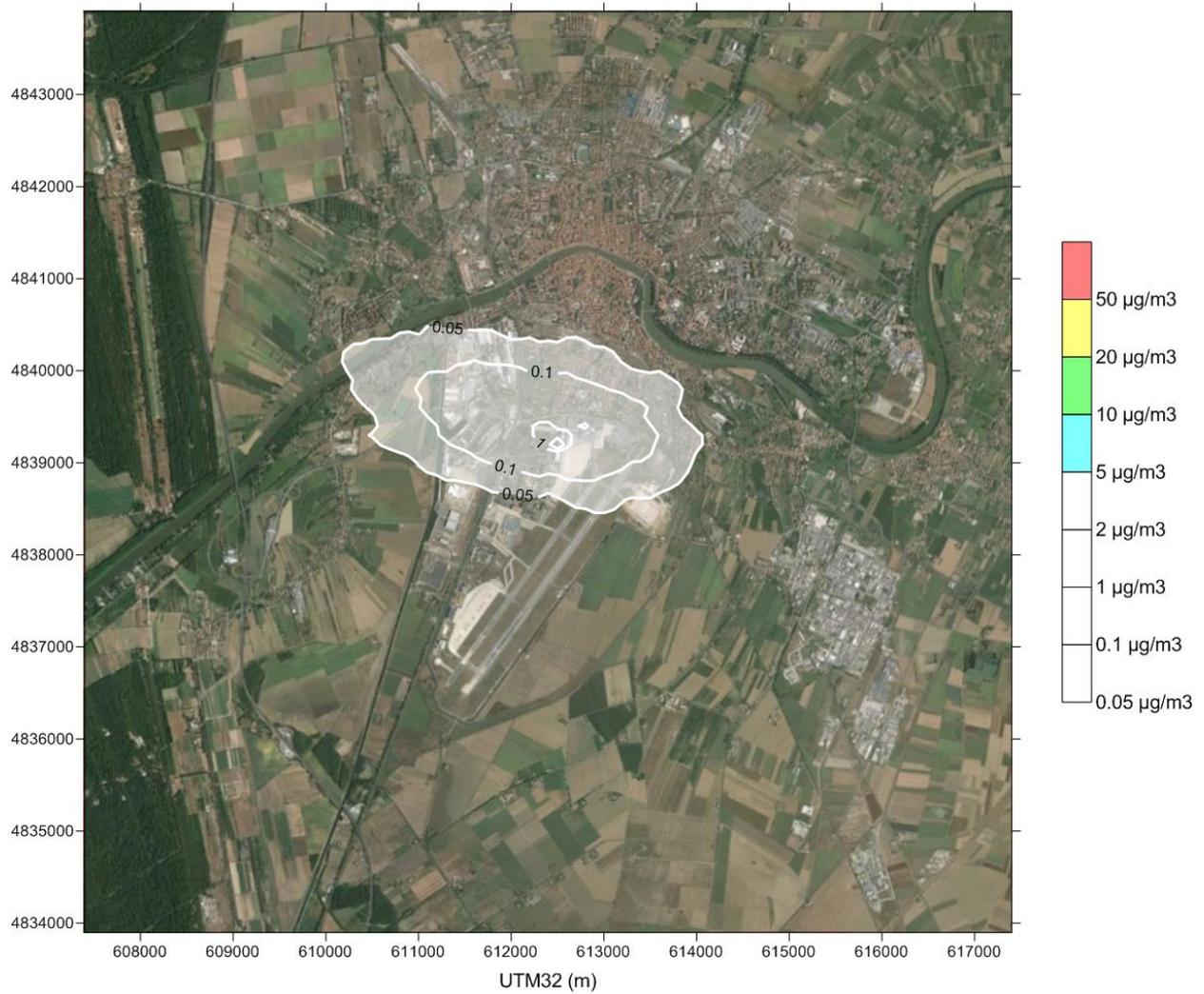


Figura 53. 90.4° percentile delle concentrazioni medie giornaliere di PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - anno 2028

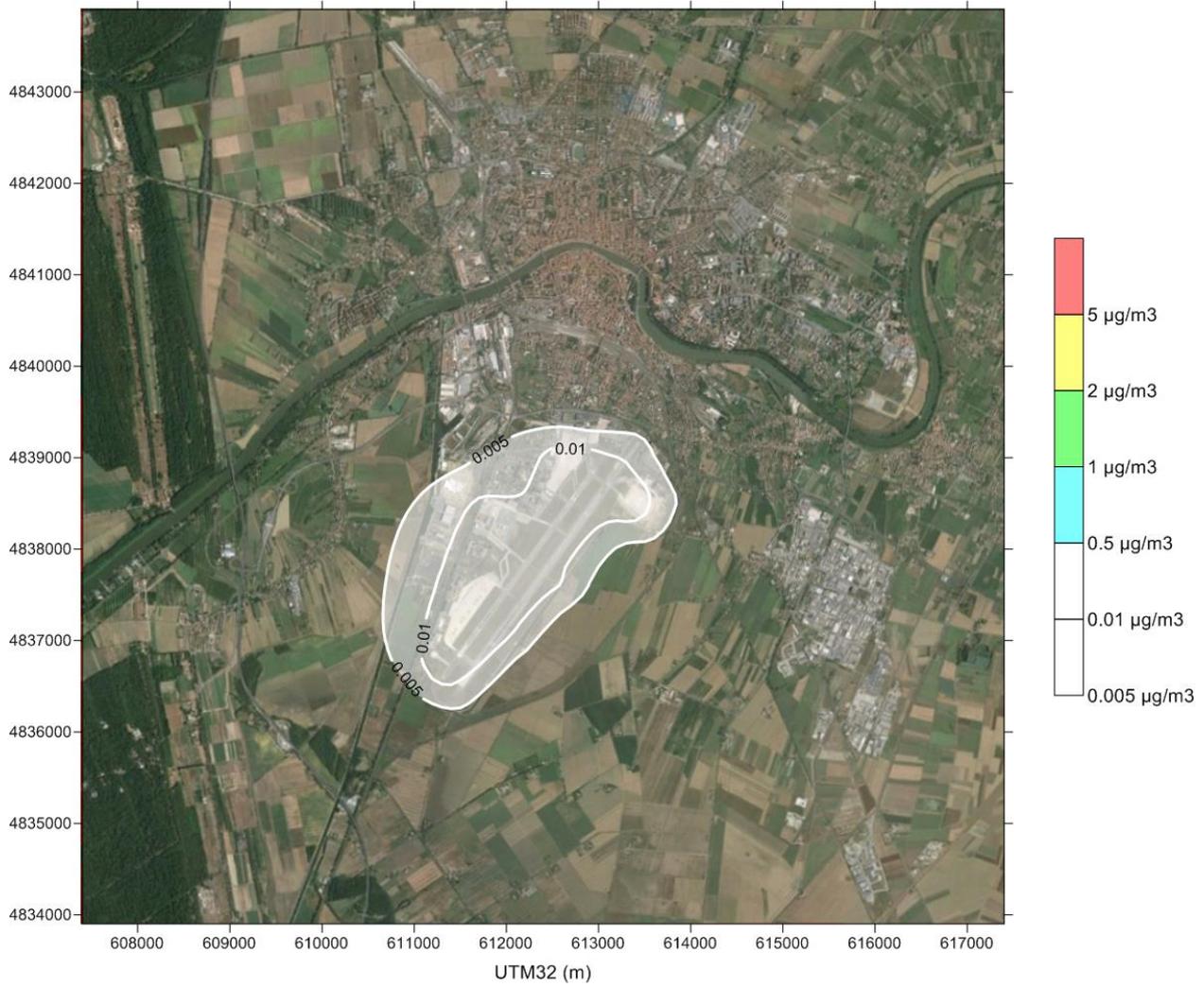


Figura 54. Media annuale di benzene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – anno 2028

8.3.3 Differenziale di impatto

Di seguito sono mostrate le mappe differenza per i diversi indici di qualità dell'aria, relativi agli anni 2028 – 2014, sovrapposta al fondo regionale.

L'impronta ambientale dell'evoluzione della sorgente aeroporto così come risultante dal masterplan 2028 non è visivamente distinguibile dal fondo.

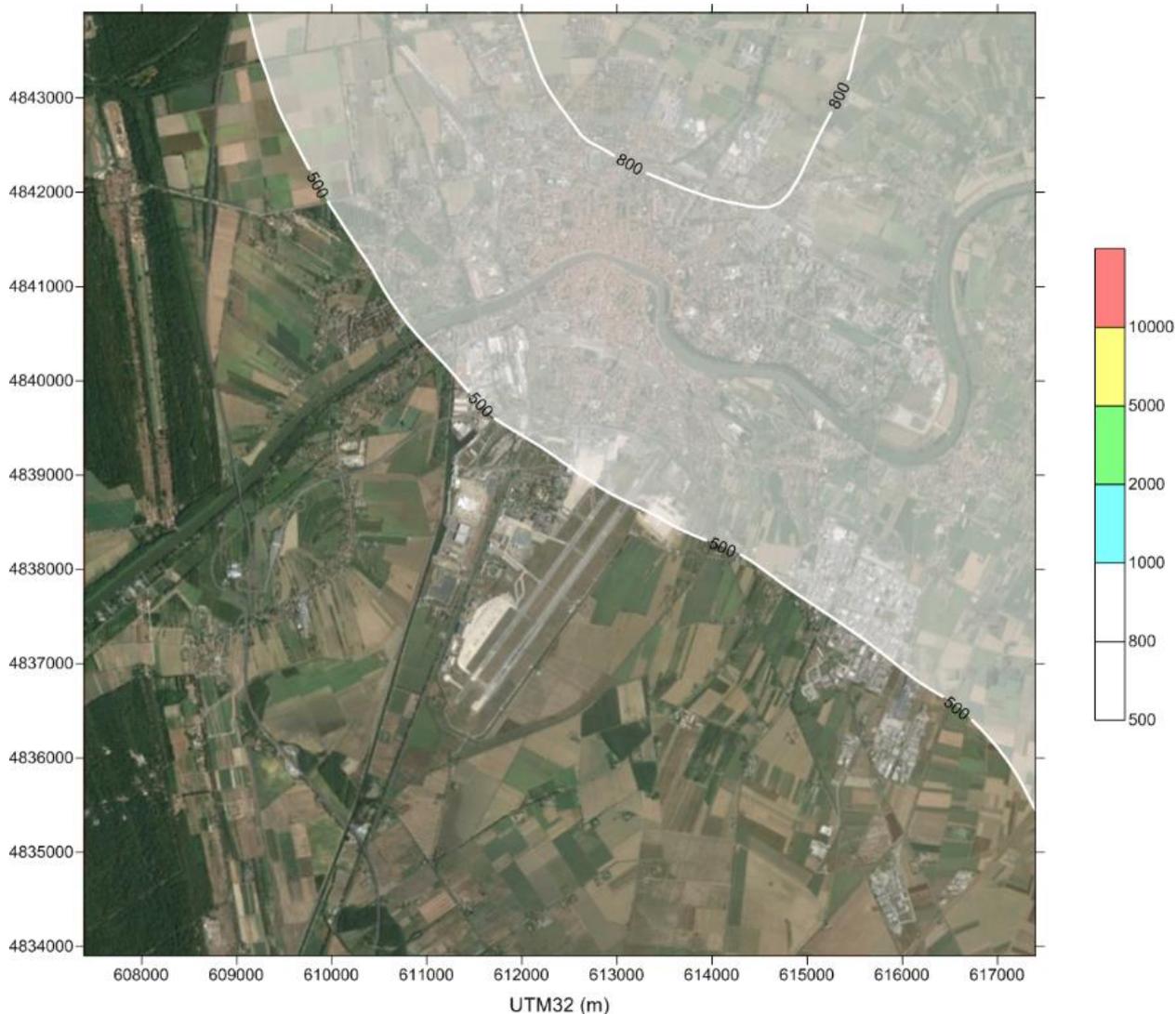


Figura 55. Differenza dei massimi della media mobile 8-oraria giornaliera di CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – anno 2028 – 2014, sovrapposta al fondo regionale.

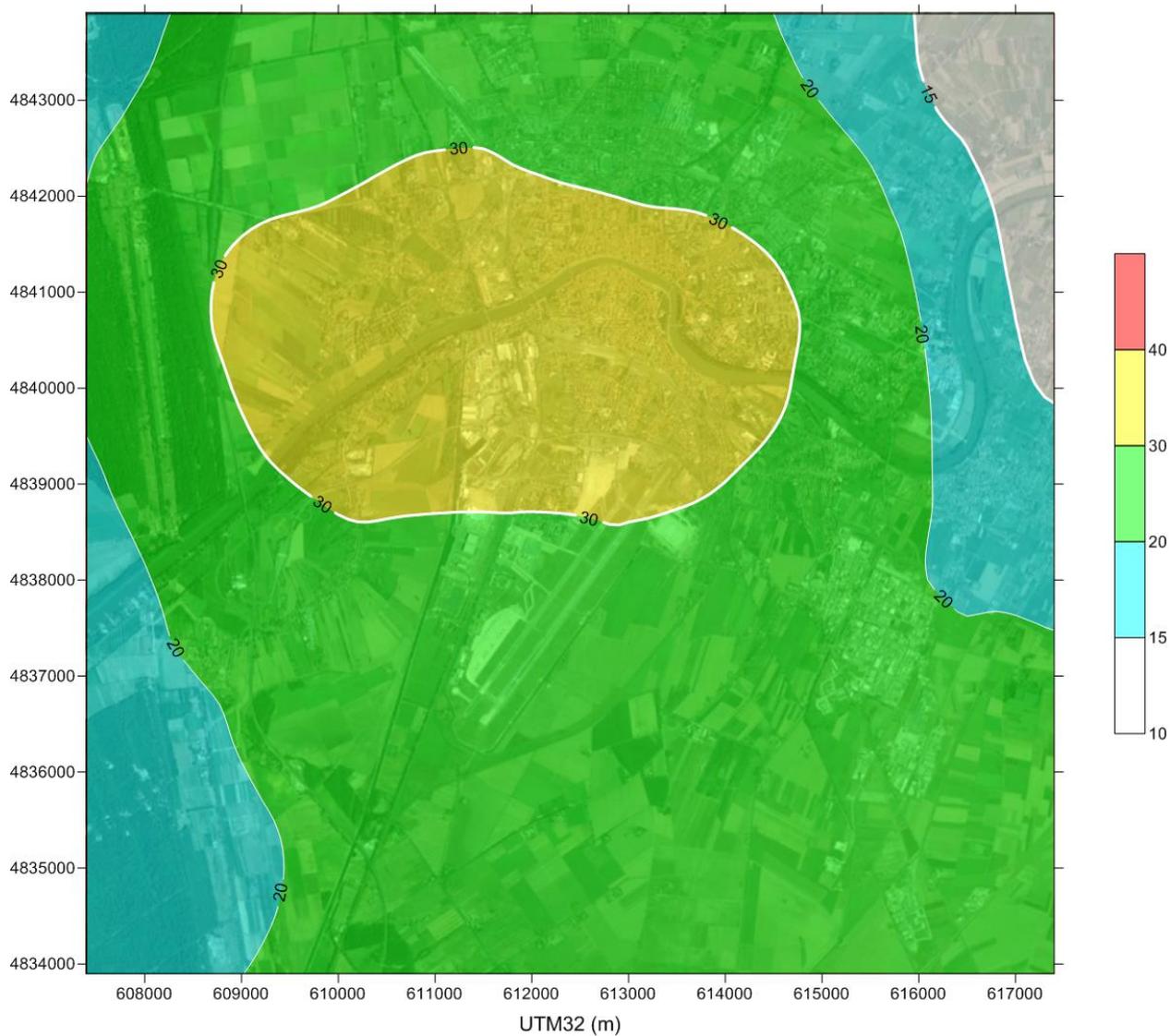


Figura 56. Differenza tra le medie annuali di NO₂ (µg/m³) – anno 2028 – 2014, sovrapposta al fondo regionale

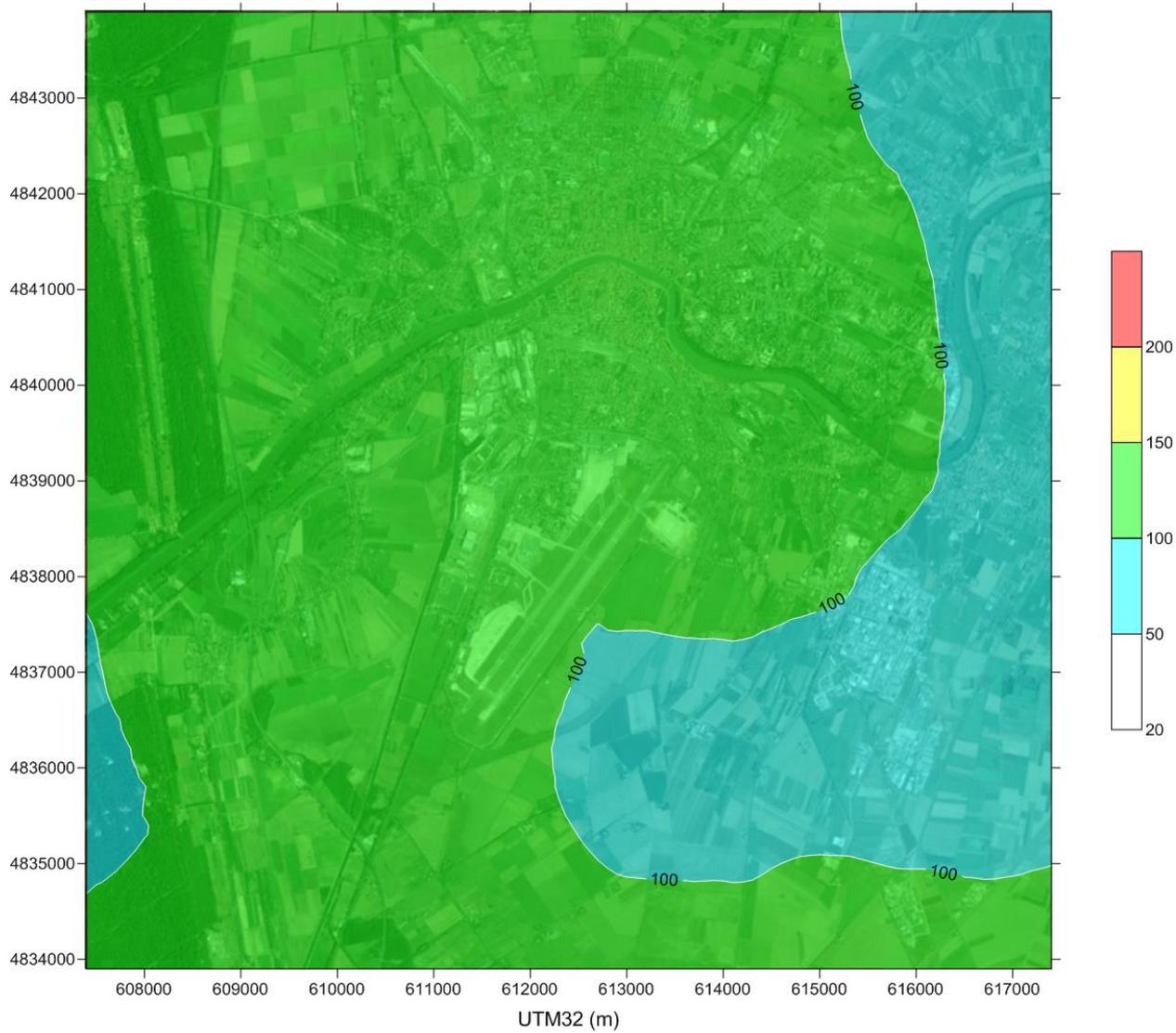


Figura 57. Differenza del 99.8 percentile delle medie orarie di NO₂ (µg/m³) – anno 2028 – 2014, sovrapposta al fondo regionale

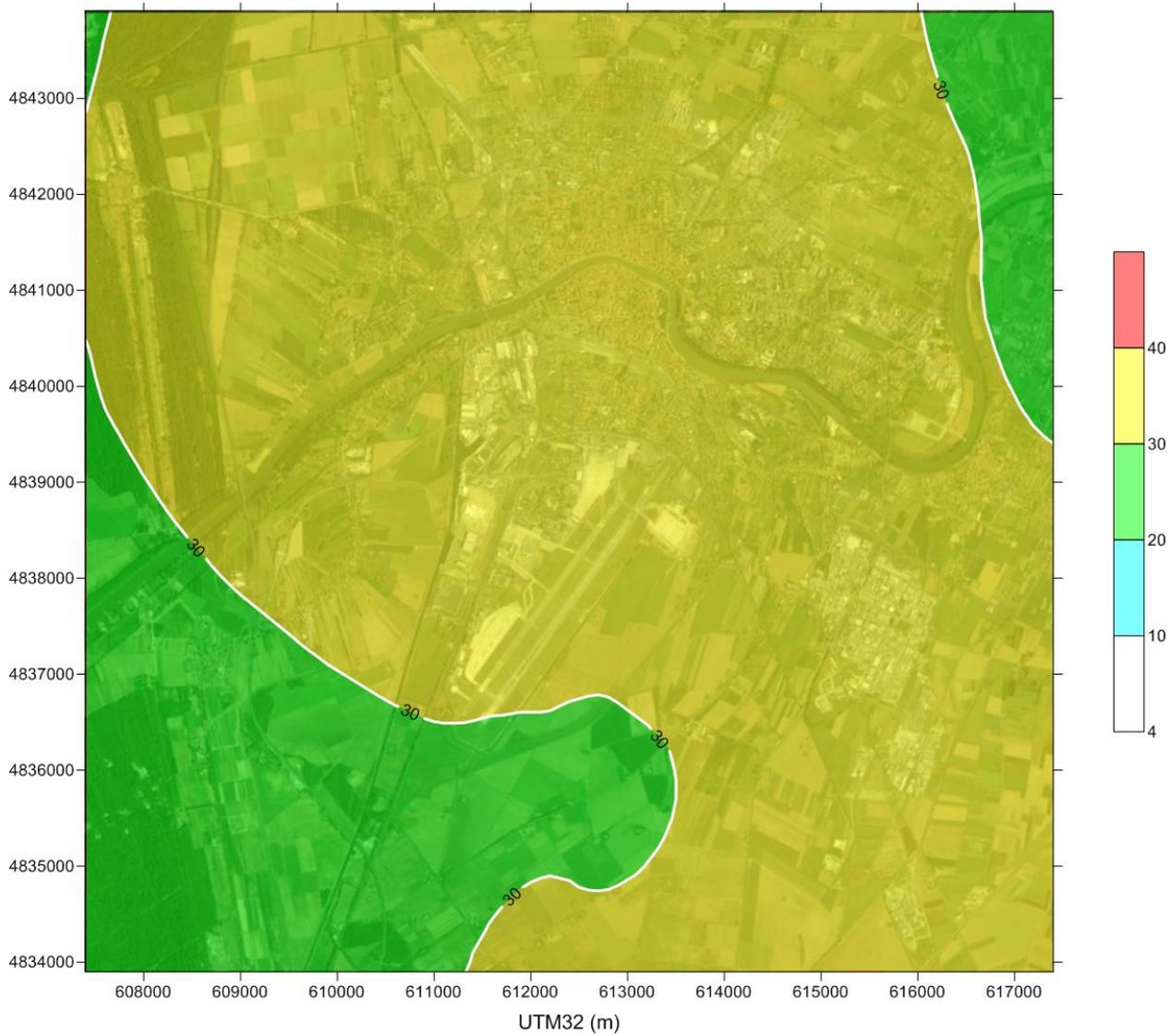


Figura 58. Differenza tra le medie annuali di PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – anno 2028 – 2014, sovrapposta al fondo regionale

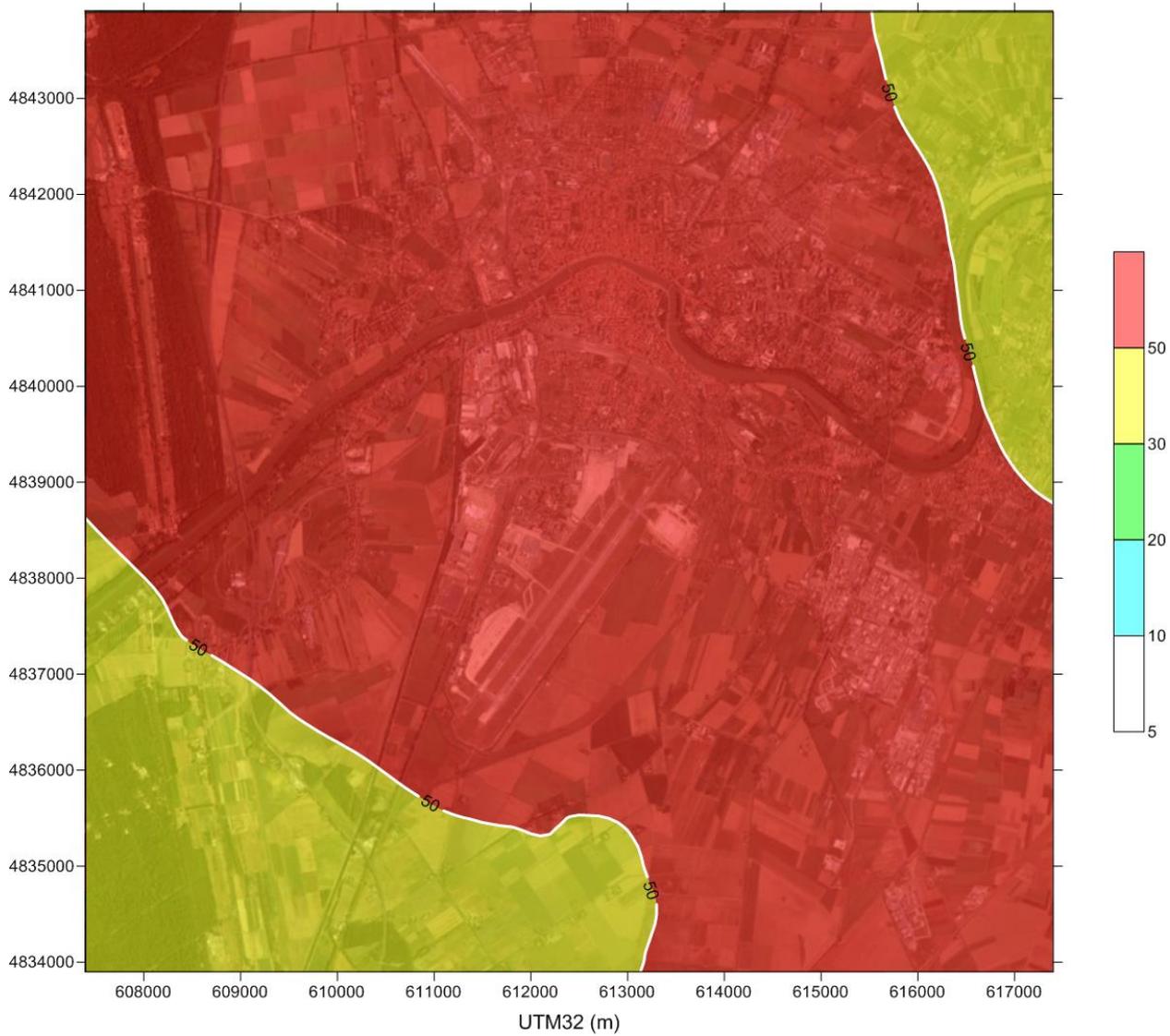


Figura 59. Differenza del 90.4 percentile delle medie giornaliere di PM10 (µg/m3) – anno 2028 – 2014, sovrapposta al fondo regionale

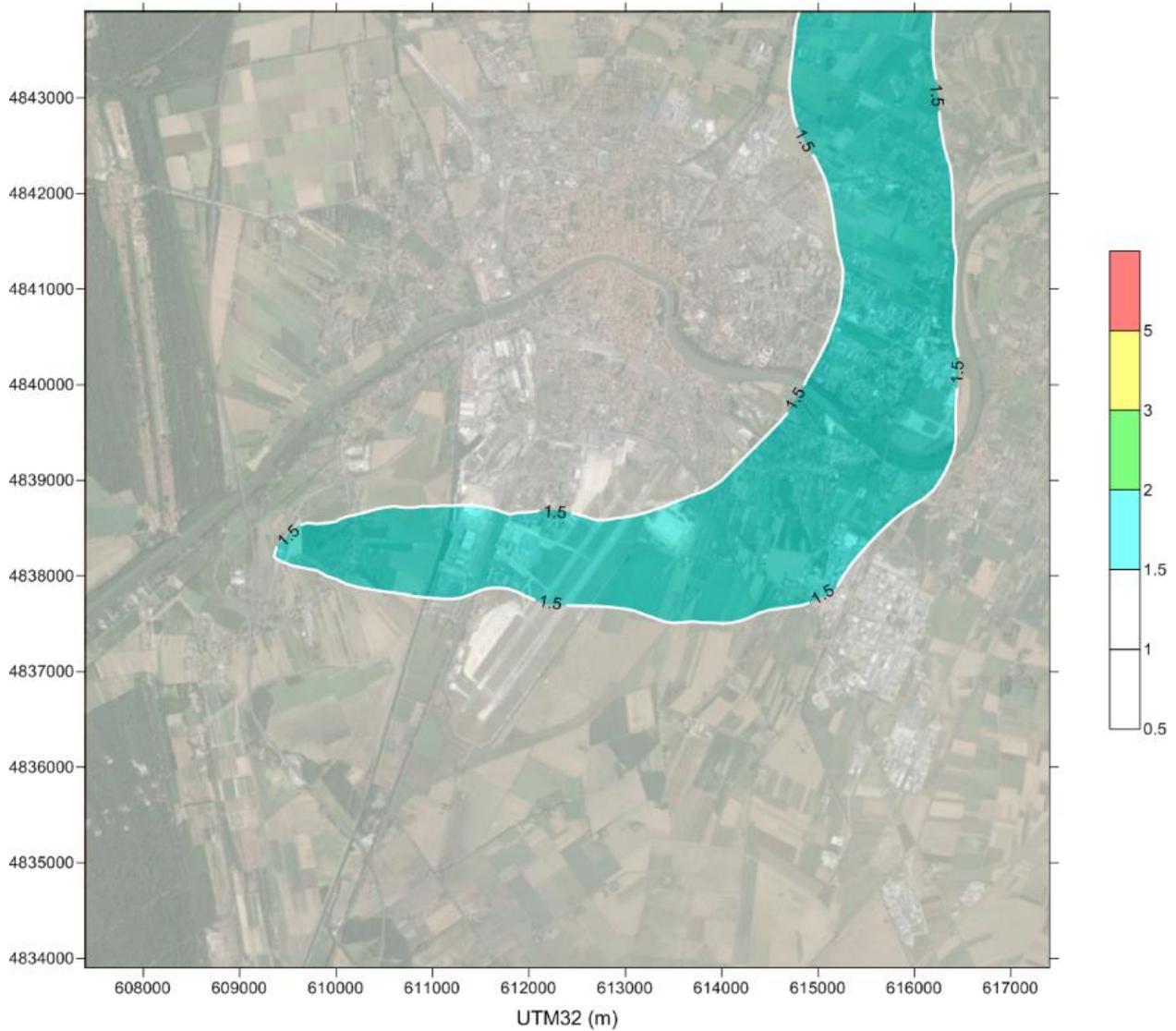


Figura 60. Differenza tra le medie annuali di benzene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – anno 2028 – 2014, sovrapposta al fondo regionale

9 Incidenza del futuro assetto aeroportuale sulle aree d'interesse naturalistico

Essendo il sedime aeroportuale posto nelle vicinanze di aree d'interesse naturalistico, in particolare del Parco Naturale Migliarino - San Rossore – Massaciuccoli che si estende lungo la costa tra Viareggio e Livorno ed è sorvolato dagli aeromobili che atterrano dal mare (direzione 04) e che decollano verso il mare (direzione 22), è emersa la necessità di un approfondimento della compatibilità dell'impatto del nuovo Masterplan 2028 con la presenza di questa importante area naturalistica.

Questa analisi è stata effettuata calcolando con il modello ARIA Impact le concentrazioni in aria di inquinanti emessi dall'aeroporto lungo una serie rettilinea di recettori al suolo diretta parallelamente alle piste verso sud ovest e intersecante i confini del parco come indicato in figura. Il primo recettore dista 300m dalla testa pista e gli altri successivi distano sempre 300m dagli adiacenti.

Poiché l'unico limite di legge relativo alle aree naturalistiche per gli inquinanti trattati è quello di protezione della vegetazione che riguarda le medie annuali degli ossidi di azoto – limite fissato a $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ - ci si è limitati ad analizzare solo quello all'interno di questo paragrafo come indicativo dell'interazione complessiva aeroporto – parco.

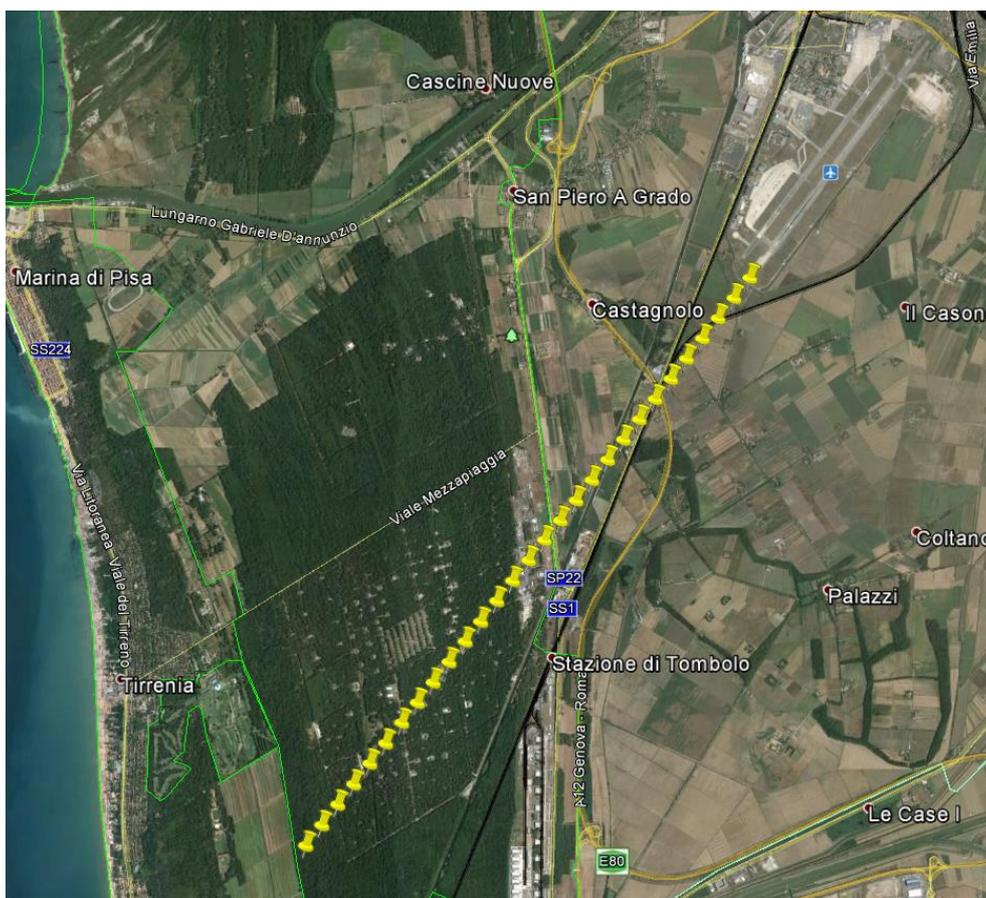


Figura 61. Posizione serie di recettori utilizzata per l'analisi d'incidenza sul Parco

Nel grafico successivo sono presentati i contributi alle concentrazioni calcolati lungo la serie di recettori fissata e di cui è responsabile l'aeroporto nell'assetto attuale 2014 e nell'assetto futuro previsto al 2028; inoltre è presentato l'andamento del fondo ambientale, sempre in corrispondenza della serie di recettori, stimato come descritto nel capitolo 6, e della somma fondo + differenziale

d'impatto, intesa come livello assoluto di qualità dell'aria atteso al 2028. Queste concentrazioni calcolate sono messe a confronto con i limiti normativi, quello di protezione della vegetazione all'interno dei confini del SIC e quello di tutela della salute umana ($40\mu\text{g}/\text{m}^3$, valido in realtà per il solo biossido di azoto) all'esterno dei confini SIC.

La figura evidenzia in ogni caso il previsto rispetto dei limiti considerati (almeno in corrispondenza delle rotte di atterraggio e decollo e dunque nei punti di potenziale massimo impatto dell'aeroporto a queste distanze) - in particolare di quello, assai stringente, di protezione della vegetazione - e che il differenziale d'impatto dovuto al masterplan 2028 risulta relativamente trascurabile sui livelli di concentrazione esistenti all'interno del parco.

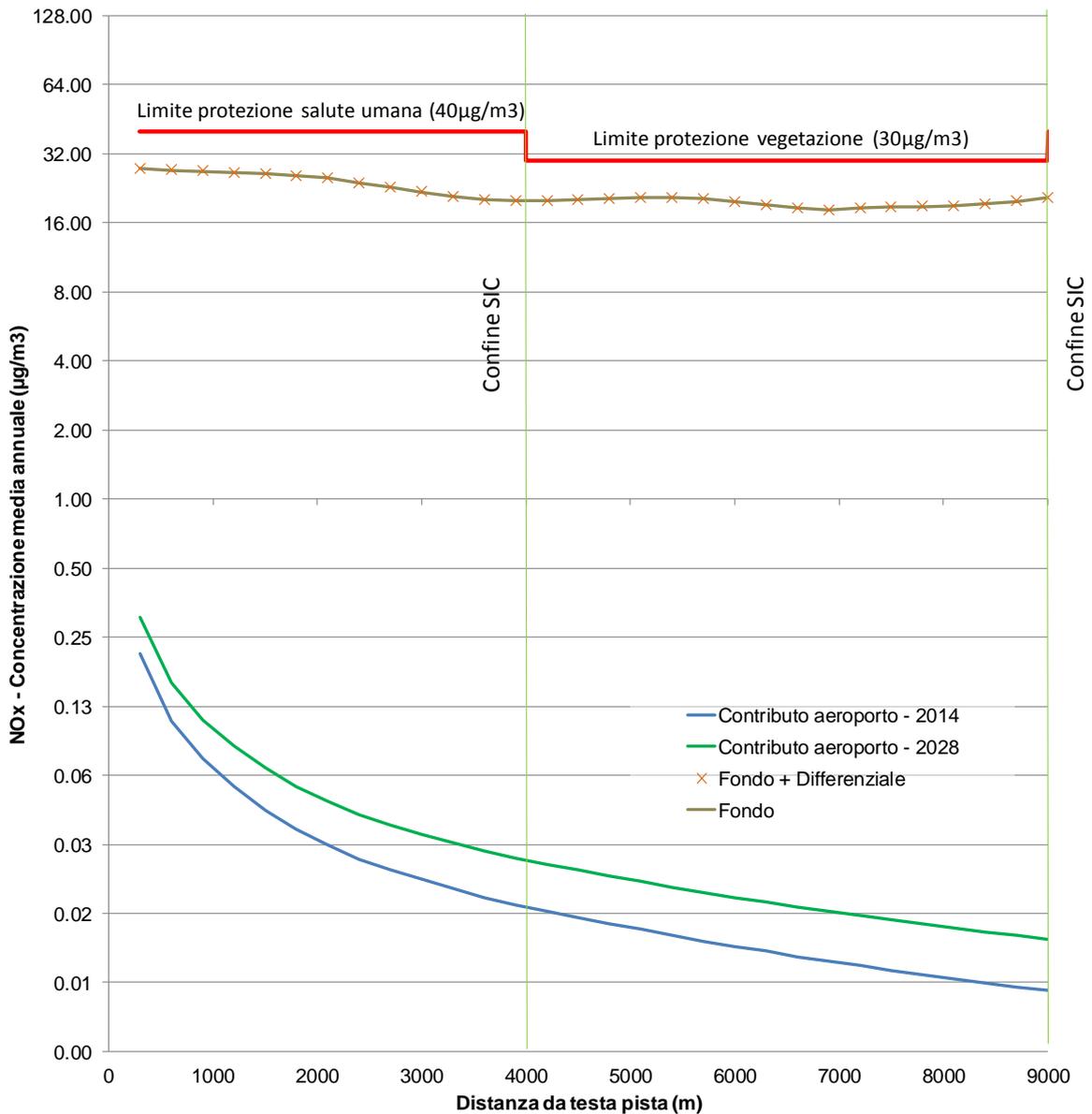


Figura 62. Differenza tra le medie annuali di benzene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – anno 2028 – 2014, sovrapposta al fondo regionale. La scala delle concentrazioni è in forma logaritmica in base 2.

10 Risultati in corrispondenza dei recettori

All'interno delle attività di monitoraggio condotte da Arpa Toscana nei pressi dell'aeroporto e documentate nel rapporto "Impatto dell'aeroporto di Pisa sulla qualità dell'aria" del 2013 sono stati considerati punti recettori interni ed esterni al sedime aeroportuale, di particolare interesse ai fini della valutazione della qualità dell'aria. Tra questi ne sono stati selezionati 10 in corrispondenza dei punti prossimi ad edifici residenziali o adibiti ad attività ricettive, scolastiche, sanitarie, per i quali si è voluto confrontare i livelli di concentrazione calcolati con i limiti imposti dalla normativa.

La loro localizzazione è presentata in Figura 63.



Figura 63. Localizzazione dei recettori sensibili all'interno del dominio di calcolo

In Tabella 19 si presenta l'estrazione dei valori di concentrazione [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] calcolati per il 2014 e il 2028 in corrispondenza dei punti sensibili per il confronto con i limiti previsti in normativa, per tutte le specie simulate e le relative statistiche.

Tabella 19. Estrazione dei valori calcolati in corrispondenza dei recettori (simulazione 2014)

Recettore	media C6H6	media NO2	99.8 percentile NO2	media PM10	90.4 percentile PM10	Max medie 8- orarie
p 62	0.006	0.365	7.599	0.053	0.104	13.096
p 63	0.003	0.165	5.510	0.018	0.043	10.412
p 20	0.001	0.044	4.001	0.003	0.008	7.896
p 59	0.019	0.832	9.737	0.040	0.090	14.571
p 60	0.015	0.656	9.701	0.056	0.126	15.200
p 66	0.008	0.581	10.275	0.008	0.015	13.753
p 50	0.001	0.061	4.557	0.001	0.003	9.575
p 49	0.004	0.221	7.237	0.015	0.031	13.645
p 64	0.002	0.094	4.431	0.007	0.020	8.791
p 39	0.001	0.061	2.403	0.005	0.012	3.650

Tabella 20. Estrazione dei valori calcolati in corrispondenza dei recettori (simulazione 2028)

Recettore	media C6H6	media NO2	99.8 percentile NO2	media PM10	90.4 percentile PM10	Max medie 8-orarie
p 62	0.005	0.422	7.118	0.188	0.385	12.926
p 63	0.002	0.180	6.115	0.063	0.160	11.083
p 20	0.001	0.047	3.861	0.007	0.024	7.853
p 59	0.014	0.756	9.034	0.048	0.126	14.843
p 60	0.011	0.646	9.428	0.088	0.211	15.352
p 66	0.006	0.603	11.436	0.004	0.007	13.947
p 50	0.000	0.070	5.015	0.001	0.002	9.811
p 49	0.003	0.226	6.728	0.038	0.094	13.548
p 64	0.001	0.098	4.854	0.021	0.056	9.559
p 39	0.001	0.069	2.547	0.015	0.037	3.667

Anche per i recettori più prossimi al sedime aeroportuale (p 59, p 60, p66) i livelli calcolati mostrano valori ben al di sotto dei limiti di legge per entrambi gli scenari.

Queste tabelle mostrano l'impatto del solo terminal aeroportuale sugli specifici recettori, senza considerare l'effetto delle altre sorgenti presenti sul territorio. Per considerare i livelli realistici di esposizione della popolazione sono stati estratti anche i valori di concentrazione dalle mappe di fondo ottenute mediante i procedimenti descritti nel paragrafo 6.5 e che include l'impatto attuale dell'aeroporto, a cui è stato sovrapposto il differenziale di impatto tra il 2028 e il 2014 per considerare livelli realistici di esposizione della popolazione nello scenario 2028.

Tabella 21. Estrazione dei valori calcolati in corrispondenza dei recettori (fondo + differenziale d'impatto)

Recettore	media C6H6	media NO2	99.8 percentile NO2	media PM10	90.4 percentile PM10	Max medie 8-orarie
p 62	1.456	33.085	106.332	32.620	54.451	579.587
p 63	1.443	32.807	113.930	32.614	53.929	638.399
p 20	1.440	32.070	108.558	32.626	55.209	745.905
p 59	1.478	30.894	103.738	32.183	54.434	486.929
p 60	1.467	32.115	107.384	32.380	54.448	534.013
p 66	1.328	21.735	109.896	29.977	51.962	351.830
p 50	1.203	22.545	106.887	29.512	48.940	343.541
p 49	1.467	31.780	105.766	32.463	54.920	625.101
p 64	1.435	32.780	112.663	32.644	53.818	690.971
p 39	1.430	32.809	110.705	32.552	52.509	626.110

Nel complesso si registrano valori modesti e nessun superamento dei limiti per quanto riguarda benzene, NO₂ e CO. Le uniche criticità si osservano per il 90.4 percentile giornaliero del PM10, il cui limite di 50 µg/m³ si calcola che verrà superato ovunque eccetto nel recettore p 50. La media annuale del PM10 resta mediamente su livelli pari a $\frac{3}{4}$ del limite di legge, senza mostrare alcun superamento dello stesso. Per entrambi gli indicatori relativi al particolato l'omogeneità dei valori estratti nei diversi recettori conferma la natura obiquitaria della specie considerata.

Dal confronto tra i dati presentati nelle tre tabelle si può ritenere che i livelli di qualità dell'aria sul territorio sono influenzati in modo preponderante dal complesso delle sorgenti (e dalle trasformazioni chimiche che generano inquinamento secondario) più che dall'aeroporto in sé.

11 Stima del contributo aeroportuale alle emissioni di gas climalteranti

A completamento dell'analisi del progetto di evoluzione dell'aeroporto (Masterplan 2028) dal punto di vista delle emissioni atmosferiche, sono state stimate le emissioni di gas climalteranti attribuibili all'aeroporto nello scenario futuro e confrontate con quelle contenute nell'inventario regionale IRSE 2007.

In generale (Tabella 22) le emissioni aeroportuali a livello provinciale costituiscono poco più del 5% di quelle complessive e si attestano a 31.9 kt di CO₂ equivalente. Al 2028 le emissioni di gas climalteranti sono stimate pari a 171.4 kt di CO₂ equivalente, la maggior parte attribuibile alle attività degli aeromobili.

Tabella 22. Emissioni annuali di gas climalteranti della provincia di Pisa in tonnellate di CO₂ equivalente (Fonte: IRSE 2007).

Settore	CO ₂ (kt)
Prod.Energia Elettrica	0.0
Comb.non industriale	112.1
Comb.Industriale	160.8
Proc.produttivi	51.4
Estrazione combustibili fossili	0.0
Uso solventi	0.0
Traffico stradale	194.0
Altri mezzi mobili (aeroporti)	42.7 (31.9)
Gestione rifiuti	39.8
Agricoltura	0.0
Natura ed altri assorbimenti	0.1
Totale	600.8

Tabella 23. Emissioni annuali di gas climalteranti stimate per l'aeroporto in tonnellate di CO₂ equivalente (Scenario: Masterplan 2028).

Attività	CO ₂ (kt)
LTO aeromobili	156.3
Centrali termiche	13.3
mezzi pesanti / parcheggi	0.6
GSE	1.3
Totale	171.4

12 Conclusioni

Il presente studio contiene le risposte alla richiesta di approfondimento da parte del Ministero dell'Ambiente e indirettamente di ARPAT riguardo allo studio d'impatto atmosferico delle attività correlate con l'aeroporto di Pisa, nel suo assetto attuale (2014) e in accordo con gli sviluppi futuri previsti (anno di riferimento 2028).

In accordo con le richieste è stato considerato il contributo di fondo di tutte le emissioni presenti allo stato attuale in un'area vasta che include il dominio di studio, che evidenzia come i livelli più critici non siano da attribuire alla sorgente aeroportuale (che rientra in questa analisi nella configurazione esistente) ma al traffico stradale e navale (livelli massimi di ossidi di azoto e particolato atmosferico registrati in corrispondenza degli assi viari e del porto di Livorno).

Per valutare l'impatto atmosferico aeroportuale è stato applicato un modello dispersivo di tipo gaussiano separatamente per i due scenari selezionati. In sintesi il lavoro è stato suddiviso nelle seguenti fasi:

- caratterizzazione del sito di studio da un punto di vista meteorologico;
- individuazione delle sorgenti inquinanti e stima dell'attività emissiva specifica;
- calcolo della dispersione atmosferica delle sorgenti individuate;
- verifica della compatibilità dell'opera al 2028, in termini di livelli differenziali di qualità dell'aria, con il contesto territoriale.

A valle delle simulazioni si conferma che anche sovrapponendo il differenziale d'impatto dell'aeroporto al 2028 rispetto allo stato attuale e il fondo ambientale stimato il giudizio sulla compatibilità ambientale del progetto non cambia rispetto allo stato attuale, dominato dai contributi derivanti da altre sorgenti emmissive (aree urbane, strade, trasporto marittimo).

In merito alla richiesta di approfondire le ricadute inquinanti sulle aree interne al Parco Regionale Migliarino, San Rossore, Massacciuccoli le elaborazioni hanno consentito di confermare che l'impatto sul SIC sia trascurabile; anche considerandone la sovrapposizione al fondo ambientale si stimano valori inferiori al limite di protezione della vegetazione ($30 \mu\text{g m}^{-3}$ per l' NO_x).

In merito alle osservazioni specifiche di ARPAT si sono effettuate simulazioni annuali con un diverso modello di dispersione (AERMOD) per considerare l'effetto del building downwash con particolare attenzione agli edifici prossimi alle centrali termiche, dai cui risultati non si richiedono ulteriori approfondimenti sull'altezza dei camini.

Si sono infine valutate le ricadute in corrispondenza di 10 specifici punti recettori interni ed esterni al sedime aeroportuale, per cui sono stati estratti i valori di concentrazione riconducibili alla sola sorgente aeroportuale nei due scenari accanto ai valori derivanti dal fondo sommato al differenziale, da confrontare con gli standard di qualità dell'aria. Anche da questa analisi emerge che le emissioni del complesso aeroportuale incidono in minima percentuale sui livelli di qualità dell'aria e che complessivamente non si raggiungono livelli critici eccetto che per il limite dei superamenti sulle polveri, standard superato in modo pressochè omogeneo su tutta l'area anche nello stato attuale a causa del mix di effetti dovuti alla presenza delle sorgenti inquinanti e di formazione in atmosfera di particolato secondario su cui la presenza dell'aeroporto incide in maniera del tutto irrilevante.

BIBLIOGRAFIA

- ARIA Technologies (2012). General design and user's manual – ARIA Impact v1.7. Rapport
ARIANET-R2002.06 - Studio di impatto sulla locale qualità dell'aria del sistema aeroportuale di Malpensa
- ARPAT (2013). Impatto dell'aeroporto di Pisa sulla qualità dell'aria.
- Bratseth, A.M. (1986) Statistical interpolation by means of successive corrections. *Tellus*, 38A,439-447.
- Briggs G. A. (1969): "Plume Rise", U.S. Atomic Energy Commission Critical Review Series, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN. Report NTIS TID-25075.
- Briggs, G. A. (1974): "Diffusion estimation on small emission", U.S. Atomic Energy Commission Critical, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN. Rep. USAEC ATDL-106.
- Briggs, G. A. (1975): "Plume rise prediction. Lectures on air pollution pollution and environmental impact analyses", American Meteorological Society, Boston, MA, pp. 59-111.
- Comune Pisa (2007) Rapporto Annuale sulla Qualità dell'Aria
- D'Elia, I., Bencardino, M., Ciancarella, L., Contaldi, M., Vialetto, G. (2009) Technical and Non Technical Measures for Air Pollution Emission Reduction: the Integrated Assessment of the Regional Air Quality Management Plans through the Italian National Model. *Atmospheric Environment*, 43, 6182-6189.
- Derwent R.G. et Middleton D.R. (1996). An empirical function for the ratio NO₂:NO_x. *Clean Air*, vol. 26, No. 3/4, p 57.
- Dixon J, Middleton D R and Derwent R G (2000). Using measurements of nitrogen oxides to estimate the emission controls required to meet the UK nitrogen dioxide standard. Presented at Second International Conference on Urban Air Quality, Madrid Spain, March 1999. Published in *Environmental Monitoring and Assessment* Vol. 65, pp. 3-11
- Doppelheuer, A.,(1997) - "Berechnung der Produkte unvollständiger Verbrennung aus Luftfahrttriebwerken, IB-325-09-97, Inst. Fur Antriebstechnik, Dtsch. Zentrum fur luft- u. Raumfahrt, Koln, Germany.
- Doppelheuer, A. and M. Lecht.(1999) – "Influence of Engine Performance on Emission Characteristics", RTO Meeting Proceedings14 on Gas Turbine Engine Combustion, Emissions and Alternative Fuels, RTO-MP-14, NATO, Cedex, France, June, 1999.
- Doppelheuer, A. and C. Wahl (2000) – "Determination of Quantities and Properties of Aircraft Engine Generated Soot, Inst. fur Antriebstechnik, Dtsch Zentrum fur Luft- und Raumfahrt.
- EEA (2013) Emission Inventory Guidebook
- EEA (2013) TRENDS IN GLOBAL CO₂ EMISSIONS: 2013 Report
- EMEP/CORINAIR (2007). Atmospheric Emission Inventory Guidebook. <http://reports.eea.europa.eu/EMEP-CORINAIR5/en/page002.html>
- EPA, 1999. Evaluation of air pollutant emissions from subsonic commercial jet aircraft. EPA420-R-99-013.
- EPA, 1985. Compilation of air pollutant emission factors, volume II: mobile sources, AP-42.
- FAA, 1997. Air quality procedures for civilian airports and air forces bases. FAA-AEE-97-03 AL/EQ-TR-1996-0017.
- Finzi G. e Brusasca G. (1991) - La qualità dell'aria. Modelli previsionali e gestionali - Masson, Milano, pp 346.
- Finzi G., G. Pirovano, M., Volta L. (2001) – Gestione della qualità dell'aria – McGraw-Hill Milano, pp 409.
- Hagen, D.E., M.B. Trueblood, and P.D. Whitefield (1992) - A Field Sampling of Jet Exhaust Aerosols, *Particulate Science and Technology*, 10:53-63
- Hagen, D.E. and P.D. Whitefield (1996) – "Particulate emissions in the exhaust plume from commercial jet aircraft under cruise conditions, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, D14, August 27, 1996, pgs. 19,551 – 19,557.
- Hagen, D.E., P. Whitefield, J. Paladino, and M. Trueblood (1998) – "Particle sizing and emission indexes for a jet engine exhaust sampled at cruise, *Geophysical Research Letters*, Vol. 25, No. 10, May 15, 1998, pgs. 1681-1684.
- ICAO (2008) Engine Exhaust Emissions Data Bank, First Edition 1995, ICAO, Doc 9646- AN/943
- ICAO, 1993. Annex 16 "International standards and recommended practices, Environmental protection", Volume II "Aircraft engine emissions", 2nd ed.
- IPCC (1999) http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/2_5_Aircraft.pdf

- Istituto Prometeo (2008). Società Aeroporto Toscano S.p.a. - Aeroporto G. Galilei – Pisa - Valutazione dell'impatto prodotto dal complesso delle attività aeroportuali sulla qualità dell'aria. Campagna di monitoraggio Febbraio 2008.
- Istituto Prometeo (2008). Società Aeroporto Toscano S.p.a. - Aeroporto G. Galilei – Pisa - Valutazione dell'impatto prodotto dal complesso delle attività aeroportuali sulla qualità dell'aria. Campagna di monitoraggio Settembre 2008.
- Mircea, M., Ciancarella, L., Briganti, G., Calori, G., Cappelletti, A., Cionni, I. Costa, M., Cremona, G., D'Isidoro, M., Finardi, S., Pace, G., Piersanti, A., Righini, G., Silibello, C., Vitali, L., Zanini, G. (2014) Assessment of the AMS-MINNI system capabilities to predict air quality over Italy for the calendar year 2005. *Atmospheric Environment*, 84, 178-188
- Odman M.T.(2008) – “Air Quality Impacts from Airport Related Emissions:Atlanta Case Study”
- Pehrson J.R. et al (2005) – “Aircraft Particulate Matter Emissions“ Transportation Research Board 84th annual meeting
- Petzold, A. and A. Doppelheuer (1998) – “Reexamination of Black Carbon Mass Emission indexes of a Jet Engine”, *Aerosol Science and Technology*, 29:355-356, 1998.
- Petzold, A., A. Doppelheuer, C.A. Brock, and F. Schroder (1999) – “In situ observations and model calculations of black carbon emission by aircraft at cruise altitude”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, No. D18, September 27, 1999, pgs.22.171 – 22.181.
- Punto Energia (2001). Pressione ambientale di Malpensa 2000 sul territorio circostante.
- Silibello, C., Bolignano, A., Sozzi, R., Gariazzo, C. (2014) Application of a chemical transport model and optimized data assimilation methods to improve air quality assessment. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 7, 3, 283-296.
- Unal A. et al. (2005) – “Airport related emissions and impacts on air quality: Application to the Atlanta International Airport” , *Atmospheric Environment*, Vol.39, Issue 32, October 2005, Pages 5787-5798
- U.S. EPA (1986): "Guideline on air quality models (Revised)", Rep. EPA-450/2-78-027R.
- U.S. EPA (1995): AP-42 “A compilation of air pollutants emission factors”. Fifth edition. (available from GPO – Government Printing Office and NTIS).
- Walker, S.E., Schaap, M., Slini, L. (2006) Data assimilation, Air4EU WP6 synthesis, Milestone report 6.8.
- Wayson R.L, Fleming G.G., Kim B., Draper J (2003) – “Derivation of A First Order Approximation of Particulate Matter From Aircraft”, 96th Annual Conference and Exhibition of the Air & Waste Management Association, San Diego , CA , June 22-26, 2003
- Whitfield, P.D., D.E. Hagen, G. Siple, J. Pehrson (2001) – “Estimation of Particulate Emission indexes as a Function of Size for the LTO Cycle for Commercial Jet Engines”, *Proceedings of the Air & Waste Management Association Annual Meeting Orlando, Florida, June, 2001.*