

Impatto dell'aeroporto di Pisa sulla qualità dell'aria

anno 2013





ARPAT

Agenzia regionale
per la protezione ambientale
della Toscana

Impatto dell'aeroporto di Pisa sulla qualità dell'aria

INSIEME PER UN FUTURO SOSTENIBILE

Titolo report: Impatto dell'aeroporto di Pisa sulla qualità dell'aria

A cura di:

Gaetano Licitra

ARPAT – Responsabile Settore STEPPASⁱ – Direzione Tecnica

Autori:

Gaetano Licitra, Debora Bellassai, Valeria Tricarico

ARPAT

Hanno contribuito:

per i paragrafi 4.2 e 5.2.1

Silvia Becagli, Roberto Udisti -Università degli studi di Firenze, Dipartimento di Chimica

per il cap. 6

Giulia Cesaroni, Francesco Forastiere - Dipartimento di Epidemiologia del Servizio Sanitario Regionale Regione Lazio

Coordinamento dell'attività di indagine

Valeria Tricarico - ARPAT

Pianificazione dell'indagine

Gigliola Ciacchini, Gaetano Licitra, Marco Paoli, Valeria Tricarico - ARPAT

Realizzazione dell'indagine attraverso dosimetri ambientali

Debora Bellassai, Luciano Caputo, Roberto Fruzzetti, Gianfranco La Conca, Valeria Tricarico - ARPAT

Realizzazione dell'indagine attraverso Laboratorio Mobile della Provincia di Pisa ed elaborazione e validazione dei risultati

Guido Menichetti, Alessandro Sanna -Provincia di Pisa

Roberto Fruzzetti, Gianfranco La Conca, Dennis Dalle Mura - ARPAT

Realizzazione dell'indagine attraverso Laboratorio Mobile dell'Università di Firenze ed elaborazione e validazione dei risultati

Silvia Becagli, Roberto Udisti - Università degli studi di Firenze, Dipartimento di Chimica

ⁱ Settore Tecnico Promozione, Produzione delle Attività e dei Servizi (settore previgente alla riorganizzazione ARPAT approvata con DGRT 796/2011)

Misure di Laboratorio e loro validazione

Paolo Altemura (Aldeidi), Valeria Tricarico (BTEX) - ARPAT

Teresa Concari e Adriana Pirozzi (NO₂) - ARPA Emilia Romagna

Caratterizzazione dell'attività aeroportuale ed elaborazione dati meteorologici

Debora Bellassai - ARPAT

Database georeferenziato e predisposizione schede sito

Moreno Comelli - IFAC-CNR Firenze

Modellizzazione LUR dei risultati dosimetrici sull'intera città di Pisa

Giulia Cesaroni, Francesco Forastiere - Dipartimento di Epidemiologia del Servizio Sanitario Regionale Regione Lazio

Elaborazione complessiva dati del rapporto.

Gaetano Licitra, Valeria Tricarico - ARPAT

Si ringrazia:

Colonnello Marco Ristori, Tenente Colonnello Roberto Leomporra, M.llo di 1^a cl Simone Sanna - 46^a Aerobrigata dell'Aeronautica Militare di Pisa

Pasquale Tirota - Società Aeroporto Toscano S.p.A.

Laura Botti - Alitec Srl

© ARPAT 2013

SE STAMPATO:

Stampato su carta che ha ottenuto il marchio di qualità ecologica dell'Unione Europea – Ecolabel

PREMESSA	6
SINTESI	7
1 INTRODUZIONE	9
1.1 Finalità e metodo seguito	10
2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO, INDICATORI E INDICI PER LA RAPPRESENTAZIONE DEI RISULTATI	11
3 CARATTERIZZAZIONE DEL CONTESTO TERRITORIALE	13
3.1 Sorgenti di inquinamento urbano e qualità dell'aria a Pisa.....	13
3.2 Condizioni climatiche ambientali.....	14
3.3 Caratteristiche dell'attività aeroportuale	19
3.3.1 Sorgenti emissive caratteristiche aeroportuali.....	22
4 LE CAMPAGNE SPERIMENTALI DI MISURA: MATERIALI E METODI	25
4.1 I dosimetri ambientali utilizzati.....	25
4.2 Strumentazione impiegata nelle misure a bordo pista dall'Università di Firenze e Alitec presso il sedime aeroportuale da ARPAT	27
4.3 Il disegno di campionamento: distribuzione dei dosimetri e utilizzo dei laboratori mobili	30
5 LE CAMPAGNE SPERIMENTALI DI MISURA: RISULTATI E LORO ANALISI	35
5.1 Campagne con dosimetri	35
5.1.1 Biossido di Azoto	38
5.1.1.1 Validazione dei dati attraverso il controllo con i valori delle centraline della rete regionale della qualità dell'aria e mezzo mobile	39
5.1.1.2 Distribuzione spaziale e temporale della concentrazione media di NO ₂	40
5.1.2 Aldeidi.....	45
5.1.2.1 Distribuzione spaziale e temporale della concentrazione media delle Aldeidi	45
5.1.3 BTEX	51
5.1.3.1 Distribuzione spaziale e temporale della concentrazione media dei BTEX.....	51
5.2 Polveri e metalli	57
5.2.1 Campagne con i laboratori mobili	57
6 MODELLIZZAZIONE LUR DEI RISULTATI DOSIMETRICI SULL'INTERA CITTÀ DI PISA.....	80
6.1 I modelli LUR per la previsione della distribuzione spaziale degli ossidi di azoto	80
6.2 La mappa dell'inquinamento da ossidi di azoto a Pisa	81
7 CONCLUSIONI	84
8 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	86

ALLEGATI

Allegato 1: Tabella mappatura campionamento

Allegato 2: Schede sito [consultabili on-line per mezzo di un file KML](#) (per la visualizzazione 3D di siti e indici associati - per la consultazione serve [Google Earth](#)) o [scaricabili in formato PDF](#). Tutto il materiale (incluse le istruzioni per la consultazione) è [disponibile sul sito Web di ARPAT](#).

PREMESSA

La Regione Toscana, sia nel PRAA – Piano Regionale di Azione Ambientale – che nel PSR – Piano Sanitario Regionale – pone fortemente l’accento sul tema della prevenzione come integrazione tra ambiente e salute; ciò si traduce per ARPAT in una stretta collaborazione tra i suoi Dipartimenti operanti sul territorio e quelli di Prevenzione delle Aziende USL anche mettendo a disposizione dati sull’inquinamento ambientale utili allo studio dei loro effetti sanitari sulla popolazione.

In tale ambito, la Regione Toscana ha finanziatoⁱⁱ il progetto sulle tematiche di ambiente e salute per un importo di 400.000,00 Euro, e poi ha autorizzato ARPATⁱⁱⁱ ad utilizzare le risorse residue, provenienti da risparmi nell’esecuzione del progetto pari a 50.000,00 Euro, per approfondire la linea progettuale n. 5 “Individuazione esposizione della popolazione al rumore, ai sensi della Direttiva europea 49/2002 recepita dal D.lgs. 194/2005”, (Ns. Decreto D. G. 141/2011), includendo gli aspetti relativi all’inquinamento atmosferico determinato dall’impatto dell’aeroporto sulla qualità dell’aria urbana.

L’approfondimento della linea progettuale n. 5 ha preso spunto dal progetto “l’Impatto dell’inquinamento ambientale prodotto dagli Aeroporti sulla salute dei residenti”, (attività strategica n. 1 del programma 2010 del Centro Nazionale per la prevenzione e controllo delle malattie (CCM) del Ministero del Lavoro, della Salute e delle Politiche Sociali, nella linea progettuale Ambiente e Salute, ambito sorveglianza epidemiologica innovativa).

Lo studio nella città di Pisa e presso l’aeroporto Galileo Galilei è stato condotto quindi in allineamento con quello analogo condotto su Ciampino da ISPRA e ARPA LAZIO nello stesso periodo.

In particolare il progetto, ripetendo il monitoraggio secondo le metodologie sviluppate da ESCAPE (European Study of Cohorts for Air Pollution Effects), ha effettuato l’indagine sia all’interno del sedime aeroportuale e area limitrofa, sia nell’area urbana della città di Pisa.

Si è così cercato di coinvolgere le istituzioni pubbliche che già avevano avviato i progetti sopra indicati nella realizzazione di questo progetto. Il Dipartimento di Epidemiologia del Servizio Sanitario Regionale Regione Lazio ha così collaborato alla realizzazione delle mappe di inquinamento urbano, mentre l’Università di Firenze e la società Alitec s.r.l., nell’ambito di propri studi sul particolato urbano e indagini per la messa a punto di metodiche per la sua misura, hanno accettato di realizzare alcune campagne di misura all’interno del sedime aeroportuale, fornendo quindi dati importanti a meglio descrivere l’impatto aeroportuale sulla qualità dell’aria. I dosimetri e le analisi sul NO₂ sono state commissionate all’ARPA Emilia Romagna, che ha acquisito negli anni una esperienza specifica e aveva già collaborato per lo studio analogo sull’aeroporto di Ciampino.

Parole chiave: Aeroporto; inquinamento atmosferico; BTEX; Aldeidi; NO₂; PM₁₀; PM_{2,5}; Metalli; LUR.

ⁱⁱ con nota del 22.05.2008, prot. A00GRT/142365/Q.050.010.010, della Dirigente responsabile del Settore Finanza della Direzione Generale Diritto alla Salute e Politiche di Solidarietà, Dr.ssa Carla Donati, recepita con decreto del Direttore Generale di ARPAT n. 351/2008

ⁱⁱⁱ con nota prot. 657441/Q.50.010.010 del 14/03/2011 della Dirigente responsabile Dott.ssa M. Chiara Innocenti, la Direzione generale Diritti alla cittadinanza e coesione sociale della Regione Toscana

SINTESI

Al fine di valutare il contributo del traffico aeroportuale sui livelli di inquinamento atmosferico complessivo nella città di Pisa, sono state programmate una serie di campagne di misura in ambiente urbano e nel sedime aeroportuale, queste ultime anche in collaborazione con l'Università di Firenze e la società Alitec s.r.l. per le misure in continua del particolato e sua speciazione.

Le campagne di misura si sono svolte in tre diverse stagioni dell'anno attraverso campionamento passivo su dosimetri per la misura di BTEX^{iv}, Aldeidi e NO₂^v, questi ultimi forniti da ARPA Emilia Romagna, e analisi con tecniche cromatografiche e spettrofotometriche. Le tre campagne sono state condotte all'interno del sedime aeroportuale contemporaneamente in 11 siti collocati lungo le piste e nei punti di manovra ed in circa 54 siti distribuiti nell'area urbana, in modo tale da rappresentare le diverse situazioni del carico emissivo (alto, medio e basso traffico) e del grado di urbanizzazione (zona residenziale centro, residenziale periferico e zona rurale).

Contemporaneamente alle misure degli inquinanti e delle condizioni meteorologiche sono stati acquisiti, per ogni sito, i volumi e la composizione del traffico lungo le strade monitorate e lungo le strade più prossime, le cui emissioni avrebbero potuto influenzare i livelli di concentrazione misurati.

I dati ottenuti nelle campagne di misura, organizzati in un geodatabase normalizzato basato su PostgreSQL con estensione spaziale PostGIS, sono stati utilizzati come dati in ingresso per elaborare indici qualitativi assegnati ai siti per singola famiglia di inquinanti (BTEX, Aldeidi e NO₂) e per singola campagna; per ogni sito è stata poi calcolata la media pesata degli indici relativi ai singoli inquinanti ottenendo un indice complessivo che tiene conto della concentrazione di Benzene, Formaldeide e NO₂.

Attraverso modelli LUR (Land Use Regression) è stata inoltre realizzata una mappa di distribuzione degli Ossidi di Azoto per la città di Pisa.

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 contenuto attraverso l'utilizzo di strumentazione specifica allocata in laboratori mobili.

Per il posizionamento dei due mezzi mobili (appartenenti alla Provincia di Pisa e all'Università di Firenze) è stato scelto un sito, il più prossimo possibile alla pista e nella zona di più frequente atterraggio, dove fosse possibile campionare le polveri generate in questa fase dall'usura degli pneumatici e dei freni che contengono metalli caratteristici. Ciò è stato possibile grazie alla collaborazione dell'Aeronautica Militare (46^a Brigata Aerea) che ha messo a disposizione una cabina elettrica per l'alimentazione, oltre che i siti all'interno dell'area aeroportuale di sua competenza.

Complessivamente i livelli d'inquinamento rilevati mostrano che l'aeroporto non impatta in maniera rilevante sulla qualità dell'aria dell'ambiente urbano, se si fa riferimento ai valori medi orari, giornalieri e annuali previsti dalle norme vigenti. L'opportunità di effettuare un monitoraggio in continua del particolato atmosferico in estrema prossimità della pista, anche con sensori innovativi, ha consentito di evidenziare la significativa variabilità nel brevissimo termine dei livelli di inquinamento in corrispondenza alle operazioni di volo.

^{iv} Benzene, Toluene, Etilbenzene, para-meta-orto Xilene (BTEX)

^v Biossido di Azoto (NO₂)

I risultati dello studio forniscono utili indicazioni per identificare gli inquinanti caratteristici emessi dalle attività aeroportuali e le loro concentrazioni. Sulla base di essi, potranno essere sviluppati modelli di propagazione che consentano di comprendere meglio lo sviluppo temporale della formazione degli inquinanti e la loro distribuzione spaziale. I dati ottenuti costituiranno inoltre un utile riferimento in studi epidemiologici interessati a evidenziare gli impatti sulla salute delle infrastrutture aeroportuali, con particolare riguardo ai residenti più vicini all'infrastruttura possono essere esposti, se in estrema prossimità, a livelli anche elevati di inquinanti i per brevi periodi.

1 INTRODUZIONE

L'aviazione civile è uno dei settori maggiormente in crescita dell'economia globale, con un aumento del traffico annuale di circa il 5% dagli anni novanta [1]. Il progressivo aumento del traffico aeroportuale, legato soprattutto all'avvento dei vettori low-cost, ha comportato per i cittadini residenti nei pressi degli aeroporti un aumento dell'inquinamento acustico ambientale e delle emissioni di scarico, generate dagli aeromobili e dal traffico stradale tipicamente associato alla presenza di impianti aeroportuali [2].

Si stima che nei prossimi vent'anni sia possibile che la domanda di trasporto aereo commerciale raddoppi. È verosimile che di fronte a una tale espansione della domanda seguirà una proporzionale espansione degli aeroporti esistenti, compresa la conversione alle crescenti esigenze civili di aeroporti militari, di aeroporti dedicati all'Aviazione Generale (voli di Stato, umanitari e Protezione Civile) e di piccoli aeroporti regionali [3].

Un aeroporto è un sistema complesso che può determinare un impatto significativo sull'ambiente. Naturalmente alla crescita del traffico è associato un aumento della pressione ambientale da parte del settore sia a livello locale, sia regionale e globale. Potenzialmente le emissioni prodotte dalle attività aeroportuali possono influenzare la qualità dell'aria e contribuire all'esposizione della popolazione determinando un incremento del rischio da esposizione a inquinanti aerodispersi sia localmente sia su scala più ampia.

Per valutare l'impatto sulla qualità dell'aria è necessario individuare e comprendere alcune importanti peculiarità; è necessario, infatti, acquisire informazioni sulle sorgenti e individuare le diverse fasi delle attività aeroportuali che possono determinare emissioni di inquinanti.

Le attività di movimentazione degli aeromobili, le prove motori, le fasi di taxiing, decollo ed atterraggio, oltre alle emissioni prodotte dagli impianti al servizio dell'infrastruttura, possono costituire una significativa fonte di inquinamento atmosferico in determinate condizioni atmosferiche in aree prossime all'aeroporto e comunque contribuire all'inquinamento urbano.

La determinazione di questo contributo non è semplice, sia per la tipologia degli inquinanti emessi che si sovrappongono a quelli tradizionali tipici del traffico stradale, sia per la modalità di emissione, che per le sue caratteristiche di intermittenza non può essere caratterizzata con le metodiche tradizionali, basate su misure di lungo termine.

Recenti studi hanno infatti evidenziato la possibilità che un contributo all'immissione in aria di elementi e composti contenenti metalli e metalloidi possa essere comunque originata dal traffico veicolare in relazione all'uso di sistemi catalitici, con emissione di composti della famiglia del Platino [4] [5] ed in relazione ai fenomeni di attrito che determinano rilascio di particolato e che coinvolgono asfalto, pneumatici e sistemi frenanti. Anche nel caso dei velivoli è stato osservato che composti dell'antimonio e del rame (in relazione all'usura delle pastiglie dei freni) vengono rilasciati in associazione a particelle caratterizzate da densità elevata nella frazione coarse oltre che a Bario, Zinco e Molibdeno in seguito all'attrito dei pneumatici sul terreno [6] [7].

1.1 FINALITÀ E METODO SEGUITO

La finalità dello studio è quella di valutare gli aspetti scientifici relativi all'inquinamento atmosferico generato dal traffico aeroportuale attraverso un sistema integrato di misure e di modelli previsionali dell'emissione e diffusione degli inquinanti per evidenziare la variabilità spazio-temporale e il contributo dell'aeroporto nell'immissione in area ambiente di inquinanti gassosi e della frazione di particolato fine ed ultrafine.

Obiettivo dello studio è quello di:

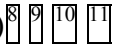
- identificare gli inquinanti caratteristici emessi dalle attività aeroportuali;
- misurare le loro concentrazioni e quindi il loro impatto sulla qualità dell'aria;
- comprendere meglio lo sviluppo temporale della loro formazione;
- avere utili informazioni da utilizzare in eventuali futuri studi epidemiologici degli impatti sulla salute di infrastrutture aeroportuali.

Lo studio è stato svolto nel biennio 2011-2012 attraverso tre campagne di misura, ciascuna condotta contemporaneamente all'interno del sedime aeroportuale e nell'area urbana. Le campagne di misura hanno interessato gli inquinanti NO_x, Aldeidi e BTEX, attraverso campionamento passivo su dosimetri (Radiello®) e analisi con tecniche cromatografiche e spettrofotometriche. La validazione dei risultati è stata garantita anche attraverso l'utilizzo di alcuni dosimetri opportunamente collocati in prossimità delle centraline della Rete Regionale della Qualità dell'Aria gestite da ARPAT per consentire il confronto dei risultati con dati certificati in maniera indipendente.

In occasione delle ultime due campagne sopra citate, sono state svolte misure di polveri sottili presso l'aeroporto di Pisa, lungo la pista, per evidenziare attraverso tecniche di "Light scattering" e spettroscopia di emissione atomica (ICP-AES) non solo le dimensioni del particolato, ma anche la sua speciazione chimica.

Al fine di cogliere la variabilità stagionale, le tre campagne di misura si sono svolte in tre diverse stagioni dell'anno (estate, autunno, inverno).

I dati ottenuti sono stati utilizzati per produrre, insieme alle informazioni sul traffico rilevate contestualmente alle misure degli inquinanti, delle mappe di inquinamento.

Le mappe sono state ottenute attraverso modelli LUR (Land Use Regression)  nei quali si integrano campagne di monitoraggio ad hoc a modelli di regressione che stimano i valori misurati durante le campagne con l'ausilio di predittori legati alla geografia ed uso del suolo del luogo circostante il punto di monitoraggio.

Il confronto dei dati urbani con quelli registrati nel sedime aeroportuale, ha fornito una misura dell'apporto dato dall'attività aeroportuale alla qualità dell'aria.

2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO, INDICATORI E INDICI PER LA RAPPRESENTAZIONE DEI RISULTATI

A partire dal 01/01/2011 la qualità dell'aria viene monitorata attraverso la nuova rete regionale di rilevamento gestita da ARPAT, che va a sostituirsi alle preesistenti reti provinciali [2]. L'intero sistema è improntato ai dettami legislativi contenuti a:

- livello comunitario: nella Direttiva 2008/50/CE
- livello nazionale: nel Decreto Legislativo del 13 agosto 2010, n. 155 e s.m.i.
- livello regionale: nella L.R. 9/2010 e nella DGRT 1025/2010

e mira a garantire una valutazione ed una gestione della qualità dell'aria su base regionale anziché su base provinciale. Uno dei vantaggi introdotti dal nuovo sistema consiste nella possibilità di sganciare la valutazione della qualità dell'aria dal rigido sistema dei confini amministrativi a favore di un sistema fondato sulla ripartizione del territorio in **zone omogenee** dal punto di vista delle fonti di inquinamento, delle caratteristiche orografiche e meteo-climatiche e del grado di urbanizzazione.

La DGRT 1025/2010 ha suddiviso il territorio della regione toscana in sei zone (agglomerato Firenze, zona Prato - Pistoia, zona costiera, zona Valdarno pisano e piana lucchese, zona Valdarno aretino e Valdichiana e zona collinare montana) per quanto riguarda gli inquinati indicati nell'allegato V del D.Lgs 155/2010 (biossido di zolfo, biossido di azoto, ossidi di azoto, materiale particolato PM₁₀- PM_{2,5}, Benzene, monossido di carbonio) e tre zone (zona pianure costiere, zona pianure interne e zona collinare montana) per quanto attiene l'ozono indicato nell'appendice I del D.Lgs 155/2010.

Per ciascuna zona è previsto un certo numero di stazioni di monitoraggio che dipende dalla popolazione residente e dallo storico delle misure effettuate nella zona.

Il comune di Pisa è compreso nella zona Valdarno pisano e Piana Lucchese e nella zona Pianure costiere.

ARPAT effettua il monitoraggio della qualità dell'aria attraverso stazioni di rete fissa e/o con i laboratori mobili al fine di fornire alle Amministrazioni competenti il quadro conoscitivo necessario a determinare le politiche di gestione dell'ambiente ed elabora una relazione annuale sullo stato della qualità dell'aria.

Sul territorio comunale di Pisa sono presenti le due centraline di monitoraggio classificate ai sensi del D.Lgs 155/2010 come riportato in Tabella 1 e Tabella 2.

Tabella 1

Zonizzazione	Class. ^{vi}	Prov.	Comune	Denominazione	PM ₁₀	PM _{2,5}	NO ₂	CO
Zona Valdarno pisano e Piana lucchese	UF	PI	Pisa	Passi	X	X	X	
	UT	PI	Pisa	Borghetto	X		X	X

Tabella 2

Zonizzazione	Class. ^{vii}	Prov.	Comune	Denominazione	NO ₂	O ₃
Zona pianure costiere	S	PI	Pisa	Passi	X	X

^{vi} Legenda classificazione stazioni (All. III D.Lgs 155/2010) UF – Urbana fondo; UT – Urbana traffico; RF – Rurale fondo; PF – Periferica fondo

^{vii} Legenda classificazione stazioni-Ozono (All. VIII D.Lgs 155/2010) U – Urbana; S –Suburbana; R – Rurale; RF – Rurale di fondo

Al fine di una visualizzazione che faciliti la lettura e l'interpretazione dei risultati ottenuti nel presente studio, relativamente alle campagne condotte con dosimetri, sono stati elaborati degli indici qualitativi assegnati ai siti per singola famiglia di inquinanti e per singola campagna.

Gli indici sono stati calcolati considerando il limite normativo, qualora vigente, individuando nove classi di ampiezza uguale, partendo dal valore zero fino al valore limite. In tale scala di valori il valore 10 è assegnato al superamento del limite.

Per quanto attiene ai limiti vigenti degli inquinanti monitorati nello studio con specifici dosimetri (Benzene, NO₂, Formaldeide), l'allegato XI del D.Lgs 155/2010 impone i valori limite per le concentrazioni nell'aria ambiente di biossido di azoto e Benzene come riportati nella Tabella 3:

Tabella 3

Valori limite D.Lgs 155/2010	
Benzene	5 µg/m ³ media annuale
NO ₂	200µg/m ³ media oraria (max 18 superamenti annui)
NO ₂	40 µg/m ³ media annua

Per quanto attiene alla Formaldeide e le Aldeidi in generale, esse sono ritenute essere per lo più inquinanti indoor e non hanno un valore limite di riferimento nell'aria ambiente.

Viene normalmente preso come limite di riferimento per la protezione della salute umana in ambienti indoor il valore 100 µg/m³ come media su 30 minuti (valore guida assegnato dall'OMS). Applicando un fattore cautelativo pari a 5 per l'esposizione a lungo termine come nel caso degli NO₂ (valore limite pari a 40 come media annuale e 200 di media oraria), si è assegnato come limite superiore 20 µg/m³; tale valore non è ovviamente un limite, ma solo un ausilio per una migliore leggibilità dei dati.

Per ogni sito è stata poi calcolata la media pesata degli indici relativi ai singoli inquinanti ottenendo un indice complessivo che tiene conto della concentrazione di Benzene, Formaldeide e NO₂. In Tabella 4 sono riportati per ciascun inquinante gli intervalli di concentrazione corrispondenti alla scala degli indici.

Tabella 4: indici.

Indice	conc. NO₂ [µg/m³]	conc. Formaldeide [µg/m³]	conc. Benzene [µg/m³]
1	0 ÷ 4.44	0 ÷ 2.22	0 ÷ 0.56
2	4.44 ÷ 8.89	2.22 ÷ 4.44	0.056 ÷ 1.11
3	8.89 ÷ 13.33	4.44 ÷ 6.67	1.11 ÷ 1.67
4	13.33 ÷ 17.78	6.67 ÷ 8.89	1.67 ÷ 2.22
5	17.78 ÷ 22.22	8.89 ÷ 11.11	2.22 ÷ 2.78
6	22.22 ÷ 26.67	11.11 ÷ 13.33	2.78 ÷ 3.33
7	26.67 ÷ 31.11	13.33 ÷ 15.56	3.33 ÷ 3.89
8	31.11 ÷ 35.56	15.56 ÷ 17.78	3.89 ÷ 4.44
9	35.56 ÷ 40	17.78 ÷ 20	4.44 ÷ 5
10	> 40	> 20	> 5

3 CARATTERIZZAZIONE DEL CONTESTO TERRITORIALE

3.1 SORGENTI DI INQUINAMENTO URBANO E QUALITÀ DELL'ARIA A PISA

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).

L'aeroporto di Pisa è un aeroporto militare aperto al traffico civile; la gestione delle piste, della torre di controllo, delle radioassistenze alla navigazione e del radar di controllo di avvicinamento è di competenza dell'Aeronautica Militare Italiana (46esima Brigata Aerea).

L'aeroporto è caratterizzato da due piste di cui una principale ed una ausiliaria, entrambe sono inclinate di 37° rispetto al Nord magnetico e lunghe rispettivamente 2993 m e 2497 m.

Entrambe le piste possono essere utilizzate, non contemporaneamente, nelle due direzioni, sia per il decollo che per l'atterraggio; il traffico aereo, comunque, normalmente si svolge solo sulla pista principale, mentre quella ausiliaria costituisce la pista di rullaggio.

Dai dati pubblicati dalla Società Aeroporto Toscano (SAT) Galileo Galilei S.p.A.^{viii} emerge un aumento di traffico per i primi sei mesi del 2012 pari al 3,8% rispetto al 2011 ed oltre 2 milioni i passeggeri transitati

La direzione privilegiata per i decolli e gli atterraggi è quella Sud, poiché ciò evita il sorvolo della città. In condizioni meteorologiche di vento in coda maggiore di 10 nodi, la direzione Nord è obbligatoria in decollo, inoltre a causa dell'elevato traffico attuale, specialmente estivo, quasi tre quarti dei decolli vengono effettuati in quella direzione.

In condizione meteorologiche particolari, è risultato necessario, seppur in rare occasioni, anche l'atterraggio da Nord.

I voli militari, che rappresentano oltre un terzo di quelli civili, non sono sottoposti ad alcuna limitazione operativa di legge riguardo alle traiettorie da seguire.

Gli inquinanti monitorati nel presente studio sono Biossido di Azoto (NO₂), Benzene, Toluene, Etilbenzene, Xileni (BTEX), Aldeidi, Polveri e metalli aerodispersi, sia con campagne di misura con dosimetri che attraverso laboratori mobili come meglio si vedrà nel seguito.

Dalle relazioni annuali sullo stato della qualità dell'aria nella regione toscana per l'anno 2011 ^[3] e per l'anno 2012 ^[4], emerge un sostanziale rispetto dei valori limite fatta eccezione per la concentrazione dell'NO₂ nella stazione Borghetto (traffico urbano), la cui media annuale nel 2011 è stata superiore al VL.

In Tabella 5 sono riportati i valori di medie annuali riscontrate dalle centraline (per il CO è riportata la massima media giornaliera sulle 8 ore).

^{viii} Società che gestisce l'aeroporto Galileo Galilei di Pisa

Tabella 5: valori medi annuali di concentrazioni.

	<i>Passi (UF-S)</i>		<i>Borghetto (UT)</i>		VL
	2011	2012	2011	2012	
PM₁₀ µg/m³	26	25	30	28	40
PM_{2,5} µg/m³	18	16			25
NO₂ µg/m³	21	21	43	37	40
CO µg/m³	2,8	2,4			10
O₃ µg/m³	12	5			25 come media su 3 anni

3.2 CONDIZIONI CLIMATICHE AMBIENTALI

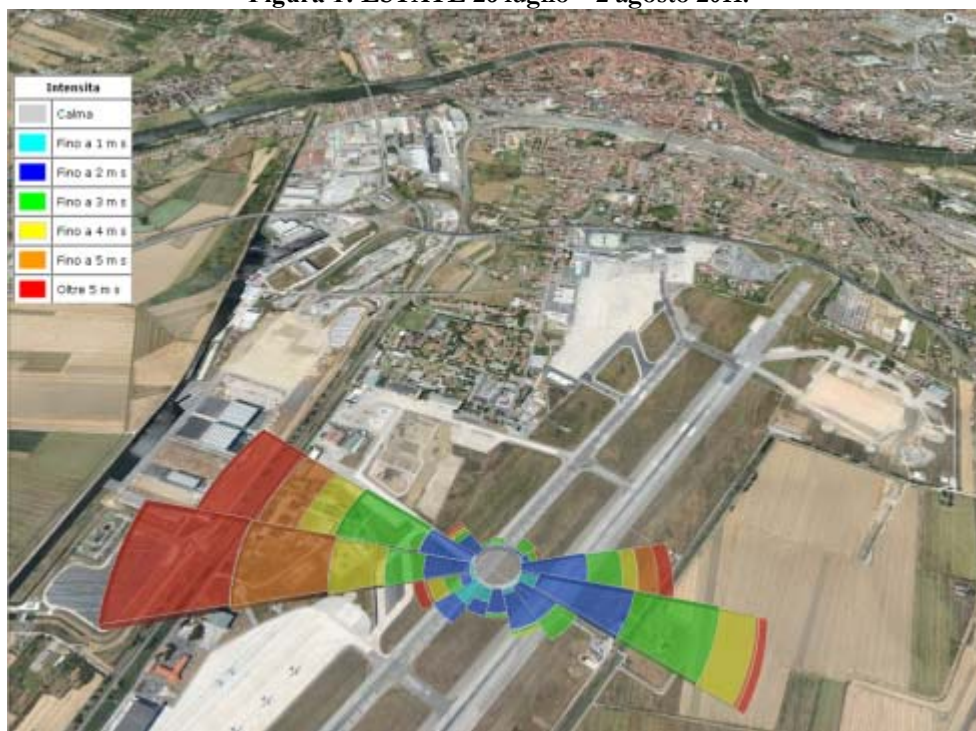
Per caratterizzare la meteo climatologia locale dei tre periodi di campionamento sono stati utilizzati i dati del sito wunderground ^[15] della stazione synop dell'aeroporto di Pisa (codice LIRP) e gestiti dall'Aeronautica Militare. I dati sono liberamente accessibili e costituiscono una base dati meteorologica con le rilevazioni di tutte le stazioni meteorologiche mondiali che afferiscono al WMO (World Meteorological Organization). La serie tipo METAR codice WMO LIRP ha frequenza sul quarto d'ora e presenta le osservazioni di velocità e direzione del vento, visibilità, temperatura dell'aria, umidità, pressione, precipitazioni e visibilità, condizioni generali.

Tra le variabili meteorologiche a disposizione è stata posta particolare attenzione alla direzione e velocità del vento poiché maggiormente correlata alla dispersione degli inquinanti.

La distribuzione delle direzioni di provenienza del vento per ciascuna campagna è descritta dai grafici riportati di seguito (rose dei venti).

La direzione del vento è stata suddivisa in 16 settori ciascuno di ampiezza di 10°N, e per ciascuno è stato riportato il numero di occorrenze per le sei classi di velocità individuate. Sono state considerate anche le calme di vento, alle quali non è possibile associare alcuna direzione e che sono particolarmente sfavorevoli alla dispersione degli inquinanti.

Figura 1: ESTATE 26 luglio – 2 agosto 2011.



Direzione	°N	$v \leq 1$ m/s	$1 < v \leq 2$ m/s	$2 < v \leq 3$ m/s	$3 < v \leq 4$ m/s	$4 < v \leq 5$ m/s	$v > 5$ m/s	frequenza direzione (%)
N	350-360 0-10	1	1	2	0	0	0	1.05
NNE	20-30	0	2	0	0	0	0	0.52
NE	40-50	1	1	4	0	0	0	1.57
ENE	60-70	1	2	2	0	0	1	1.57
E	80-100	0	17	9	4	5	4	10.24
ESE	110-120	5	24	21	9	1	2	16.27
SE	130-140	1	11	6	0	0	0	4.72
SSE	150-160	2	10	1	1	0	0	3.67
S	170-190	0	7	1	0	0	0	2.10
SSO	200-210	4	4	0	0	0	0	2.10
SO	220-230	7	6	0	0	0	0	3.41
OSO	240-250	1	3	4	4	1	3	4.20
O	260-280	1	12	10	14	24	31	24.15
ONO	290-300	1	14	23	11	11	18	20.47
NO	310-320	0	7	2	1	1	1	3.15
NNO	330-340	0	2	1	0	0	0	0.79
frequenza velocità (%)		6.17	30.37	21.23	10.86	10.62	14.81	

Il numero di calme del periodo è 24, pari al 5.93%; le velocità più frequenti sono tra 1 e 3 m/s. Le direzioni presentano due picchi, il principale per le direzioni O e ONO, tra 20 e 24% di occorrenza, caratterizzato da velocità anche superiori a 3 m/s, il secondario per le direzioni E e ESE, tra 10 e 16%, con velocità nel range di quelle più frequenti.

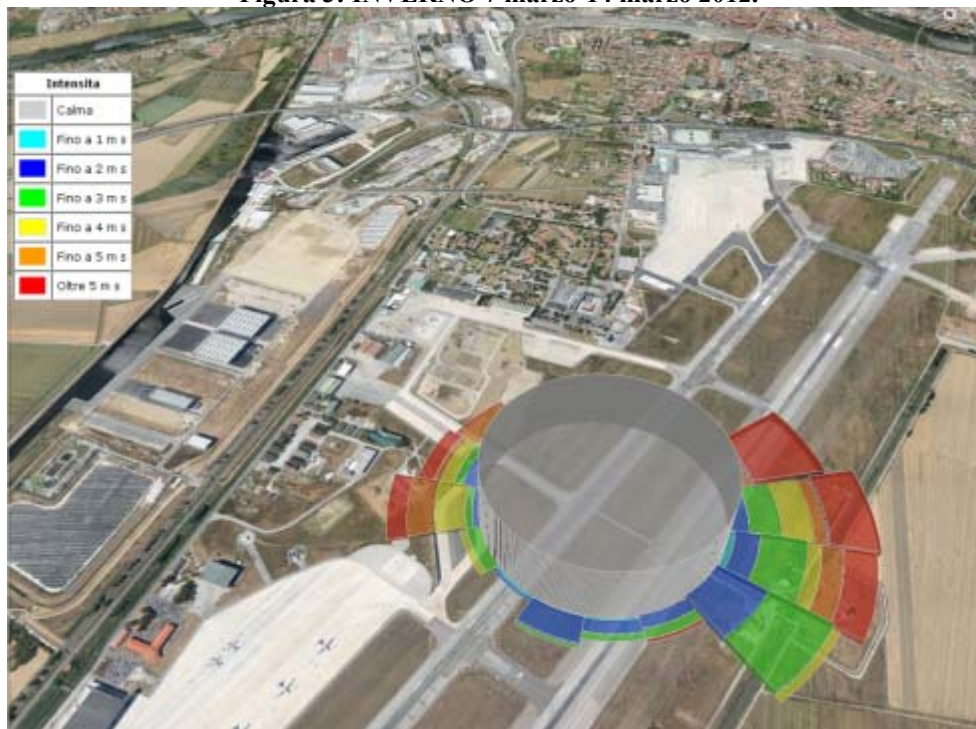
Figura 2: AUTUNNO 9 novembre-16 novembre 2011.



direzione	°N	$v \leq 1$ m/s	$1 < v \leq 2$ m/s	$2 < v \leq 3$ m/s	$3 < v \leq 4$ m/s	$4 < v \leq 5$ m/s	$v > 5$ m/s	frequenza direzione (%)
N	350-360 0-10	0	0	0	0	0	0	0.00
NNE	20-30	2	2	0	0	0	0	0.52
NE	40-50	2	2	0	0	2	0	0.79
ENE	60-70	2	16	2	10	10	2	5.50
E	80-100	8	72	50	30	24	28	27.75
ESE	110-120	4	62	64	50	56	56	38.22
SE	130-140	4	40	34	10	0	0	11.52
SSE	150-160	2	26	4	0	0	0	4.19
S	170-190	2	6	0	0	0	0	1.05
SSO	200-210	2	4	0	0	0	0	0.79
SO	220-230	2	4	2	0	0	0	1.05
OSO	240-250	0	2	0	0	0	0	0.26
O	260-280	2	4	0	0	0	0	0.79
ONO	290-300	4	2	0	2	0	0	1.05
NO	310-320	8	12	0	4	0	0	3.14
NNO	330-340	2	14	10	0	0	0	3.40
	frequenza velocità (%)	5.67	33.00	20.44	13.05	11.33	10.59	

Il numero di calme del periodo è 48, pari al 5.91%. Le velocità più frequenti sono tra 1 e 3 m/s. Le direzioni più frequenti sono E e ESE, tra 28 e 38% con una distribuzione di velocità quasi uniforme. La direzione ad esse attigua (SE) è pari all'11% delle occorrenze ed è caratterizzata da velocità minori di 4 m/s.

Figura 3: INVERNO 7 marzo-14 marzo 2012.



direzione	°N	$v \leq 1$ m/s	$1 < v \leq 2$ m/s	$2 < v \leq 3$ m/s	$3 < v \leq 4$ m/s	$4 < v \leq 5$ m/s	$v > 5$ m/s	frequenza direzione (%)
N	350-360 0-10	0	1	4	1	0	0	2.25
NNE	20-30	1	1	0	1	0	0	1.12
NE	40-50	0	1	2	1	1	2	2.62
ENE	60-70	0	2	1	1	6	23	12.36
E	80-100	1	5	9	9	4	14	15.73
ESE	110-120	2	7	13	4	6	9	15.36
SE	130-140	0	15	18	2	0	0	13.11
SSE	150-160	0	4	3	0	0	1	3.00
S	170-190	1	4	2	0	0	0	2.62
SSO	200-210	1	8	1	0	0	0	3.75
SO	220-230	1	1	0	0	0	0	0.75
OSO	240-250	0	0	4	2	0	0	2.25
O	260-280	0	2	2	9	8	6	10.11
ONO	290-300	0	6	3	4	2	5	7.49
NO	310-320	0	2	4	3	7	2	6.74
NNO	330-340	0	2	0	0	0	0	0.75
frequenza velocità (%)		1.70	14.81	16.02	8.98	8.25	15.05	

Il numero di calme del periodo è 145, pari al 35.19%. Le velocità più frequenti sono tra 1 e 3 m/s. Le direzioni più frequenti, sono E e ESE, con valori attorno al 15% di occorrenza e ENE e SE con valori tra 12 e 13%.

Di seguito in Figura 4 e Figura 5 si riportano gli istogrammi delle direzioni e delle velocità prevalenti per i tre periodi.

Figura 4: istogrammi delle direzioni prevalenti.

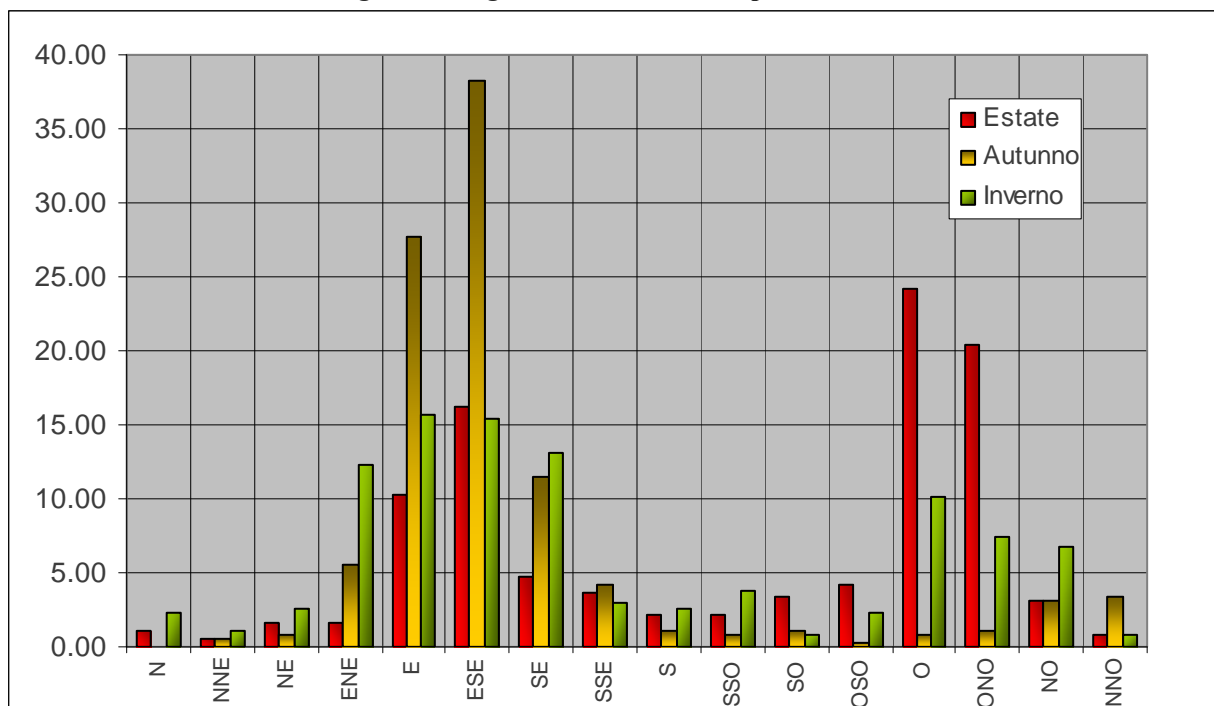
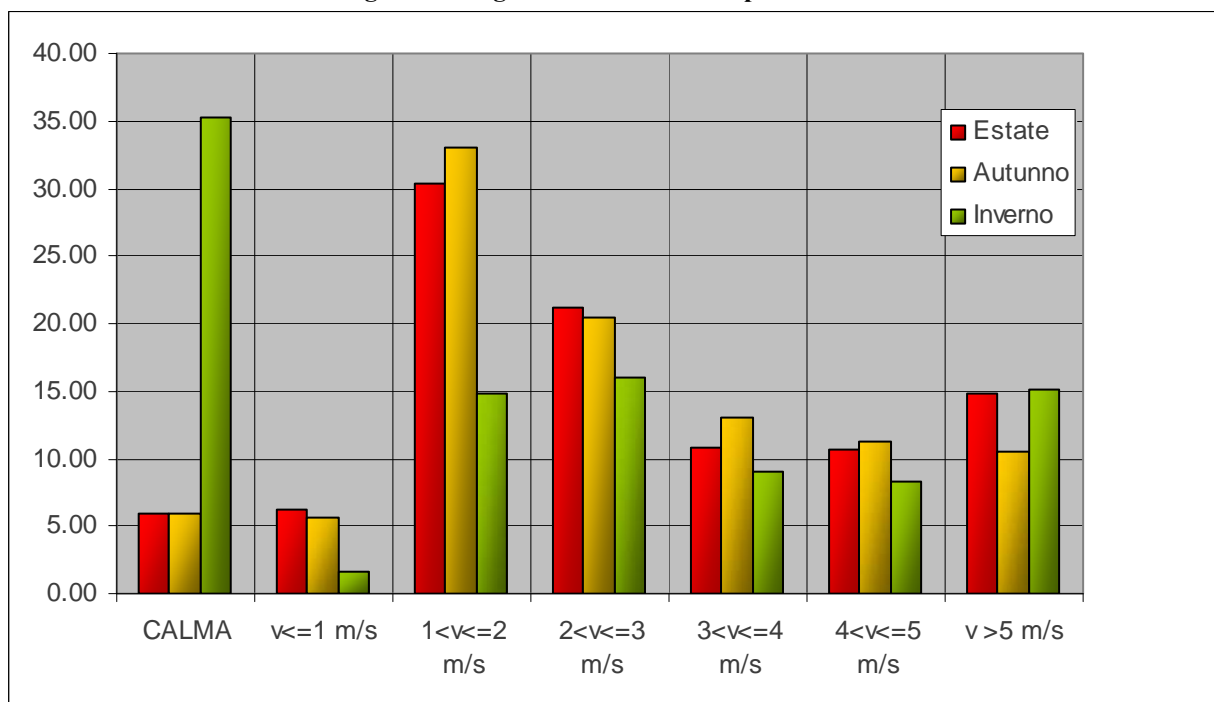


Figura 5: istogrammi delle velocità prevalenti.



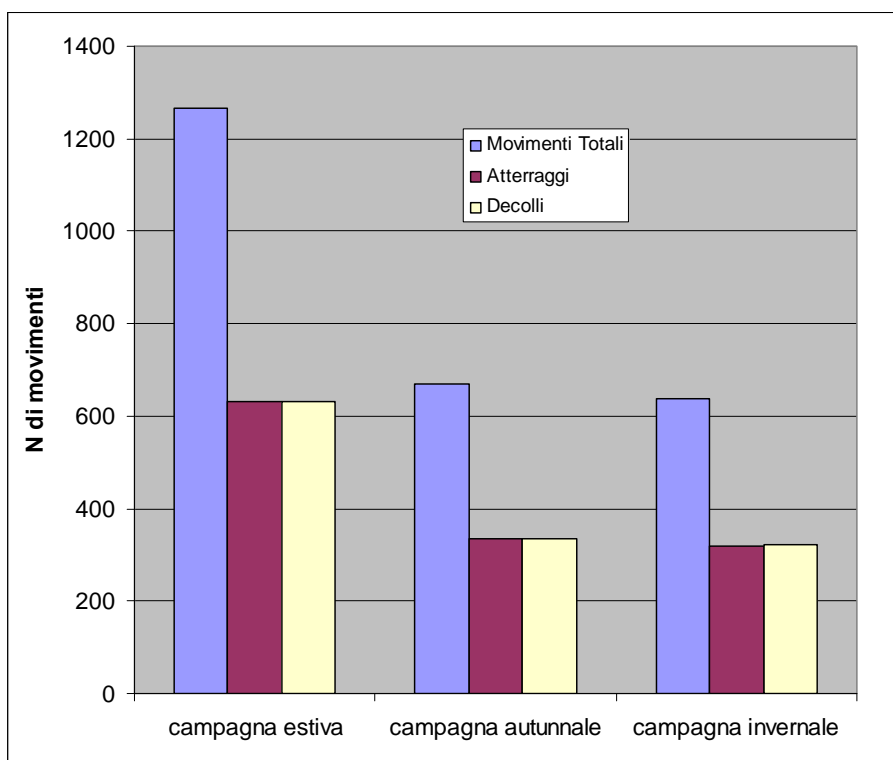
3.3 CARATTERISTICHE DELL'ATTIVITÀ AEROPORTUALE

Il traffico aereo dell'aeroporto Galileo Galilei comprende l'aviazione militare e civile; quella civile si suddivide a sua volta in commerciale e generale: nella prima tipologia rientrano i servizi di trasporto aereo e merci effettuate dai voli di linea in conformità a un orario pubblicato e caratterizzato da regolarità e frequenza, la seconda tipologia, invece, comprende tutti i voli che non sono né militari né di linea (per esempio voli di turismo, jet cargo, lanci con il paracadute). I dati dei voli commerciali sono solitamente reperibili direttamente dai siti web degli aeroporti, quelli di tipologia generale e militare, devono essere richiesti all'ente responsabile della gestione dell'aeroporto.

Attività voli civili

Sono stati analizzati i dati dell'attività aeroportuale civile relativi alle tre campagne di monitoraggio fornite dalla società SAT, in Figura 6 la rappresentazione grafica dei movimenti^{ix} che comprende sia i voli di linea che quelli dell'aviazione generale.

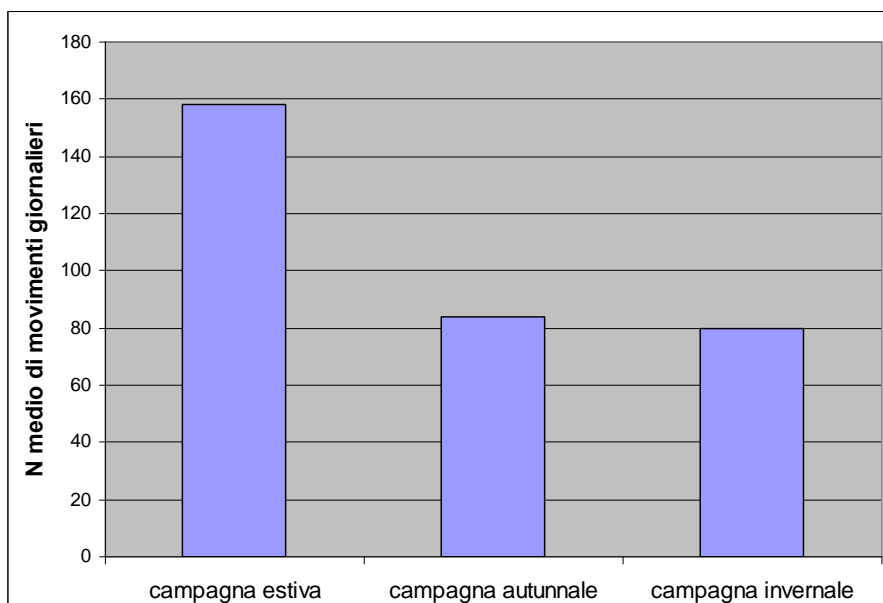
Figura 6: numero di movimenti complessivi avvenuti durante il periodo di ciascuna campagna di misura.



Confrontando i dati complessivi (Figura 7) delle tre campagne, si evince come il periodo estivo sia caratterizzato da un numero di movimenti pari a circa il doppio degli altri due.

^{ix} Per movimento si intende sia atterraggio che decollo

Figura 7: numero medio di movimenti giornalieri avvenuti durante il periodo di ciascuna campagna di misura.



Per tutte le campagne, il numero complessivo di movimenti sulla città di Pisa (direzione NE) è compreso tra il 30% (del periodo estivo) ed il 26% (della campagna autunnale). Analizzando il numero di atterraggi e decolli in direzione NE le percentuali sono pressoché costanti nei tre periodi, con una prevalenza di decolli (tra il 51 ed il 59%) rispetto agli atterraggi (circa 1%).

Figura 8: distribuzione dei movimenti totali registrati durante ciascuna campagna nelle due direzioni di pista.

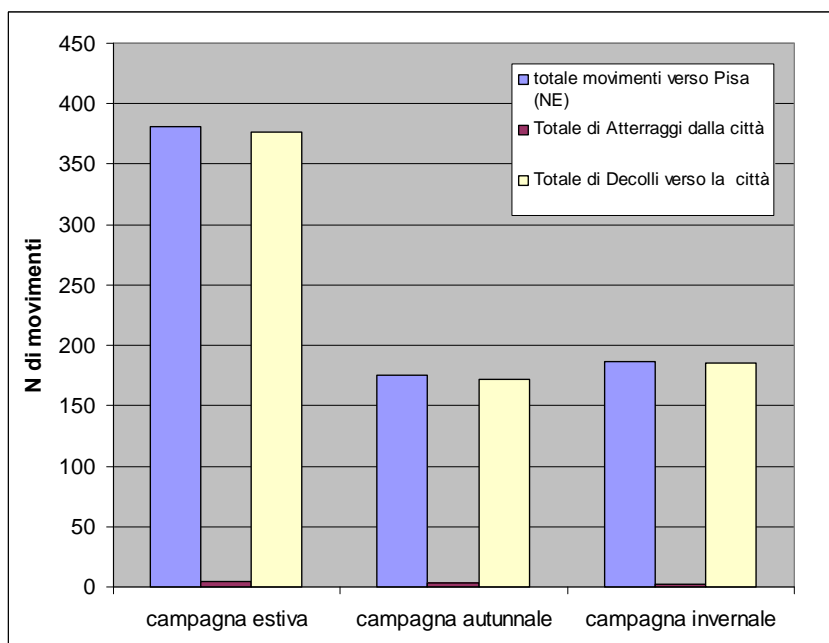


Tabella 6: numero di atterraggi e decolli verso la città di Pisa in ciascuna campagna.

MOVIMENTI	Totale	media giornaliera	Totale verso Pisa (NE)	Totale verso il mare (SO)	% verso Pisa (NE)
campagna estiva	1265	158	381	884	30.12
campagna autunnale	670	84	175	495	26.12
campagna invernale	639	80	187	452	29.26

ATTERRAGGI	Totale		Totale verso Pisa (NE)	Totale verso il mare (SO)	% verso Pisa (NE)
campagna estiva	633		4	629	0.63
campagna autunnale	336		3	333	0.89
campagna invernale	318		2	316	0.63

DECOLLI	Totale		Totale verso Pisa (NE)	Totale verso il mare (SO)	% verso Pisa (NE)
campagna estiva	632		377	255	59.65
campagna autunnale	334		172	162	51.50
campagna invernale	321		185	136	57.63

Attività voli militari

Sono stati analizzati i dati sull'attività aeroportuale militare relativi alle tre campagne di monitoraggio fornite dalla 46^a Aerobrigata in un formato aggregato su intervalli temporali di 8 ore.

A differenza dei dati civili, quelli militari non erano corredati, per questioni di riservatezza, da indicazioni sulle traiettorie. Tuttavia, come si evince dalle Tabella 7 e Tabella 8, la percentuale di voli militari variando dal 14% nella campagna estiva al 27% in quella invernale sul totale dei voli, non costituisce un impatto tale da pregiudicare l'analisi fatta in precedenza.

Tabella 7

	Movimenti Militari		
	1a campagna	2a campagna	3a campagna
decolli	102	104	122
atterraggi	101	106	120
attraversamenti	1	2	0
altro	52	87	39
Totale	256	299	281

Tabella 8

	Totale movimenti civili	Totale movimenti militari	% voli militari	Totale movimenti militari solo decolli e atterraggi	% voli militari	% voli civili
campagna estiva	1265	256	17.44	203	13.83	86.17
campagna autunnale	670	299	33.98	210	23.86	76.14
campagna invernale	639	281	31.90	242	27.47	72.53

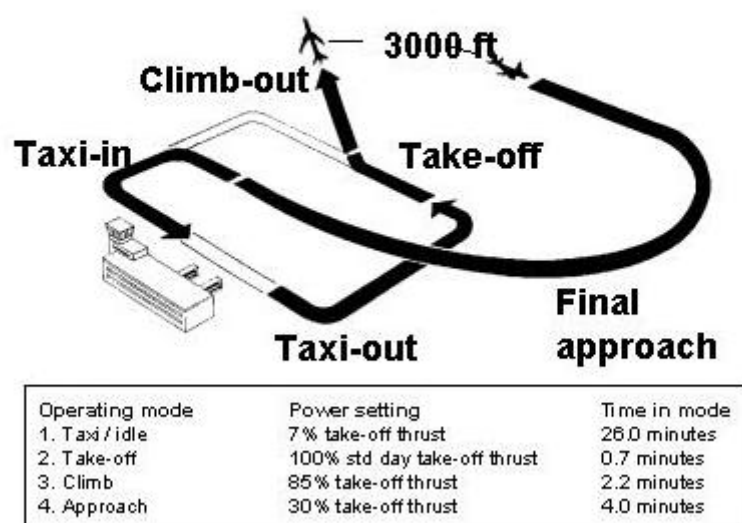
3.3.1 SORGENTI EMISSIVE CARATTERISTICHE AEROPORTUALI

Le sorgenti emissive caratteristiche dell'attività aeroportuale sono ^[16]:

Attività degli aerei (aircraft activity): l'attività di un aeromobile può essere distinta in una fase di crociera (cruise) che si svolge oltre i 3000 ft (914 m) e dal ciclo LTO (landing-takeoff cycle), che comprende tutte le operazioni che si svolgono al di sotto dei 3000 ft. Ai fini delle emissioni all'interno del PBL^x l'indicatore di attività di un aeromobile è costituito solo dal ciclo LTO, che considera le fasi di decollo/atterraggio e tutti i movimenti da e verso i gate.

Figura 9: Ciclo LTO e potenza del motore associata alle 4 fasi ^[17].

ICAO LTO Cycle Definition



Con il termine di decollo si intende, impropriamente, la somma del movimento a terra dal gate fino alla pista di volo (*runway*), con eventuali code (*queue*) ed attese (*idle*) ed il decollo vero e proprio composto da una fase (*take off*) da terra fino a 1000 ft (300 m) ed il successivo volo (*climb out*) fino a 3000 ft (914 m). Analogamente per atterraggio si considera l'insieme di movimenti dalla discesa da 3000 ft sino al suolo e il successivo spostamento fino al gate.

Di seguito una tabella con le fasi di decollo e atterraggio ed i movimenti associati: dell'aereo.

^x Lo Strato Limite Planetario, o Planetary Boundary Layer (PBL), è la porzione di Troposfera che è a diretto contatto con la superficie terrestre e da essa è influenzata. Questa influenza è data complessivamente dall'attrito subito dalle masse d'aria in movimento, dalle distorsioni indotte al loro flusso dall'orografia, dall'evapo-traspirazione, dal trasferimento di calore dal suolo all'aria e dall'emissione di inquinanti in prossimità del suolo causata dalle attività umane o dai fenomeni naturali. L'altezza del PBL presenta una notevole variabilità temporale ed un pronunciato ciclo giorno-notte. La ridotta altezza del PBL durante la notte, specialmente nei periodi freddi, diminuisce il volume dello strato di rimescolamento e causa una maggiore concentrazione di inquinanti negli strati più vicini al suolo. Al sorgere del sole l'atmosfera inizia a riscaldarsi e durante le ore più calde del giorno l'altezza del PBL aumenta provocando la diluizione degli inquinanti che si erano concentrati negli strati più bassi dell'atmosfera durante la notte.

Tabella 9: fasi di decollo e di atterraggio e i movimenti dell'aereo associati.

		Descrizione
Decollo (Departure)	Startup (o gate)	Fase di avvio dei motori al gate.
	Taxi out/idle	Movimento dell'aereo dall'uscita del gate (<i>runway end</i>) all'inizio della pista di decollo. Durante questi spostamenti l'aereo può essere soggetto a queque, può restare fermo al gate per motivi di sicurezza, traffico o altro con i motori accesi (idle). Il movimento si svolge a terra. Tutte le possibili azioni di taxiing sono tracciate sul piazzale dell'aerostazione e sono riportate in tutte le piantine dello scalo. I movimenti avvengono secondo dei tracciati ben precisi (<i>taxipath</i>).
	Take off	Movimento compiuto dall'aereo dal momento in cui inizia a spostarsi accelerando sulla runway fino al raggiungimento della quota di circa tra 150 e 300 m. Si svolge in parte a terra ed in parte in volo.
	Climb out	Si svolge completamente in atmosfera. Il velivolo, assistito dalla torre di controllo, compie un percorso la cui proiezione sul suolo terrestre costituisce un tracciato ben definito a priori. L'aereo è guidato fino al raggiungimento dell'altezza media dello strato di mescolamento e trovandosi ormai lontano dall'aeroporto da cui è decollato, può seguire la sua rotta di crociera.
	Cruise	Rotta di crociera compiuta fino al raggiungimento della destinazione e svolta completamente al di sopra del PBL.
Atterraggio (Approach) ^{xi}	Descend	Fase di discesa svolta tra 3000 ft e fino alla altezza media del PBL. Riduzione della potenza dei motori.
	Approach (o landing)	Fase di atterraggio del velivolo sulla pista (<i>runway</i>) e come il <i>takeoff</i> si svolge in parte in atmosfera (dal punto iniziale del profilo di volo o dall'inizio dell'altezza di miscelamento se questa è più bassa) ed in parte a terra (punto in cui tocca il suolo (<i>touchdown</i>) sulla runway).
	Taxi in/idle (queue)	Dopo l'atterraggio, il velivolo lascia la runway mediante apposite uscite compiendo un percorso ben preciso (<i>taxiway</i>) sul piazzale dell'aerostazione fino al gate. Vale quanto già detto per la fase di out riguardo a code o attese. Tutte le possibili taxi sono tracciate sul piazzale dell'aerostazione e sono riportate in tutte le piantine dello scalo.
	Gate	

1. **APU (Auxiliary Power Units)** e **GPU^{xii} (Ground Power Units)**: Unità ausiliarie di potenza (on board generators) e Unità di potenza a terra. Sono dei generatori di corrente, spesso presenti a bordo, che forniscono energia elettrica all'aereo quando i motori sono spenti. Nel caso di unità interne sono utilizzate per l'avvio dei motori principali. Le APU sono, in

^{xi} Approach indica sia la fase di descend che quella di landing

^{xii} sono in generale noti come mezzi di rampa

generale, dei piccoli motori simili a *turbofan* di potenza ridotta per cui il calcolo delle emissioni è simile a quello dei motori degli aerei che operano ad un solo settaggio di potenza. Nel caso in cui i velivoli siano piccoli, tali unità non sono presenti e sono costituiti da piccoli generatori Diesel fissi o mobili messi a disposizione dall'aeroporto e questi rientrano nella categoria dei GSE.

2. **GSE^{xiii}** (*Ground Support Equipment*): Unità di supporto a terra. Quando l'aereo arriva al gate e spegne i motori, necessita dell'assistenza del personale di terra. L'assistenza necessaria è di vario tipo (carico/scarico bagagli, rifornimento carburante, bus per il trasporto dei passeggeri, trasporto scaletta, auto follow me, mezzi servizio catering, svuotamento toilette, generatori elettrici ecc.) e coinvolge mezzi differenti.
3. **GAV** (*Ground Access Vehicles*): tutti i mezzi di trasporto il cui movimento è collegato all'attività aeroportuale. Sono distinte in:
 - 3.1 traffico da e verso l'aeroporto (*on road vehicles*): l'insieme dei mezzi (in genere valutati su base annuale) che transitano sulle strade di accesso all'aeroporto. Sono mezzi pubblici e privati compreso anche quelli del personale impiegato nell'aerostazione.
 - 3.2 parcheggi (*on road vehicles in parking facilities*): costituite da tutte le emissioni diffuse derivanti dai mezzi dei lavoratori e dei passeggeri. Possono essere distinti in base alla permanenza (breve durata o lunga).
4. **Sorgenti stazionarie** (*Stationary Sources*): Riguarda tutte le sorgenti fisse presenti all'interno dell'aerostazione. Sono distinte in:
 - 4.1 combustion sources: Sorgenti le cui emissioni sono collegate al processo di combustione, ad esempio centrali di riscaldamento, generatori di emergenza, inceneritori ecc...
 - 4.2 non combustion sources: serbatoi di stoccaggio combustibile, aree per la verniciatura degli aerei, deicing ecc...

Stima delle emissioni dalle varie sorgenti

La stima delle emissioni prodotte da una attività è sempre espressa, non solo nel caso specifico degli aeroporti, come (**Ia*EIa**) essendo Ia l'indicatore dell'attività che caratterizza un processo ai fini dell'emissione e EIa il fattore di emissione specifico (*Emission Index o Emission Factor*). Ci sono vari metodi per la classificazione delle attività così come per la stima degli EIa ^[18].

La formula generale per la stima delle emissioni è:

$$E = A * EF * (1 - ER / 100)$$

dove:

E = emissione;

A = rateo di attività;

EF = fattore di emissione

ER = efficienza globale di riduzione dell'emissione %

^{xiii} sono in generale noti come mezzi di rampa

4 LE CAMPAGNE SPERIMENTALI DI MISURA: MATERIALI E METODI

4.1 I DOSIMETRI AMBIENTALI UTILIZZATI

Considerata la durata della campagna di monitoraggio, il numero di punti di prelievo e di parametri da quantificare, la scelta più opportuna per il campionamento è stata giudicata l'utilizzo di una tecnica "passiva" di tipo diffusivo su una fase solida costituita da opportuno substrato adsorbente per i BTEX e assorbente per le Aldeidi e NO_2 .

Per campionamento "diffusivo" o "passivo" si intende quella tecnica che consente di raccogliere gli analiti su un substrato senza l'intervento di pompe aspiranti o altri dispositivi meccanici o elettrici.

Il principio del campionamento passivo si basa sulla prima legge di diffusione di Fick: i composti gassosi migrano verso la superficie adsorbente ad una velocità che dipende da diversi fattori quali: la lunghezza del percorso tra la superficie diffusiva e quella adsorbente, l'area della sezione del campionatore, il coefficiente di diffusione dell'analita nell'aria e la concentrazione ambientale del composto/i.

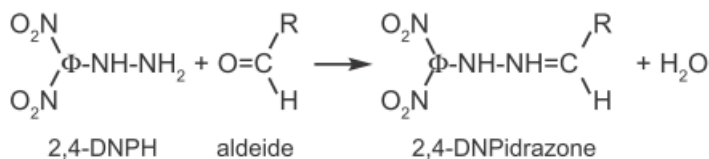
Per i BTEX e le Aldeidi sono stati utilizzati i campionatori passivi a simmetria radiale Radiello® in cui la superficie diffusiva è cilindrica e il substrato adsorbente è contenuto in una cartuccia cilindrica coassiale determinando un cammino diffusivo parallelo al raggio. La parete diffusiva del Radiello® è costituita da polietilene microporoso e, attraversandola, le molecole gassose seguono un percorso tortuoso la cui lunghezza è molto maggiore di quella dello spessore.

I BTEX captati per adsorbimento su cartuccia di acciaio inossidabile con maglia di $3 \times 8 \mu\text{m}$, riempita con 350 ± 10 mg di carbone grafitato (Carbograph 4: 35-50 mesh), sono stati recuperati dal substrato adsorbente per desorbimento termico, seguito da concentrazione criostatica e trasferimento attraverso una linea riscaldata ad una colonna capillare gascromatografica per la separazione degli analiti. In seguito sono stati rilevati tramite detector FID e quantificati.

Figura 10: strumentazione ARPAT utilizzata per analisi VOC: GCFID + Desorbitore termico (ATD 400).



La cartuccia contenuta all'interno del corpo diffusore delle Aldeidi è in rete di acciaio inossidabile 100 mesh, riempita di florisil rivestito di 2,4-dinitrofenilidrazina (2,4-DNPH). Le Aldeidi reagiscono con la 2,4-DNPH per dare il corrispondente 2,4-dinitrofenilidrazone :



I 2,4-dinitrofenilidrazoni sono estratti con acetonitrile e sono analizzati mediante HPLC in fase inversa con rivelatore UV (alla lunghezza d'onda di 365 nm)

Per gli NO₂ sono stati utilizzati dei campionatori passivi messi a punto dall'ARPA Emilia Romagna e costituiti da una serie di tre assorbitori cilindrici in vetro in cui il biossido di azoto, diffondendo all'interno dei tubi, viene assorbito in una soluzione a base di trietanolammina depositata su un fondo di reticelle metalliche. In laboratorio viene successivamente dosato per via colorimetrica come ione nitroso.

I dosimetri di tutti e tre gli analiti sono stati montati su delle staffe e protetti dalla pioggia da una tettoietta fissata alla staffa.

Figura 11: campionatore NO₂ e Radiello ® per BTEX e Aldeidi.



Figura 12: set di dosimetri montati su staffa e protetti da tettoietta e foto rappresentativa di montaggio.



4.2 STRUMENTAZIONE IMPIEGATA NELLE MISURE A BORDO PISTA DALL'UNIVERSITÀ DI FIRENZE E ALITEC PRESSO IL SEDIME AEROPORTUALE DA ARPAT

Per l'esecuzione d'indagini in prossimità della sorgente sono state compiute campagne di misura a bordo pista utilizzando un mezzo mobile dell'Università di Firenze – Dipartimento di chimica-sezione chimica analitica, in particolare per effettuare l'analisi dimensionale e quali-quantitativa del particolato (determinazione PM_{10} , contenuto ionico dei metalli oltre che del carbonio totale (TC) e delle frazioni EC-OC).

Figura 13: Mezzo mobile installato presso la pista dell'aeroporto di Pisa Galileo Galilei.



Per il campionamento del particolato atmosferico PM_{10} è stato usato un campionatore Hydra Dual Sampler della FAI Instruments fornito di due teste di prelievo che effettuano la separazione delle particelle in base al loro diametro aerodinamico equivalente, come da specifiche della norma EN 12341.

Sullo stesso mezzo mobile è stato installato un contatore ottico multicanale di particelle (OPC) della FAI Instruments. Questo sistema permette la caratterizzazione in tempo reale della distribuzione granulometrica del particolato atmosferico nel range di accumulazione di massa “fine” e “coarse” (da 0.28 a 10 μm). Lo strumento fornisce sia la concentrazione in numero di particelle negli 8 intervalli granulometrici in cui è suddiviso il campo di misura (0.28 μm , 0.40 μm , 0.50 μm , 0.70 μm , 1.10 μm , 2.00 μm , 3.00 μm , 5.00 μm), sia una stima dei dati di concentrazione di massa delle tre frazioni PM_{10} , $PM_{2.5}$ e PM_1 . La misura è effettuata tramite il principio fisico del “Light scattering”. Tale principio si basa sulla misura della luce “diffusa” da una particella che interagisce con una sorgente luminosa; questa è proporzionale al diametro equivalente della particella stessa. L’OPC permette di effettuare un campionamento ad elevatissima risoluzione (1 minuto) che consente di seguire l’evoluzione giornaliera del particolato e quindi evidenziare emissioni di breve durata e processi di diluizione e concentrazione del PM legati a variabili meteorologiche.

Sono stati utilizzati due differenti tipologie di supporti: filtri in Quarzo (Quartz fiber filters CHM 47 mm; porosità 2 μm), impiegati per la determinazione del carbonio, e in PTFE (Pall-Gelman Teflo 47 mm; porosità nominale 2 μm) per l’analisi degli ioni e dei metalli.

La determinazione degli ioni è stata effettuata mediante cromatografia ionica.

Figura 14: Sistemi cromatografici e relativo autocampionatore per la determinazione degli ioni.



La Determinazione di metalli è stata effettuata tramite spettroscopia di emissione atomica con sorgente al plasma accoppiato induttivamente (ICP-AES) secondo la normativa europea UNI EN-14902. Con questa tecnica sono stati determinati 14 metalli: Al, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, V e Zn.

L'analisi termo-ottica del contenuto totale di carbonio (TC) nelle frazioni organico (OC) ed elementare (EC) è stata eseguita tramite l'analizzatore termo-ottico Sunset della Sunset Laboratory Inc. presso i laboratori del LABEC all'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) di Firenze utilizzando il protocollo analitico EUSAAR-2 [19].

Figura 15: Analizzatore termo-ottico Sunset (foto a sinistra) e filtro in quarzo con sistema di taglio (foto a destra).



Per la determinazione del carico di particolato atmosferico PM_{10} è stato utilizzato il metodo gravimetrico che prevede la pesata dei filtri (condizionati a temperatura e umidità controllate in essiccatore contenente gel di silice per 24 ore) prima e dopo il campionamento.

La società Alitec ha messo a disposizione dell'Università di Firenze Nano, un sensore innovativo di dimensioni e peso contenuti (vedi Figura 16) per la misura del particolato atmosferico in grado di effettuare in tempo reale misure altamente selettive del particolato

sub-micrometrico. e dei principali gas inquinanti (es. CO, NO, NO₂, SO₂, Ozono), con sistemi di acquisizione dati che sono modulari e adattabili a differenti modalità di comunicazione (GPS, UMTS, WiFi, WIMAX).

Utilizzando un veicolo in moto con a bordo il sensore, è così possibile monitorare in tempo reale le concentrazioni nei differenti punti degli archi strada percorsi. I dati raccolti, archiviati in una memoria interna al sensore stesso, in modalità di lavoro offline, e in un server centrale, quando il sensore è connesso in rete, sono processati al fine di produrre dettagliati report.

Seppure tale possibilità non sia stata sfruttata nello studio, è evidente l'impiego per mappe urbane della qualità dell'aria in tempo reale avendo a disposizione un sensore portatile, alimentato autonomamente, adatto all'impiego in strutture fisse e mobili, con rilevazioni dati ad ampio spettro e in continuo.

Figura 16: Il sensore Nano.



Nella tabella seguente sono illustrate le caratteristiche tecniche del sensore Nano di Alitec:

Tabella 10: caratteristiche sensore Alitec utilizzato.

Caratteristiche Tecniche NANO	
Nome	NANO
Dimensioni (LxPxH)	50 cm x 32 cm x 13 cm
Gas Rilevabili	<ul style="list-style-type: none"> • CO • NO • NO₂ • SO₂ • O₃
Range operatività gas	<ul style="list-style-type: none"> • CO: 0 ÷ 20 ppm • NO: 0 ÷ 5 ppm • NO₂: 0 ÷ 5 ppm • SO₂: 0 ÷ 5 ppm • O₃: 10 ÷ 1000 ppb
Risoluzione gas (ppb equivalent)	<ul style="list-style-type: none"> • CO: < 10 • NO: < 5 • NO₂: < 5 • SO₂: < 3 • O₃: < 5
Particolato Rilevabile	< PM ₁
Livello di soglia particolato	10 mg/m ³
Alimentazione	220 V AC
Interfaccia download dati	USB
Modalità di comunicazione	GPS, UMTS, WIFI

Il mezzo mobile utilizzato nel sedime aeroportuale è stato messo a disposizione di ARPAT dalla Provincia di Pisa dotato dei seguenti analizzatori:

- API 101 AS SO₂/H₂S Analyzer per la determinazione tramite fluorescenza UV degli SO₂ e H₂S
- API 200 A per la determinazione degli NO_x tramite chemiluminescenza
- API 300 per la determinazione tramite spettrometria IR del CO
- NIRA 301 per la determinazione tramite gascromatografia degli idrocarburi totali

4.3 IL DISEGNO DI CAMPIONAMENTO: DISTRIBUZIONE DEI DOSIMETRI E UTILIZZO DEI LABORATORI MOBILI

I siti di misura dove allocare i dosimetri sono stati scelti sulla base della conoscenza della città e delle attività aeroportuali, oltre che in base a dati di traffico e d'inquinamento esistenti (centraline qualità dell'aria e campagne di misura precedenti). Per la selezione dei siti e posizionamento dei dosimetri, inoltre, è stato seguito il protocollo dello studio europeo ESCAPE ^[20] ^[21] (European Study of Cohorts for Air Pollution Effects). Si è cercato il più possibile di avere siti lontano da incroci, da semafori, da cantieri, da parcheggi, da fermate degli autobus e da alberi, i dosimetri passivi sono stati posizionati a circa 2,5 metri di altezza, in genere su pali o gronde dei palazzi, il più distanti possibili da ostacoli e ad almeno 20 cm da superfici verticali, 5 m da condizionatori.

Sono così stati individuati **54 siti** distribuiti in modo tale da coprire l'intera area geografica indagata e rappresentare le diverse situazioni del carico emissivo nell'area urbana (alto, medio e basso traffico) oltre che del grado di urbanizzazione e recettori sensibili (zona residenziale centro, residenziale periferico e zona rurale).

In base alle caratteristiche definite nel manuale Escape, i siti si suddividono in:

- ⇒ 2 Regional Background;
- ⇒ 39 Traffic site;
- ⇒ 13 Urban Background;

Per caratterizzare le immissioni in aria ambiente d'inquinanti dell'interno complesso aeroportuale, sono stati selezionati **11 siti** all'interno del sedime, 4 dei quali nella parte di pertinenza SAT in prossimità della fase di taxing degli aeromobili e di quella di rifornimento (essendo queste le fasi indicate in letteratura come tra le più impattanti) i restanti sono stati selezionati nella parte di pertinenza militare lungo le piste in modo da avere il contributo delle fasi di landing e takeoff.

Per il posizionamento dei due mezzi mobili è stato scelto un sito il più prossimo possibile alla pista principale e all'altezza del punto di contatto della fase di atterraggio in modo da campionare la polvere generata in questa fase dall'usura degli pneumatici e dei freni. Ciò è stato possibile grazie alla collaborazione dell'aeronautica militare-46^a brigata aerea- che ha messo a disposizione una cabina elettrica per l'alimentazione oltre che i siti all'interno dell'area aeroportuale di sua competenza.

Nell'insieme è possibile individuare punti rappresentativi di diverse macro-situazioni:

- ⇒ punti dove esiste la contemporanea influenza diretta delle sorgenti aeroportuali e della sorgente traffico veicolare;
- ⇒ punti dove la sorgente principale è rappresentata dal traffico veicolare;
- ⇒ punti dove la sorgente principale è rappresentata dal traffico aeroportuale;
- ⇒ punti relativamente lontani dalle principali sorgenti di inquinamento.

Figura 17: Vista generale siti: 52 urbani, 2 extraurbani, 11 all'interno del sedime aeroportuale.

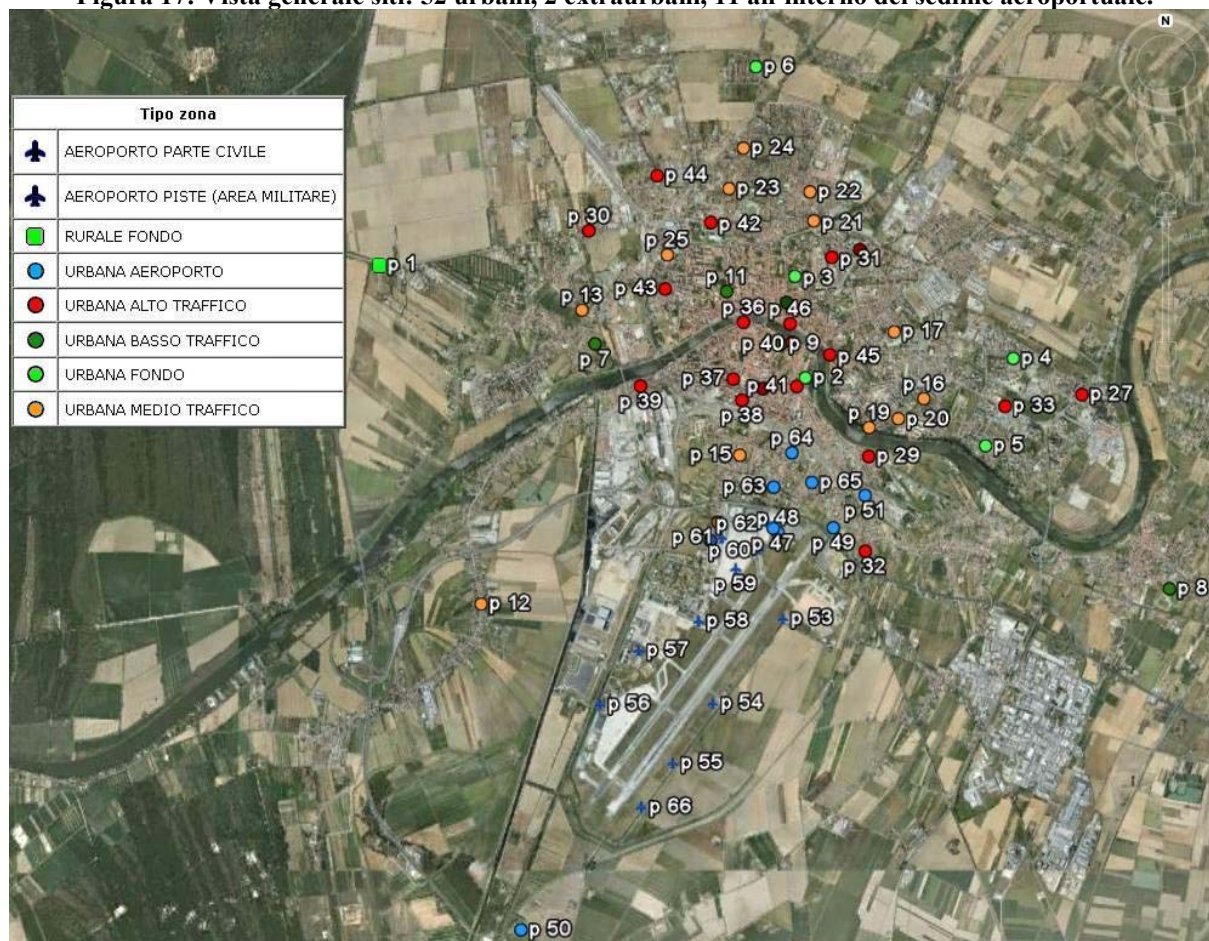


Figura 18: Vista generale siti: zoom città.

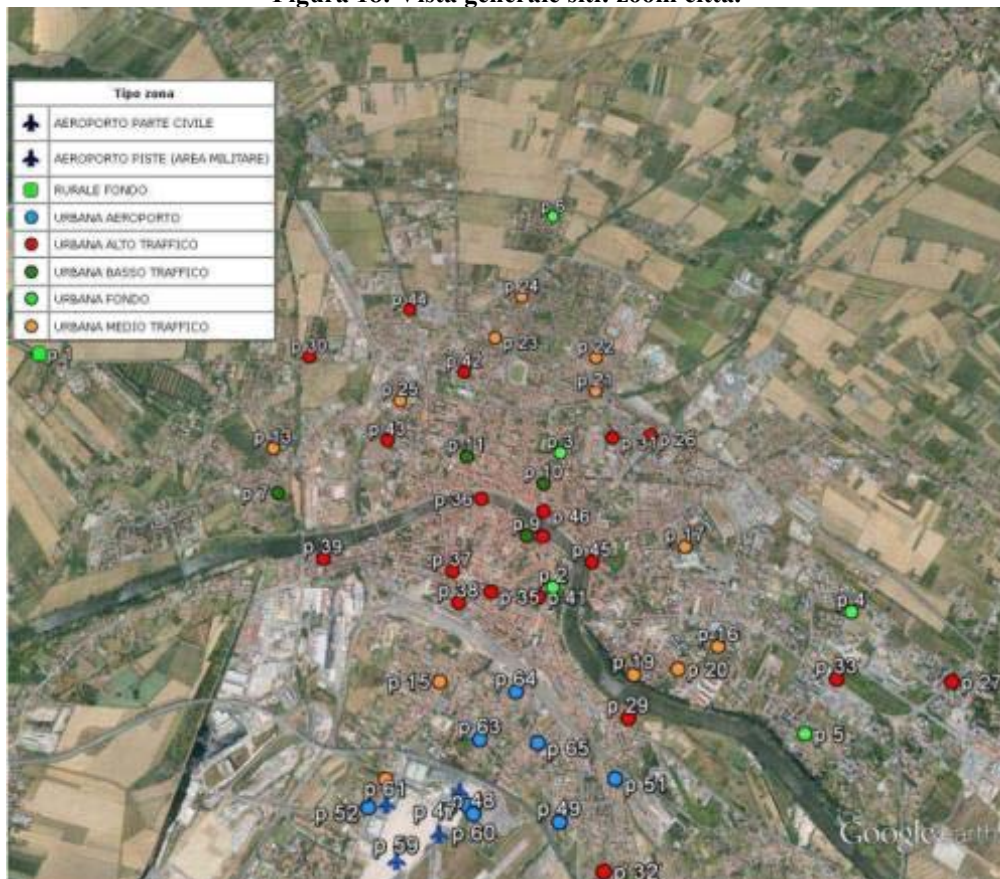


Figura 19: Vista generale siti: zoom aeroporto.



In 65 siti sono stati collocati campionatori passivi così disposti:

- in 35 siti sono stati posizionati i dosimetri per NO₂ + BTEX + Aldeidi
- in 23 siti sono stati posizionati i soli dosimetri NO₂
- in 4 siti sono stati posizionati dosimetri NO₂ + BTEX
- in 2 siti sono stati posizionati i dosimetri NO₂ + Aldeidi
- in 35 siti sono stati posizionati i soli dosimetri BTEX

In un sito solamente, adiacente ai mezzi mobili sono stati misurati solamente i BTEX (in doppio).

In **Allegato 1** è riportata una tabella contenente l'indicazione della tipologia di sito e dei dosimetri utilizzati in ciascun sito.

Per considerare le diverse situazioni climatiche e la variabilità delle sorgenti (stagionalità del traffico aereo, riscaldamento domestico ecc), le misure sono state condotte in tre stagioni diverse: per una settimana a stagione (dal 26 luglio al 2 agosto 2011, dal 9 al 16 novembre 2011 e dal 7 al 14 marzo 2012) e contemporaneamente in tutti i siti selezionati.

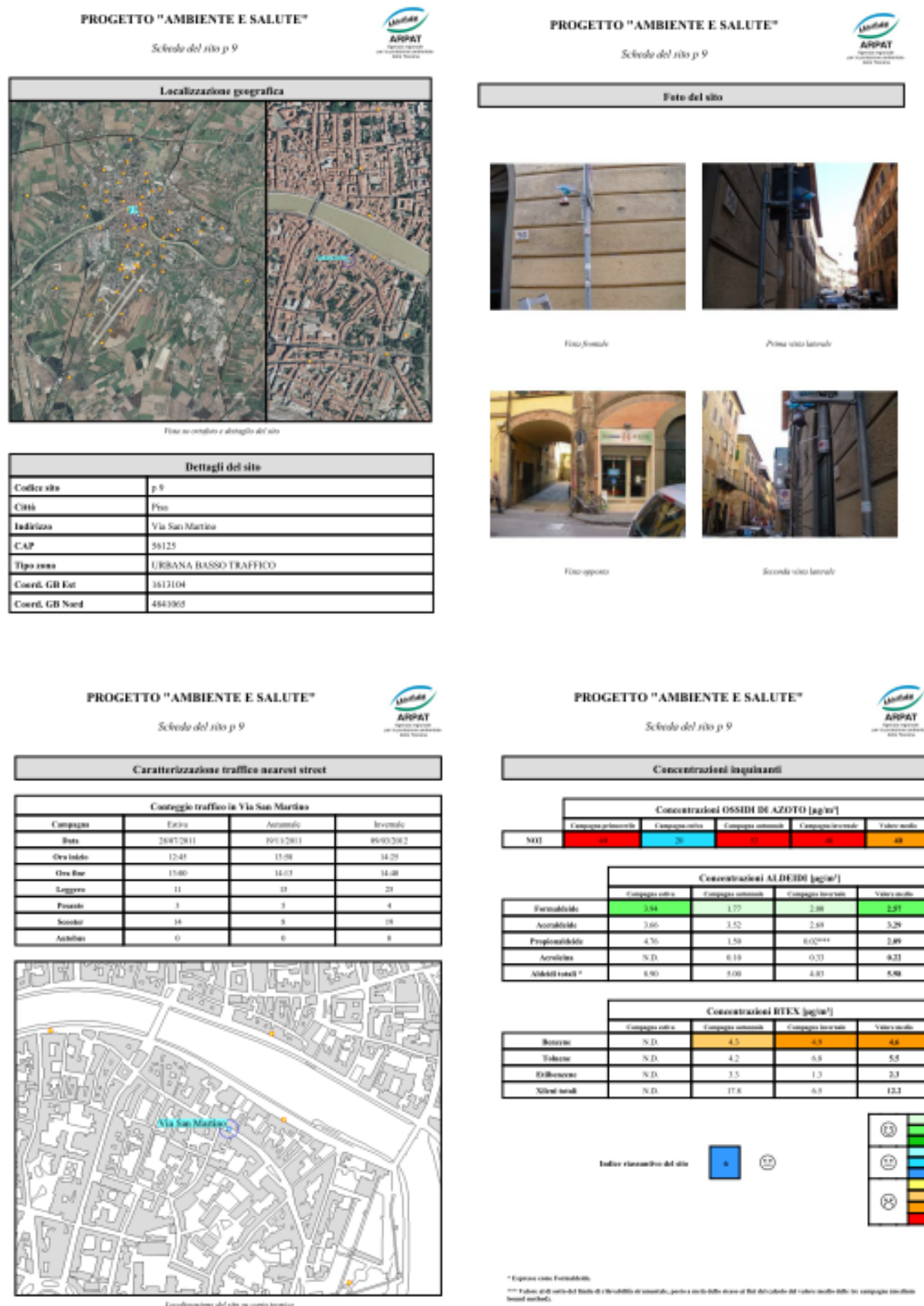
Contestualmente all'esposizione dei dosimetri, campagne di misura con i mezzi mobili e dati rilevati dalle centraline della qualità dell'aria, sono state rilevate informazioni sul traffico per lo sviluppo del modello di regressione lineare tra inquinamento e volumi di traffico: in ogni sito e nelle strade limitrofe più impattanti sono stati contati per un periodo di 15 minuti durante ciascuna campagna il numero di veicoli leggeri, il numero di veicoli pesanti, i motorini ed i bus.

Per ogni sito è stata creata una scheda sito con:

- localizzazione del sito (indirizzo, coordinate Gauss Boaga, tipologia di zona, ecc) e viste d'insieme e di dettaglio sulle ortofoto della cartografia regionale;
- 4 foto del sito (vista frontale, opposta e 2 viste laterali);
- tabella di caratterizzazione del traffico per nearest street (strada in cui è posizionato il dosimetro o la più vicina) e nearby street (strada nelle vicinanze del sito le cui emissioni potrebbero essere rilevanti e influenzare i livelli di concentrazione misurati nel sito), per ciascuna campagna, con localizzazione su cartografia numerica regionale;
- 3 tabelle, una per ciascuna famiglia d'inquinante, con le concentrazioni per singola campagna e la concentrazione media. Le celle con la concentrazione misurata sono colorate in base al valore dell'indice calcolato per quel sito per quel inquinante, per quella campagna;
- indice complessivo del sito, calcolato come media pesata degli indici relativi ai singoli inquinanti misurati nel sito in tutte le campagne.

In **Allegato 2** sono riportate le schede per tutti e 65 siti, mentre in Figura 20 è riportato un esempio di scheda.

Figura 20: scheda sito.



5 LE CAMPAGNE SPERIMENTALI DI MISURA: RISULTATI E LORO ANALISI

5.1 CAMPAGNE CON DOSIMETRI

Le tabelle che seguono, riportano in maniera sintetica, per ciascuna campagna, il periodo di svolgimento, la temperatura media registrata, il numero e tipo di dosimetri utilizzati ed i valori medi ottenuti.

Tabella 11: periodo svolgimento campagne, T media e numero di dosimetri utilizzati.

Campagna	periodo	Temperatura (°C)	dosimetri
Estiva 2011	26 luglio-2 agosto 2011	22,1	65 NO ₂ 39 ALD 20 BTEX
Autunnale 2011	9-16 novembre 2011	10,4	65 NO ₂ 40 ALD 40 BTEX
Invernale 2012	7-14 marzo 2012	10,8	65 NO ₂ 40 ALD 40 BTEX

Tabella 12 Valori medi ottenuti.

Campagna	NO ₂ µg/m ³	Formaldeide µg/m ³	Benzene µg/m ³
Estiva 2011	25	3.8	2.4
Autunnale 2011	51	2.0	2.5
Invernale 2012	41	2.1	2.9

Le direzioni principali dei venti durante la campagna estiva sono state O e ONO per il 44%, ed E e ESE per il 26%, in quella autunnale E e ESE per il 66%, evitando in questo modo il trasporto da e verso la città (a Nord dell'aeroporto).

Per ogni sito, come riportato nel capitolo 2, è stata calcolata la media pesata degli indici relativi ai singoli inquinanti ottenendo un indice complessivo, che tiene conto della concentrazione di Benzene, Formaldeide e NO₂. In Figura 21 è riportata la mappa dei risultati dell'indice complessivo presso tutti i siti oggetto di campionamento. Il valore dell'indice fa riferimento a quanto riportato in Tabella 4.

Figura 21: Vista indice Complessivo.



In Figura 22 e Figura 23 sono riportate il dettaglio delle mappe dell'indice complessivo riferito rispettivamente all'area urbana e a quella aeroportuale.

Figura 22: Vista indice complessivo all'interno della città.

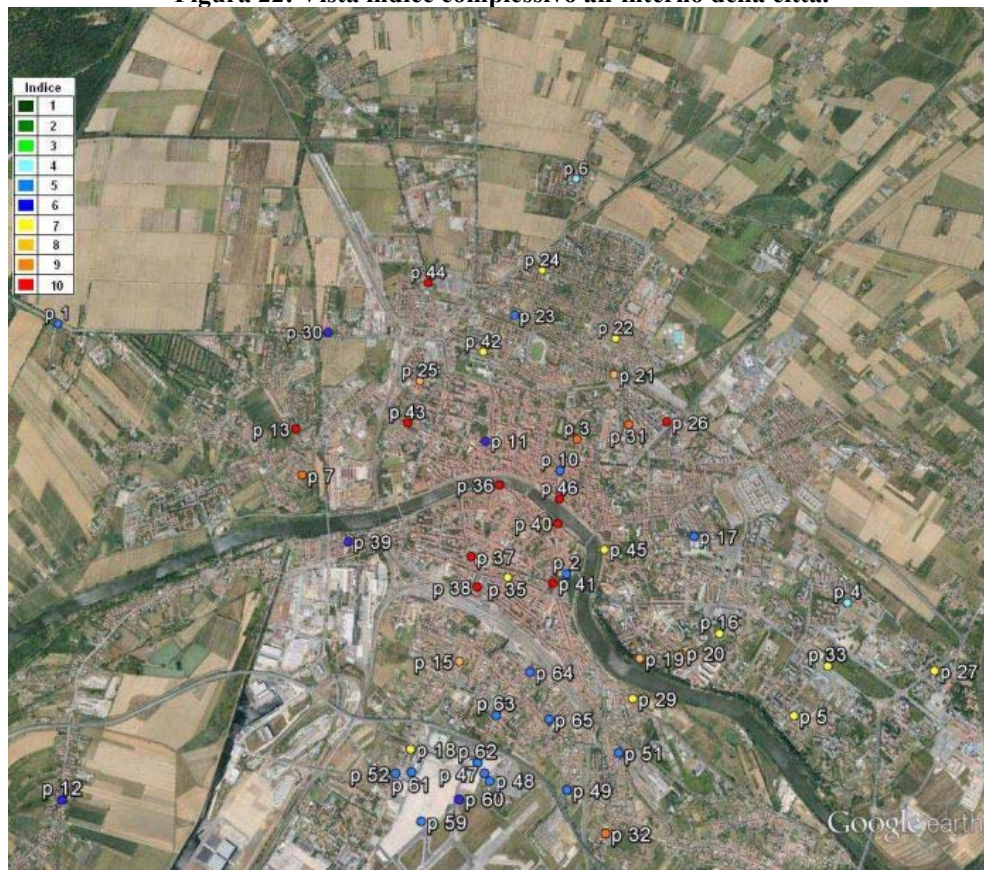


Figura 23: Vista indice complessivo nell'area aeroportuale.



5.1.1 BIOSSIDO DI AZOTO

Il Biossido di Azoto è un gas di colore rosso bruno, di odore forte e pungente, altamente tossico ed irritante.

In generale gli ossidi di azoto (NO, N₂O, NO₂ ed altri) sono generati da processi di combustione, qualunque sia il combustibile utilizzato, per reazione diretta tra l'azoto e l'ossigeno dell'aria ad alta temperatura (superiore a 1.200 °C).

I processi di combustione (centrali termoelettriche, riscaldamento, motori a combustione interna ed in particolare motori Diesel) emettono quale componente principale monossido di azoto (NO) che, nelle emissioni di un motore a combustione interna, rappresenta circa il 98% delle emissioni totali di ossidi di azoto. Il biossido di azoto (NO₂) è per lo più un inquinante secondario che si forma nell'aria per reazioni anche fotochimiche che coinvolgono NO e HC (anche in periodo invernale).

Il biossido di azoto può essere originato anche da processi produttivi senza combustione, come ad esempio la produzione di acido nitrico, fertilizzanti azotati, ecc..., ed anche da sorgenti naturali (attività batterica, eruzioni vulcaniche, incendi). La miscela degli ossidi di azoto, una volta immessa nell'ambiente, vi permane anche per alcuni giorni, prima di essere rimossa con formazione di acido nitrico (HNO₃) e quindi di nitrati. Pertanto, in particolari condizioni meteorologiche e in presenza di concentrazioni elevate, questa miscela può diffondersi nell'atmosfera ed interessare territori situati anche a grande distanza dalla sorgente inquinante.

Effetti sulla salute e sull'ambiente

Per quanto riguarda gli effetti sulla salute dell'uomo, gli ossidi di azoto risultano potenzialmente pericolosi per la salute.

In particolare il monossido di azoto (NO), analogamente al monossido di carbonio, agisce sull'emoglobina, fissandosi ad essa con formazione di metamoglobina e nitrosometamoglobina.

Questo processo interferisce con la normale ossigenazione dei tessuti da parte del sangue ma, nonostante ciò, non sono mai stati riscontrati casi di decessi per avvelenamento da NO.

Il biossido di azoto è più pericoloso per la salute umana, con una tossicità fino a quattro volte maggiore di quella del monossido di azoto.

Forte ossidante ed irritante, il biossido di azoto esercita il suo effetto tossico principalmente sugli occhi, sulle mucose e sui polmoni. In particolare tale gas è responsabile di specifiche patologie a carico dell'apparato respiratorio (bronchiti, allergie, irritazioni, edemi polmonari che possono portare anche al decesso). I soggetti più esposti all'azione tossica sono quelli più sensibili, come i bambini e gli asmatici.

Gli ossidi di azoto si possono ritenere fra gli inquinanti atmosferici più critici, non solo perché il biossido di azoto in particolare presenta effetti negativi sulla salute, ma anche perché, in condizioni di forte irraggiamento solare, provocano delle reazioni fotochimiche secondarie che creano altre sostanze inquinanti ("smog fotochimico"): in particolare è un precursore dell'ozono troposferico e della componente secondaria delle polveri sottili.

Tabella 13: Limiti Livelli di concentrazione stabiliti dal D.lgs. 155/2010.

Inquinante	Tipo protezione	Indice statistico	Unità di misura	Soglia Allarme	Limite	Numero sup./anno	Soglia val. sup.		Soglia val. inf.	
							livello	sup./anno	livello	sup./anno
NO _x	vegetazione	media annuale	µg/m ³		30		24		19,5	
NO ₂	salute umana	media oraria	µg/m ³	400 per 3 h	200	18/anno	140	18/anno	100	18/anno
	salute umana	media annuale	µg/m ³		40		32		26	

5.1.1.1 VALIDAZIONE DEI DATI ATTRAVERSO IL CONTROLLO CON I VALORI DELLE CENTRALINE DELLA RETE REGIONALE DELLA QUALITÀ DELL'ARIA E MEZZO MOBILE

I risultati ottenuti sono stati confrontati e validati con i dati dello stesso periodo delle centraline fisse della rete regionale della qualità dell'aria. Un dosimetro per NO_x è stato collocato adiacente al mezzo mobile all'interno del sedime aeroportuale per ulteriore controllo. Per tutte e tre le tipologie di dosimetri, inoltre, sono stati posizionati dosimetri in doppio ed effettuati bianchi di campo e di laboratorio per ciascuna campagna.

La qualità dei dati delle centraline fisse e dei laboratori mobili è assicurata anche garantendo il mantenimento degli standard di qualità richiesti dalla normativa relativamente all'approvazione degli strumenti di campionamento e misura della qualità dell'aria (art. 17 del D.Lgs 155/2010); a tale scopo, come previsto dalla L.R. 9/2010 art. 5 comma 4, la Regione si avvale del Centro regionale di Riferimento per il controllo e l'assicurazione di qualità dei dati (C.R.R.Q.A.) di ARPAT che esercita la funzione di controllo ed assicurazione di qualità dei dati prodotti dalla rete regionale di rilevamento.

Dalle tabelle che seguono, si riscontra un ottimo accordo tra i dati delle centraline, e quelli dei dosimetri posizionati nella stessa tipologia di zona urbana, dimostrando, tra l'altro, la corretta classificazione delle postazioni (urbana fondo, urbana traffico). Si riscontra, inoltre, un ottimo accordo tra i valori registrati dal mezzo mobile e quelli derivanti dal dosimetro posto in prossimità.

Tabella 14 Confronto dei valori della centralina urbana fondo (mediati sullo stesso periodo di esposizione dei dosimetri in ciascuna campagna) e di 6 dosimetri posizionati nella stessa tipologia di zona urbana.

mezzo mobile (P66 vicino a P55)		
NO ₂ µg/m ³ 293K		
Estiva 2011	Autunnale 2011	Invernale 2012
13	31	16

Dosimetro per NO ₂ in prossimità del mezzo mobile (P55)		
NO ₂ µg/m ³ 293K		
Estiva 2011	Autunnale 2011	Invernale 2012
9	26	16

Tabella 15 Confronto dei valori della centralina urbana traffico (mediati sullo stesso periodo di esposizione dei dosimetri in ciascuna campagna) e di 39 dosimetri posizionati nella stessa tipologia di zona urbana.

NO ₂ Centralina urbana fondo (Passi)		
$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 293K		
Estiva 2011	Autunnale 2011	Invernale 2012
9	39	29

medie 6 dosimetri urbana fondo		
$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 293K		
Estiva 2011	Autunnale 2011	Invernale 2012
14	45	33

NO ₂ Centralina urbana traffico (Borghetto)		
$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 293K		
Estiva 2011	Autunnale 2011	Invernale 2012
28	59	43

media 39 dosimetri urbana traffico (basso + medio + alto)		
$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 293K		
Estiva 2011	Autunnale 2011	Invernale 2012
31	58	49

5.1.1.2 DISTRIBUZIONE SPAZIALE E TEMPORALE DELLA CONCENTRAZIONE MEDIA DI NO₂

I valori misurati nei siti di fondo e di traffico medio e basso sono risultati paragonabili tra loro in tutte le tre campagne per tal motivo le zone di fondo-basso e medio traffico, sono state aggregate nella tabella riepilogativa che segue.

Tabella 16: valori di NO₂ in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mediati per tipologia di zona nelle tre stagioni.

Siti e tipo zona	estate 2011	autunno 2011	inverno 2012	media	
p26-p46 alto traffico	43	70	59	57	alto traffico
p1-p25 fondo e basso-medio traffico	17	44	37	33	fondo - basso - medio traffico
p47-p52 e p63-p65 Aeroporto limitrofo	17	39	34	28	Aeroporto limitrofo
p59-p62 Aeroporto SAT	24	46	33	34	Aeroporto SAT
p53-p58 Aeroporto Aeronautica (piste)	10	32	20	21	Aeroporto Aeronautica (piste)

I valori registrati per tutte e tre le campagne, nella parte del sedime aeroportuale dedicata alla fase di fasi di landing e takeoff (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 (Take-off) [22]. La Figura 24 riporta i valori medi di emissione di NO_x e CO ad ogni fase del ciclo LTO associato alla potenza del motore.

Figura 24: valori medi di emissione di NO_x e CO ad ogni fase del ciclo LTO e potenza del motore associata.

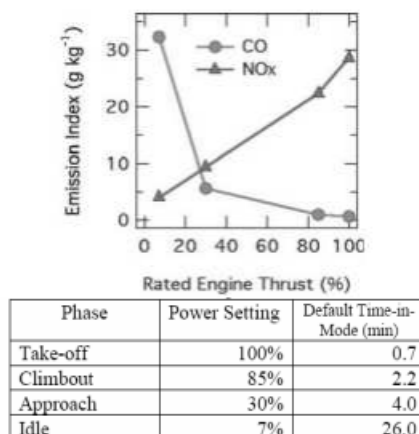
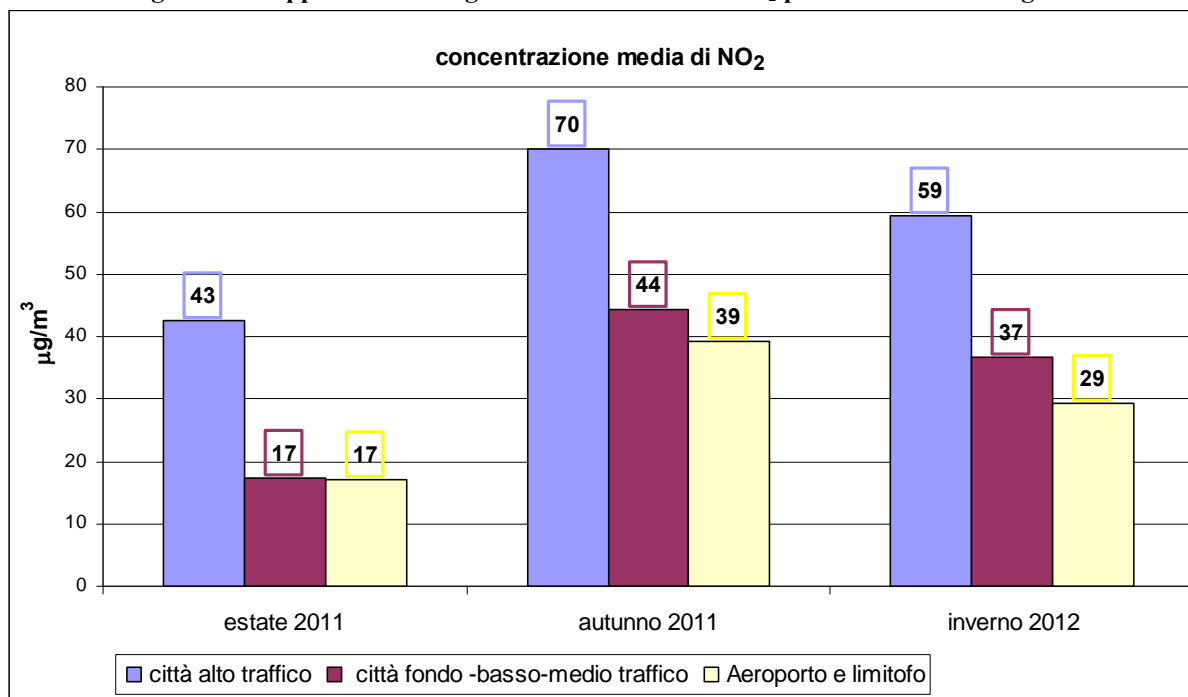
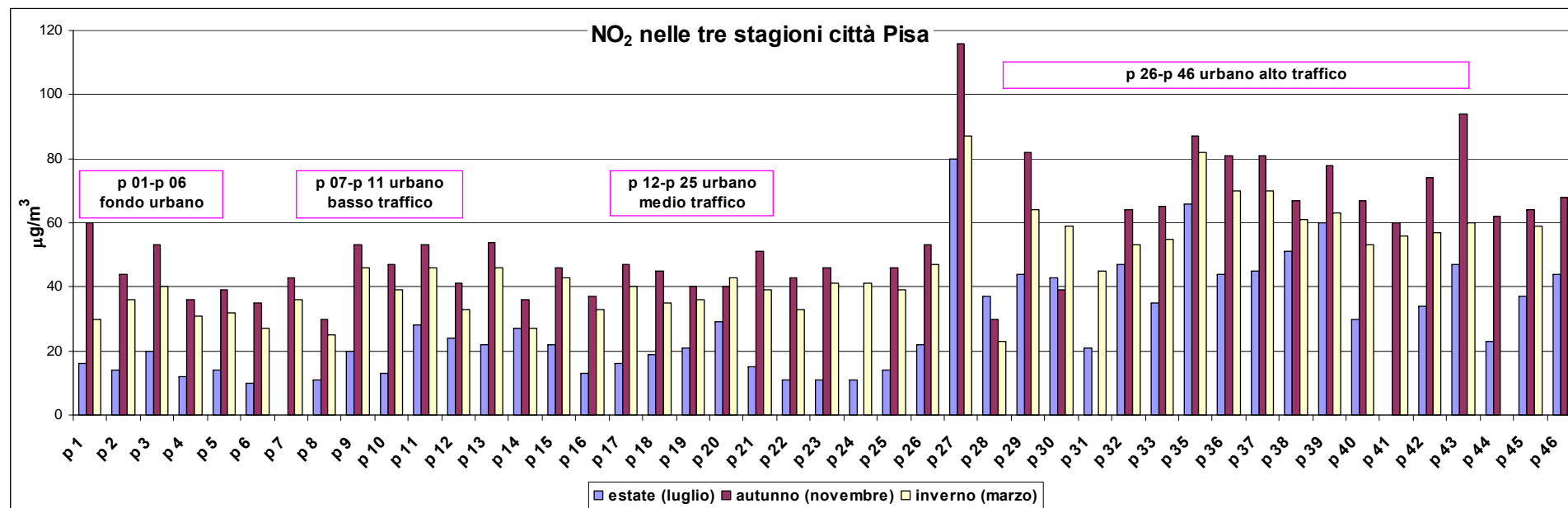
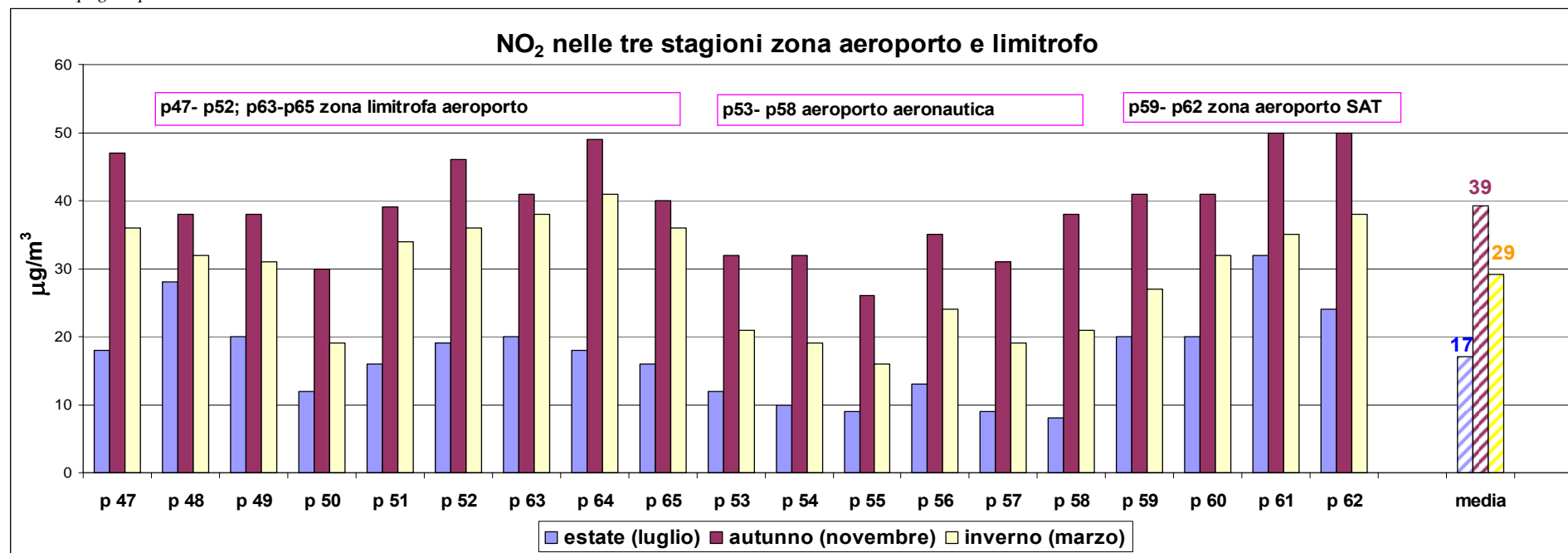


Figura 25: Rappresentazione grafica dei valori medi NO₂ per zona nelle tre stagioni.



I valori di NO₂ in tutte e tre le campagne nella zona aeroportuale e limitrofa sono paragonabili o inferiori ai valori riscontrati nei siti di fondo, medio, basso traffico urbano, in linea con quanto emerso in un analogo studio presso l'aeroporto di London City²³.

Di seguito sono riportati in grafico i risultati ottenuti nelle tre campagne di misura suddivisi per tipologia di zona indagata: città (urbana alto traffico, urbana medio traffico, urbana basso traffico, urbana fondo), aeroporto e zone limitrofe all'aeroporto.



Di seguito in Figura 26 è riportata la mappa con la rappresentazione dell'indice per NO₂ calcolato dai risultati delle tre campagne. In Figura 27 e Figura 28 è riportato il dettaglio relativo alle aree urbana e aeroportuale rispettivamente.

Figura 26: Vista indice NO₂.

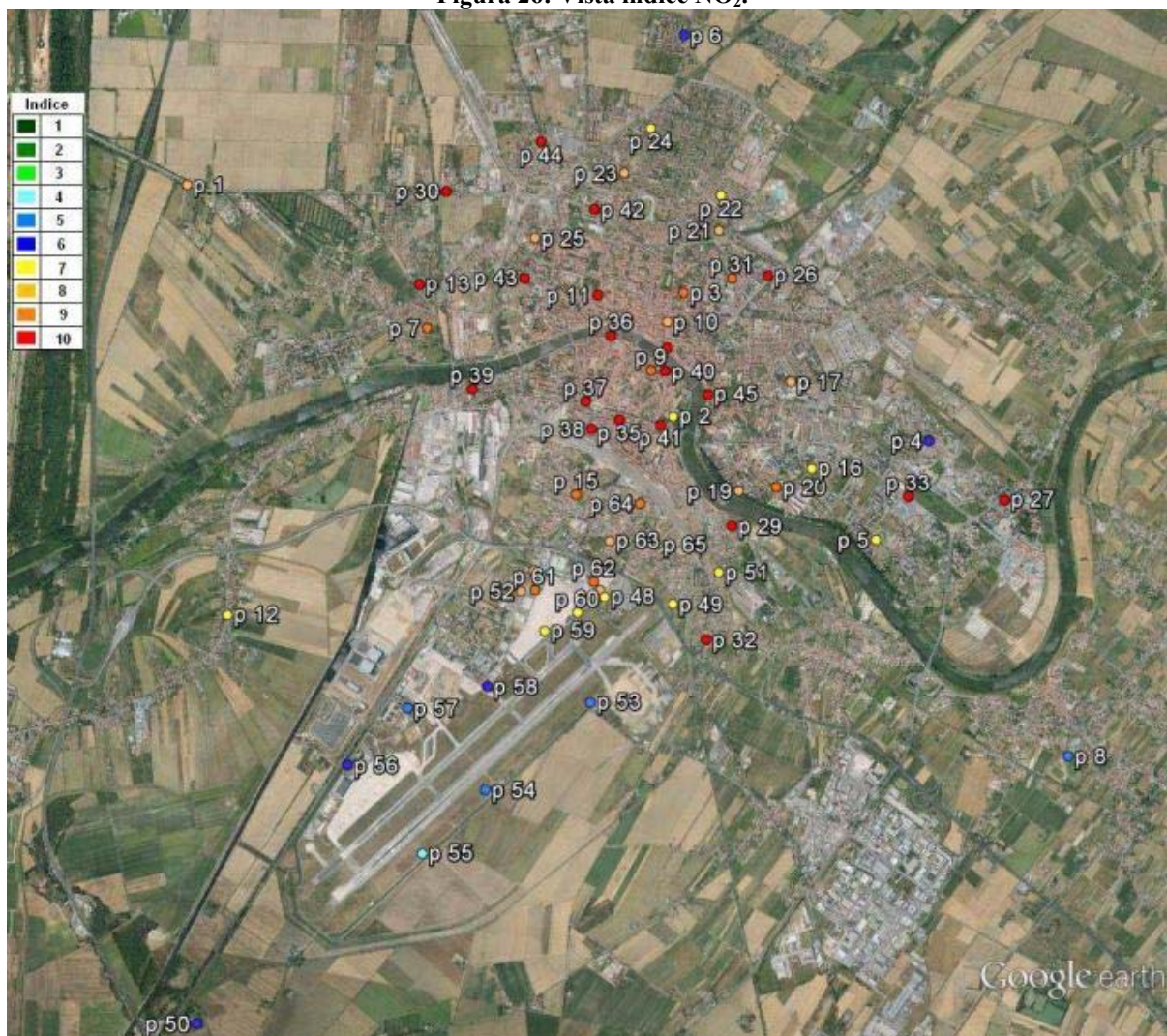


Figura 27: Vista indice NO₂ all'interno della città.

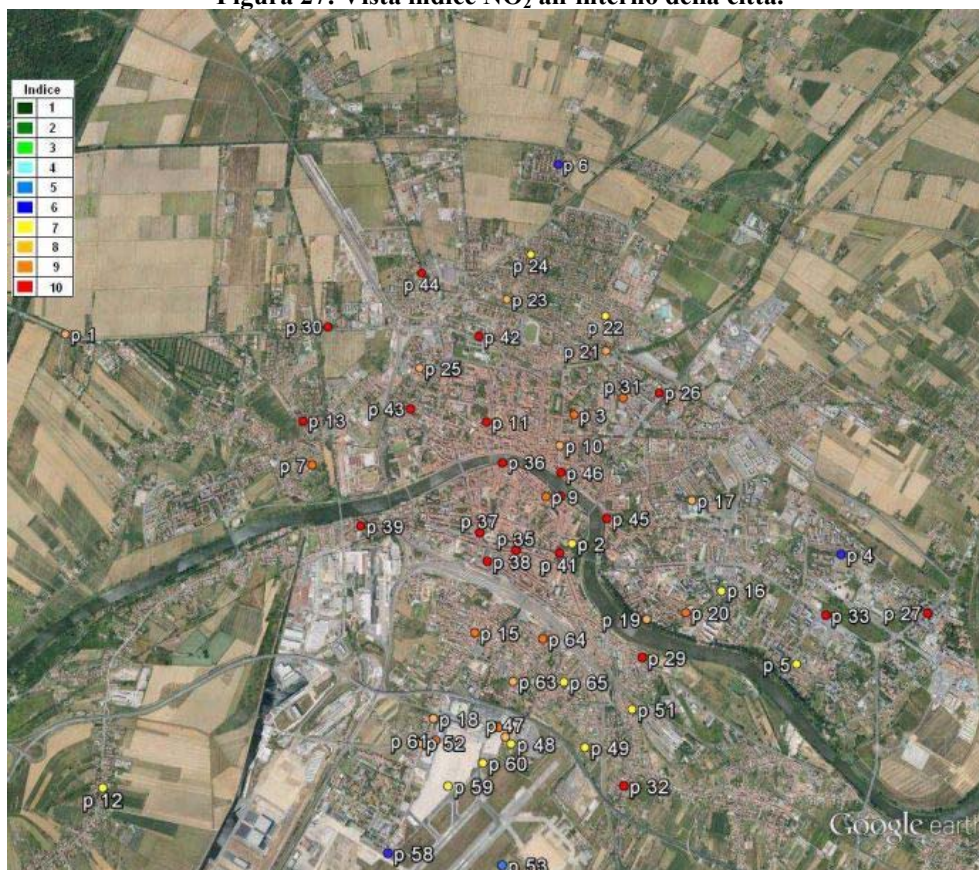


Figura 28: Vista indice NO₂ nell'area aeroportuale.



5.1.2 ALDEIDI

5.1.2.1 DISTRIBUZIONE SPAZIALE E TEMPORALE DELLA CONCENTRAZIONE MEDIA DELLE ALDEIDI

Le Aldeidi possono essere emesse direttamente da fonti mobili o stazionarie, oppure possono formarsi in atmosfera in seguito alla foto-ossidazione degli idrocarburi. Le reazioni atmosferiche di formazione delle Aldeidi avvengono principalmente nel periodo diurno, ma hanno luogo anche nel periodo notturno, quando siano presenti ossidanti come l'ozono ed il radicale nitrato.

L'emissione di Aldeidi dagli autoveicoli è fortemente dipendente dalla motorizzazione, dal tipo di carburante e dal post-trattamento dei gas di scarico.

Le Aldeidi direttamente emesse dagli autoveicoli rappresentano complessivamente circa il 2.5% degli idrocarburi totali. Di queste, la Formaldeide rappresenta circa il 60% mentre l'Acetaldeide, la Benzaldeide, l'Acroleina e l'Esanale sono emesse in percentuali decrescenti.

La Formaldeide ($H_2C=O$) è un gas infiammabile, incolore, reattivo che polimerizza a temperatura e pressione ambiente, ha un odore pungente ed è venduto commercialmente come soluzione acquosa al 30-50% (in peso).

È ampiamente presente nell'ambiente come risultato di processi naturali (incluso incendi di foreste) e come prodotto di rilascio da parte di sorgenti di natura antropogenica.

Le sorgenti naturali sono rappresentate dai processi di ossidazione degli idrocarburi nella troposfera: è infatti uno dei composti volatili che si formano nei primi stadi della decomposizione dei residui delle piante nel suolo.

Le sorgenti antropogeniche sono rappresentate dai gas di scarico dei veicoli, soprattutto Diesel. In ambienti indoor è rilasciata da mobili (truciolato e compensato) e dal fumo di sigaretta.

La Formaldeide è un forte allergizzante della pelle ed è causa di dermatite da contatto. È classificata dalla IARC (International Agency for Research on Cancer) nel gruppo 1 - sostanze cancerogene per l'uomo.

L'Acetaldeide (CH_3CHO) è un composto chimico ubiquitario dell'ambiente.

Oltre ad essere un prodotto intermedio della respirazione delle piante, si forma dalla combustione incompleta del legno, dai camini, dal trattamento di alcuni alimenti (per esempio dalla tostatura del caffè), dal fumo di sigarette, da emissioni auto veicolari, dalla raffinazione del carbone e da impianti di trattamento dei rifiuti. È prodotta in ambiente a seguito della combustione e dalla foto ossidazione degli idrocarburi presenti in atmosfera. Comunque le maggiori sorgenti di emissione sono camini residenziali e stufe a legna, seguite da varie emissioni industriali.

È classificata dallo IARC nel gruppo 2B (possibili cancerogeni umani).

L'Acroleina ($CH_2=CHCHO$) è usata nella produzione di acido acrilico, come materiale di partenza per i polimeri acrilati. È anche usata nella produzione di DL-metionina e come erbicida.

Nell'area urbana si forma in seguito alla foto ossidazione degli idrocarburi, è reperita nei gas di scarico sia dei motori a benzina sia Diesel, nelle emissioni degli aeroplani e nel fumo di sigaretta. In ambienti confinati dove sono presenti stufe a legna possono essere trovate concentrazioni di alcuni mg/m^3 . Non sono disponibili valori di riferimento per l'aria ambiente

se non per un valore massimo accettabile per la concentrazione di fondo esistente in Russia nel 1993 pari a 30 mg/m^3 .

Le aldeidi alifatiche superiori (con tre o più atomi di carbonio), fra le quali vi sono propanale, butanale, pentanale, isopentanale ed esanale, sono caratterizzati da una tossicità minore di quelle di minore peso molecolare ²⁴.

Tra le numerose sostanze organiche volatili presenti in aria, le Aldeidi rivestono notevole interesse sia per le loro proprietà tossicologiche sia perché sono precursori di altri inquinanti fotochimici.

Di seguito le rappresentazioni grafiche delle concentrazioni delle Aldeidi misurate nelle tre campagne. Nel primo grafico sono mediati tutti i siti misurati, nel grafico due e tre sono mediati rispettivamente i siti urbani ed i siti all'interno del sedime aeroportuale.

Figura 29: Concentrazioni medie delle Aldeidi misurate nelle tre campagne media di tutti i siti.

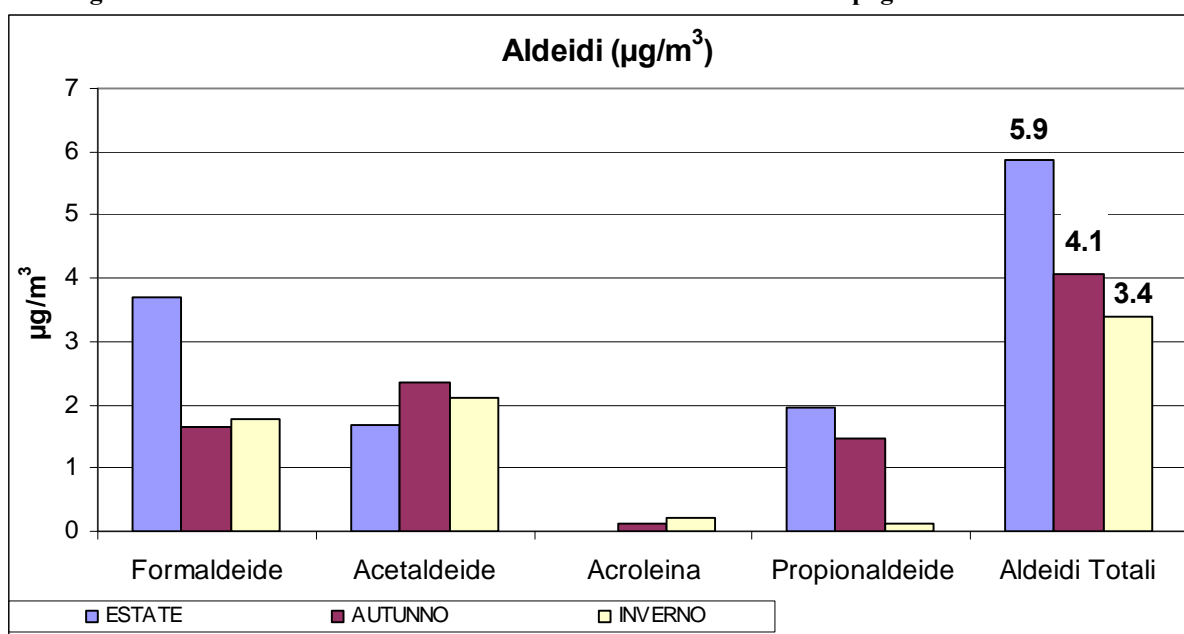


Figura 30: Concentrazioni medie delle Aldeidi misurate nelle tre campagne media dei siti urbani.

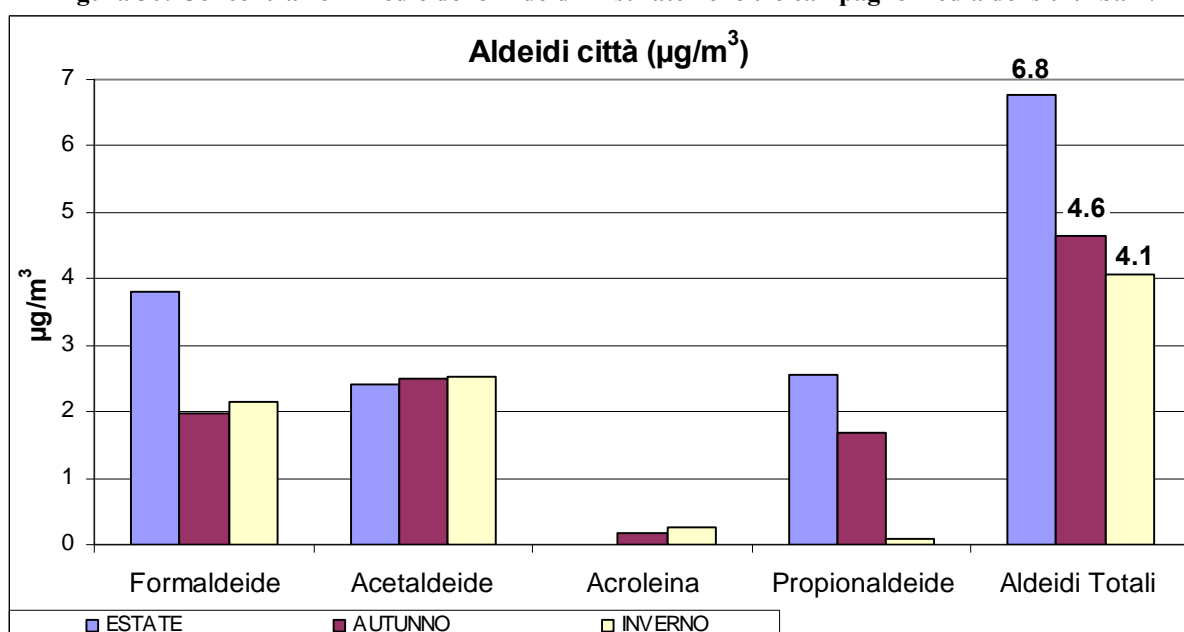
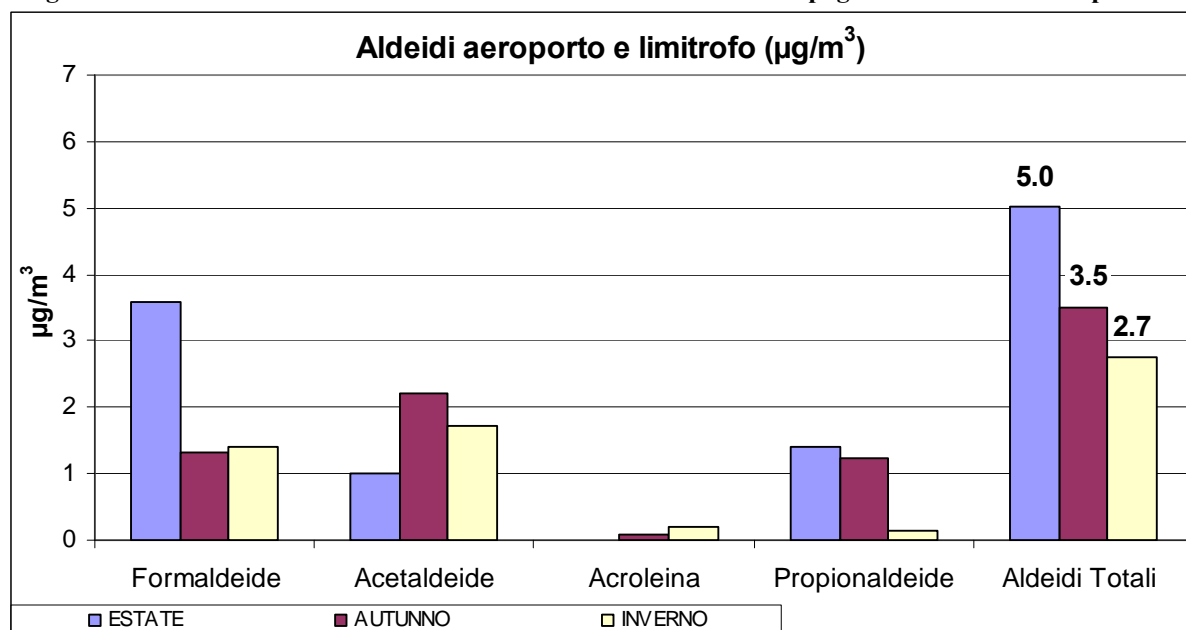


Figura 31: Concentrazioni medie delle Aldeidi misurate nelle tre campagne media dei siti aeroportuali.

La maggior concentrazione estiva delle Aldeidi totali, e tra queste della Formaldeide rispetto alle altre, potrebbe essere dovuta alla maggior presenza di Aldeidi "secondarie" cioè non direttamente emesse ma provenienti da reazioni fotochimiche: il maggior irraggiamento provoca maggior attività fotolitica e quindi formazione del radicale OH* che innesca le reazioni ossidative dei COV con formazione di Aldeidi ed in particolar modo di Formaldeide.

Analizzando i dati si nota che le concentrazioni misurate in aeroporto sono minori di quelle misurate in città.

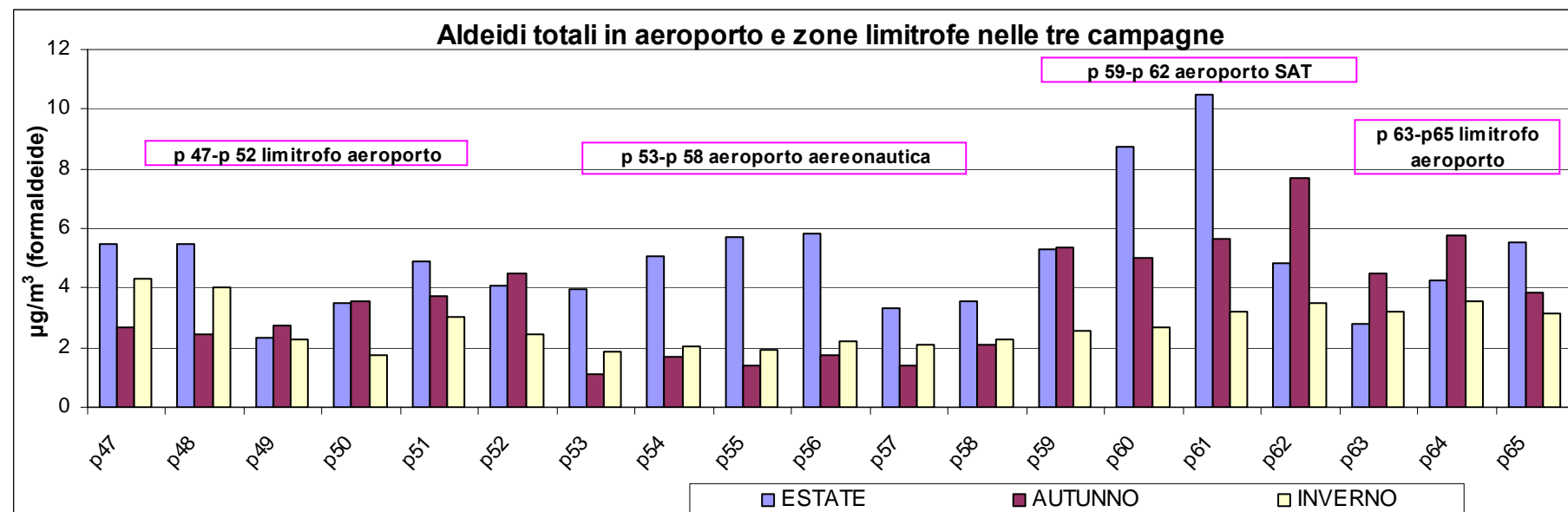
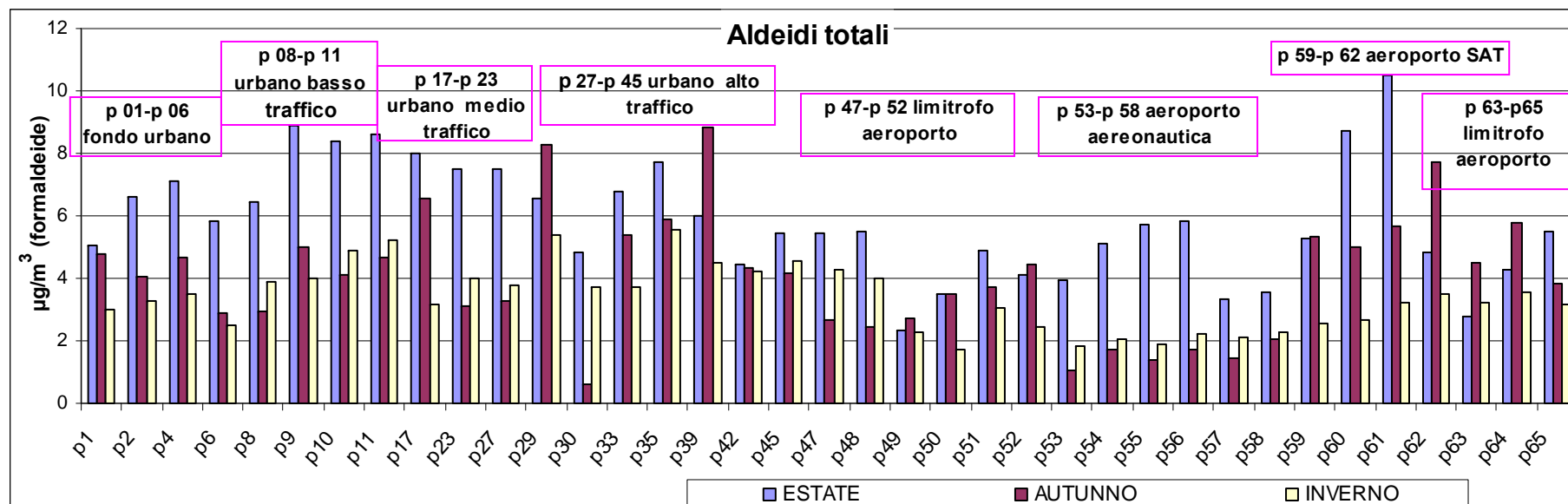
Come riportato nella tabella sottostante, la percentuale di Formaldeide rispetto le altre Aldeidi in estate è del 70% in aeroporto: alzano la media i punti vicino alla zona manovra e parcheggio, in città la percentuale di Formaldeide è del 57%.

In letteratura si trova che la Formaldeide rappresenta circa il 60% delle Aldeidi emesse, mentre l'acetaldeide, la benzaldeide, l'acroleina e l'esanale vengono emesse in percentuali decrescenti. Il valore di 70% riscontrato nel periodo estivo è in linea sia con le condizioni di maggior irraggiamento solare e di quindi maggiore produzione di Formaldeide per attività fotolitica, sia alla caratteristica del combustibile avio composto da una miscela di idrocarburi a catena corta ricca di catene laterali costituite da gruppi metilici i quali durante la combustione danno luogo al radicale metilico che a sua volta si ossida a Formaldeide.

Tabella 17: valori percentuali di Formaldeide rispetto le altre Aldeidi misurate.

	% Formaldeide		
	ESTATE	AUTUNNO	INVERNO
totale città + aeroporto	64%	37%	52%
aeroporto	70%	34%	51%
città	57%	40%	53%

Il calcolo delle Aldeidi totali è stato compiuto sommando solo quelle identificate in tutte e tre le campagne (Formaldeide, acetaldeide, acroleina e propionaldeide) ed espresse come Formaldeide (rapportando i pesi molecolari); di seguito la rappresentazione dell'andamento delle concentrazioni delle Aldeidi totali in tutti i siti nelle tre campagne.



L'andamento delle concentrazioni di Formaldeide ed in generale di tutte le Aldeidi presenta i valori più elevati nella zona di parcheggio aerei e di manovra (zone di immissione diretta da P59 a P62); allontanandosi dal punto di immissione, la concentrazione diminuisce anche grazie a fenomeni di degradazione dovuti alla loro elevata fotosensibilità.

Come già riportato al capitolo 2, la Formaldeide e le Aldeidi in generale sono ritenute essere per lo più inquinanti indoor e non hanno un valore limite di riferimento nell'aria ambiente, viene normalmente preso come limite di riferimento per la protezione della salute umana in ambienti indoor il valore 100 mg/m^3 come media su 30 minuti (valore guida assegnato dall'OMS); applicando un fattore cautelativo pari a 5 per l'esposizione a lungo termine come nel caso degli NO_2 (40 media annuale e 200 media oraria), si è assegnato come limite superiore 20 mg/m^3 ; tale valore non è ovviamente un limite ma solo un ausilio per una migliore leggibilità dei dati.

Di seguito in Figura 32 è riportata la mappa con la rappresentazione dell'indice per le Aldeidi calcolato dai risultati delle tre campagne. In Figura 33 e Figura 34 è riportato il dettaglio relativo alle aree urbana e aeroportuale rispettivamente.

Figura 32: Vista indice Aldeidi.



Figura 33: Vista indice Aldeidi zoom città. all'interno della città.

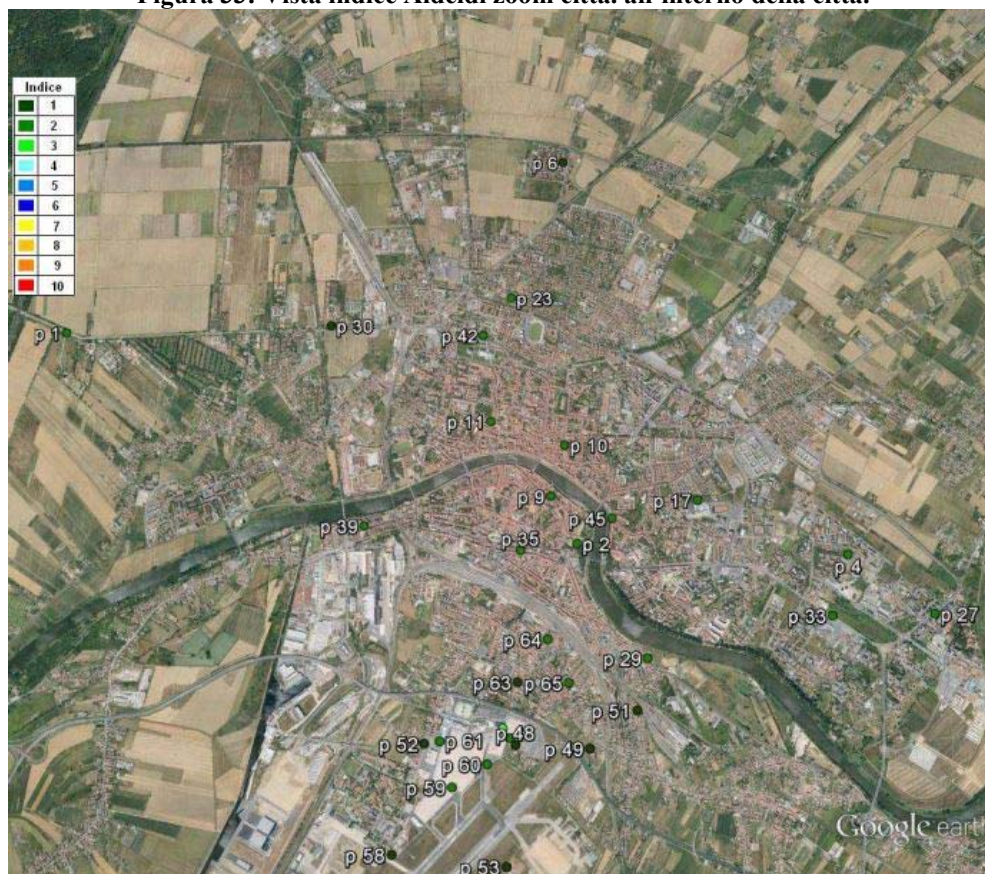


Figura 34: Vista indice Aldeidi nell'area aeroportuale.



5.1.3 BTEX

5.1.3.1 DISTRIBUZIONE SPAZIALE E TEMPORALE DELLA CONCENTRAZIONE MEDIA DEI BTEX.

L'acronimo BTEX viene usato per indicare l'insieme di Benzene, Toluene, Etilbenzene e gli isomeri orto, meta, para dello Xilene. Si tratta di composti organici volatili derivati dalla raffinazione del petrolio ed utilizzati in vario modo nell'industria (come solventi o per la sintesi di altri composti chimici) e come componenti nelle benzine in quanto ne incrementano il potere antidetonante. In Italia la legge n. 413/1997 ha stabilito che il contenuto di Benzene nelle benzine non deve superare l'1% in volume.

Il Benzene è il capostipite della famiglia dei composti organici aromatici. È un liquido volatile derivato dalla distillazione del petrolio, usato come solvente e come materia prima per la preparazione di composti aromatici. Di formula bruta C_6H_6 è incolore, facilmente infiammabile e dal caratteristico odore aromatico pungente che diventa irritante a concentrazioni elevate.

Il Benzene presente nell'aria deriva da processi evaporativi (emissioni industriali) e di combustione incompleta sia di natura antropica (veicoli a motore), sia naturale (incendi).

La presenza di Benzene nell'atmosfera è un problema particolarmente rilevante nelle aree urbane dove insistono densità abitative elevate e notevoli quantità di traffico veicolare. La quantità predominante di Benzene (circa 85%) deriva dai gas di scarico dei veicoli mentre una percentuale minore (15%) proviene dalle emissioni evaporative. La dispersione del Benzene in atmosfera è connessa a una serie di variabili di tipo meteorologico (variazioni stagionali e giornaliere), socio-economico (intensità e fluidità del traffico giornaliero e orario) e geografico (distribuzione degli assi stradali principali, morfologia del territorio, ecc.).

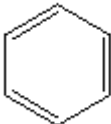
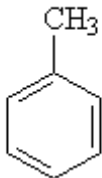
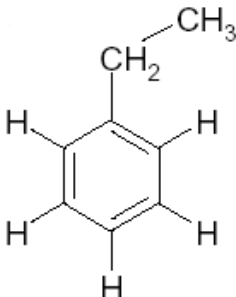
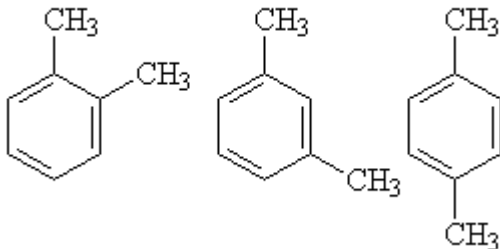
Gli effetti nocivi dei BTEX sono noti da diversi anni. Il Benzene è una sostanza di cui è conosciuto il potere cancerogeno, mentre tale caratteristica non è stata dimostrata per gli altri tre composti che sono però responsabili di danni neurologici causati da cambiamenti delle membrane neurali ²⁵.

A causa della accertata cancerogenicità del Benzene, lo IARC (International agency for research on cancer) lo ha classificato nel gruppo 1 dei cancerogeni per l'uomo e pertanto non è possibile raccomandare una soglia di sicurezza per la sua concentrazione in aria.

I riferimenti di legge (D.Lgs 155/10) definiscono un valore limite annuale, calcolato come media annua, per il Benzene pari a $5 \mu g/Nm^3$. Per gli altri inquinanti non esistono a tutt'oggi valori limite nell'aria.

Tabella 18: Limiti Livelli di concentrazione stabiliti dal D.Lgs. 155/2010 - Benzene (C_6H_6).

Inquinante	Tipo protezione	Indice statistico	Unità di misura	Soglia Allarme	Limite	Numero sup./anno	Soglia val. sup.		Soglia val. inf.	
							livello	sup./anno	livello	sup./anno
Benzene	salute umana	media annuale	$\mu g/m^3$		5		3,5		2	

Benzene CAS NUMBER: 71-43-2 Formula Chimica: C ₆ H ₆	
Toluene CAS NUMBER: 108-88-3 Formula Chimica: C ₇ H ₈	
Etilbenzene CAS NUMBER: 100-41-4 Formula Chimica: C ₈ H ₁₀	
Xilene CAS NUMBER: orto 95-47-6 CAS NUMBER: meta 108-38-3 CAS NUMBER: para 106-46-3 Formula Chimica: C ₈ H ₁₀	

Per la prima campagna di misura sono stati posizionati 18 Radielli dedicati ai BTEX tutti all'interno del sedime aeroportuale e nelle aree limitrofe l'aeroporto; per le altre due campagne si è deciso di allargare lo studio e sono stati posizionati altri 21 dosimetri in altrettanti siti urbani in modo da coprire tutte le tipologie di zone individuate. Per il calcolo dell'indice dei BTEX è stata fatta una media pesata che tenesse conto anche del numero di dati disponibili in ciascuna campagna.

I risultati ottenuti sono stati confrontati e validati con i dati dello stesso periodo delle centraline fisse e per ulteriore controllo, come per gli altri inquinanti, sono stati posizionati dei dosimetri in doppio ed è stato effettuato un bianco di campo ed uno di laboratorio per ciascuna campagna.

Tabella 19: concentrazione media in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dei BTEX nelle tre campagne.

	media tutti i siti		
	ESTATE	AUTUNNO	INVERNO
Benzene	2.4	2.5	2.9
Toluene	3.8	2.1	6.0
Etilbenzene	0.5	1.2	0.9
Xileni Tot	2.6	7.7	4.5

La media estiva si riferisce solo a dosimetri interni all'aeroporto e nei siti limitrofi all'aeroporto, le medie autunnali e invernali invece sono state fatte su 39 dosimetri posizionanti sia in aeroporto e limitrofo che in città.

Di seguito i valori medi dei BTEX divisi per i siti urbani e quelli all'interno del sedime aeroportuale e zone limitrofe.

Tabella 20: Concentrazione media in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dei siti urbani (p1-p45) e dei siti aeroporto e limitrofo (p47-p66)

media città (p1-p45)			media aeroporto - limitrofo (p47-p66)			
	AUTUNNO	INVERNO	ESTATE	AUTUNNO	INVERNO	
Benzene	2.8	3.4	2.4	2.2	2.3	B
Toluene	2.7	6.3	3.8	1.5	5.6	T
Etilbenzene	1.8	1.1	0.5	0.7	0.8	E
Xileni Tot	11.0	5.4	2.6	4.5	3.7	X

Figura 35: medie delle concentrazioni dei BTEX per le campagne autunnale ed invernale nelle diverse tipologie di siti.

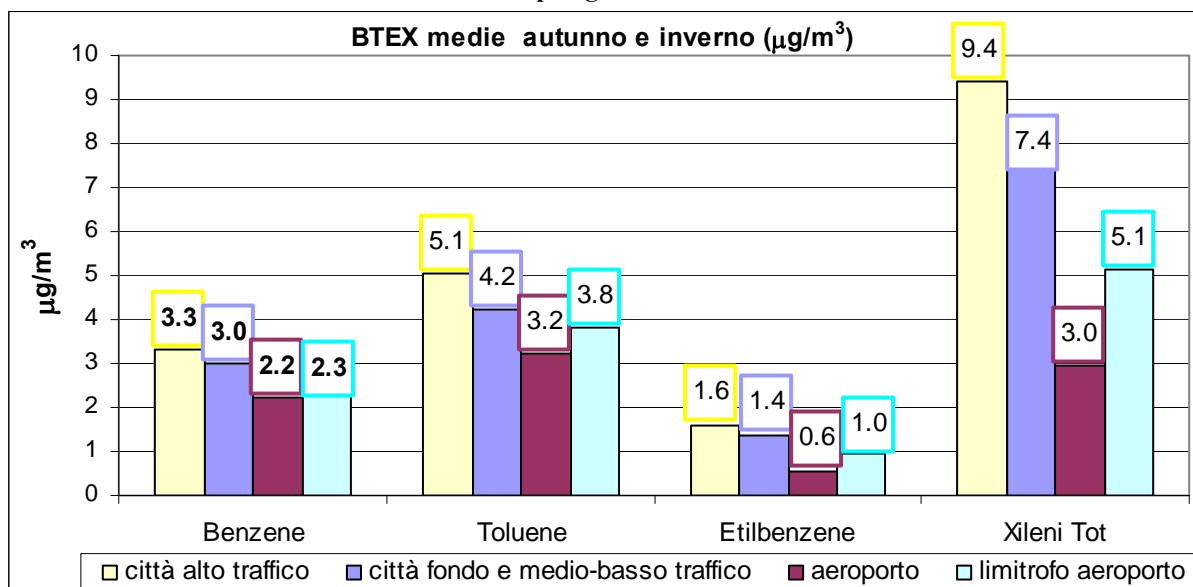
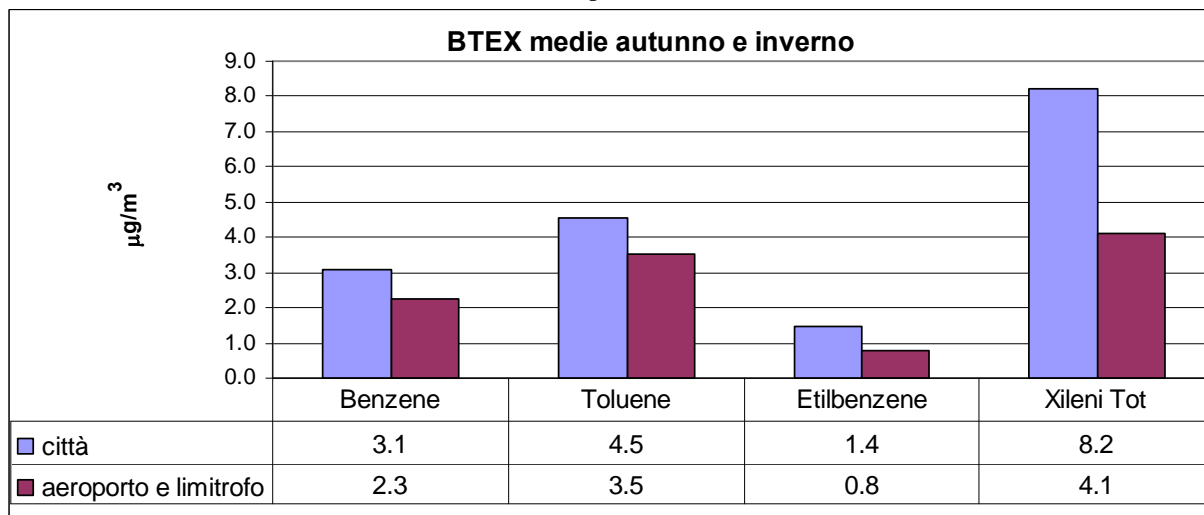
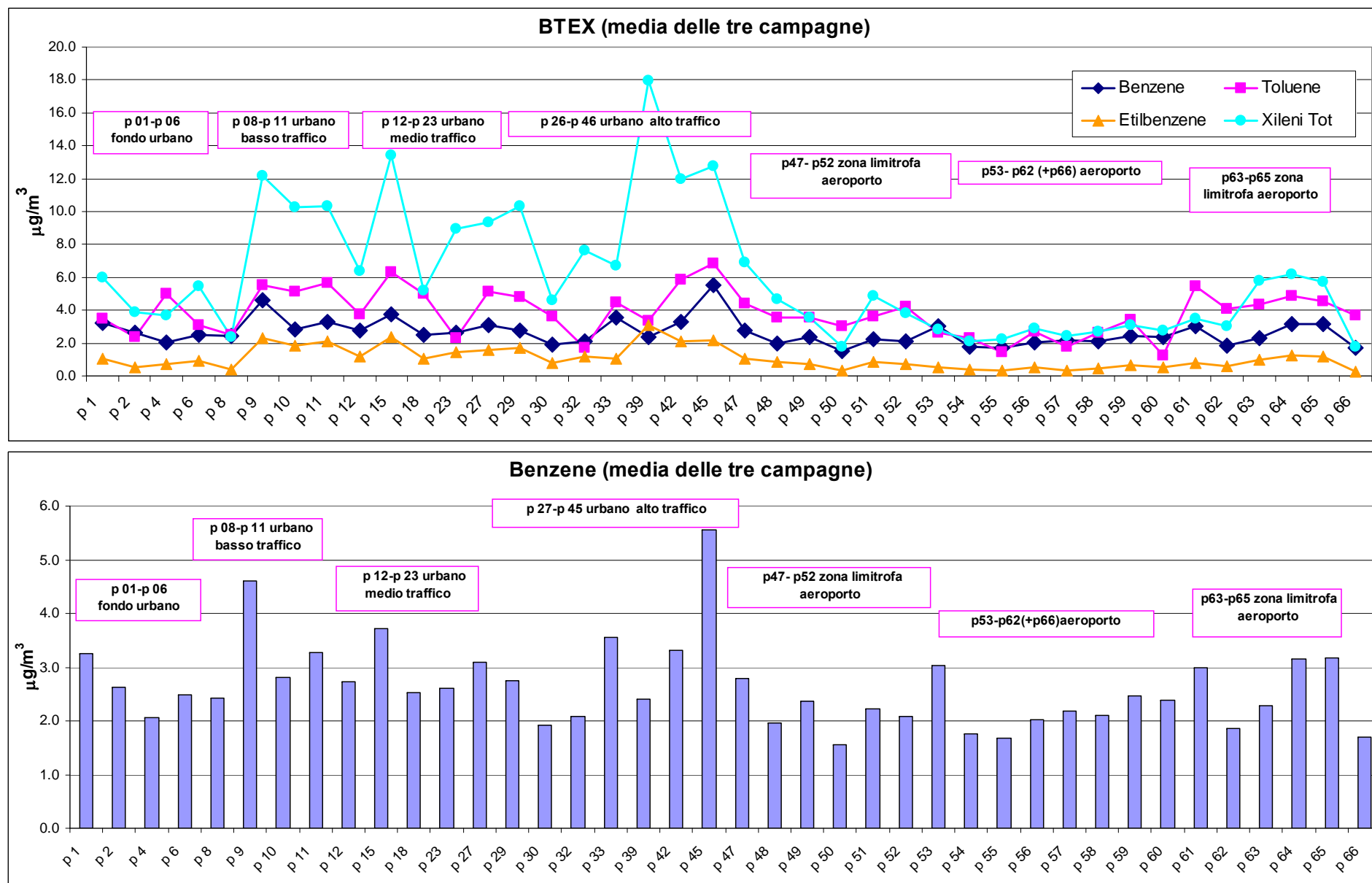


Figura 36: medie delle concentrazioni dei BTEX per le campagne autunnale ed invernale nei siti urbani e aeroportuali.





Come si deduce dalle rappresentazioni grafiche e tabellari riportate, 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.

Di seguito in Figura 37 è riportata la mappa con la rappresentazione dell'indice per i BTEX calcolato dai risultati delle tre campagne. In Figura 38 e Figura 39 è riportato il dettaglio relativo alle aree urbana e aeroportuale rispettivamente.

Figura 37: vista indice BTEX.



Figura 38: vista indice BTEX all'interno della città.

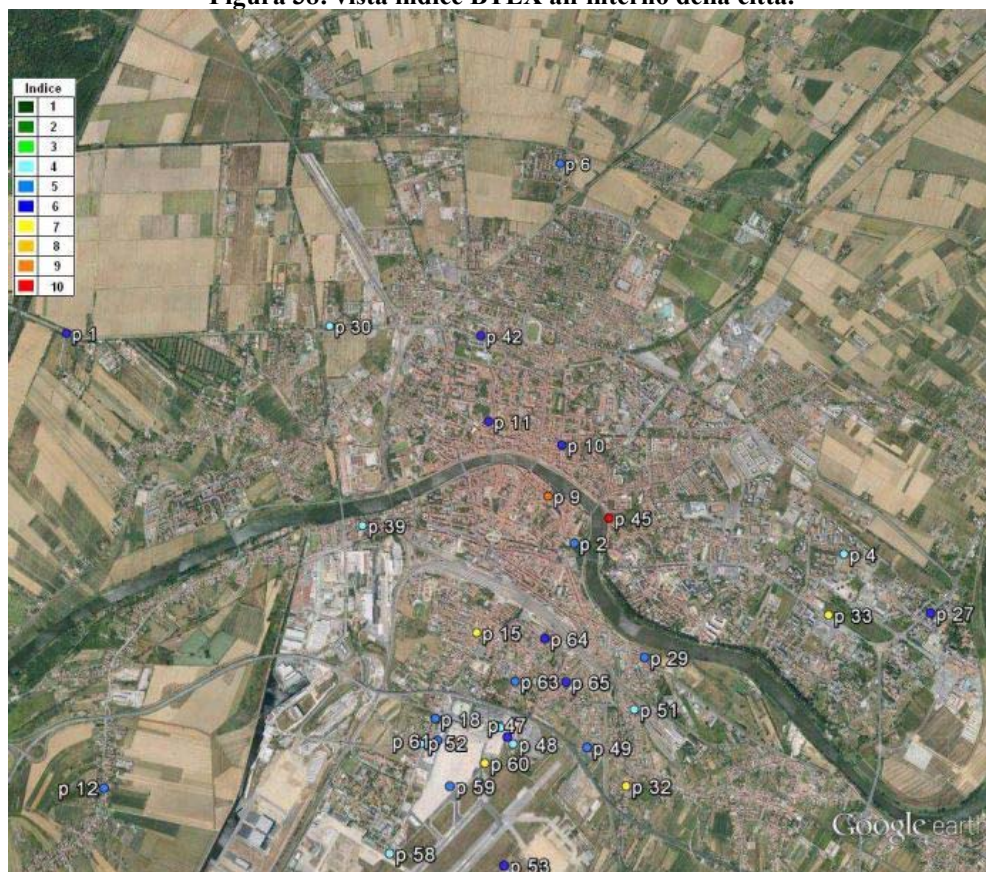


Figura 39: vista indice BTEX nell'area aeroportuale.



5.2 POLVERI E METALLI

5.2.1 CAMPAGNE CON I LABORATORI MOBILI

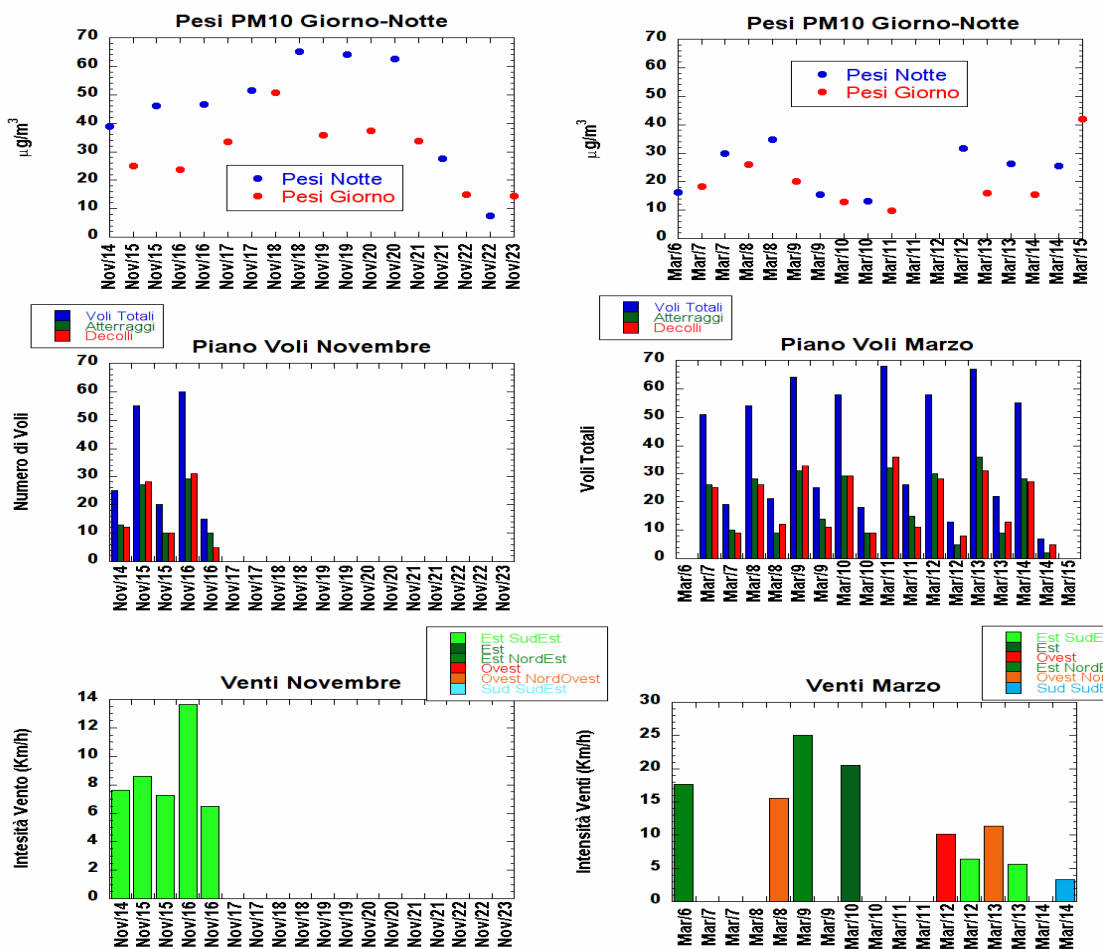
In questo paragrafo sono illustrati i risultati ottenuti dall'analisi chimica, composizione ionica e ricerca di specifici metalli, dell'aerosol raccolto durante le due campagne di campionamento (autunnale: dal 14 novembre al 23 novembre 2011, invernale: dal 6 marzo 15 marzo 2012).

Andamento del PM₁₀

La Figura 40 riporta:

- gli andamenti della concentrazione del particolato atmosferico campionato (PM₁₀) suddivisi nelle fasce giorno e notte;
- il piano dei voli giornalieri per le due campagne;
- la velocità e direzione del vento per le due campagne.

Figura 40: Profili temporali di PM₁₀, intensità e direzione del vento e numero di voli, suddivisi per giorni ed in base all'orario di campionamento (giorno 7-19, notte 19-7). I voli sono stati ulteriormente suddivisi in atterraggi e decolli.



Il PM_{10} mostra una marcata differenza stagionale ($37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ media in novembre contro $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in marzo) nonché un netto trend giorno-notte con concentrazioni notturne superiori anche di oltre il 50% rispetto a quelle diurne; quest'ultimo trend è particolarmente evidente durante la campagna di novembre.

Quanto rilevato è in linea con la conoscenza sulla dinamica di evoluzione dello Strato Limite Planetario (PBL) e dello Strato di Mescolamento (ML) che riducendosi durante le ore notturne e nel periodo invernale sfavoriscono la dispersione degli inquinanti con conseguente maggiori concentrazioni al suolo di tutti gli inquinanti prodotti da sorgenti locali.

Influenza del vento:

Come è noto la direzione e la velocità del vento influenzano la dispersione degli inquinanti in termini di concentrazione e di recettori interessati dall'inquinante emesso.

Nei giorni di vento forte, soprattutto intorno all'8 e al 9 marzo, sono state registrate concentrazioni più basse di PM_{10} a discapito del fatto che il vento soffiando da est trasporta inquinanti provenienti dalle aree antropizzate dell'entroterra (soprattutto dalla città di Pisa e da zone limitrofe). Questo tipo di trasporto si ripercuote invece sulla concentrazione di alcuni metalli presenti nell'aerosol, come dettagliato in seguito.

Influenza del numero di voli:

In entrambe le campagne, il numero di voli del giorno (fascia oraria 7-19) è stato nettamente superiore a quello della notte (fascia oraria 19-7), con una media di 60 voli diurni contro i 20 notturni. Il numero di atterraggi e decolli è comparabile in tutti i giorni del campionamento.

Il maggior numero di voli diurni ha avuto un effetto meno rilevante: in novembre, infatti, si osserva che non ha prodotto un accumulo di inquinanti immediato essendo il PM_{10} più basso di giorno che di notte. I valori alti di PM_{10} notturno in inverno sono quindi maggiormente influenzati dalle condizioni meteo climatiche che non dal numero di voli. In marzo, nel periodo di campionamento si sono verificati solo pochi fenomeni di basso strato di rimescolamento ma condizioni di vento piuttosto forte.

Il PM per rilevazioni mediate nel tempo è quindi sostanzialmente indipendente dal numero di voli ed è invece correlato alle condizioni atmosferiche.

I dati dei contatori di particelle ad elevata risoluzione sono stati utilizzati anche per valutare l'impatto a brevissimo termine dell'atterraggio e decollo degli aerei sul numero di particelle. Sebbene quanto detto sopra sia vero per rilevazioni mediate nel tempo, dalle rilevazioni istantanee si osserva invece come un accumulo del traffico aereo in un determinato periodo di tempo porti ad un notevole incremento, a distanza di pochi minuti, del numero di particelle ultrafini. Questo effetto si può riscontrare nelle giornate dell'8 e del 9 marzo, dove si osserva l'effetto nonostante l'elevata intensità del vento.

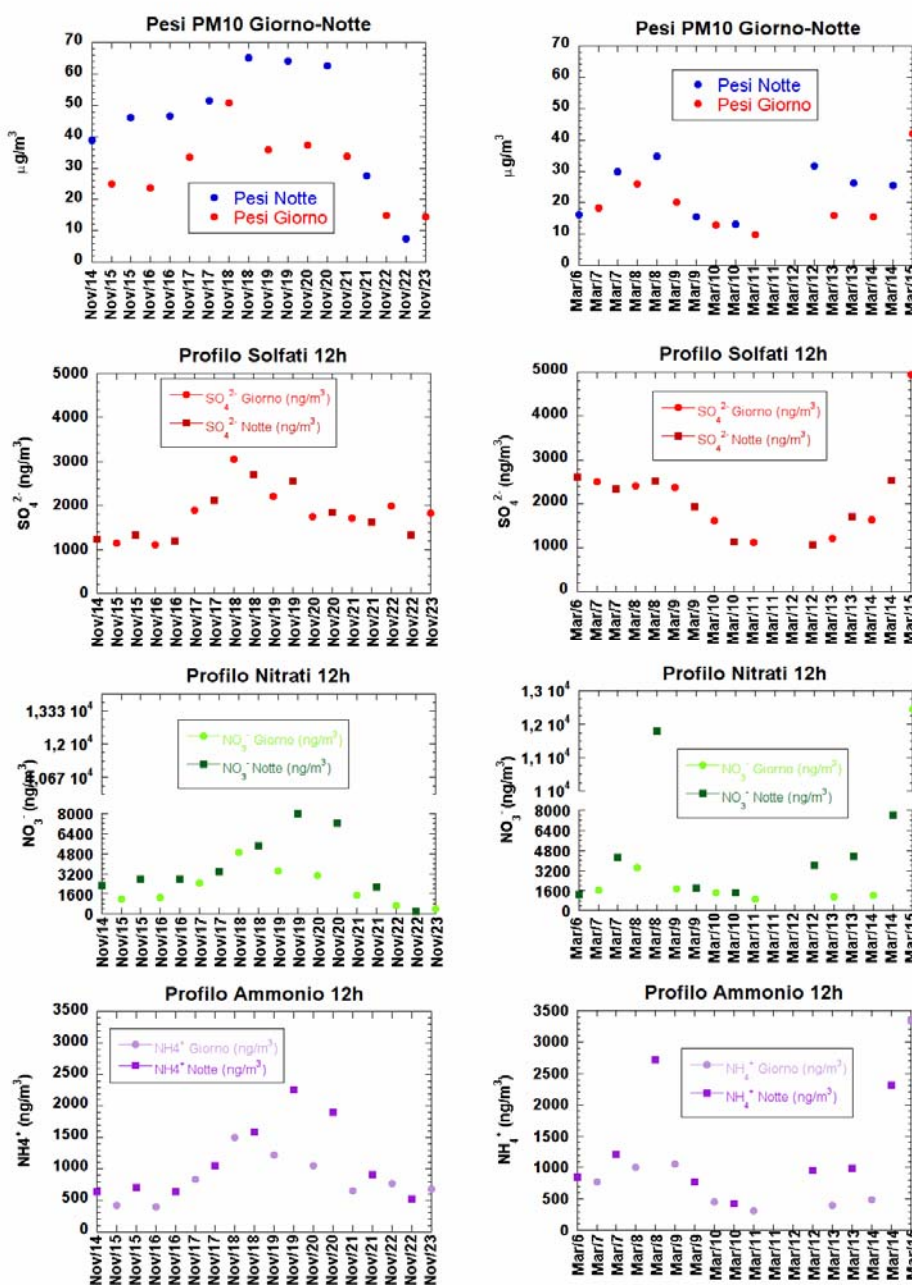
Andamento dei Solfati (SO_4^{2-}), dei Nitrati (NO_3^-) e dell'Ammonio (NH_4^+)

La Figura 41 riporta gli andamenti per gli ioni ricercati sul particolato.

Solfati, nitrati e ammonio, costituiscono il '*Secondario Inorganico*', cioè specie non emesse come tali dalla sorgente emissiva ma che derivano da processi secondari di ossidazione in atmosfera e/o processi di conversione gas-particella. Tali composti sono generalmente presenti nella frazione più fine dell'aerosol (sub micrometrica) ed hanno elevati tempi di residenza in atmosfera; pertanto, sono soggetti a diffusione su larga scala.

I nitrati e l'ammonio, seppur in maniera meno evidente, evidenziano lo stesso andamento giornaliero del peso (PM_{10}) anche se le concentrazioni medie in questo caso sono simili in novembre e marzo (rispettivamente 984 ng/m^3 e 1160 ng/m^3 per NH_4^+ e 2943 ng/m^3 e 4031 ng/m^3 per NO_3^-). Il solfato mostra invece un andamento temporale differente. Sono stati individuati due eventi in cui sono state raggiunte concentrazioni più elevate rispetto al background delle due campagne: una nella notte di martedì 8 marzo 2012 (11789 ng/m^3 per i nitrati, 2710 ng/m^3 per l'ammonio), l'altro tra la notte del 14 e la mattina del 15 marzo 2012 (12434 ng/m^3 e 3345 ng/m^3), questo secondo evento riguarda anche il solfato (4941 ng/m^3).

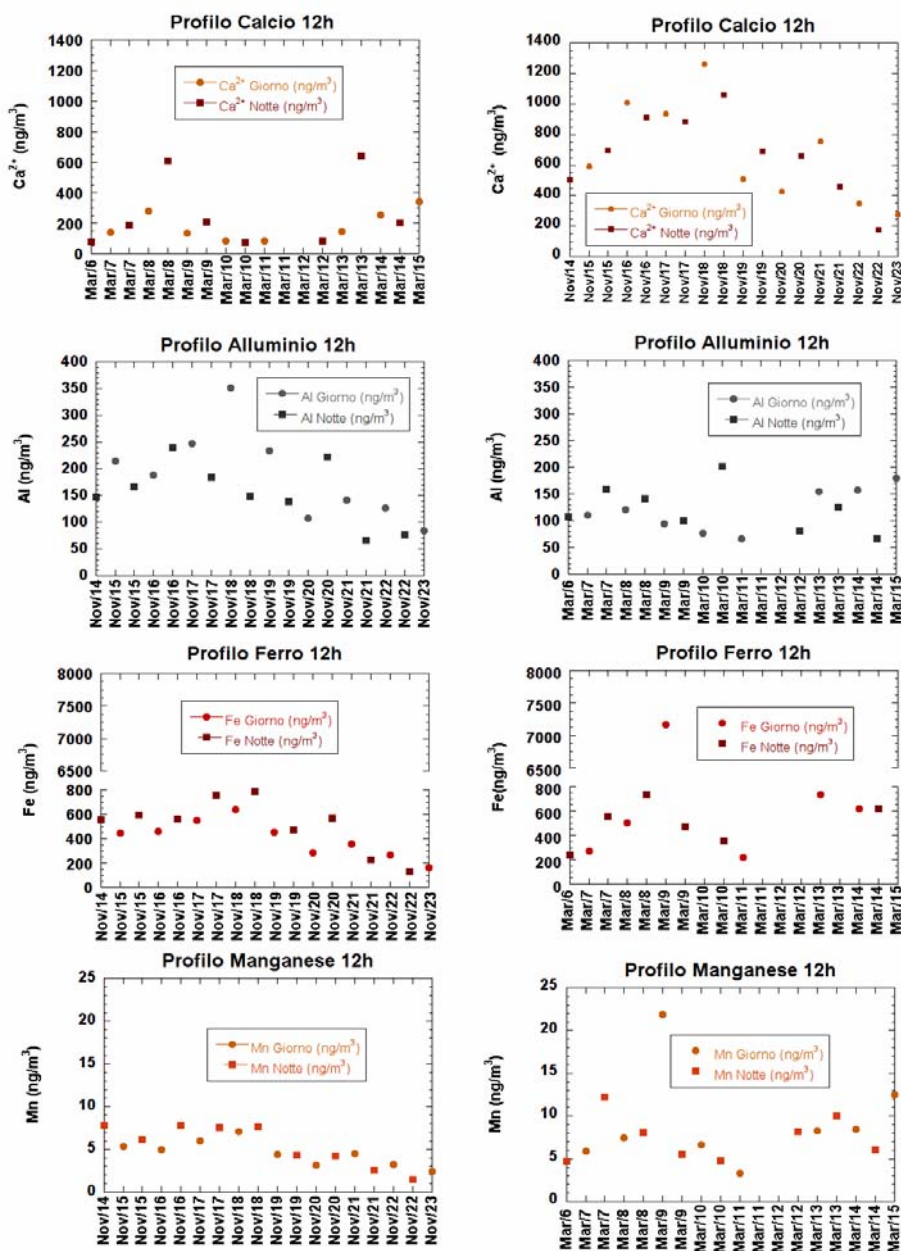
Figura 41: Profili temporali dei pesi, solfati, nitrati e ammonio divisi per campagne di campionamento. In punti chiari rappresentano i dati campionati durante il giorno (7-19), i quadrati scuri quelli campionati durante la notte (19-7).



Andamento del Calcio (Ca), dell'Alluminio (Al), del Ferro (Fe) e del Manganese (Mn)

In Figura 42 sono riportati i profili di alcuni metalli (Al, Fe e Mn) che con tutta probabilità hanno una comune origine che è stata identificata nella corrosione e nel deterioramento delle parti meccaniche delle fusoliere degli aerei. Anche in questo caso, la concentrazione autunnale risulta in media leggermente superiore rispetto a quella primaverile, specie per l'alluminio (171 ng/m^3 contro 12 ng/m^3).

Figura 42: Profili temporali di Calcio, Ferro, Manganese ed Alluminio, divisi per campagne autunnale e primaverile e nei periodi giorno-notte.



Ben più marcata è invece la differenza tra le concentrazioni medie delle due campagne per il calcio, elemento tipicamente di origine crostale che è utilizzato come marker di trasporto a lunga distanza (fenomeni tipo Saharan dust) ma può essere originato anche dal risollevarimento delle polveri a livello locale.

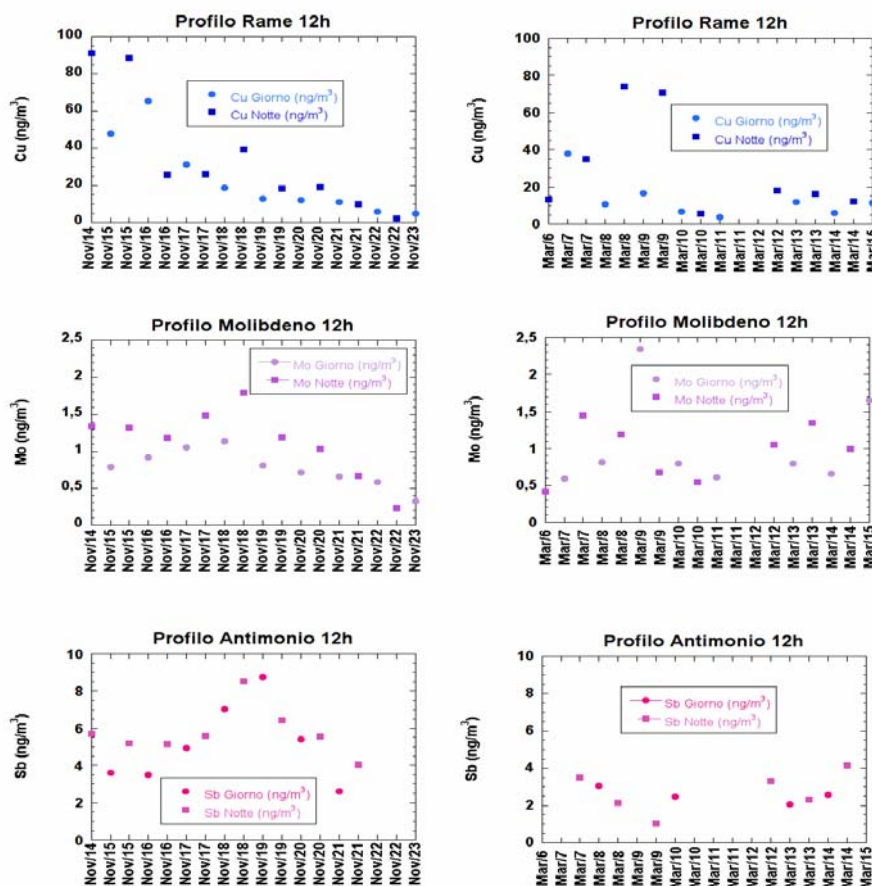
Il valore medio di novembre (675 ng/m^3) è di tre volte superiore rispetto a quello di marzo (220 ng/m^3). In tutti i profili riportati in figura, non è stato possibile individuare trend giornalieri o particolari differenze tra campionamento notturno e diurno.

Andamento del Molibdeno (Mo), Stagno (Sb) e del Rame (Cu)

Mo, Sb e Cu, seguono gli stessi andamenti già descritti precedentemente per gli altri metalli.

In particolare il Mo risulta seguire lo sviluppo di Manganese e Ferro, probabilmente a causa della comune origine dalla corrosione delle parti meccaniche degli aerei. Il Rame ha in generale concentrazioni invernali più elevate, ma nelle notti del 8 e del 9 marzo possiamo mettere in evidenza un netto aumento rispetto al background (concentrazioni diurne di 70 ng/m^3 contro un valore di background di 12 ng/m^3).

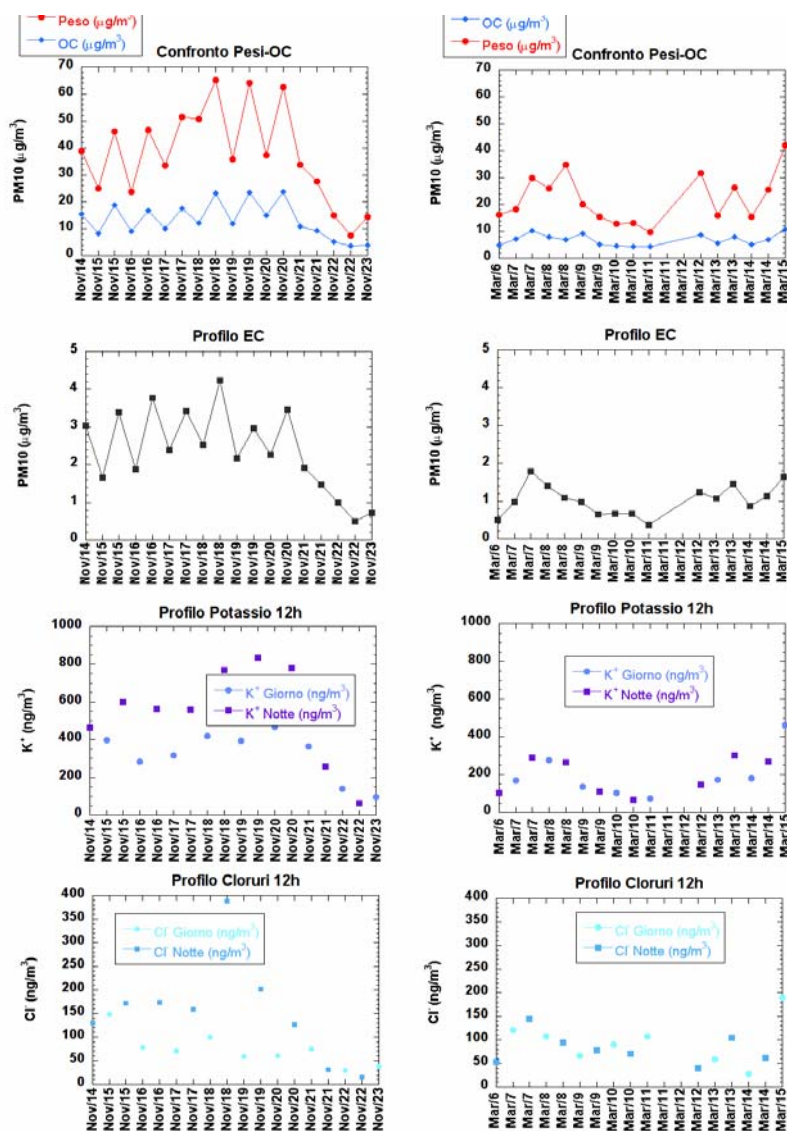
Figura 43: profili temporali di Rame, Antimonio e Molibdeno divisi per campagne e nei periodi giorno-notte.



Andamento del Carbonio Elementare (EC), del Carbonio Organico (OC), dei Cloruri (Cl) e del Potassio (K^+)

In Figura 44 sono riportati i confronti tra PM_{10} , EC (carbonio elementare) e OC (carbonio organico), dei cloruri e del K^+ . Tutti questi composti, derivano prevalentemente dalla combustione dei carburanti fossili utilizzati dagli aerei e pertanto vengono trattati insieme. I loro andamenti temporali sono infatti molto simili: ricalcano lo stesso andamento descritto per il PM_{10} .

Figura 44: Profili temporali di OC, EC, Potassio e Cloruri divisi per campagne e nei periodi giorno-notte.

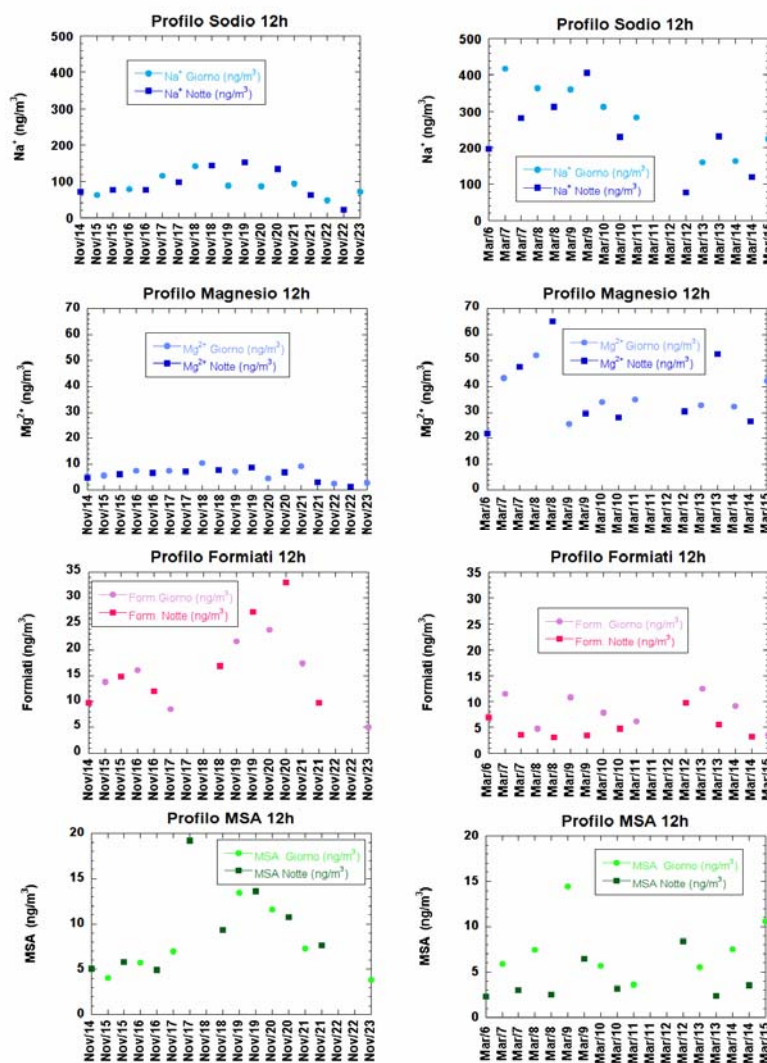


Andamento Sodio(Na^+), Magnesio (Mg^{2+}), dei Formiati e dell'Acido Metansolfonico (MSA)

Il sodio ed il magnesio sono elementi origine primaria (marina e/o crostale), quindi associati prevalentemente al particolato super-micrometrico. La concentrazione riscontrata nella campagna invernale (marzo 2012) è maggiore di quella autunnale, probabilmente a causa di più efficienti processi di trasporto di masse d'aria marina dal Mar Tirreno.

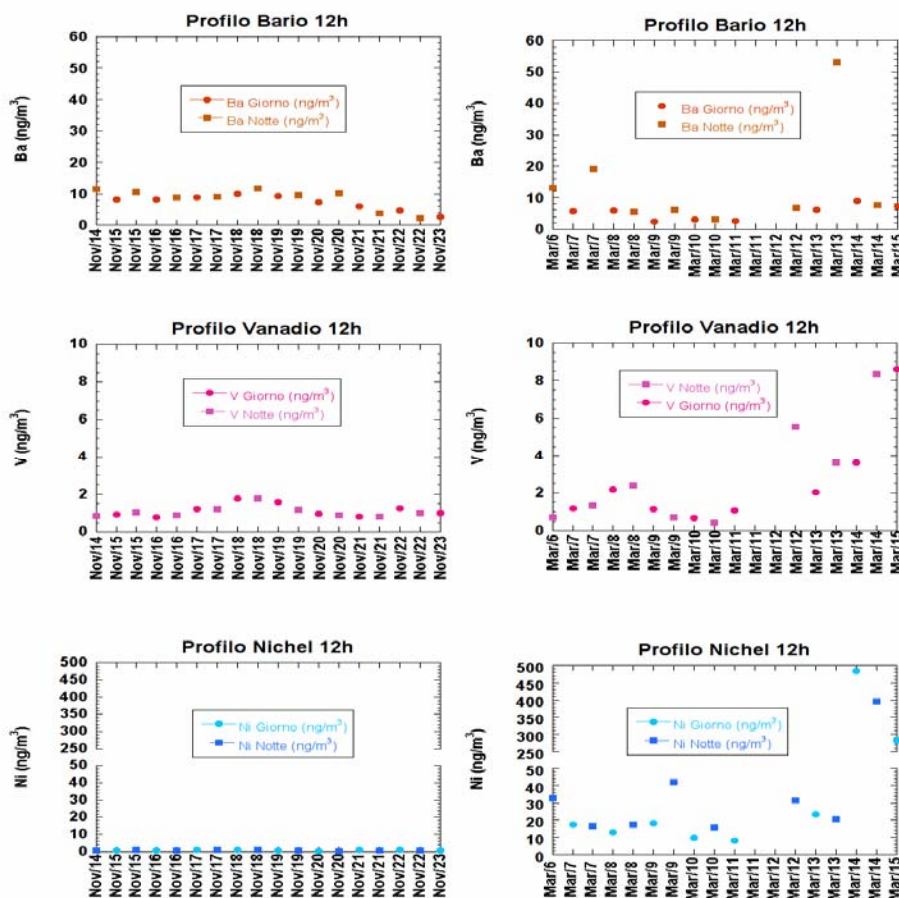
L'MSA (Acido Metansolfonico) è un composto che si forma in atmosfera da processi di ossidazione a carico del dimetilsolfuro una sostanza di origine biologica marina. L'MSA durante la campagna primaverile mostra concentrazioni diurne superiori a quelle notturne probabilmente a causa dell'attività fotochimica più elevata che determina una più rapida formazione di MSA dal dimetilsolfuro.

Figura 45: profili temporali di MSA, Formiati, Magnesio e Sodio divisi per campagne e nei periodi giorno-notte.



Andamento Bario(Ba), Vanadio (Vd) e Nichel(Ni)

Al contrario dei precedenti casi, questi metalli hanno concentrazioni molto basse in autunno rispetto alla primavera. Questo può essere spiegato da più intensi processi di avvezione delle masse d'aria durante i mesi estivi, in particolare provenienti dalla costa toscana, capaci di aumentare il contenuto di Vanadio e Nichel nell'aerosol atmosferico. Questi metalli sono caratteristici delle emissioni navali, poiché i combustibili utilizzati ne sono ricchi ^[26].

Figura 46: Profili temporali di Nichel, Bario e Vanadio divisi per campagne e nei periodi giorno (chiaro) e notte (scuro).

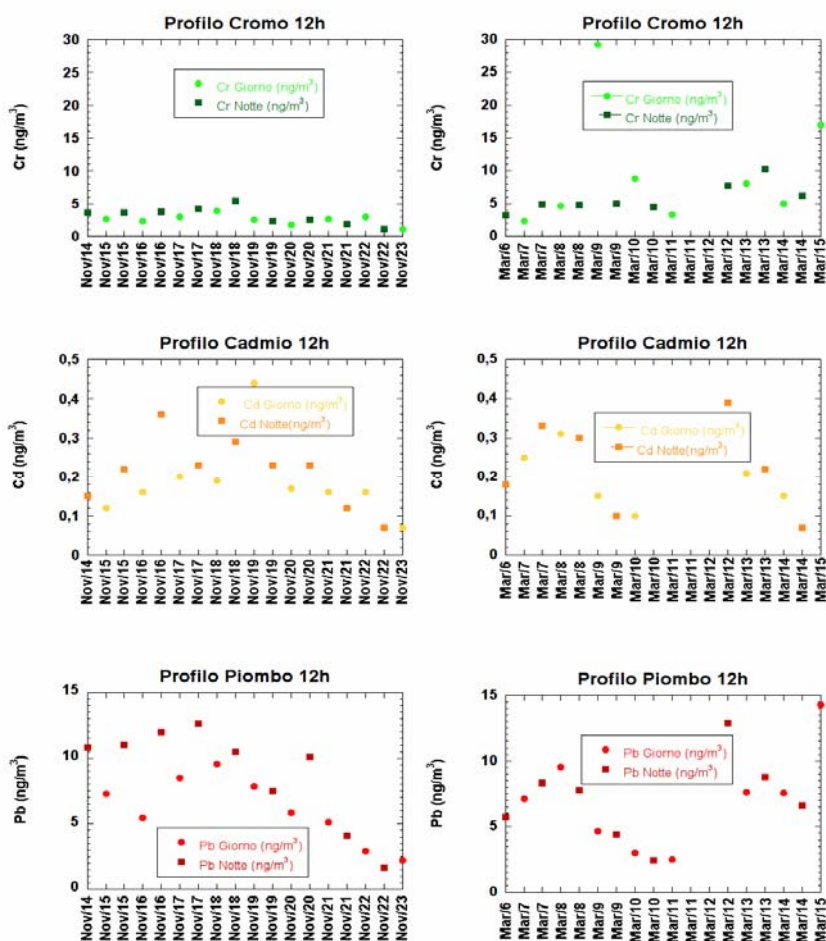
Andamento del Cromo(Cr), del Cadmio (Cd) e del Piombo(Pb)

Il Cromo presenta una concentrazione media di circa 3 ng/m^3 durante la campagna autunnale e di circa 5 ng/m^3 nella campagna invernale, senza particolari distinzioni giorno-notte. L'andamento temporale del Cromo è simile a quello di Ferro, Manganese e Molibdeno, essendo un tipico componente di acciai speciali anticorrosione. Come già evidenziato per gli altri elementi, l'unico evento di rilievo risulta essere quello del 9 marzo, osservato per il Piombo ma soprattutto per il Cromo, che presenta un picco particolarmente intenso (con una concentrazione di 30 ng/m^3 , risulta essere 6 volte superiore rispetto ai valori di background) probabilmente dovuto a processi di trasporto più efficienti da aree antropizzate dell'entroterra toscano. Il Cd ha una distribuzione stagionale piuttosto omogenea e nel trend può essere associato a quello dell'antimonio. Nonostante sia accertata la sua presenza in molte leghe metalliche non è stato possibile associarlo con sicurezza a nessuna delle sorgenti individuate (vedi Allegato 3 PCA).

La concentrazione atmosferica del cadmio è normata dal D.Lgs 155/2010 che indica per questo elemento il valore obiettivo di 5 ng/m^3 (calcolato come media annua) da raggiungersi entro il 31 Dicembre 2012. Nello stesso Decreto sono indicate, inoltre, la soglia di valutazione superiore (in percentuale del valore obiettivo) di 3 ng/m^3 (60%) e la soglia di valutazione inferiore (in percentuale del valore obiettivo) di 2 ng/m^3 (40%).

I valori medi delle concentrazioni atmosferiche di Cd, relativamente ai due periodi di campionamento (rispettivamente 0.21 ng/m^3 per l'autunno e 0.20 ng/m^3 per la primavera), sono risultati essere inferiori alla soglia di valutazione inferiore in tutte e due le campagne.

Figura 47: profili temporali di Cromo, Cadmio e Piombo divisi per campagne e nei periodi giorno-notte.



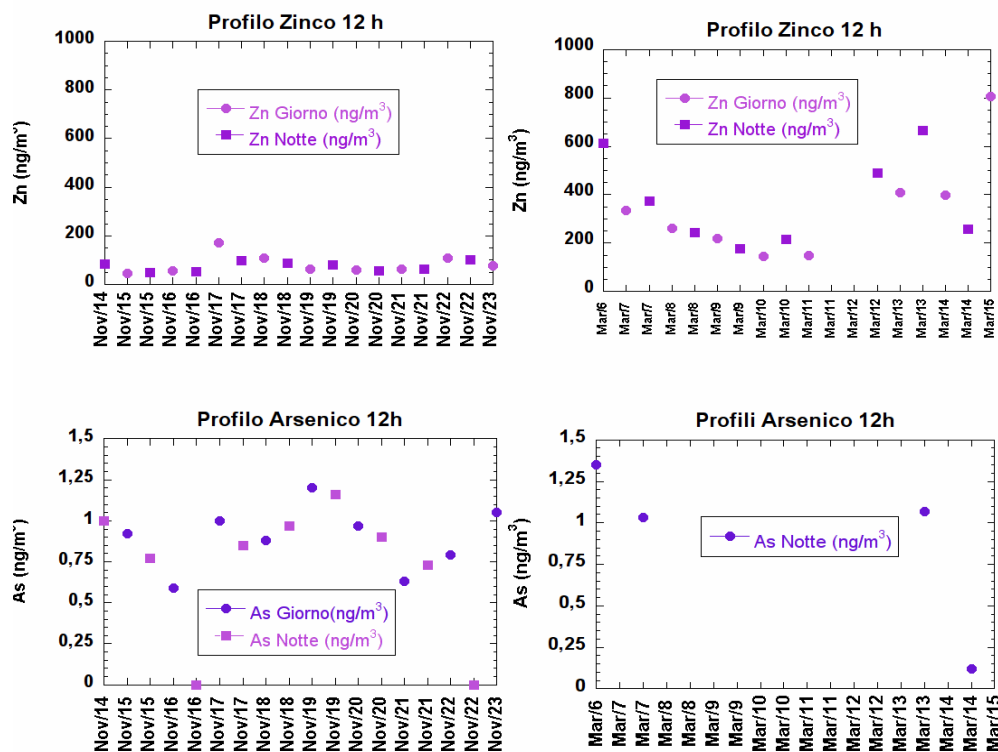
Andamento dello Zinco(Zn), dell'Arsenico(As)

Lo Zn segue l'andamento di Vanadio e Nichel, confermando la sua origine dai combustibili pesanti usati da navi ed in impianti industriali presenti sulla costa. Questo è confermato anche dall'analisi delle componenti principali, in cui si evidenzia un fattore che accomuna questi tre elementi, che risultano quindi derivanti dalla medesima sorgente (vedi Allegato 3 per dettaglio).

Per quanto riguarda l'As, le concentrazioni risultano estremamente basse nel caso della campagna invernale e solo in tre casi risultano superiori al limite di rilevabilità strumentale. Nella campagna autunnale sono stati trovati valori misurabili superiori al limite di rilevabilità, ma non si registrano eventi particolari né un'evidente differenza giorno notte. La concentrazione media nel periodo considerato, di circa 1 ng/m³, è notevolmente inferiore ai limiti di legge.

Infatti il D.Lgs n. 155/2010 determina, per la concentrazione atmosferica di arsenico, il valore obiettivo di 6 ng/m³ come media annua, da raggiungersi entro il 31 Dicembre 2012. Lo stesso decreto indica, inoltre, la soglia di valutazione superiore (in percentuale del valore obiettivo) di 3.6 ng/m³ (60%) e la soglia di valutazione inferiore (in percentuale del valore obiettivo) di 2.4 ng/m³ (40%).

Figura 48: profili temporali di Arsenico e Zinco suddivisi nelle due campagne e nei periodi notte (19-7) e giorno (7-19).



Dati OPC ad alta risoluzione temporale

Il contatore ottico di particelle multicanale OPC (Optical Particle Counter) ha permesso di caratterizzare in tempo reale la distribuzione granulometrica del particolato atmosferico ad alta risoluzione temporale (1 min).

Lo strumento rileva direttamente i valori di concentrazione di particelle, mentre i valori di massa di PM 1, 2,5 e 10 sono calcolati da opportuni algoritmi che considerano costante la densità delle particelle. Essendo la densità in realtà varia con l'origine delle particelle (sorgente di particolato), la massa calcolata di PM 1, 2,5 e 10 risulta affetta da un'elevata incertezza di entità differente in funzione del tipo e del contributo delle sorgenti che controllano la composizione del particolato. Per questo motivo l'uso di un contatore ottico di particelle risulta principalmente utile per seguire le dinamiche di evoluzione giornaliera del particolato nelle classi dimensionali di interesse (nel nostro caso $< 1 \mu\text{m}$, $1-2 \mu\text{m}$, $>2 \mu\text{m}$).

Nelle Figura 49 e Figura 50 sono riportati gli andamenti temporali del numero di particelle negli intervalli dimensionali suddetti per alcuni giorni caratteristici delle due campagne di misura. Si osserva che il numero delle particelle fini è di 2 ordini di grandezza più elevato rispetto alle particelle micrometriche ($1-2 \mu\text{m}$) e queste a sua volta sono circa 2 ordini di grandezza più elevate delle particelle di diametro maggiore di $2 \mu\text{m}$.

In tutte le giornate selezionate in novembre e nella giornata dell'8 marzo, si nota che il numero di particelle aumenta durante la notte per poi diminuire nelle ore più calde della giornata. Questo andamento spiega e conferma i valori più bassi di PM₁₀ misurati per questi giorni nell'intervallo 7-19 rispetto ai valori notturni. Il fenomeno è particolarmente evidente tra l'8 e il 9 marzo 2012, giorni che sono importanti per l'accumulo al suolo di metalli quali Cr, Fe, Mn, Mo.

Tra il 9 e il 10 marzo invece il numero delle particelle rimane più o meno costante durante le 24 h e più basso rispetto al giorno precedente. Queste giornate sono state caratterizzate da fenomeni di forte vento che hanno impedito la concentrazione del particolato disperdendolo in modo efficace.

Figura 49: Andamento del numero di particelle nel tempo per le giornate 8, 9 e 10 marzo 2012. Le linee verticali suddividono nei due periodi di campionamento (7-19 e 19-7). I colori indicano le diverse dimensioni delle particelle (< 1 μm in rosso, 1-2 μm in blu, > 2 μm in verde).

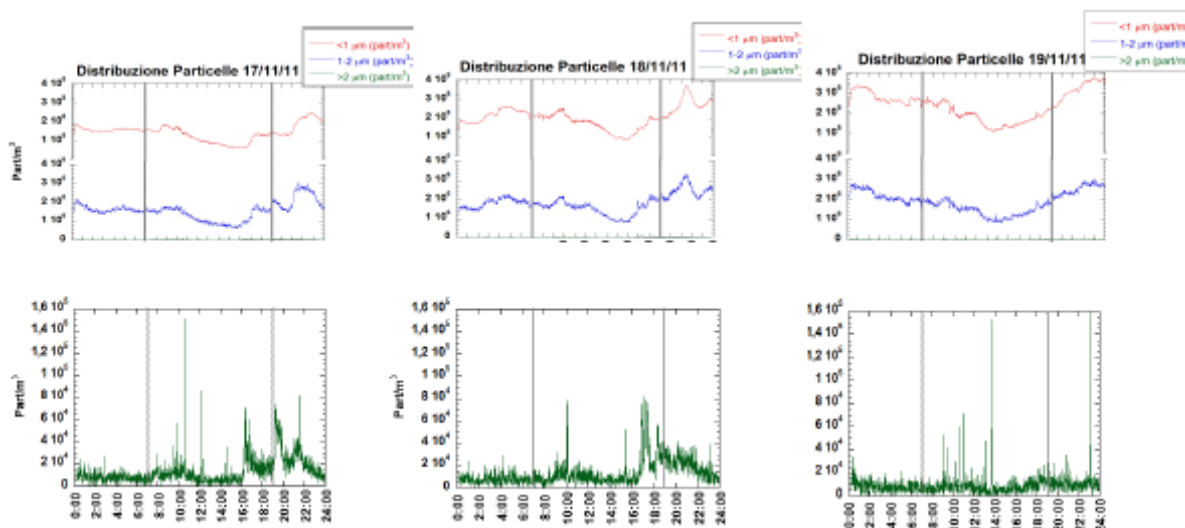
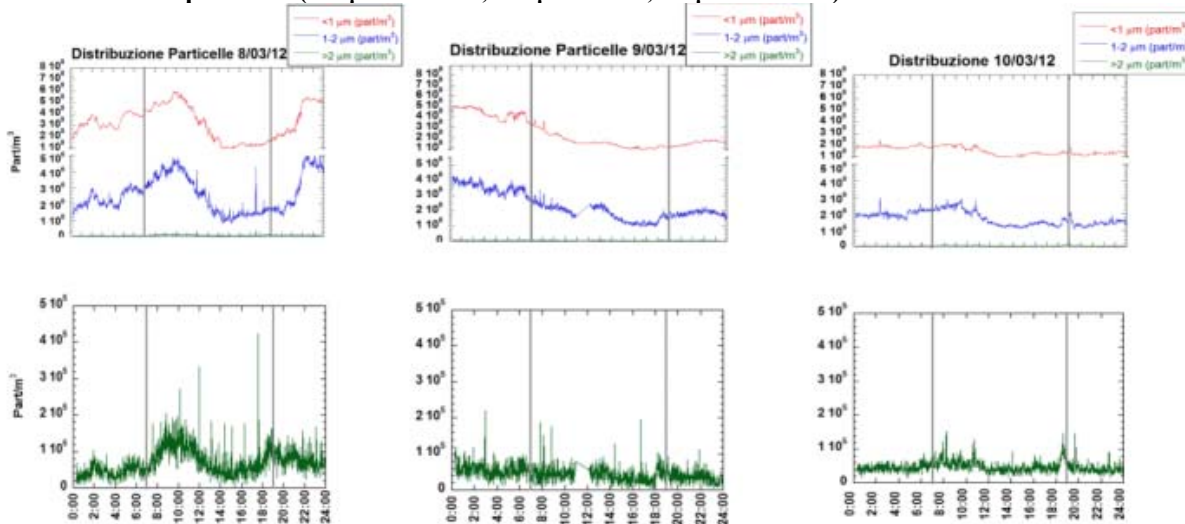
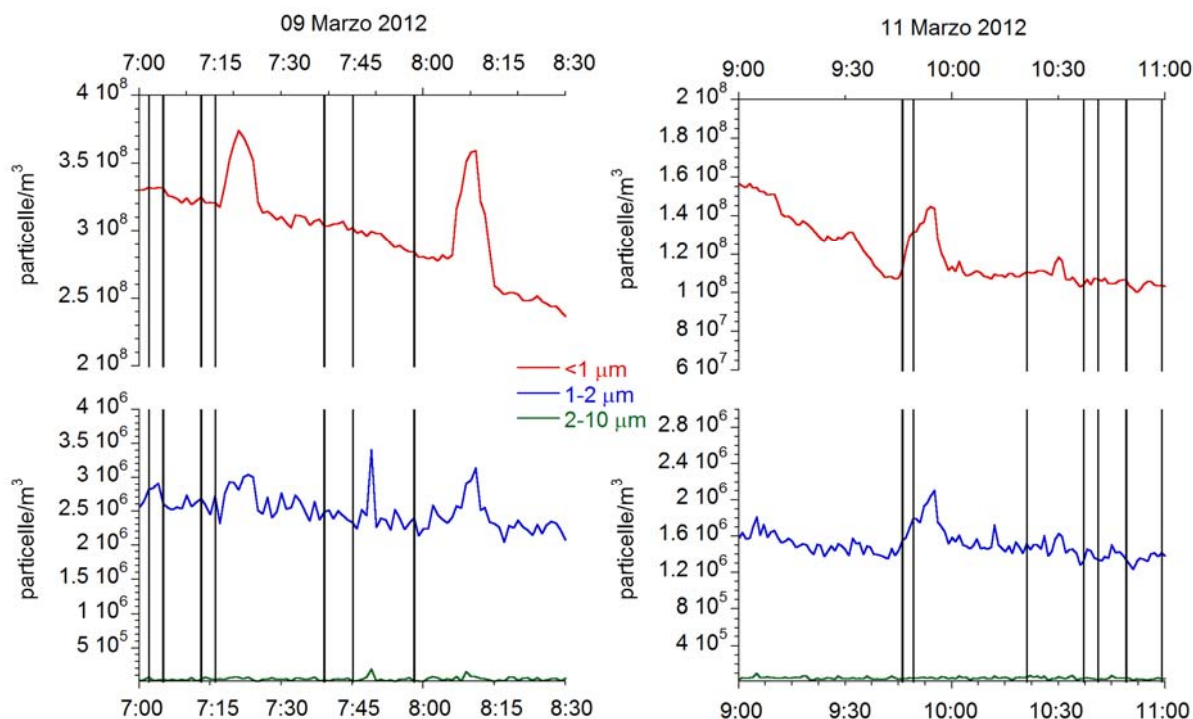


Figura 50: Andamento numero di particelle nel tempo per le giornate 17, 18, 19 novembre 2011. Le linee verticali suddividono nei due periodi di campionamento (7-19 e 19-7). I colori indicano le diverse dimensioni delle particelle (< 1 μm in rosso, 1-2 μm in blu, > 2 μm in verde).



I dati dei contatori di particelle a elevata risoluzione possono essere utilizzati per valutare l'impatto a brevissimo termine dell'atterraggio e decollo degli aerei sul numero di particelle. Sebbene come è stato in precedenza mostrato, il numero totale dei voli non abbia un effetto sui valori medi su 12 ore del PM_{10} , dei metalli e degli ioni, nella Figura 51 sono riportati alcuni esempi in cui si osservano picchi di concentrazione del particolato a distanza di pochi minuti dal decollo di uno o più aerei. Nella stessa figura, si osserva che l'aumento della concentrazione di particolato è particolarmente evidente e significativo rispetto alle oscillazioni del fondo, nelle frazioni più fini, confermando i risultati ottenuti in analoghi studi presso altri aeroporti [27][28].

Figura 51: Evoluzione temporale del numero di particelle (suddivise in tre classi dimensionali) misurate con l'OPC a risoluzione di 1 minuto e atterraggi e decolli (indicati dalle linee nere verticali).



Contributi medi delle componenti maggiori dell'aerosol

Da selezionati analiti misurati nell'aerosol, utilizzati come specifici marker, sono state identificate le seguenti componenti maggiori:

Secondario Inorganico: solfati, nitrati e ammonio.

Secondario Organico (POM_{sec}): è costituito da composti organici che si formano per reazioni di ossidazione in atmosfera a partire da precursori gassosi di composti del ciclo del carbonio. Questa componente è stata calcolata a partire dal particolato organico totale (POM, Particulate Organic Matter).

Per il calcolo del particolato organico (POM), le concentrazioni atmosferiche di OC sono state moltiplicate per un opportuno fattore, in modo da tenere conto del contributo in massa degli altri elementi (H, O, N, S, alogeni), che accompagnano il carbonio nei composti organici depositati sui filtri. I fattori moltiplicativi sono determinati sperimentalmente e variano a seconda della tipologia della stazione (Figura 52).

Figura 52: Fattori di correzione per il calcolo del POM da OC.

FATTORI CONVERSIONE	ZONA O SORGENTE	Bibliografia
1,3	Urbana traffico	Harrison et al., 2003. Atmos. Env.
1,4	Urbana fondo	Harrison et al., 2003. Atmos. Env.
1,6	Periferica fondo	Turpin and Lim, 2001. Aerosol. Sci. Technol.
2,1	Rurale	Turpin and Lim, 2001. Aerosol. Sci. Technol.

È stato scelto un valore di 1.3, stimato come valore limite oltre il quale si ottiene una massa di PM_{10} ricostruita superiore a quella determinata per pesata.

Questo porterebbe a catalogare la stazione come urbana – traffico, ma la collocazione del campionario e le concentrazioni di analiti individuate durante l'analisi spingono a annoverare questa zona come urbana fondo. Quest'apparente incongruità dei dati è data dalla presenza

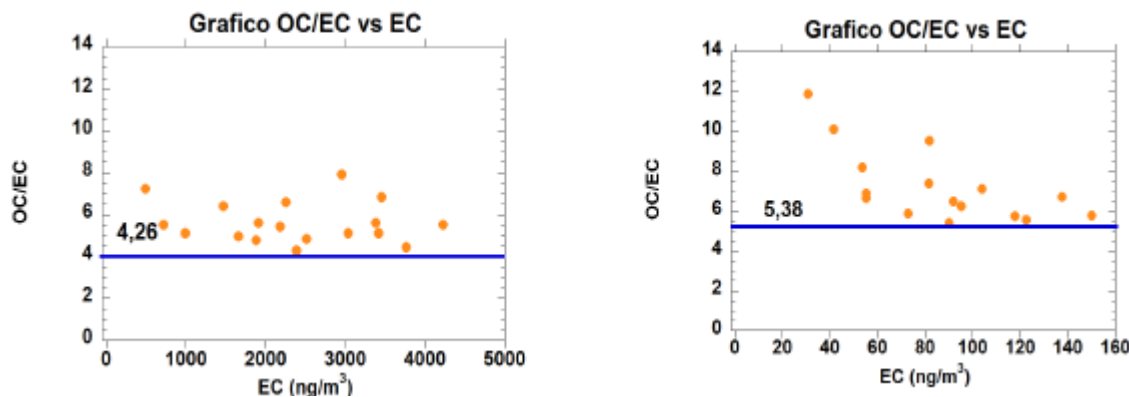
della sorgente aeroporto in un'area rurale, che comporta la presenza di concentrazioni elevate di specie del carbonio ridotte (scarsa presenza di atomi di O, fattore di correzione OC-POM 1.3) che si sommano a valori di PM_{10} di background piuttosto bassi (tipici di una stazione rurale).

Utilizzando un marker univoco delle emissioni primarie (EC) e valutando il rapporto (OC/EC) caratteristico delle sorgenti primarie nel sito in oggetto, è possibile calcolare POM_{sec} per ogni campione dalla seguente formula:

$$POM_{sec} = POM - [(OC/EC)_{prim} \times EC]$$

Il rapporto $(OC/EC)_{prim}$ non ha un valore universalmente valido, ma dipende dal tipo delle sorgenti emissive e presenta una grande variabilità spaziale. È stato possibile ricavare questo valore riportando per ogni campione il rapporto (OC/EC) in funzione di EC e determinando il valore a cui tende l'iperbole ottenuta per valori alti di EC, per i quali è lecito pensare che la sorgente primaria sia dominante (ovvero, che la sorgente secondaria di OC tenda a 0). In alcuni casi la stima della tendenza del rapporto è favorita dall'andamento di tipo iperbolico mostrato ad esempio durante la campagna di marzo 2012. I grafici riportati in Figura 53 mostrano che il valore del rapporto $(OC/EC)_{prim}$ determinato per il sito dell'Aeroporto è 4.3 per novembre e 5.4 per marzo. Il valore più elevato determinato in marzo fa supporre che in questa stagione non si raggiunga la condizione di assenza di contributi secondari all'OC data la più elevata attività fotochimica dell'atmosfera rispetto a novembre. Il valore del rapporto $(OC/EC)_{prim}$ ottenuto di 4.3 è più elevato del valore misurato in siti urbani caratterizzati da elevati contributi della sorgente traffico ($(OC/EC)_{prim} \sim 1$) facendo supporre che la sorgente aeroporto abbia un rapporto caratteristico $(OC/EC)_{prim}$ più elevato di quello determinato per la sorgente traffico.

Figura 53: Grafici OC/EC contro EC e valori limite ottenuti.



Primario Organico (POM_{prim}): questa frazione dell'aerosol è data dalla differenza tra POM totale e POM secondario. I processi primari di combustione producono sia carbonio in forma grafitica che una certa quantità di carbonio organico a causa della combustione incompleta di combustibili fossili o di bio-massa.

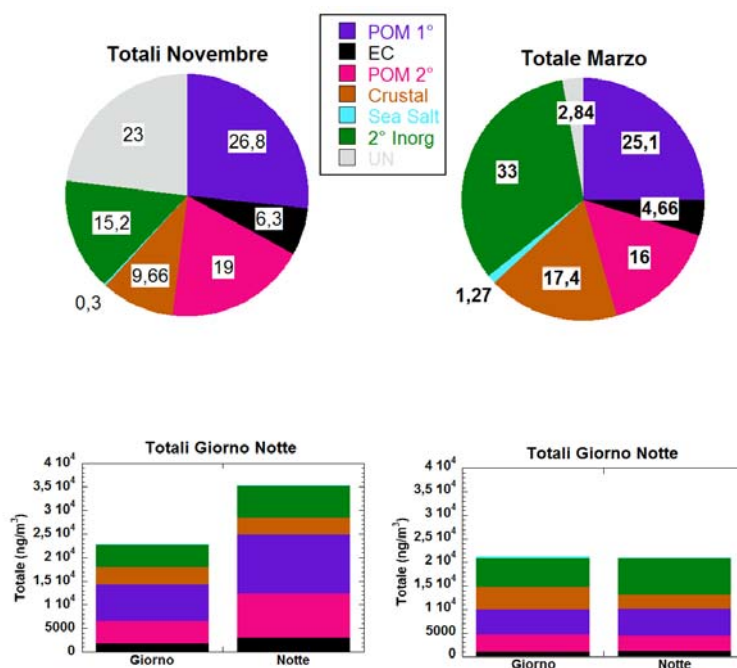
Crostante: rappresenta la componente minerale prodotta dall'erosione della crosta terrestre; viene ottenuta come somma delle concentrazioni atmosferiche in massa degli elementi tipici della crosta terrestre considerati nella loro forma di ossidi. Con questo metodo di calcolo, si ottengono solo le concentrazioni atmosferiche di particolato crostante totale; non è cioè possibile distinguere fra i contributi naturali da trasporto a lunga distanza (episodi sahariani) e il materiale crostante dovuto a risollevarimento di polveri locali derivante da traffico.

Marino primario: componente dell'aerosol generata dai processi di sollevamento e trasporto dello spray marino. Il suo contributo nel PM_{10} è stato valutato sommando le concentrazioni atmosferiche di Na, Cl e Mg.

Nella Figura 54 sono riportati i trend temporali e i bilanci di massa (con le rispettive abbondanze relative) dei componenti maggioritari del PM_{10} campionato nel sito dell'aeroporto. I grafici riportano i contributi in massa (ng/m^3) e le percentuali assolute e relative al PM_{10} , suddivisi nelle due campagne.

Si osserva che il componente principale nelle due campagne è rappresentato dal carbonio, suddiviso nelle tre classi, ovvero carbonio elementare, POM primario e POM secondario. Nella campagna di novembre la percentuale di carbonio e dei suoi composti raggiunge il 52.1%, mentre in quella di marzo scende leggermente (45.8%). Il Carbonio organico primario è il più abbondante di questo gruppo, essendo emesso da processi primari di combustione. L'effetto di maggiore concentrazione notturna rilevata per tutti i gruppi significativi, è particolarmente pronunciato sulla concentrazione del POM primario e secondario, che risultano più che raddoppiate durante le ore notturne. La seconda componente più abbondante è rappresentata dal "secondario inorganico". Questi composti sono soggetti a fenomeni di diffusione su larga scala, infatti la loro concentrazione è leggermente superiore nella campagna di marzo, spiegabile con una più energica circolazione atmosferica su scala regionale e della maggiore efficienza dell'ossidazione atmosferica (soprattutto per nitrati e solfati). Le differenze stagionali e giorno-notte non sono però così marcate se si tiene conto delle concentrazioni assolute. Questo è dovuto al comportamento opposto dei composti facenti parte di questa componente: l'ammonio ha prevalenti fonti locali non caratterizzate stagionalmente (traffico, agricoltura, processi industriali), e il modesto aumento delle concentrazioni atmosferiche medie in inverno è essenzialmente da imputarsi alla scarsa circolazione verticale delle masse d'aria in tale stagione. Il solfato, invece, non ha importanti sorgenti locali ed è prevalentemente originato da fonti localizzate in ambito regionale (ad esempio, impianti termoelettrici per la produzione di energia). I valori particolarmente elevati dei nitrati nei mesi freddi sono principalmente da attribuirsi alla sorgente riscaldamento domestico e combustione. Il contributo crostale è meno influenzato dalla stagione, poiché è da attribuirsi principalmente al risollevamento di polveri dalle piste dell'aeroporto causato dalle attività di atterraggio e decollo. Infine, è del tutto trascurabile il contributo di sale marino, poiché la maggior parte dei cloruri deriva dai fenomeni di combustione dei carburanti degli aerei. Ciò è stato confermato dall'analisi statistica.

Figura 54: Torte e istogrammi che illustrano la suddivisione percentuale ed assoluta nelle componenti principali del PM_{10} campionato nelle campagne estiva ed invernali.



Fattore di Arricchimento

L'Enrichment Factor (EF) rappresenta il rapporto tra la concentrazione del metallo presente nel campione e quella naturale del medesimo metallo nella crosta terrestre superficiale. In particolare i valori di EF sono stati determinati mediante la formula:

$$EF(X) = ([X]_{air}/[Ref]_{air}) / ([X]_{source}/[Ref]_{source})$$

dove "X" è il metallo di interesse (espresso come concentrazione media dei singoli valori) e "Ref" è il metallo di riferimento rispetto al quale si calcola l'Enrichment Factor. In questo caso sono stati calcolati i fattori di arricchimento dei singoli elementi determinati rispetto alla sorgente crostale. Scegliendo come metallo di riferimento l'Alluminio a cui è assegnato un valore unitario di EF, i calcoli sono stati eseguiti utilizzando valori tabulati delle abbondanze medie dei vari elementi che costituiscono la crosta continentale [29].

Le indicazioni ottenibili dall'analisi di EF sono solo indicative a causa di ampie variazioni della composizione della crosta terrestre superficiale.

In particolare, valori di EF inferiori a 10 indicano che il metallo pesante in questione ha origine prevalentemente crostale e viene quindi definito "elemento non arricchito"; al contrario, valori maggiori di 1000 sono indicativi di metalli pesanti di origine antropica e sono definiti "elementi molto arricchiti". Valori compresi tra le due soglie indicano invece un'origine mista dell'elemento in questione.

Si può osservare immediatamente come in generale, in tutti i campioni di entrambe le campagne, alcuni elementi (Mn, Sb) siano sempre molto arricchiti, alcuni siano spesso mediamente arricchiti (As, Ni, Cu, Mo, Pb, Cr, Zn) e altri siano quasi sempre non arricchiti (Fe, Ba, V).

Nei grafici che seguono sono riportati i fattori di arricchimento dei vari metalli analizzati, suddivisi nelle due campagne, autunnale e primaverile, nei vari giorni di campionamento, differenziando inoltre i campioni raccolti durante il giorno (arancione) e la notte (verde).

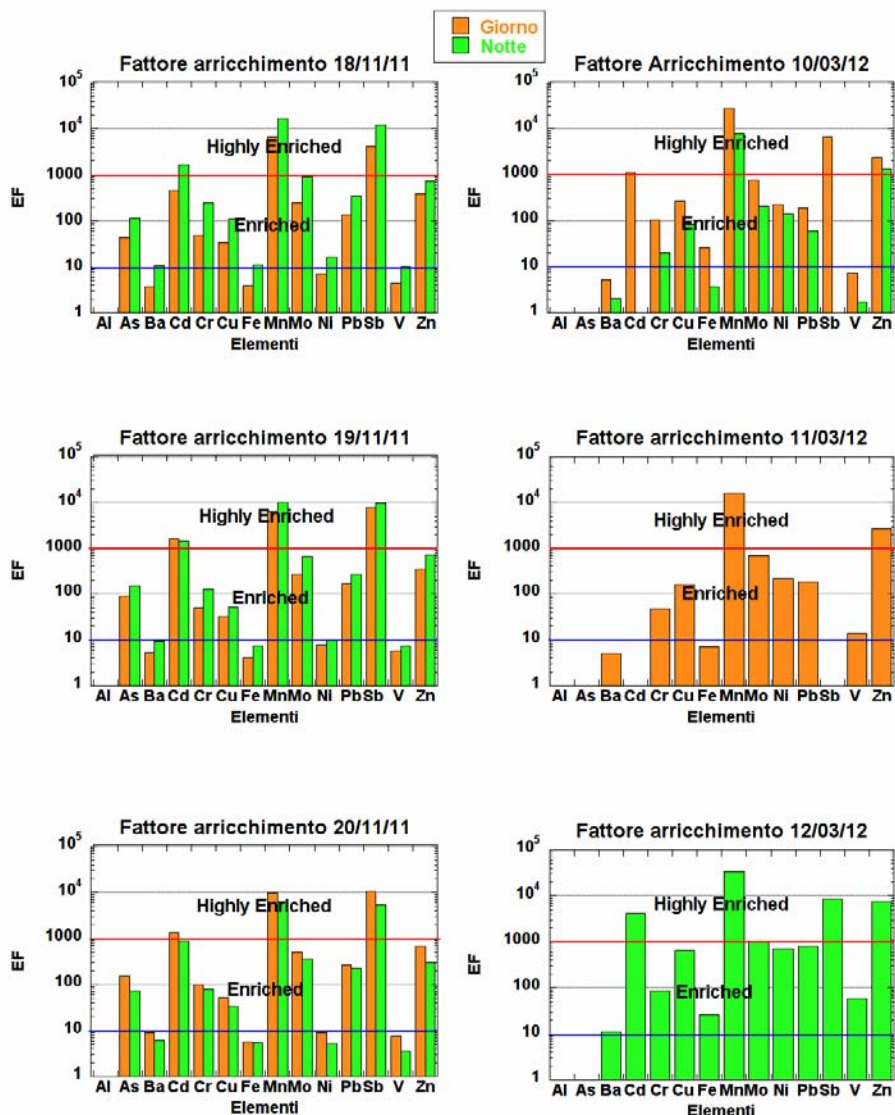
Come già accennato il Mn risulta essere sempre molto arricchito rispetto alla crosta confermando la sua origine antropica aeroportuale, come messo in evidenza anche dall'analisi statistica delle componenti principali.

Anche il Sb, quando presente, risulta essere arricchito. Purtroppo la scarsità di dati raccolti per questo elemento ci impedisce di affermare con sicurezza la sua affidabilità come marker di emissioni aeroportuali, sebbene lo studio di Amato [7] abbia dimostrato una connessione tra l'antimonio e le attività aviatorie.

Anche lo Zinco mostra un arricchimento notevole, così come Cromo e Molibdeno, sempre molto vicini al valore 1000. Anche questi dati sembrano quindi confermare la loro origine prevalentemente antropica collegata all'attività dello scalo di Pisa.

Metalli che invece non sono mai significativamente arricchiti sono il Fe, il Ba e il V, quindi la loro sorgente risulta essere prevalentemente crostale. Questi dati possono apparire in contraddizione con quanto si vedrà nel confronto con il sito di San Rossore, soprattutto per quanto riguarda il Ferro e il Bario.

Figura 55: Fattori di arricchimento suddivisi nelle due campagne autunnale e primaverile e nei periodi giorno (arancione) e notte (verde).



Tali metalli, presenti a livelli notevolmente più alti nell'aeroporto rispetto a San Rossore, possono essere attribuiti alla corrosione di parti meccaniche e all'usura dei freni degli aerei, ma dato che non risultano arricchiti rispetto alla composizione della crosta, è più probabile che siano legati a processi di risolleamento crostale dovuta all'attività dello scalo aeroportuale. Si tratta quindi di un'origine antropica pur con una composizione della sorgente prettamente crostale.

È interessante notare come il valori di EF dello Zn sia differente nelle due campagne. In quella primaverile, infatti, il fattore di arricchimento è sempre maggiore di 10³ mentre a novembre questo valore è sempre compreso tra 10 e 10², a parte un caso (22/11/11) in cui l'EF raggiunge un valore di 10³.

Tale comportamento può essere attribuito a più efficienti processi di trasporto delle masse d'aria durante i mesi primaverili ed estivi, responsabili dell'apporto di più elevate quantità di Zn dovute all'attività antropica che si realizza sulla costa toscana, in particolare di impianti industriali e trasporti che sfruttano grosse quantità di combustibili fossili.

È possibile anche osservare che il Cd ha un valore di EF molto elevato solo nel giorno 7 marzo, indicando l'instaurarsi di una extra-sorgente antropica di Cd (molto probabilmente trasportata dal vento) o un rafforzamento di una già attiva nell'aeroporto.

Figura 56: Fattori di arricchimento suddivisi nelle due campagne autunnale e primaverile e nei periodi giorno (arancione) e notte (verde).

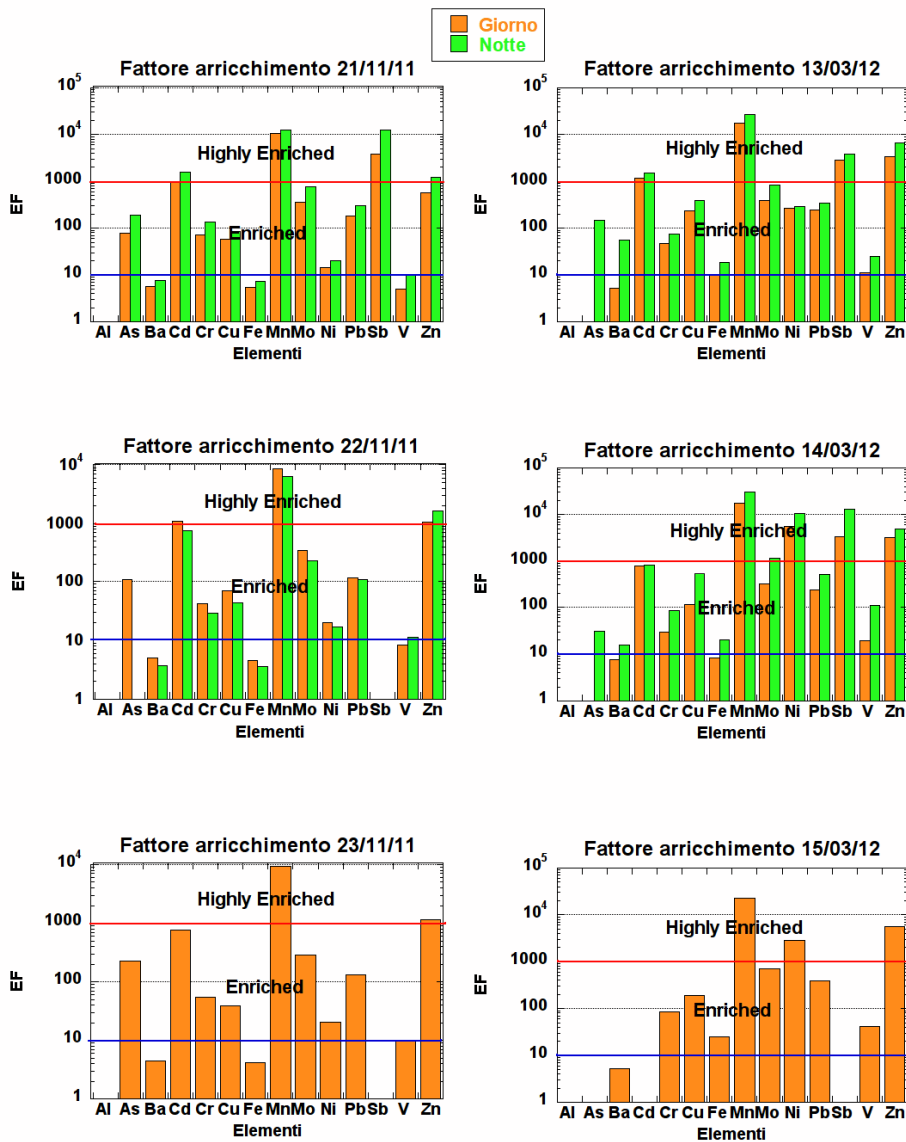
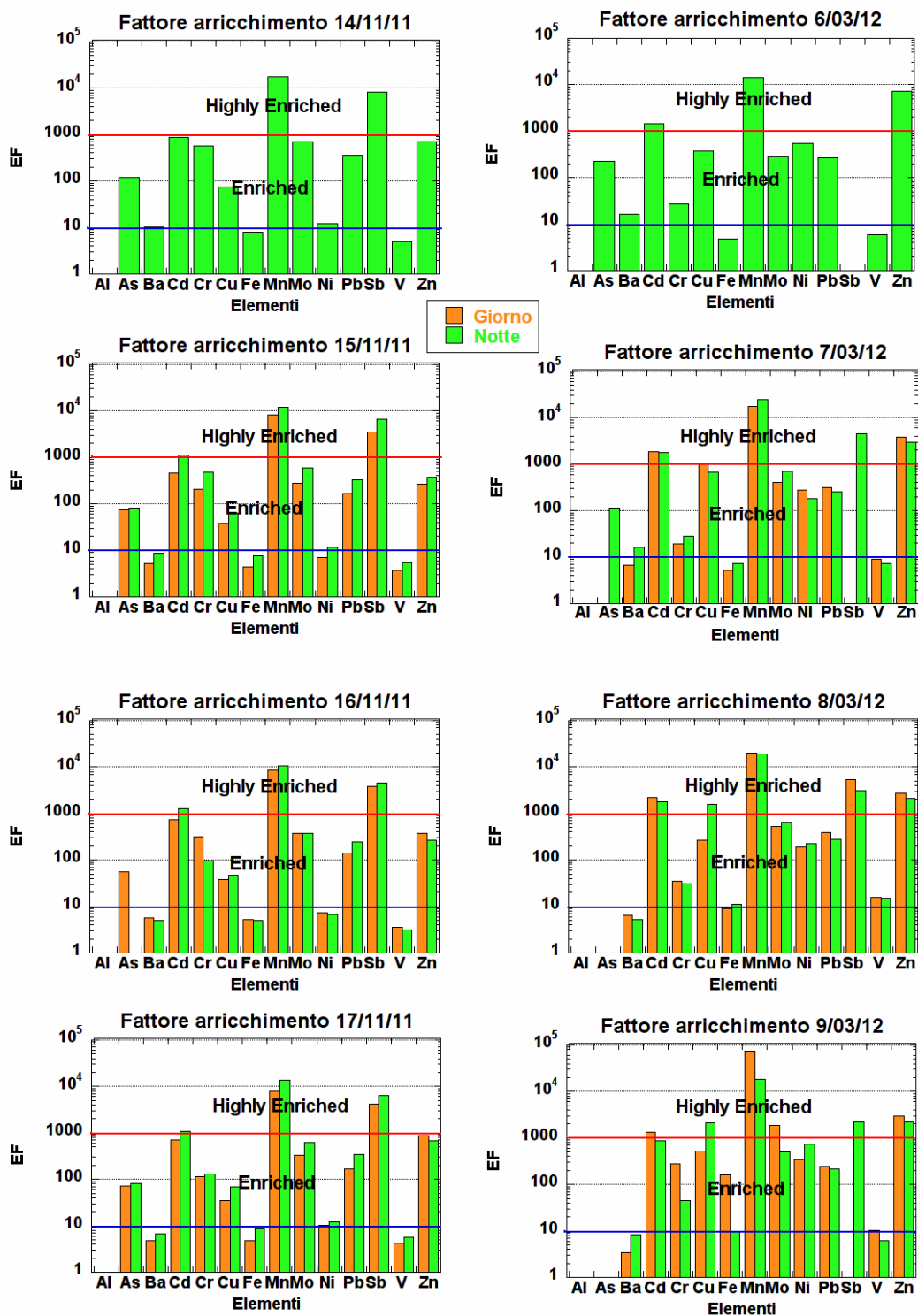


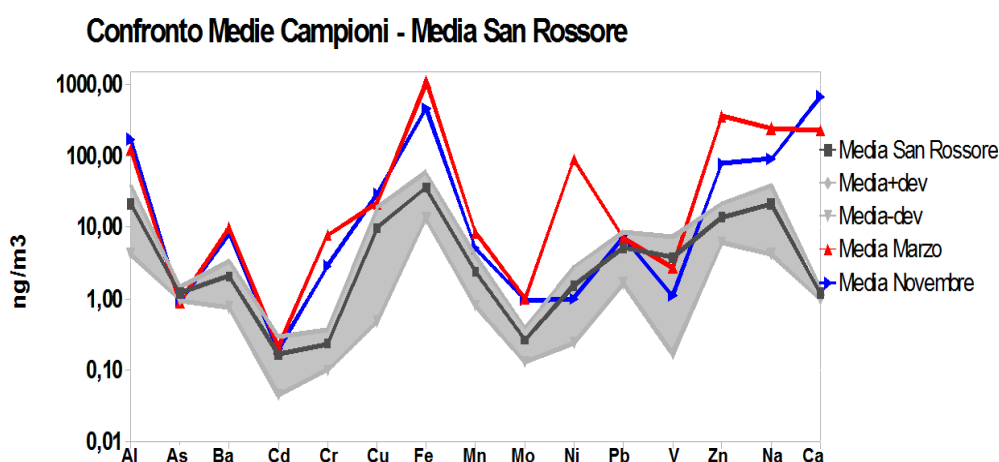
Figura 57: Fattori di arricchimento suddivisi nelle due campagne autunnale e primaverile e nei periodi giorno (arancione) e notte (verde).



Confronto Pisa Aeroporto - Pisa San Rossore

La Figura 58 mostra il confronto tra le concentrazioni medie dei diversi analiti misurati durante le due campagne dell'aeroporto di Pisa e gli stessi elementi misurati durante un intero arco annuale nel parco di San Rossore ^[59] situato a pochi chilometri dal centro storico della città di Pisa ma influenzato in maniera minore dalle emissioni antropiche.

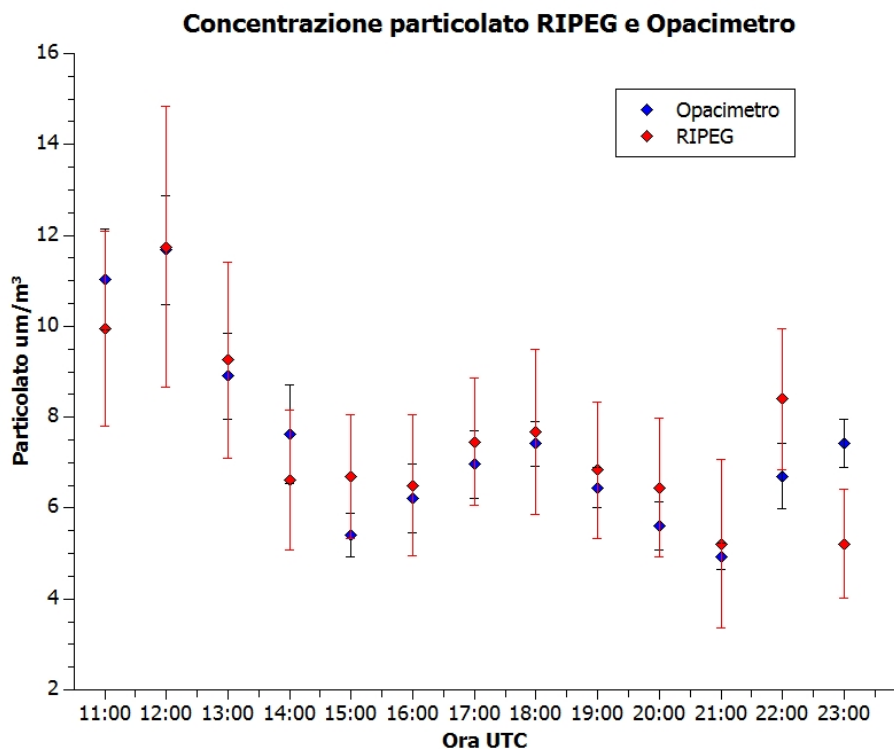
Figura 58: Confronto tra le campagne dell'Aeroporto di Pisa e la campagna annuale di San Rossore. La linea nera rappresenta i valori medi della campagna di San Rossore, la banda grigia è il range di concentrazioni registrate durante l'intera campagna di San Rossore, comprese in un intervallo di ± 1 Deviazione Standard, la linea rossa rappresenta i valori medi della campagna estiva di Pisa Aeroporto mentre quella blu rappresenta quella autunnale.



Dalla figura si osserva immediatamente come alcuni degli elementi misurati nel sito aeroportuale presentino concentrazioni nettamente più elevate delle medie dei dati di San Rossore. Valori significativamente più alti, intorno ad un ordine di grandezza (considerando la scala delle Y logaritmica) si osservano per Al, Ba, Mn, Na e in minor misura Mo. Una discrepanza ancora maggiore è mostrata da Cr, Fe, Ni, Zn e Ca con valori più elevati di due ordini di grandezza. La maggior concentrazione di Zn, Ba e Mo nell'aerosol campionato nell'aeroporto può essere imputata all'usura di freni e pneumatici, come riportato da Amato nel suo studio ^[60]. I livelli più elevati di Fe e Cr possono essere correlati ad effetti di corrosione della fusoliera degli aerei e dall'usura di parti meccaniche in acciaio.

Di seguito viene riportato un confronto tra le misure effettuate con Nano, il sensore dell'Alitec messo a disposizione dell'Università di Firenze e allocato nel laboratorio mobile e quelle dell'opacimetro Optical Particle Counter FAI Instruments dell'Università di Firenze.

Figura 59: confronto misure effettuate con Opacimetro e con sensore Nano.



Il confronto mostra all'interno dell'incertezza di misura la buona corrispondenza tra i risultati trovati indipendentemente e contemporaneamente dai due strumenti, il che depone a vantaggio dell'utilizzo di Nano in futuro in indagini analoghe con tutte le potenzialità connesse ad uno strumento di nuova generazione che potrà consentire misure in tempo reale effettuando mappe urbane della qualità dell'aria.

Sorgenti principali del PM₁₀: Analisi statistica delle Componenti Principali (PCA)

Per identificare le principali sorgenti di particolato atmosferico è stata effettuata una analisi statistica delle componenti principali (PCA). La PCA è una tecnica di analisi multivariata che ha come obiettivo principale quello di rappresentare il contenuto informativo di n variabili (nel nostro caso le concentrazioni dei vari componenti) mediante un numero ridotto di nuove variabili, definite "componenti principali", che raggruppano tra di loro le variabili originarie sulla base di correlazioni multiple, in modo da semplificare l'osservazione e l'interpretazione del complesso dei dati sperimentali. Le nuove variabili così ottenute sono chiamate fattori e rappresentano combinazioni lineari di quelle originali. I fattori sono costruiti in modo da essere ortogonali tra di loro e, di conseguenza, non correlati l'un l'altro, così da poter rappresentare effetti indipendenti tra loro.

All'interno di ogni fattore, le variabili originarie hanno un peso diverso, definito "loading", in funzione del grado di correlazione che esse presentano tra di loro, all'interno di quel fattore. Scegliendo un valore di soglia è possibile considerare significative, all'interno di quel fattore, solo alcune delle variabili originarie, quelle che hanno un peso superiore a suddetto valore. Nel nostro caso abbiamo scelto come valore di soglia 0.5. Le variabili all'interno di un fattore sono accomunate tra loro da uno stesso comportamento, come ad esempio una medesima sorgente o un simile processo di trasporto. In questo modo, sulle basi di una sufficiente conoscenza a priori del sistema studiato, un fattore potrà essere identificato in un particolare processo atmosferico. Inoltre, la variabilità globale del sistema, espressa

come varianza della matrice dei dati originari, può essere spiegata sufficientemente, anche se non completamente, da solo alcuni dei fattori trovati.

Per facilitare ulteriormente l'interpretazione del fenomeno fisico, una volta ridotto lo spazio delle variabili, è possibile cercare il sistema di riferimento più comodo per individuare una struttura nelle relazioni fra le variabili. Per fare ciò si possono ruotare opportunamente gli assi precedentemente stabiliti utilizzando diverse strategie. Quella che abbiamo scelto è la rotazione Varimax che minimizza il numero di variabili che hanno un elevato peso su ogni dato fattore. In seguito a ciò, ciascun fattore tende ad avere un peso fattoriale di una certa variabile che sia il più possibile alto (vicino ad uno) o basso (vicino a zero).

La PCA, essendo un'analisi statistica, è tanto più efficace quanto più è esteso il data-set a disposizione. I dati a nostra disposizione non rappresentano un data-set molto ampio, ma comunque sufficientemente esteso per ottenere una valutazione affidabile della composizione delle componenti principali. Sono stati individuati quattro fattori che riescono a definire il 71% della varianza del sistema.

Nel primo fattore, che abbiamo chiamato "Aeroporto" e che spiega il 28% della varianza del sistema, variabili determinanti sono EC, OC, potassio e cloruri, marker tipici della combustione di derivati del petrolio. Sono inoltre presenti importanti contributi di calcio ed alluminio, probabilmente dovuti al risollevarimento di particolato dalle piste dell'aeroporto.

Il secondo fattore, che spiega il 19% della varianza totale, è invece caratterizzato da composti di origine secondaria, come ammonio, solfati, ossalati e nitrati, non prodotti localmente in maniera significativa, ma distribuiti con processi di trasporto a larga scala da sorgenti puntiformi o estese, cui si aggiungono vanadio e nichel derivanti dalla combustione di nafta ed oli pesanti usati per la locomozione di navi. L'insieme dei marker presenti in questo fattore caratterizza processi di trasporto dal litorale tirrenico, dove sono presenti importanti impianti termo-elettrici, industrie petrolchimiche e acciaierie.

Nel terzo fattore, che corrisponde al 15% della varianza del sistema, i marker caratteristici sono metalli pesanti (ferro, manganese, molibdeno, cromo) derivanti principalmente dalle attività meccaniche dell'aeroporto, quali usura delle fusoliere e dei freni e lavori effettuati sugli scafi degli aerei, che determinano il rilascio di metalli tipicamente usati per la fabbricazione di acciai speciali usati per costruire velivoli resistenti al freddo e alle alte pressioni.

L'ultimo fattore rappresenta invece i contributi biologici dovuti principalmente all'attività marina. È interessante notare che essendo questi indicatori naturali, sono anticorrelati agli altri marker antropici, caratterizzati da una differente tempistica e intensità delle sorgenti emissive.

Tabella 21: Factor Loading dei diversi analiti all'interno dei tre fattori identificati.

Factor Loadings (Varimax normalized) (Spreadsheet2) Extraction: Principal components (Marked loadings are > .700000)				
	Fattore 1	Fattore 2	Fattore 3	Fattore 4
	Aeroporto	Contributi secondari antropica comprese	Attività meccaniche aeroporto	Contributi secondari naturali (att.biogenica marina)
PM10	0,951	0,201	-0,031	-0,034
Na+	-0,236	0,282	0,533	0,337
NH4+	0,405	0,806	0,104	-0,089
K+	0,944	0,123	-0,114	0,030
Mg2+	-0,309	0,578	0,377	0,417
Ca2+	0,837	-0,099	-0,128	-0,178
Cl-	0,732	0,150	0,116	0,169
NO3-	0,455	0,784	0,075	0,062
SO42-	0,266	0,744	0,264	-0,252
Ox	0,246	0,811	0,292	0,198
Form	0,084	-0,092	-0,060	-0,880
MSA	0,004	-0,047	-0,021	-0,919
Al	0,619	0,033	0,025	-0,255
As	-0,424	0,160	0,468	0,047
Ba	0,273	0,239	0,040	0,273
Cr	-0,044	0,242	0,926	0,006
Cu	0,449	-0,160	0,059	0,387
Fe	0,033	0,016	0,931	-0,061
Mn	0,182	0,246	0,910	0,126
Mo	0,638	0,219	0,694	0,079
Ni	-0,209	0,625	0,012	0,031
Pb	0,700	0,422	0,155	0,127
Sb	-0,486	0,172	-0,131	-0,394
V	-0,033	0,854	0,105	0,000
Zn	-0,276	0,710	0,291	0,169
EC	0,970	-0,073	-0,061	-0,002
OC	0,937	0,020	-0,011	0,030
Expl.Var	7,641	5,101	4,044	2,600
Prp.Totl	0,283	0,189	0,150	0,096

Discussione dei risultati

I dati di composizione chimica del particolato atmosferico PM₁₀ campionato con risoluzione di 12 ore presso l'Aeroporto Internazionale Galileo Galilei di Pisa insieme ai dati ad alta risoluzione del contatore di particelle (OPC) relativi due diverse campagne, una autunnale (dal 14 al 23 novembre 2011) e una primaverile (dal 6 al 15 marzo 2012) hanno permesso di caratterizzare la sorgente “aeroporto” grazie ad opportuni marker e all'applicazione di analisi statistica multivariata delle Componenti Principali (PCA).

In entrambe le campagne, alcuni metalli presentano sempre un arricchimento rispetto alla sorgente crostale che, per tali elementi, rappresenta la principale sorgente naturale. Gli arricchimenti maggiori sono stati osservati per Mn e Sb ma anche Al, Cr e Mo risultano arricchiti con fattori dell'ordine di 10³. La fonte specifica di questi metalli è confermata dal

confronto con un'area di background vicina al sito di campionamento, meno influenzata dalle emissioni antropiche (il Parco di San Rossore a Pisa). Infatti, le concentrazioni medie di Cr e Mo nel sito dell'aeroporto risultano molto più alte rispetto alla media di San Rossore (valori da 2 a 10 volte superiori) e quindi possano essere correlate alle emissioni da attività aeroportuali, che includono sia le emissioni primarie da usura meccanica degli aerei e al risollevarimento crostale che quelle di origine primaria e secondaria legate ai processi di combustione del motore degli aerei.

Grazie all'analisi statistica del tipo PCA, è stato possibile confermare i precedenti risultati, con l'identificazione di un fattore relativo proprio alla sorgente "aeroporto" rappresentato principalmente da Cr, Fe, Mn e Mo e l'individuazione di fattore che raccoglie EC, OC, K⁺ e Cl⁻, tipici marker della combustione dei propellenti usati dagli aerei. Un terzo fattore, comprendente Ni, V, Zn, solfati, nitrati e ammonio, identifica altre attività antropiche, soprattutto legate alle industrie costiere e alle emissioni navali.

Non è stata individuata una correlazione tra il peso del particolato e il numero dei voli per rilevazioni con risoluzione a 12 ore: tale mancanza di correlazione può essere giustificata dal fatto che la sorgente "aeroporto" è rappresenta un insieme di input puntiformi e variabili rapidamente nel tempo. I fattori meteorologici capaci di disperdere (direzione e intensità dei venti, piogge) o concentrare (formazione di strati di inversione) gli inquinanti (provenienti da ogni tipo di sorgente) nella bassa troposfera risultano il fattore principale che determina le concentrazioni del PM₁₀. Infatti, la scelta di condurre campionamenti in due stagioni diverse (autunno e primavera) e con una risoluzione a 12 h (per distinguere il comportamento diurno da quello notturno) ha permesso di mettere in risalto il ruolo fondamentale dei fattori meteorologici, in particolare dell'altezza dello strato di rimescolamento nell'accumulo e nella dispersione di contaminanti di origine primaria e secondaria provenienti dalla sorgente "aeroporto".

Ciò è stato messo in evidenza grazie ai dati ottenuti dal contatore ottico di particelle (OPC), che ha permesso di monitorare il numero di particelle ultrafini e fini con elevata risoluzione temporale (1 minuto) mostrando un pattern giornaliero con minimi diurni e massimi notturni, dovuti alla maggior dispersione durante il giorno (più efficace circolazione dell'aria sia verticale che orizzontale).

I dati ottenuti dal contatore ottico di particelle (OPC), sono stati utilizzati anche per valutare l'impatto a brevissimo termine dell'atterraggio e decollo degli aerei sul numero di particelle. Sebbene il numero totale dei voli non abbia un effetto sui valori medi su 12 ore del PM₁₀, dalle rilevazioni a elevata risoluzione temporale, si osserva come un accumulo del traffico aereo in un determinato periodo di tempo porti ad un notevole incremento, a distanza di pochi minuti, del numero di particelle ultrafini.

Quindi pur basandosi su un set di dati abbastanza limitato, questo studio pilota è risultato promettente ai fini di una caratterizzazione chimica e dei trend stagionali della sorgente "aeroporto", che potrà essere completata ed approfondita solo con un numero significativamente elevato di campionamenti e misure, regolarmente distribuite nel corso dell'anno. Ad un più esteso data set sarebbe possibile applicare metodi statistici più avanzati (PMF – Positive Matrix Factorization), per l'identificazione di una vera e propria fingerprint della sorgente "aeroporto" e, soprattutto, per la quantificazione del suo contributo in massa per l'area presa in esame.

6 MODELLIZZAZIONE LUR DEI RISULTATI DOSIMETRICI SULL'INTERA CITTÀ DI PISA

6.1 I MODELLI LUR PER LA PREVISIONE DELLA DISTRIBUZIONE SPAZIALE DEGLI OSSIDI DI AZOTO

Diversi studi hanno mostrato gli effetti sulla salute di esposizioni croniche all'inquinamento dell'aria. Negli ultimi 15 anni molti lavori hanno documentato l'aumento di rischio di mortalità per cause non accidentali, ed in particolare per cause cardiovascolari [31] [32] [33] [34] [35] [36] [37] [38] [39] [40] [41].

Per stimare l'esposizione cronica ad inquinamento sono stati utilizzati i modelli di dispersione, metodi di interpolazione di misure da centraline fisse pesate per l'inverso della distanza e modelli land use regression (LUR). Questi ultimi sono stati sviluppati nello studio SAVIAH (Small Area Variation In Air quality and Health) e sono diventati un approccio sempre più utilizzato sia in Europa sia in Nord America [42] [43]. Il metodo consiste nello stimare le concentrazioni misurate in un sito utilizzando le caratteristiche geografiche e di uso del territorio del sito, tipicamente la densità abitativa, il network stradale, l'altitudine e i flussi di traffico.

Negli ultimi quattro anni è stato condotto in Europa lo studio ESCAPE [20] [21] che ha misurato le concentrazioni di NO₂ in 36 città (in Italia Roma, Torino e Varese) e sviluppato una metodologia all'avanguardia per lo sviluppo dei modelli LUR.

L'obiettivo di questo lavoro è stato quello di utilizzare i metodi approntati nel progetto ESCAPE per sviluppare un modello land use regression per le concentrazioni di biossidi di azoto per la città di Pisa.

Metodi

Tabella 22: Dati utilizzati per lo Sviluppo del LUR

Tipo di dati	Origine
Uso del suolo	Corine 2007 1:10.000
Popolazione	Censimento 2001
Altitudine	Quote da DTM
Traffico1 Network Locale	Simulazione modello traffico per acustica
Traffico2	Valori su ¼ h misurati per le tre campagne
Traffico Network Centrale	Sviluppati da
NO _x misurato	Risultati delle campagne di monitoraggio
NO _x 'adjusted'	Risultati campagne e dati annuali centralina di fondo (I PASSI)

Per ogni sito è stata calcolata una media annuale di concentrazione di biossido di azoto (NO₂) aggiustata utilizzando i dati di una centralina fissa di fondo urbano, per tener conto della variabilità delle concentrazioni durante l'anno, dipendente dalle diverse condizioni meteorologiche.

Le coordinate di ogni sito sono state determinate usando una combinazione di letture GPS eseguite ad ogni campagna di misura e correzioni manuali fatte utilizzando una mappa dettagliata delle strade locali per assicurare una posizione accurata del sito rispetto al network stradale locale.

Sono state considerate diverse variabili per lo sviluppo del modello LUR, utilizzando un sistema informativo geografico (GIS). Variabili sull'uso del territorio sono state ottenute dal database CORINE Land Cover 2000 (alta densità abitativa, bassa densità abitativa, industriale, naturale, verde urbano e popolazione residente) per buffer intorno al sito di 100, 300, 500, 1000, 5000 metri. È stata considerata l'altitudine e diverse variabili dal network stradale locale e dai dati disponibili sul traffico stradale (distanza dalla strada più vicina e relativo traffico; distanza dalla strada ad alto traffico più vicina e relativo traffico; traffico nei buffer di 25, 50, 100, 300, 500, 1000 metri; traffico su strade importanti nei buffer di 25, 50, 100, 300, 500, 1000 metri; traffico pesante sulla strada più vicina e sulla strada importante più vicina sia come numero medio di veicoli al giorno, sia come carico di traffico nei buffer di 25, 50, 100, 300, 500, 1000 metri; lunghezze di strade e lunghezze delle strade importanti nei buffer di 25, 50, 100, 300, 500, 1000 metri).

Il modello è stato sviluppato utilizzando una regressione lineare con una procedura stepwise ⁴⁴. In ogni passo è stata aggiunta al modello la variabile con il più alto R² aggiustato, se l'aumento del R² era più del 1% e se la direzione dell'effetto era quella definita a priori (positiva per le variabili di popolazione, di traffico, di presenza di industrie, negativa per altitudine, verde urbano o aree naturali). Dal modello finale sono state eliminate le variabili con un p-value >0.10 e le variabili collineari (Variance Inflation Factor, VIF >3). Per analizzare la possibilità che alcune osservazioni fossero influenti è stata usata la distanza di Cook.

Il modello è stato validato utilizzando il metodo di leave-one-out cross-validation: il valore di un singolo sito è stato predetto utilizzando tutti gli altri punti e sono stati paragonati i valori misurati e predetti.

6.2 LA MAPPA DELL'INQUINAMENTO DA OSSIDI DI AZOTO A PISA

La concentrazione media misurata di NO₂ è di 36,7 µg/m³ (deviazione standard: 15,2; minimo: 15,7; massimo: 89,7).

Le variabili entrate nel modello sono: il traffico pesante sulla strada più vicina, l'area di alta densità abitativa nel buffer di 5 km, l'area di verde urbano nel buffer di 100 metri, il traffico sulla strada importante più vicina per l'inverso della distanza al quadrato (auto/m²).

La tabella che segue mostra il modello LUR sviluppato per la città di Pisa.

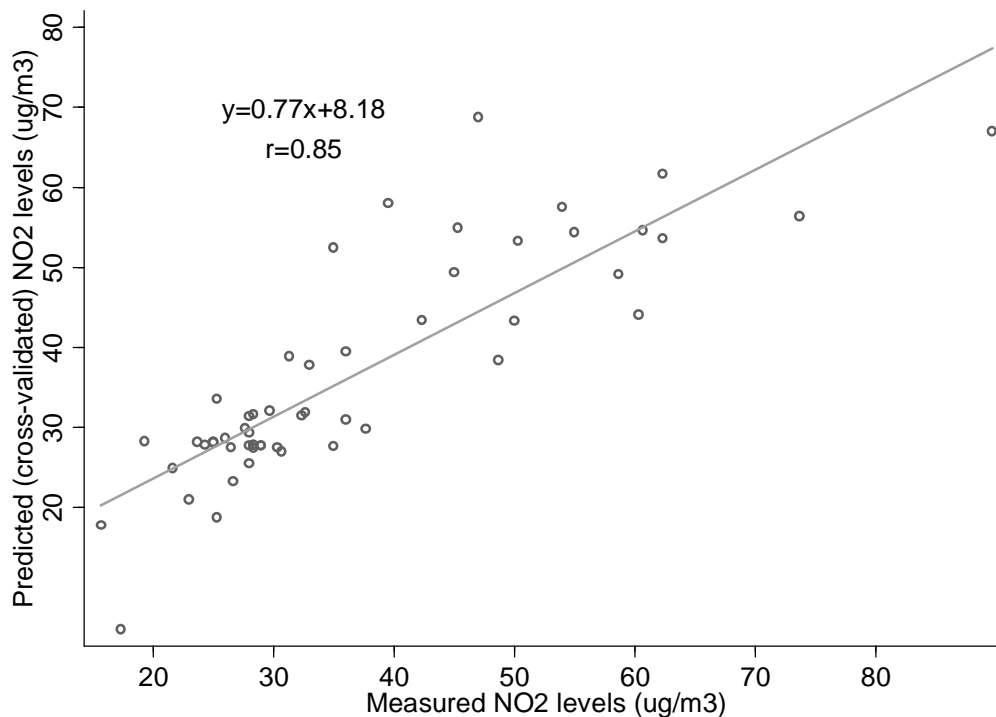
Tabella 23: Modello LUR di Pisa per Biossido di Azoto.

Variabile	Coefficiente	p-value	IC 95%	
heavytrafnear	0.0393705	<0.001	0.03313	0.04561
hdres_5000	0.00000377	0.016	0.00000073	0.0000068
urbgreen_100	-0.0006045	0.022	-0.00112	-0.00009
intmajorininvdist2	0.0016508	0.097	-0.00031	0.00361
Costante	16.9783	<0.001	8.76805	25.18855
R ²	0.7897			
R ² aggiustato	0.7725			
RMSE	7.2458			

Non è stata trovata evidenza di collinearità né presenza di osservazioni influenti.

La Figura 60 mostra i risultati della validazione del modello. Valori predetti e osservati hanno una correlazione di 0.85.

Figura 60: Validazione del modello.



La **Tabella 24** descrive le variabili che compongono il modello.

Tabella 24: Descrizione delle variabili che compongono il modello.

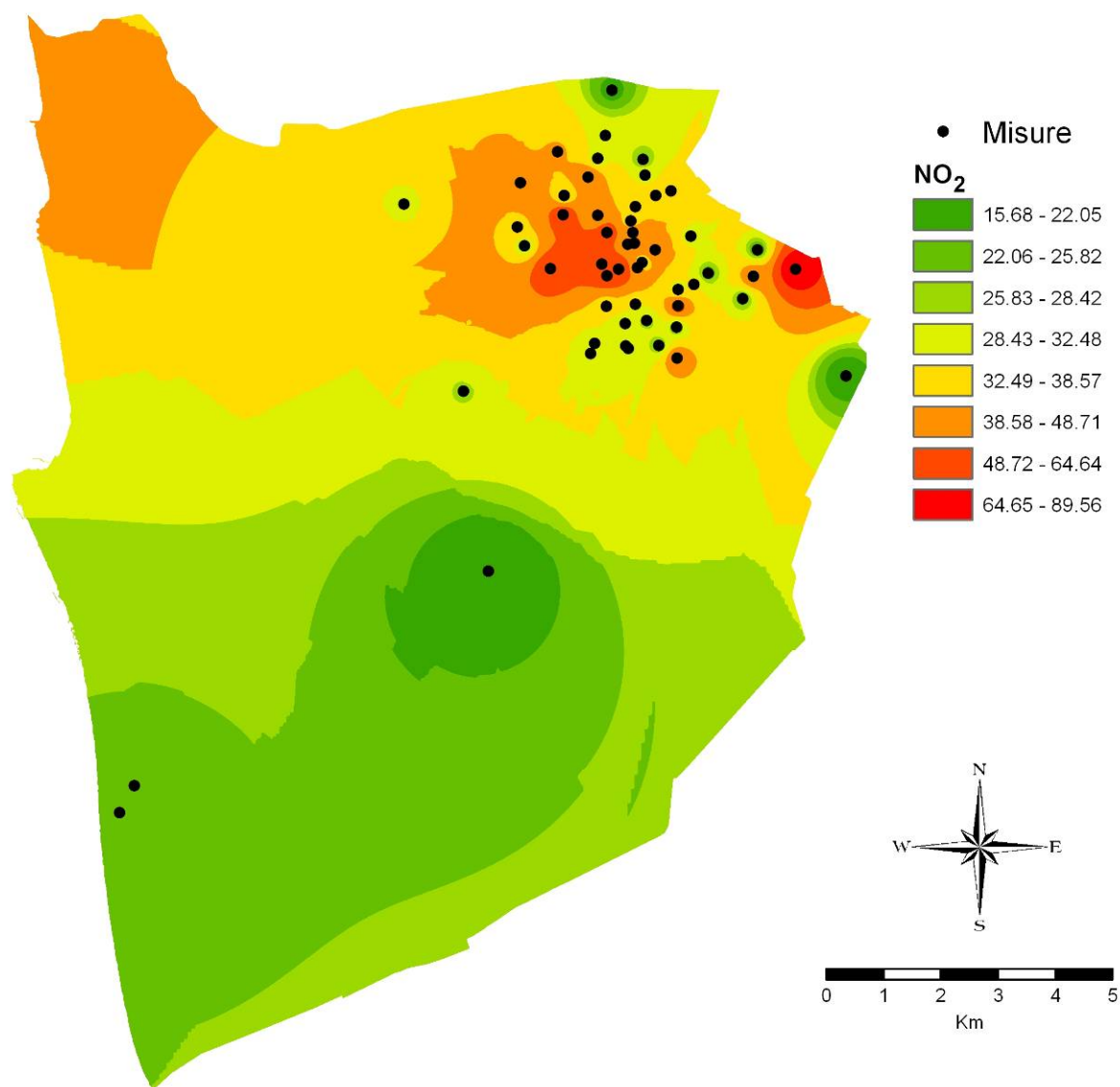
Variabile	min	p25	p50	p75	max
heavytrafnear	0	0	96	604	1084
hdres_5000	0	2704972	2829133	2829133	2836324
urbgreen_100	0	0	0	771	19749
intmajorininvdist2	0	61	95	201	7324

Per stimare la concentrazione di NO₂ in un punto della città occorrerà calcolare le variabili del modello (descritte in Tabella 23), sostituire i valori che superano quelli assunti nei siti di misura con il massimo riportato in Tabella 24 e applicare l'equazione del modello descritta in Figura 60.

Mappa delle concentrazioni di Biossido di Azoto

La Figura 61 mostra la mappa della città, i siti selezionati per le misure di NO₂ e i valori delle concentrazioni ottenute dai valori delle misure pesati per l'inverso della distanza.

Figura 61: mappa con i siti selezionati per le misure di NO₂ e concentrazioni pesate per l'inverso della distanza.



7 CONCLUSIONI

L'inquinamento atmosferico determinato dal traffico aereo relativo all'aeroporto di Pisa è stato oggetto di una serie di campagne di misura che hanno coperto tre diverse stagioni dell'anno attraverso l'utilizzo di specifici dosimetri e di campagne di misura con laboratori mobili specificatamente attrezzati.

Sono state realizzate mappe di distribuzione del Biossido di Azoto attraverso modelli LUR, evidenziando livelli medi annuali inferiori ai limiti di legge. Per tener conto della variabilità delle concentrazioni durante l'anno, dipendente dalle diverse condizioni meteorologiche, la concentrazione media misurata è stata aggiustata utilizzando i dati di una centralina fissa di fondo urbano. Per ogni sito è stata calcolata una media annuale di concentrazione di Biossido di Azoto (NO_2). Le mappe così realizzate possono avere impiego anche ai fini epidemiologici.

I valori di concentrazione NO_2 in tutte e tre le campagne nella zona aeroportuale e limitrofa sono paragonabili o inferiori ai valori riscontrati nei siti di fondo urbano e di medio e basso traffico. I valori registrati per tutte e tre le campagne nella parte del sedime aeroportuale dedicata alla fase di fasi di landing e takeoff (lungo le piste) risultano molto bassi, addirittura più bassi dei valori registrati nei siti di fondo ciò a conferma che i maggiori effetti dell'attività aeroportuale relativamente ai NO_x si registrano a quote superiori a 300 m (Take-off), in linea con quanto emerso in analoghi studi presso altri aeroporti.

L'andamento delle concentrazioni di Formaldeide e in generale di tutte le Aldeidi misurate, mostra i valori più elevati nella zona di parcheggio e manovra degli aerei, mentre allontanandosi dal punto di immissione, la concentrazione diminuisce. Ciò è in linea con l'elevata fotosensibilità che le contraddistingue e che causa la loro degradazione.

Sia per le Aldeidi, che per i BTEX, in conformità con quanto riscontrato per l' NO_2 , le concentrazioni misurate all'interno del sedime aeroportuale e nelle zone limitrofe ad esso, sono sempre inferiori a quelle rilevate nei siti urbani sia di alto traffico, che di medio - basso traffico e di fondo urbano.

Risultano di particolar interesse i risultati riguardanti la speciazione chimica del particolato campionato nelle estreme vicinanze della pista: è stato infatti riscontrato un arricchimento rispetto la sorgente crostale dell'ordine di 10^3 di Mn, Sb, Al, Cr e Mo. La fonte specifica da attività aeroportuali di questi metalli è stata confermata dal confronto con un'area di background vicina al sito di campionamento, meno influenzata dalle emissioni antropiche (il Parco di San Rossore a Pisa), dove le concentrazioni medie sono risultate molto più basse rispetto a quelle nel sito dell'aeroporto correlando, quindi, questi metalli alle emissioni da attività aeroportuali, che includono sia le emissioni primarie da usura meccanica degli aerei, sia il risollevarimento crostale, sia le emissioni di origine primaria e secondaria legate ai processi di combustione del motore degli aerei. Grazie all'analisi statistica del tipo PCA, è stato possibile confermare i risultati analitici, con l'identificazione di un fattore relativo proprio alla sorgente "aeroporto" che è rappresentato principalmente da Cr, Fe, Mn e Mo e l'individuazione di un fattore che raccoglie EC, OC, K^+ e Cl^- , tipici marker della combustione dei propellenti usati dagli aerei.

Per rilevazioni con risoluzione di 12 ore, non è stata individuata una correlazione tra particolato e il numero dei voli (sulle 12 ore il particolato è risultato sostanzialmente correlato a fattori meteorologici).

Nelle misure di PM con elevata risoluzione temporale (1 minuto) ottenuti dal contatore ottico di particelle è emerso un notevole incremento di particelle ultrafini durante le fasi di atterraggio e decollo degli aerei (come già visto nel caso di Ciampino ⁴⁵ ⁴⁶). Come per i residenti presso scuole affette da intenso traffico da motocicli in brevi periodi temporali, l'esposizione per brevi periodi a elevati livelli di concentrazione, che può essere sperimentata dai residenti in estrema prossimità degli aeroporti, è meritevole di approfondimento per la valutazione degli effetti sulla loro salute.

Complessivamente è stato quindi riscontrato un impatto del sistema aeroportuale non rilevante sulla qualità dell'aria ambiente secondo i parametri di legge attuali, che impongono misure mediate nel tempo e non istantanee. Per quanto prima espresso, però, nel caso di aeroporti con residenti estremamente prossimi alle piste, come nel caso di Ciampino, i risultati legati alla distribuzione spaziale delle emissioni prodotte nella fase di decollo potrebbero essere oggetto di indagine approfondita attraverso specifici modelli di dispersione.

Sulla base dell'attività svolte, infatti, sarebbe possibile sviluppare uno studio modellistico per prevedere l'evoluzione dell'impatto atmosferico delle attività aeroportuali tenuto conto dei futuri incrementi di traffico aereo. A tal fine, informazioni meteorologiche e misure effettuate con anemometri sonici potrebbero consentire di descrivere le condizioni di propagazione e costituire parametri d'ingresso al modello matematico di previsione EDMS (Emission and Dispersion Modeling System) riconosciuto e consigliato dall'ICAO (International Civil Aviation Organization) e dall'EPA, al fine di determinare il contributo delle attività aeroportuali all'inquinamento urbano nelle varie condizioni meteorologiche. Ulteriori dati d'ingresso al modello potranno essere costituiti dalle informazioni tratte dai data base "Engine Emissions Databank" dell'ICAO che consentono di identificare i livelli medi di emissione dei principali inquinanti della flotta operante presso l'aeroporto di Pisa.

In ogni caso, la prevista delocalizzazione delle abitazioni di via Carrareccia e Cariola, poste nelle immediate vicinanze delle piste aeroportuali, a seguito dei finanziamenti statali e regionali, oltre che sulla base delle risorse dell'ente gestore SAT, consentirà l'eliminazione di una possibile criticità. L'allungamento della pista in direzione sud (quindi verso il mare) e il conseguente arretramento del punto di decollo e atterraggio, previsto nell'ambito del piano di risanamento acustico dell'aeroporto, potrà avere ulteriori benefici sulla qualità dell'aria nelle aree restanti a nord in prossimità dell'aeroporto.

8 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- 1 IPCC, 1999 - J.E.Penner, D.H.Lister, D.J.Griggs, D.J.Dokken, M.McFarland (Eds.) Prepared in collaboration with the Scientific Assessment Panel to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer-Cambridge University Press, UK. pp 373
- 2 www.ccm-network.it/documenti_Ccm/programmi_e_progetti/2010/sostegnoPnp&GS/inquinamento-aereoporti_Lazio.pdf
- 3 Maurice LQ, Lee DS. (eds) 2009. Assessing Current Scientific Knowledge, Uncertainties and Gaps in Quantifying Climate Change, Noise and Air Quality Aviation Impacts. Final Report of the International Civil Aviation Organization (ICAO) Committee on Aviation and Environmental Protection (CAEP) Workshop. US Federal Aviation Administration and Manchester Metropolitan University, Washington DC and Manchester.
- 4 Bocca Beatrice, Francesco Petrucci, Alessandro Alimonti and Sergio Caroli. Traffic-related platinum and rhodium concentrations in the atmosphere of Rome. *J. Environ. Monit.*, 2003, 5, 563–568
- 5 Iavicoli I, Bocca B et al. Exposure of Rome City Tram Drivers to Airborne Platinum, Rhodium, and Palladium. *JOEM Volume 50, Number 10, October 2008*
- 6 Canepari S., Perrino, C., Olivieri, F., Astolfi, M. L., 2008. Characterisation of the traffic sources of PM through size-segregated sampling, sequential leaching and ICP analysis. *Atmospheric Environment* 42, 8161-8175.
- 7 Fulvio Amato, Teresa Moreno, Marco Pandolfi, Xavier Querol, Andrés Alastuey, Ana Delgado, Manuel Pedrero, Nuria Cots. Concentrations, sources and geochemistry of airborne particulate matter at a major European airport. *Journal of Environmental Monitoring*, Volume 12, Number 4 (April 2010), pp. 854-862
- 8 Hoek G, Beelena R, de Hoogh K, Vienneaub D, Gulliverc J, Fischer P, Briggs D. A review of land-use regression models to assess spatial variation of outdoor air pollution. *Atmospheric Environment*, 42(3):7561-7578, 2008.
- 9 Brauer M., Hoek G., et al. Estimating long-term average particulate air pollution concentrations: Application of traffic indicators and geographic information systems. *Epidemiology*, 14(2):228-239, 2003.
- 10 Rosenlund M, Forastiere F, Stafoggia M, Porta D, Perucci M, Ranzi A, Nussio F, Perucci CA. "Comparison of regression models with land-use and emissions data to predict the spatial distribution of traffic-related air pollution in Rome". *J Expo Sci Environ Epidemiol*. 2008 Mar;18(2):192-9.
- 11 Hänninen O., Zauli-Sajani S., De Maria R., Lauriola P, Jantunen M. Integrated ambient and microenvironment model for estimation of PM₁₀ exposures of children in annual and episode settings. *Environmental Modeling and Assessment*, 2009.
- 12 <http://www.ARPAT.toscana.it/temi-ambientali/aria/sistema-di-rilevamento>
<http://www.ARPAT.toscana.it/temi-ambientali/aria/sistema-di-rilevamento>
- 13 <http://www.ARPAT.toscana.it/documentazione/catalogo-pubblicazioni-ARPAT/relazione-annuale-sullo-stato-della-qualita-dellaria-nella-regione-toscana-anno-2011>.
- 14 <http://www.ARPAT.toscana.it/documentazione/catalogo-pubblicazioni-ARPAT/relazione-annuale-sullo-stato-della-qualita-dellaria-nella-regione-toscana-anno-2012>

- 15 <http://www.wunderground.com/>
- 16 Airport Air Quality Guidance Manual, ICAO preliminary edition Doc 9889, 2007 ok: metodologia per stimare le emissioni aeroportuali in tutte le sue parti.
- 17 Glenn Research Center- NASA. Jet Engine NOx Emissions
https://mdao.grc.nasa.gov/reengine/emissions_primer.html
- 18 Emission Inventory Guidebook di EEA, ultima versione del 2010, US-EPA AP 42 del 1999
- 19 Cavalli F., Viana M., Yttri K.E., Genberg J., and Putaud J.-P. : Toward a standardised thermal-optical protocol for measuring atmospheric organic and elemental carbon: the EUSAAR protocol, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2010, 3, 79–89.
- 20 European Commission Seventh Framework Programme Theme ENV.2007.1.2.2.2. European cohort on air pollution Project number: 211250
- 21 <http://www.escapeproject.eu/>
- 22 Airport Cooperative Research Program (ACRP) Report 7: Aircraft and Airport-Related Hazardous Air Pollutants: Research Needs and Analysis -WASHINGTON , D.C. (FAA-2008)
- 23 Denise Welch, Kieran Laxen and Stephen Moorcroft. London City Airport Air Quality Measurement Programme: Annual Report 2010. Air Quality Consultants Ltd, on behalf of London City Airport. April 2011.
- 24 Cottica D., Sacco P., Valutazione del rischio e degli effetti clinici ad Aldeidi negli ambienti di vita, B1/9/DML/05
- 25 Interaction profile for: Benzene, Toluene, Ethylbenzene, and Xylenes (BTEX) U.S. Department of Health and Human Services Public Health Service Agency for Toxic Substances and Disease Registry. May 2004
- 26 Moldanová J., Fridell E., Popovicheva O., Demirdjian B., Tishkova V., Faccineto A., Focsa C.: Characterization of particulate matter and gaseous emissions from a large ship Diesel engine, *Atmospheric Environment*, 2009, 43, 16, 2632–2641.
- 27 Westerdahl D., Fruin S.C., Fine P.L., Sioutas C.: The Los Angeles International Airport as a source of ultrafine particles and other pollutants to nearby communities, *Atmospheric Environment* , 2008, 42, 3143–3155.
- 28 Zhu Y., Fanning E., Yu R.C., Zhang Q., Froines J.R. : Aircraft emissions and local air quality impacts from takeoff activities at a large International Airport, *Atmospheric Environment*, 2011, 45, 6526 – 6533.
- 29 Wedepohl K. H., The composition of the continental crust, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59, 7, 1217–1232.
- 30 Becagli S. , Ghedini C., Peeters S., Rottiers A., Traversi R., Udisti R., Chiari M., Jalba A., Despiu S., Dayan U., Temara A. : MBAS (Methylene Blue Active Substances) and LAS (Linear Alkylbenzene Sulphonates) in Mediterranean coastal aerosols: Sources and transport processes, *Atmospheric Environment*, 2011, 45, 37, 6788–6801.
- 31 Beelen R, Hoek G, van den Brandt PA, Goldbohm RA, Fischer P, Schouten LJ, Jerrett M, Hughes E, Armstrong B, Brunekreef B. Long-term effects of traffic-related air pollution on mortality in a Dutch cohort (NLCS-AIR study). *Environ Health Perspect* 2008,116:196–202.
- 32 Dockery DW, Stone PH. Cardiovascular risks from fine particulate air pollution. *NEngl J Med* 2007, 356:511–3.

-
- 33 Filleul L, Rondeau V, Vandentorren S, Le Moual N, Cantagrel A, Annesi-Maesano I, Charpin D, Declercq C, Neukirch F, Paris C, Vervloet D, Brochard P, Tessier JF, Kauffmann F, Baldi I. Twenty five year mortality and air pollution: results from the French PAARC survey. *Occup Environ Med* 2005, 62:453–60.
- 34 Finkelstein MM, Jerrett M, DeLuca P, Finkelstein N, Verma DK, Chapman K, Sears MR. Relation between income, air pollution and mortality: a cohort study. *CMAJ* 2003, 169:397–402.
- 35 Gehring U, Heinrich J, Krämer U, Grote V, Hochadel M, Sugiri D, Kraft M, Rauchfuss K, Eberwein HG, Wichmann HE. Long-term exposure to ambient air pollution and cardiopulmonary mortality in women. *Epidemiology* 2006, 17:545–51.
- 36 Hoek G, Brunekreef B, Goldbohm S, Fischer P, van den Brandt PA. Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in the Netherlands: a cohort study. *Lancet* 2002, 360:1203–9.
- 37 Jerrett M, Burnett RT, Ma R, Pope CA 3rd, Krewski D, Newbold KB, Thurston G, Shi Y, Finkelstein N, Calle EE, Thun MJ: Spatial analysis of air pollution and mortality in Los Angeles. *Epidemiology* 2005, 16:727–36.
- 38 Miller KA, Siscovick DS, Sheppard L, Shepherd K, Sullivan JH, Anderson GL, Kaufman JD. Long-term exposure to air pollution and incidence of cardiovascular events in women. *N Engl J Med* 2007, 356:447–58.
- 39 Naess Ø, Nafstad P, Aamodt G, Claussen B, Rosland P. Relation between concentration of air pollution and cause-specific mortality: four-year exposures to nitrogen dioxide and particulate matter pollutants in 470 neighborhoods in Oslo, Norway. *Am J Epidemiol* 2007, 165:435–43.
- 40 Nafstad P, Håheim LL, Wisløff T, Gram F, Oftedal B, Holme I, Hjermann I, Leren P: Urban air pollution and mortality in a cohort of Norwegian men. *Environ Health Perspect* 2004, 112:610–5.
- 41 Cesaroni G, Badaloni C, Gariazzo C, Stafoggia M, Sozzi R, Davoli M, Forastiere F. Long-Term Exposure to Urban Air Pollution and Mortality in a Cohort of More than A Million Adults in Rome. *Environ Health Perspect*. 2013 (in stampa).
- 42 Briggs DJ, Collins S, Elliott P, Fisher P, Kingham S, Lebreton E, Pryl K, van Reeuwijk H, Smallbone K, van der Veen A. Mapping urban air pollution using GIS: a regression based approach. *Int J Geographical Information Science* 1997, 11:699–718.
- 43 Hoek G, Beelen R, de Hoogh C, Vienneau D, Gulliver J, Fischer P, Briggs D. A review of land-use regression models to assess spatial variation of outdoor air pollution. *Atmos Environ* 2008, 42:7561–7578.
- 44 Eeftens M, Beelen R, de Hoogh K, Bellander T, Cesaroni G, Cirach M, Declercq C, Dedele A, Dons E, de Nazelle A, Dimakopoulou K, Eriksen K, Falq G, Fischer P, Galassi C, Gražulevičienė R, Heinrich J, Hoffmann B, Jerrett M, Keidel D, Korek M, Lanki T, Lindley S, Madsen C, Mölter A, Nádor G, Nieuwenhuijsen M, Nonnemacher M, Pedeli X, Raaschou-Nielsen O, Patelarou E, Quass U, Ranzi A, Schindler C, Stempfelet M, Stephanou E, Sugiri D, Tsai MY, Yli-Tuomi T, Varró MJ, Vienneau D, Klot Sv, Wolf K, Brunekreef B, Hoek G. Development of Land Use Regression models for PM_{2.5}, PM_{2.5} absorbance, PM₁₀ and PM_{coarse} in 20 European study areas; results of the ESCAPE project. *Environ Sci Technol*. 2012;46:11195-205

45 A. Di Menno di Bucchianico, G. Cattani, A. Gaeta, A. Caricchia, F. Troiano, R. Sozzi, A. Bolignano, F. Sacco, S. Damizia, S. Barberini, R. Caleprico, T. Fabozzi, C. Ancona, L. Ancona, G. Cesaroni, F. Forastiere, G.P. Gobbi, F. Costabile, F. Angelini, F. Barnaba, M. Inglessis, F. Tancredi, L. Palumbo, L. Fontana, A. Bergamaschi, I. Iavicoli : The contribution of Rome-Ciampino airport to the surrounding air quality. Negli atti del EAC-2012 (European Aerosol Conference Granada, 2-7 sept 2012)

46 Carla Ancona, Francesco Forastiere, Gaetano Licitra, Giorgio Cattani, Roberto Sozzi: L'impatto dell'inquinamento ambientale prodotto dagli aeroporti sulla salute dei residenti, in Qualità dell'ambiente urbano-VIII Rapporto- Focus su PORTI, AEROPORTI E INTERPORTI, Ispra, 2012.

ALLEGATI

Allegato 1: Tabella mappatura campionamento

Allegato 2: Schede sito [consultabili on-line per mezzo di un file KML](#) (per la visualizzazione 3D di siti e indici associati - per la consultazione serve [Google Earth](#)) o [scaricabili in formato PDF](#). Tutto il materiale (incluse le istruzioni per la consultazione) è [disponibile sul sito Web di ARPAT](#) (<http://www.arp.at.toscana.it/monitoraggio-qualita-aria-aeroporto-pisa-2013>).

tipo dosimetro	tipologia sito	Cod sito	indirizzo	XCOORD	YCOORD	note
NOX BTEX ALD	RURALE FONDO	p 1	Via delle Cascine 152	1609192.19	4841768.79	
NOX BTEX ALD	URBANA FONDO	p 2	Lungarno Fibonacci	1613349.56	4840742.81	<i>dentro giardino scotto</i>
NOX	URBANA FONDO	p 3	Via San Lorenzo (Piazza Santa Caterina)	1613231.78	4841725.25	<i>ZTL</i>
NOX BTEX ALD	URBANA FONDO	p 4	Via Umbro Viale (zona cisanello)	1615366.41	4840966.17	<i>Vicino scuola</i>
NOX	URBANA FONDO	p 5	Via Umbria (zona cisanello dietro esselunga)	1615110.56	4840114.15	<i>Vicino scuola</i>
NOX BTEX ALD	URBANA FONDO	p 6	Via 24 Maggio (largo ippolito nievo)	1612820.60	4843754.38	<i>Centralina ARPAT</i>
NOX	URBANA TRAFFICO B	p 7	Via Ugo Visconti 56	1611299.90	4841038.09	
NOX BTEX ALD	URBANA TRAFFICO B	p 8	Via di Oratoio 143	1616915.23	4838758.07	
NOX BTEX ALD	URBANA TRAFFICO B	p 9	Via San Martino 39	1613104.38	4841064.76	
NOX BTEX ALD	URBANA TRAFFICO B	p 10	Piazza San Paolo all' Orto	1613154.36	4841469.51	<i>ZTL</i>
NOX BTEX ALD	URBANA TRAFFICO B	p 11	Via Santa Maria	1612572.26	4841567.21	<i>ZTL</i>
NOX BTEX	URBANA TRAFFICO M	p 12	Via Livornese 575	1610228.97	4838498.40	
NOX	URBANA TRAFFICO M	p 13	Via Caduti del Lavoro 15	1611168.17	4841362.96	
NOX	URBANA TRAFFICO M	p 14	Via Pisorno (tirrenia)	1604478.56	4831600.93	
NOX BTEX	URBANA TRAFFICO M	p 15	Via S. Agostino 117	1612723.60	4839982.57	
NOX	URBANA TRAFFICO M	p 16	Via Giavan Battista Fumaioli 130	1614503.65	4840560.12	<i>Rotta aerei</i>
NOX ALD+ALD	URBANA TRAFFICO M	p 17	Via Andrea Pisano	1614205.43	4841202.71	<i>Vicino scuola</i>
NOX BTEX	URBANA TRAFFICO M	p 18	Via Sant' Agostino 329	1612521.15	4839330.44	<i>Rotta aerei</i>
NOX	URBANA TRAFFICO M	p 19	Viale delle Piagge 10	1613977.09	4840271.03	<i>Rotta aerei</i>
NOX	URBANA TRAFFICO M	p 20	Via San Michele degli Scalzi 139	1614258.80	4840363.01	<i>Rotta aerei</i>
NOX	URBANA TRAFFICO M	p 21	Via Francesco Rismondo 57	1613406.81	4842267.66	
NOX	URBANA TRAFFICO M	p 22	Via Savona 11-13	1613366.05	4842548.15	
NOX BTEX ALD	URBANA TRAFFICO M	p 23	Via Orazio Gentileschi 25	1612577.55	4842565.31	<i>vicino scuola</i>
NOX	URBANA TRAFFICO M	p 24	Via Alfredo della Pura 21	1612711.33	4842961.46	
NOX	URBANA TRAFFICO M	p 25	Via Giunta Pisano 20	1611990.05	4841912.91	
NOX	URBANA TRAFFICO A	p 26	Via Angelo Battelli 33	1613859.39	4841994.51	
NOX BTEX ALD	URBANA TRAFFICO A	p 27	Via Mons. Manghi	1616033.05	4840626.88	<i>zona cisanello barriere rumore</i>
NOX	URBANA TRAFFICO A	p 28	Viale del Tirreno	1604223.00	4831126.70	
NOX BTEX ALD	URBANA TRAFFICO A	p 29	Via Fiorentina 227	1613979.26	4839990.77	<i>Vicino scuola</i>
NOX BTEX ALD	URBANA TRAFFICO A	p 30	Viale delle Cascine 118	1611221.72	4842134.40	
NOX	URBANA TRAFFICO A	p 31	Via Vittorio Veneto (Arpat)	1613586.63	4841916.31	
NOX BTEX	URBANA TRAFFICO A	p 32	Via Emilia 338	1613960.35	4839073.85	<i>Vicino aeroporto</i>
NOX BTEX ALD	URBANA TRAFFICO A	p 33	Via Cisanello	1615294.00	4840500.33	<i>stradone esselunga</i>
NOX ALD+ALD	URBANA TRAFFICO A	p 35	Viale Francesco Bonaini 69	1612937.92	4840629.38	
NOX	URBANA TRAFFICO A	p 36	Via Lungarno Gambacorti	1612739.95	4841270.97	<i>vicino comune</i>
NOX	URBANA TRAFFICO A	p 37	Via Silvio Pellico	1612647.41	4840719.69	
NOX	URBANA TRAFFICO A	p 38	Via Filippo Corridoni	1612736.50	4840515.86	<i>stazione</i>

tipo dosimetro	tipologia sito	Cod sito	indirizzo	XCOORD	YCOORD	note
NOX BTEX ALD	URBANA TRAFFICO A	p 39	Via Conte Fazio	1611748.84	4840635.67	<i>Vicino scuola</i>
NOX	URBANA TRAFFICO A	p 40	Lungarno Galileo Galilei 11	1613215.77	4841083.72	
NOX	URBANA TRAFFICO A	p 41	Piazza Guerazzi 38	1613267.41	4840658.12	
NOX BTEX ALD	URBANA TRAFFICO A	p 42	Via Contessa Matilde 74	1612406.65	4842233.35	<i>Vicino scuola</i>
NOX	URBANA TRAFFICO A	p 43	Via Pisano Bonanno 65	1611974.26	4841581.74	
NOX	URBANA TRAFFICO A	p 44	Via Pietrasantina 130	1611876.47	4842680.23	
NOX BTEX ALD	URBANA TRAFFICO A	p 45	Piazza del Rosso	1613583.56	4840969.73	<i>Centralina ARPAT</i>
NOX	URBANA TRAFFICO A	p 46	Lungarno Medicio 32	1613191.49	4841263.94	
NOX BTEX ALD	Aeroporto limitof	p 47	Via Carrareccia	1613060.97	4839281.26	
NOX BTEX ALD	Aeroporto limitof	p 48	Via Cariola 30	1613109.64	4839238.95	
NOX BTEX ALD	Aeroporto limitof	p 49	Via della Ferrovia 21	1613645.83	4839295.61	
NOX BTEX ALD	Aeroporto limitof	p 50	Via del Viadotto 8	1610669.46	4835344.62	<i>vicino agriturismo</i>
NOX BTEX ALD	Aeroporto limitof	p 51	Via Ettore Socci 26	1613950.59	4839612.26	<i>vicino scuola</i>
NOX BTEX ALD	Aeroporto limitof	p 52	Via Asmara 10	1612453.42	4839149.99	
NOX BTEX ALD	Aeroporto aereonautica	p 53	palo illuminazione d. carburanti Nord	1613167.93	4838407.57	
NOX BTEX ALD	Aeroporto aereonautica	p 54	palo illuminazione aerologica	1612497.95	4837574.30	
NOX BTEX ALD	Aeroporto aereonautica	p 55	manufatto V.O.R. ,sotto la griglia delle antenne	1612117.34	4836987.25	
NOX BTEX ALD	Aeroporto aereonautica	p 56	palo illuminazione perimetrale	1611401.20	4837543.50	
NOX BTEX ALD	Aeroporto aereonautica	p 57	Ex palo illuminazione d. carburanti Ovest	1611769.09	4838074.87	
NOX BTEX ALD	Aeroporto aereonautica	p 58	palo illuminazione blocco tecnico	1612347.72	4838366.65	
NOX BTEX ALD	Aeroporto SAT	p 59	Aeroporto SAT	1612701.30	4838881.86	confine con ramp 1
NOX BTEX ALD	Aeroporto SAT	p 60	Aeroporto SAT	1612927.04	4839077.27	vicino a uscita E
NOX BTEX ALD	Aeroporto SAT	p 61	Aeroporto SAT	1612561.91	4839181.70	parcheggio aviazione civile vicino officina
NOX BTEX ALD	Aeroporto SAT	p 62	Aeroporto SAT	1612999.96	4839338.98	confine parcheggio av. civile-generale
NOX BTEX ALD	Aeroporto limitof	p 63	via Arcangelo Ghisleri 50	1613059.72	4839678.50	
NOX BTEX ALD	Aeroporto limitof	p 64	via di Morrona 4	1613232.49	4840015.67	
NOX BTEX ALD	Aeroporto limitof	p 65	Via Leopoldo Pilla 54	1613430.87	4839729.97	
BTEX	Aeroporto aereonautica	p 66	Aeroporto 46°Aerobrigata/lato est	1611822.64	4836556.13	<i>Cabina elettrica PG 111, vicino mezzo mobile</i>