



<p>RELAZIONE SULLA QUALITÀ DELL'ARIA DEL COMPRESORIO DI CIVITAVECCHIA. ANNO 2017.</p>
--

Autori: E. Specchia;I. Allegrini;A. D'Ausilio;C. Silibello;C. Pozzi

SOMMARIO

1	Premessa	2
1.1	L'impianto ENEL di Civitavecchia	3
1.2	Altri comparti emissivi	5
2	Analisi meteorologica dell'area	8
2.1	Analisi delle misure effettuate presso la Centrale	8
3	Limiti e standard di qualità dell'aria	11
4	Rete di monitoraggio della qualità dell'aria	13
4.1	Metodi di misura	16
5	Misure di concentrazione e verifica degli standard	18
5.1	Particolato PM ₁₀	19
5.1.1	Sintesi dei dati	19
5.1.2	Andamento temporale	19
5.1.3	Episodi di inquinamento naturale (Polveri sahariane)	23
5.2	Particolato PM _{2,5}	25
5.2.1	Sintesi dei dati	25
5.3	Biossido di azoto	27
5.3.1	Sintesi dei dati	27
5.3.2	Processi chimico-fisici che coinvolgono il biossido di azoto	27
5.3.3	Andamento temporale del biossido di azoto	29
5.3.4	Rose di concentrazione di NO ₂	33
5.4	Ozono	37
5.4.1	Sintesi dei dati	37
5.4.2	Andamento temporale dell'ozono	39
5.4.3	Protezione della vegetazione (AOT40)	42
5.5	Biossido di zolfo	43
5.5.1	Sintesi dei dati	43
5.5.2	Andamento temporale del biossido di zolfo	43
5.6	Cluster Analysis (PM ₁₀ e NO ₂)	45
6	Valutazione della distribuzione dell'inquinamento in aree non coperte o coperte parzialmente dalla rete di rilevamento	48
6.1	Scores e validazione	52
6.2	Analisi della rappresentatività della rete per le successive indagini epidemiologiche	53
7	Conclusioni	55
8	Appendice	57
A.	Campagna sperimentale meteorologica	58
a)	Analisi anemologica	58
b)	La struttura verticale dell'atmosfera	60
B.	PM₁₀: riferimento a studi di Source apportionment	62
C.	Ozono	64

1 Premessa

Nel presente rapporto sono riportati i risultati di uno studio della qualità dell'aria, relativo all'anno 2017, sull'area di Civitavecchia e in particolare nel territorio dei Comuni facenti parte del Consorzio per la gestione dell'osservatorio ambientale.

Secondo i Rapporti di qualità dell'aria annuali redatti da Arpa Lazio, l'area di Civitavecchia merita particolare attenzione per la presenza significativa di sorgenti emissive.

I risultati e le valutazioni in esso contenuto sono basati sui dati disponibili della rete di monitoraggio elaborati da ARIANET. Inoltre, il rapporto si basa anche sui dati di emissione della Centrale ENEL Torrevaldaliga Nord e dei dati meteo misurati dalla Centrale stessa a due quote differenti. La rete di rilevamento degli inquinanti è molto rappresentativa ed i suoi dati sono conformi a quanto previsto dalla legislazione vigente sia in termini di copertura territoriale che di qualità. Nel presente studio sono stati considerati i seguenti inquinanti di interesse per l'analisi del possibile contributo della Centrale: Particolato atmosferico (PM₁₀ e PM_{2.5}), NO₂, O₃ e SO₂.

Studi precedenti volti ad individuare il contributo della Centrale ai livelli di PM₁₀, si veda Appendice B, hanno mostrato che la Centrale contribuisce in misura minima a tali livelli nell'area (approssimativamente 1-2 %). Tali risultati sono stati confermati dalle campagne di monitoraggio effettuate nell'area.

I dati mostrano qualche criticità relativa essenzialmente ad inquinanti secondari come l'ozono ed il biossido di azoto relativamente al confronto delle concentrazioni con i limiti e le linee guida accettate a livello comunitario e nazionale. Le concentrazioni di questi inquinanti sono comunque disgiunte dalle emissioni della centrale e sono principalmente causate dalle emissioni a livello del suolo da traffico, riscaldamento, trasporti navali ed altre attività che insistono nell'area.

Per quanto riguarda gli altri inquinanti, si possono confermare dati in sicurezza per quanto riguarda il loro impatto ambientale. Per quanto riguarda infine il benzo(a)pirene e i metalli pesanti non sono disponibili dati ottenuti con metodi strumentali automatici, in quanto necessitano di campionamento manuale e successiva analisi strumentale; alla luce dei dati rilevati per gli inquinanti rilevati nell'area, il loro impatto è molto verosimilmente limitato.

Nel dettaglio, la seguente tabella mostra la sintesi circa la presenza degli inquinanti e le concentrazioni rilevate nell'annualità.

Tabella 1. Sintesi della qualità dell'aria per inquinante

O₃	L'ozono è misurato in sei stazioni e presenta concentrazioni medie annuali comprese tra 58 e 85 µg/m ³ . Il valore obiettivo di 120 µg/m ³ viene superato solo nella stazione di Allumiere – Via Faggeto per 26 volte. L'inquinamento da ozono è causato da precursori, sia di origine naturale (es. VOC emessi dalla vegetazione) sia di origine antropogenica, emessi a livello del suolo e quindi trasportati negli strati più alti della troposfera a seguito di moti convettivi e, quindi trasferiti a terra per fumigazione verticale da turbolenza. Questo spiega il motivo per cui nelle centraline si nota un aumento dell'ozono dovuto alle due componenti di formazione locale e di trasferimento da alta quota.
PM₁₀	La media annuale nelle 13 stazioni nelle quali l'inquinante è stato misurato è di 17.1 µg/m ³ con una deviazione standard di 3.3 µg/m ³ che testimonia una distribuzione abbastanza uniforme sul territorio. Tali livelli sono inferiori al limite previsto dalla legislazione (40 µg/m ³). Anche il limite relativo al numero massimo di superamenti della soglia di 50 µg/m ³ per la media giornaliera (35) è stato ampiamente rispettato (numero massimo di superamenti pari a 2).
PM_{2.5}	Analogamente al PM ₁₀ , anche questo inquinante mostra una distribuzione spaziale molto costante sul territorio. Le medie annuali sono dell'ordine di 8-10 µg/m ³ quindi molto più basse di quelle previste dalla legislazione (25 µg/m ³) ed in linea con quelle previste dai futuri sviluppi della legislazione. Anche per questo inquinante non si identificano dunque particolari criticità.
NO₂	È l'inquinante maggiormente valutato dalla rete di rilevamento in ben quindici stazioni. La sua concentrazione è molto variabile ed è più alta in prossimità

	delle stazioni nel tessuto urbano di Civitavecchia in quanto sensibile alle emissioni al suolo di ossidi azoto. In ogni caso, le medie annuali sono comprese tra 5 e 39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ inferiori quindi al limite annuale previsto dalla legislazione (40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Il secondo limite che si riferisce alla media oraria non viene mai superato. Questo inquinante è anche modulato sia dalla situazione meteorologica locale che dalle emissioni che determinano un aumento delle concentrazioni nelle ore del mattino e nel tardo pomeriggio, in opposizione alle concentrazioni di ozono
SO ₂	Le medie annuali di questo inquinante mostrano valori molto bassi al di sotto di 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le stazioni non hanno mai segnalato superamenti dei due standard previsti dalla legge (125 e 350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Anche le concentrazioni di biossido di zolfo soddisfano ampiamente i requisiti legislativi. L'analisi di correlazione tra i rapporti NOX/SO ₂ misurati nelle diverse centraline ed il corrispondente rapporto delle emissioni NOX/SOX dai 3 gruppi di produzione della Centrale non evidenzia relazioni tra le emissioni della Centrale ed i livelli di SO ₂ rilevati dalla rete osservativa.

1.1 L'impianto ENEL di Civitavecchia

La Centrale ENEL Torrevaldaliga Nord (di seguito TVN) è sita in località Torrevaldaliga, nel Comune di Civitavecchia (Roma), a circa 6 km in direzione NNW, rispetto al centro della città, a ridosso della costa. L'impianto occupa un'area di circa 600.000 m² ed ha una capacità totale di quasi 2000 MW distribuita su tre gruppi alimentati a polverino di carbone. Secondo il Decreto Ministeriale 114 del 2013, nel quale è stata rinnovata l'Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA), la Centrale è autorizzata a bruciare 4,5 Mt di carbone ogni anno e 150 MSm³ di gas naturale. L'impianto include i sistemi di abbattimento degli inquinanti atmosferici quali denitrificatori, desolficatori e filtri a manica per il particolato. Le emissioni dallo stoccaggio del carbone sono limitate da cupole che coprono i due carbonili. Gli inquinanti sono espulsi in atmosfera attraverso una ciminiera di 250m in altezza composta da tre canne provenienti dai tre gruppi di produzione. Le canne hanno un diametro di 5,7 m per una portata massima complessiva (fumi tal quale) di 6.300.000 Nm³/h ed una temperatura di uscita di 130-140 °C. L'altezza fisica del camino, aggiunta alla spinta entalpica dei fumi, porta le sostanze emesse ad altezze ben superiori ai 250 m (altezza fisica del camino).

Le altre fonti di inquinamento presenti nell'impianto sono caratterizzate da emissioni al suolo che contribuiscono, in misura differenziata, ai livelli di qualità dell'aria. Tra queste fonti, ricordiamo la movimentazione di materiali e mezzi al servizio della Centrale che contribuisce all'emissione di inquinanti (principalmente polveri).

L'energia immessa in rete dalla centrale è di circa 12 milioni di MWh dalle tre unità termoelettriche da 660MW ciascuna. Il consumo di combustibile riguarda circa 4Mt di carbone e circa 100 Mm³ di gas naturale che determinano l'emissione di inquinanti in atmosfera.

Le emissioni degli inquinanti sono rilevate in continuo dalle apparecchiature dedicate di misura e, saltuariamente, mediante campagne di monitoraggio con prelevamento manuale dei fumi. Sia le misure automatiche che quelle manuali si riferiscono agli standard correnti. La tabella seguente mostra i limiti di emissione, stabiliti dal suddetto DM 114/2013, per gli inquinanti atmosferici sia in termini di concentrazione, che di flusso di massa. La tabella contiene anche le concentrazioni prescritte per i microinquinanti.

La successiva Tabella 3 indica le emissioni totali analizzate a partire dai dati forniti dai sistemi di monitoraggio in continuo dei tre gruppi di produzione dell'impianto. Dall'esame di tale tabella si può osservare che, per gli inquinanti considerati, non sono stati superati i limiti alle emissioni di cui al DM 114/2013 grazie all'adozione di tecniche correnti di depurazione dei fumi ovvero filtri, desolficatori e De-NOx (riportati in Tabella 4). L'energia immessa in rete nel 2017 è stata pari a 11005 GWh.

Tabella 2. Limiti alle concentrazioni di emissione secondo il Decreto Ministeriale 114/2013

INQUINANTE/MICRO INQUINANTE	VALORI LIMITE		
	Conc. Media Oraria (mg/Nm ³)	Conc. Media Giorno (mg/Nm ³)	Flusso Massa (t/anno)
Polveri totali	10	8	160
Biossido di zolfo	100	80	2100
Ossidi di azoto	100	80	3450
Ammoniaca	5	4	195
Monossido di carbonio	-	120	2000
Mercurio*	0,05	-	-
Cadmio-Tallio (Σ Cd+Tl)*	0,05	-	-
Arsenico-Antimonio-Piombo-Cromo-Cobalto-Rame-Manganese-Nichel-Vanadio-Stagno (ΣAs+Sb+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V+Sn)*	0,5	-	-
Idrocarburi Policiclici Aromatici (ΣIPA)*	0,01	-	-
Diossine e dibenzofurani (Σ PCDD-PCDF)*	0,1**	-	-
Composti del Cloro (come HCl)*	10	-	-
Composti del Fluoro (come HF)*	5	-	-

*I limiti sono valori medi rilevati per un periodo di campionamento discontinuo

** (ng/m³ I-TEQ)

Tabella 3. Emissioni della Centrale ENEL TVN nell'anno 2017.

INQUINANTE	EMISSIONE (t/anno)
Biossido di Zolfo	1.889
Ossidi di Azoto	2.519
Polveri	52
Monossido di Carbonio	1.952
Ammoniaca	3.5
Biossido di Carbonio	9.747.838

Tabella 4. Sistemi di abbattimento degli inquinanti disponibili

Inquinante	Sistema di abbattimento	Principio chimico-fisico
Polveri	Filtri a manica	Le particelle sono filtrate mediante impianti che utilizzano filtri a manica periodicamente rigenerati
Biossido di Zolfo	DeSOx	I fumi reagiscono con calcare ed ossigeno per formare solfato di calcio quindi gesso
Ossidi di Azoto	DeNOx	Gli ossidi di azoto sono rimossi per reazioni catalitiche che li trasformano in azoto. Una prima riduzione è ottenuta con bruciatori LowNOx
Monossido di carbonio		Ottimizzazione del processo di combustione mediante controllo dei parametri.

Al fine di provvedere sia alla salvaguardia dell'ambiente sia al rispetto dei limiti di cui sopra, l'esercizio della Centrale prevede diverse prescrizioni che possono essere riassunte come segue:

- Attivazione e mantenimento di un sistema di monitoraggio alle emissioni (SME)
- Rilevamenti periodici alle emissioni per i microinquinanti
- Campagne di monitoraggio di microinquinanti in atmosfera ambientale
- Monitoraggio delle polveri diffuse (a livello del suolo)
- Campagne di biomonitoraggio.

L'ottemperanza a queste prescrizioni da parte della Centrale ENEL TVN è stata sempre totale ed è avvenuta con il controllo di ISPRA e ARPA Lazio.

1.2 Altri comparti emissivi

L'area circostante la Centrale, per un raggio di diversi chilometri, è pianeggiante ed è interessata dalle emissioni civili del Comune di Civitavecchia e dei comuni limitrofi (Santa Marinella, Monte Romano, Tolfa, Tarquinia, Allumiere). La popolazione di tali comuni è pari a circa 98 000 abitanti (Tabella 5).

Tabella 5. Popolazione residente comunale nel 2017 (fonte ISTAT)

Comune	Prov.	Abitanti
Civitavecchia	Roma	51 973
Allumiere	Roma	4 003
Tolfa	Roma	5 077
Santa Marinella	Roma	18 239
Tarquinia	VT	16 307
Monte Romano	VT	2 006
Popolazione totale		97 605

Civitavecchia ospita un porto che si è sviluppato verso le grandi navi di crociera, stante la sua vicinanza a Roma ed all'area archeologica etrusca di Tarquinia. Il porto ha movimentato oltre 10 milioni di tonnellate di merci nel 2017 (fonte ISTAT) ed è un importante porto crocieristico del Mediterraneo con quasi 3 milioni di passeggeri nello stesso anno. Inoltre, l'area di Civitavecchia è interessata dalla strada statale SS1 (Aurelia) proveniente dalla Genova-Livorno che, verso Roma, si allaccia all'autostrada A12. La SS1 e la A12 costituiscono un percorso molto frequentato per il traffico proveniente da Nord. Nei periodi estivi il traffico veicolare aumenta notevolmente a causa di veicoli che raggiungono i siti turistico-balneari costieri e per gli imbarchi sui traghetti per raggiungere le grandi isole. Il traffico leggero è quindi più elevato nei mesi estivi. Nell'area

insistono anche altre attività industriali ed artigianali che contribuiscono all'emissione di inquinanti atmosferici. L'area circostante la Centrale ha inoltre una vocazione agricola che contribuisce ulteriormente all'emissione di inquinanti.

La conoscenza delle fonti e delle loro emissioni è dunque di fondamentale importanza sia per la valutazione della qualità dell'aria sia per l'individuazione delle politiche più adeguate di risanamento ambientale.

L'inventario delle emissioni è lo strumento che si propone di raccogliere tali informazioni mediante la raccolta, aggiornabile, di informazioni e di dati di varia provenienza atti ad individuare le quantità e le tipologie degli inquinanti emessi dalle attività presenti nel territorio in esame.

Nel presente paragrafo è illustrata una sintesi dei più recenti dati di inventario, utilizzati da Arpa Lazio per alimentare i propri sistemi operativi previsionali per le valutazioni di qualità dell'aria sulla Regione, riferito all'anno 2017. Si riportano le emissioni annuali di alcuni inquinanti relative ai 6 Comuni del Comprensorio compresi nell'area di indagine (Civitavecchia, Santa Marinella, Monte Romano, Tolfa, Tarquinia, Allumiere) suddivise per macrosettore.

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

1. **"produzione energetica"**: emissioni dovute ai processi di trasformazione dell'energia;
2. **"combustione non industriale"**: emissioni provenienti da impianti di riscaldamento commerciali ed istituzionali, residenziali ed agricoli stazionari;
3. **"combustione nell'industria"**: emissioni provenienti da impianti riscaldamento di capannoni e stabilimenti e da processi che necessitano la presenza di forni di fusione o cottura dei materiali;
4. **"processi produttivi"**: emissioni legate alla produzione di un determinato bene o materiale;
5. **"estrazione, distribuzione combustibili fossili/geotermico"**: emissioni derivanti da processi di produzione, distribuzione, stoccaggio di combustibile solido, liquido e gassoso e riguarda sia le attività sul territorio che quelle off-shore;
6. **"uso di solventi"**: emissioni derivanti da attività riconducibili all'uso di vernici, allo sgrassaggio alla lavorazione e sintesi dei prodotti chimici, etc.;
7. **"trasporti stradali"**: emissioni (esauste e non) prodotte da automobili, mezzi leggeri e pesanti, motocicli, nei diversi cicli di guida;
8. **"altre sorgenti mobili"**, emissioni derivanti da trasporto ferroviario, mezzi militari, traffico marittimo, aereo, mezzi agricoli, forestali e mezzi industriali;
9. **"trattamento e smaltimento rifiuti"**: emissioni derivanti da attività di incenerimento, spargimento, interrimento di rifiuti, e gli aspetti ad essi collaterali come il trattamento delle acque reflue, il compostaggio, la produzione di biogas, lo spargimento di fanghi, etc;
10. **"agricoltura"**: emissioni legate agli allevamenti, alle attività agricole (con e senza fertilizzanti e/o antiparassitari, pesticidi, diserbanti) ed all'incenerimento di residui effettuato in loco;
11. **"altre sorgenti di emissione ed assorbimenti"**: emissioni derivanti da attività non antropiche quali attività fitologica di piante, arbusti ed erba, fulmini, emissioni spontanee di gas, emissioni dal suolo, vulcani, combustione naturale, etc.

In Tabella 6 e in Figura 1 sono rappresentati i valori assoluti e le percentuali emissive dei diversi macrosettori a livello comunale, che assumono una importanza diversa in base all'inquinante considerato.

Le emissioni di ossidi di azoto risultano dominate dal macrosettore 7 ("Trasporti su strada") per tutti i Comuni considerati (mediamente 66%) eccetto per il comune di Civitavecchia dove emergono i contributi del settore energetico (62%) e portuale (35%).

Nella maggior parte dei comuni il particolato è prodotto quasi completamente (98%) dalla somma dei settori combustione non industriale, trasporto stradale e agricoltura, mentre su Civitavecchia emergono i contributi del settore energetico (27%) e portuale (48%).

Il macrosettore 10, che include tutte le attività legate al comparto agricolo, dagli allevamenti alle colture, produce la quasi totalità delle emissioni di ammoniaca eccetto per Civitavecchia dove compare un contributo significativo (34%) del comparto energetico.

Anche il biossido di zolfo ha le sue sorgenti principali per la maggior parte dei Comuni nel settore della combustione non industriale e trasporto stradale, mentre su Civitavecchia emerge il contributo della produzione energetica. Le emissioni di cui alla Tabella 6 derivano da sorgenti poste a diverse altezze; ad esempio, le emissioni attribuite al traffico veicolare e derivanti dall'impianto ENEL avvengono rispettivamente a livello del suolo ed a diverse centinaia di metri, per cui le concentrazioni degli inquinanti rilevate dalla rete di monitoraggio non sono direttamente relazionabili alle emissioni ma sono il risultato di complessi processi chimico-diffusivi che avvengono in atmosfera.

Tabella 6. Emissioni prodotte nei Comuni del Comprensorio (t/anno) (fonte: Arpa Lazio 2017)

Comune	NOX	PM _{2.5}	PM ₁₀	CO	SO ₂	NM VOC	NH ₃
Allumiere	18.0	22.2	29.3	194.1	0.99	44.7	14.1
Civitavecchia	5430.3	228.7	266.8	2696.8	2114.01	527.0	58.6
Monte Romano	24.5	10.8	23.4	89.1	0.37	21.2	12.0
Santa Marinella	137.3	46.0	63.0	493.3	2.99	136.2	16.8
Tarquinia	155.0	55.7	92.2	570.1	2.22	168.0	126.9
Tolfa	111.6	41.8	64.4	424.6	2.0	94.7	27.3

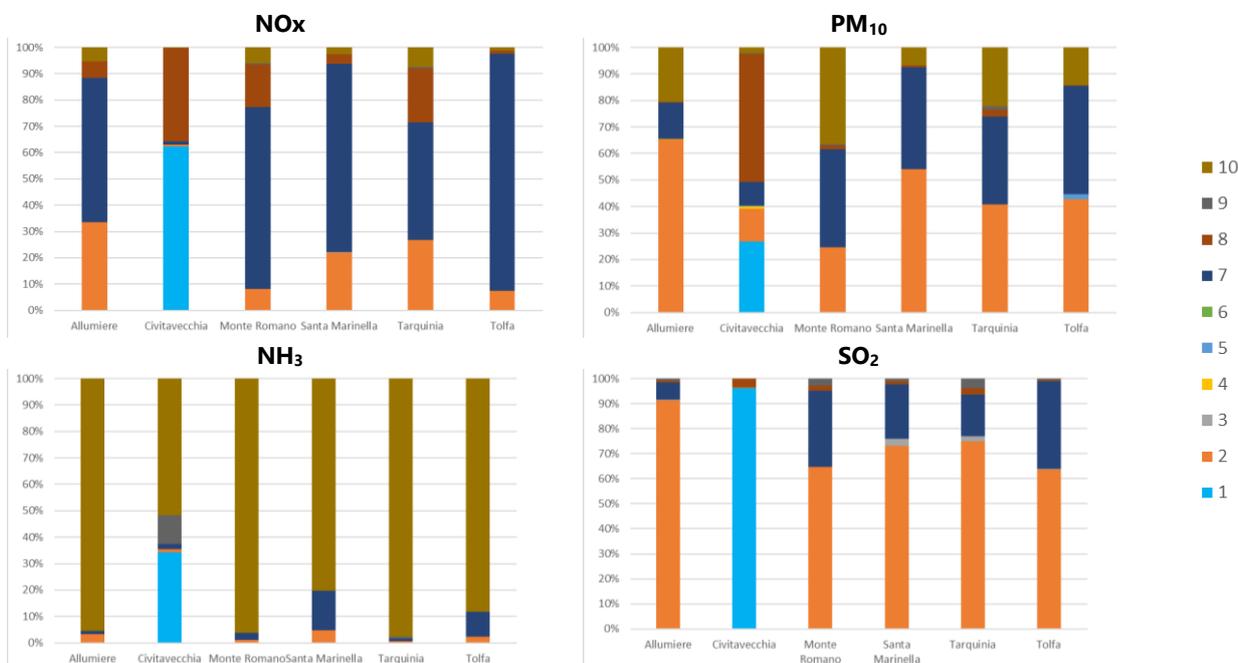


Figura 1. Contributi emissivi % dei 10 macrosettori a livello comunale (fonte: Arpa Lazio 2017).

2 Analisi meteorologica dell'area

Le caratteristiche meteorologiche dell'area interessata dalle emissioni della Centrale ENEL sono ben note, essendo state ampiamente studiate in occasione della pianificazione della Centrale e della valutazione del suo impatto ambientale. In questo rapporto, si mettono in evidenza le principali caratteristiche che contribuiscono, direttamente o indirettamente, alle ricadute al suolo degli inquinanti ed i relativi livelli di concentrazione. Queste informazioni sono molto utili per la previsione delle aree di ricaduta delle emissioni mediante l'applicazione di modelli di simulazione nei quali i parametri meteorologici giocano un ruolo fondamentale. In Appendice A vengono descritti i risultati di un'indagine realizzata dal Consorzio e CNR ISAC iniziata nel maggio 2015 e che, dopo alcune interruzioni, è proseguita dal novembre 2015 all'agosto 2016 presso la Riserva delle Saline di Tarquinia, situata sulla costa tirrenica e distante circa 10 km dalla Centrale. In questo sito, il CNR ha mantenuto operativo un sistema di monitoraggio di parametri meteorologici molto avanzato mediante il quale sono stati rilevati in continuo i parametri meteo e micrometeorologici che forniscono informazioni importanti relative allo sviluppo temporale e spaziale della circolazione di brezza nella zona di confine tra il mare e la superficie terrestre. Nel paragrafo seguente viene presentata l'analisi delle misure meteorologiche effettuate presso la Centrale nel corso del 2017

2.1 Analisi delle misure effettuate presso la Centrale

Presso la Centrale ENEL TVN sono installati strumenti per la misura di parametri meteorologici, fondamentali nella determinazione della dispersione dei pennacchi emessi dalle varie sorgenti al suo interno. La Figura 2 mostra la rosa dei venti annuale rappresentativa dei dati misurati a un'altezza di 10 m per l'anno 2017. I dati confermano quindi le caratteristiche anemologiche tipiche dell'area di Civitavecchia, con venti prevalenti da NE derivanti dalle brezze di terra e da S derivanti da una componente sinottica. Per i venti provenienti dai quadranti occidentali, il contributo è quello della brezza di mare.

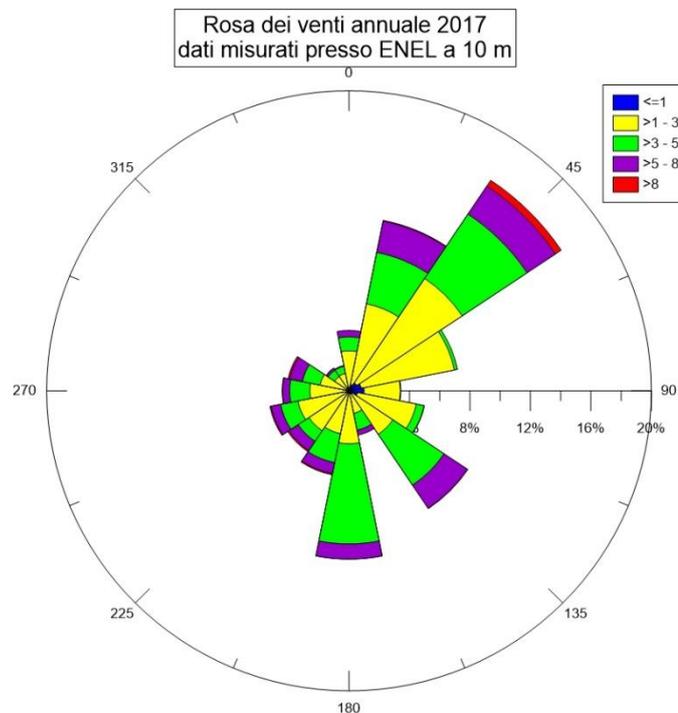


Figura 2. Rosa dei venti annuale rappresentativa dei dati misurati presso la Centrale ENEL TVN a un'altezza di 10 m per l'anno 2017

Le rose dei venti relative alle ore diurne e notturne (Figura 3) evidenziano una marcata prevalenza dei venti provenienti da NE durante le ore notturne. Questo fenomeno dipende dalla tipica circolazione della brezza di monte, caratterizzata da masse d'aria più fredde che scendono lungo i pendii durante la notte. Durante il giorno, invece, si registra un aumento della componente di vento proveniente da W, legata alla brezza di mare, col vento che soffia dal mare verso la terra.

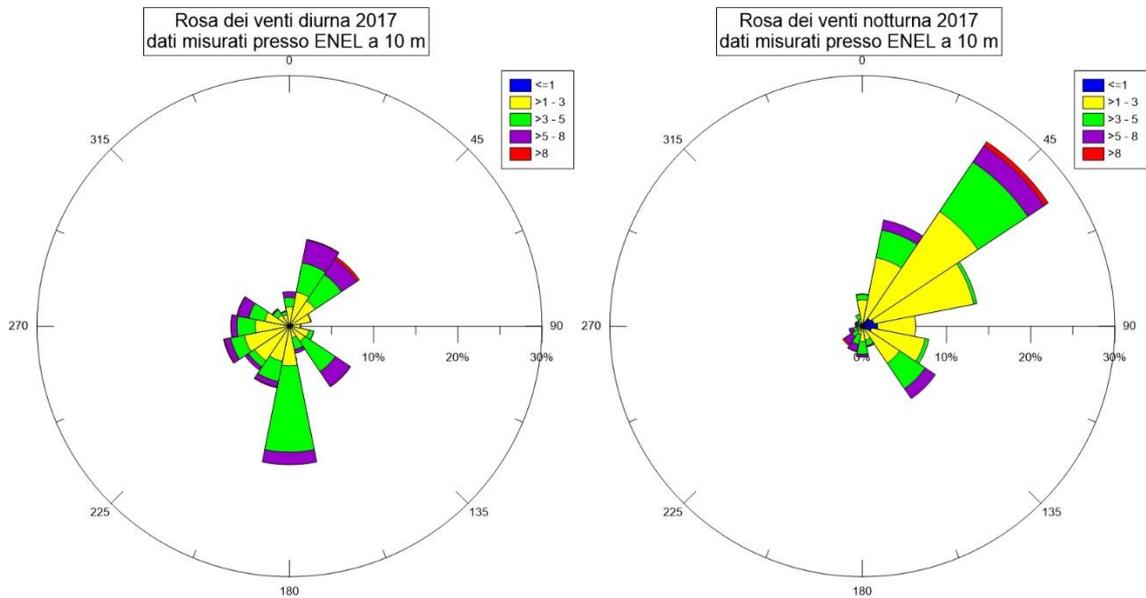


Figura 3. Rosa dei venti diurna (a sinistra) e notturna (a destra) rappresentative dei dati misurati presso la Centrale ENEL TVN a un'altezza di 10 m per l'anno 2017

La Figura 4 fornisce infine una rappresentazione dei dati misurati a una quota di 120 m per l'intero anno 2017. Quello che si nota è che su base annuale le direzioni di provenienza non subiscono variazioni significative rispetto a quelle al suolo. Tuttavia, si registra un incremento nella velocità del vento, che passa da una media annuale di circa 3 m/s a 10 m di altezza a una media annuale di circa 7 m/s a 120 m.

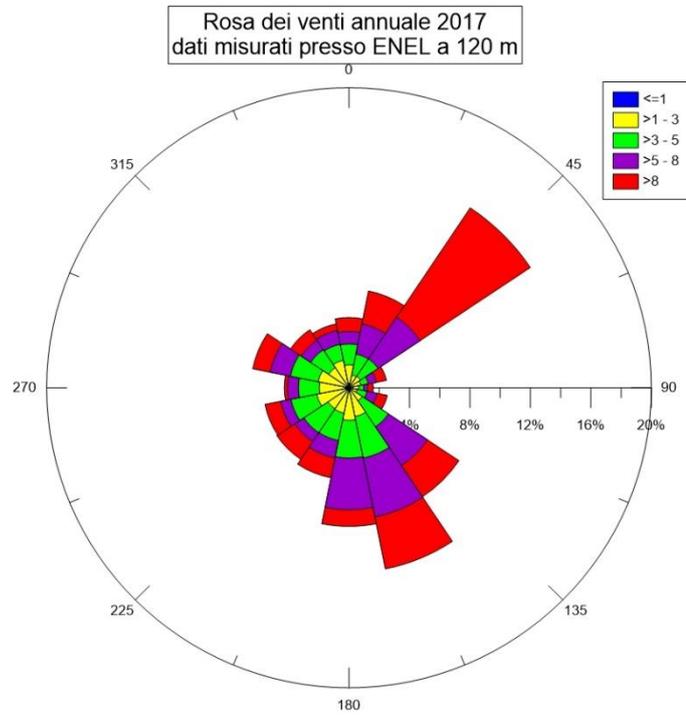


Figura 4. Rosa dei venti annuale rappresentativa dei dati misurati presso la Centrale ENEL TVN a un'altezza di 120 m per l'anno 2017

3 Limiti e standard di qualità dell'aria

Al fine di valutare nel dettaglio il possibile impatto ambientale delle sorgenti di inquinamento atmosferico, è necessario riferirsi ai valori limite ed ai valori guida previsti dalla legislazione vigente. Attualmente, la materia è regolata dal Dlgs 155/2010 che recepisce la Direttiva 2008/50/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 21 maggio 2008, relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa. La Direttiva, all'allegato IX, riporta i valori limite per la protezione della salute umana da adottarsi in tutto il territorio dell'Unione che sono stati quindi recepiti dal Decreto Ministeriale 155/2010 (Tabella 7). Tali limiti sono stati sviluppati tenendo conto dei risultati di indagini effettuate dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), e della possibilità tecnica di raggiungere tali limiti nel territorio dell'unione.

La Direttiva ha contribuito in modo notevole a migliorare la qualità dell'aria nelle aree urbane, industriali e nelle aree ove le caratteristiche orografiche e/o meteorologiche (es. bacino padano) favoriscono l'accumulo degli inquinanti nei bassi strati dell'atmosfera. Dalla data di pubblicazione della Direttiva, si è avuto tuttavia un notevole sviluppo della conoscenza dell'impatto degli inquinanti sulla salute. Da vari studi è, infatti, emerso che le concentrazioni al di sotto delle quali non si osservano effetti misurabili sulla salute, non sono coerenti con alcuni limiti tuttora in vigore.

Il Dlgs 155/2010 stabilisce inoltre che le stazioni di monitoraggio della qualità dell'aria devono garantire una disponibilità minima dei dati pari al 90% su base annua. In altre parole, le stazioni di monitoraggio devono essere operative e fornire dati utili almeno 90% del tempo durante l'anno. Questo requisito è essenziale per assicurare che i dati sulla qualità dell'aria siano completi e rappresentativi, permettendo una corretta valutazione della situazione ambientale e la gestione delle politiche pubbliche relative alla protezione della salute e salvaguardia dell'ambiente.

In questo rapporto tecnico, i valori d'inquinamento atmosferico riscontrati nell'area d'interesse sono stati confrontati con i valori limite introdotti dal Dlgs 155/2010 relativamente ai seguenti inquinanti: PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, O₃ e SO₂.

Tabella 7. Valori limite secondo il Dlgs 155 /2010

Inquinante	Limite	Periodo di mediazione	Limite	Superamenti in un anno
PM ₁₀ (µg/m ³)	Valore limite sulle 24 ore per la protezione della salute umana	Media giornaliera	50 µg/m ³	massimo 35
	Valore limite annuale per la protezione della salute umana	anno civile	40 µg/m ³	
PM _{2.5} (µg/m ³)	Valore limite annuale per la protezione della salute umana	anno civile	25 µg/m ³	
NO ₂ (µg/m ³)	Valore limite orario per la protezione della salute umana	Media massima oraria	200 µg/m ³	massimo 18
	Valore limite annuale per la protezione della salute umana	anno civile	40 µg/m ³	
O ₃ (µg/m ³)	Soglia d'informazione	Media massima oraria	180 µg/m ³	
	Soglia d'allarme	Media massima oraria	240 µg/m ³	
	Valore obiettivo	Media massima giornaliera calcolata su 8 ore	120 µg/m ³	≤ 25 volte/anno come media su 3 anni
	Valore obiettivo per la protezione della vegetazione	AOT40, calcolato sulla base dei valori di 1 ora da maggio a luglio	18000 µg/m ³ come media su 5 anni	
CO (mg/m ³)	Valore limite orario per la protezione della salute umana	Media massima giornaliera calcolata su 8 ore	10 mg/m ³	
SO ₂ (µg/m ³)	Valore limite giornaliero	Media giornaliera	125 µg/m ³	massimo 3
	Valore limite su 1 ora per la protezione della salute umana	Media massima oraria	350 µg/m ³	massimo 24
Benzene (µg/m ³)	Valore limite su base annua	anno civile	5 µg/m ³	
Benzo(a)pirene (ng/m ³)	Concentrazione presente nella frazione PM10 del materiale particolato, calcolato come media su un anno civile	anno civile	1 ng/m ³	
Metalli pesanti (ng/m ³)	Arsenico	anno civile	6 ng/m ³	
	Cadmio	anno civile	5 ng/m ³	
	Nichel	anno civile	20 ng/m ³	
	Piombo	anno civile	0,5 µg/m ³	

4 Rete di monitoraggio della qualità dell'aria

La rete di rilevamento della qualità dell'aria costituisce uno strumento essenziale per la valutazione dell'impatto determinato dalle emissioni in atmosfera delle sorgenti che insistono nell'area e per la verifica del rispetto dei limiti stabiliti dalla legislazione. La rete di monitoraggio della qualità dell'aria della Regione Lazio è costituita da 55 stazioni di monitoraggio di cui 46 incluse nel Programma di Valutazione della qualità dell'aria regionale approvato con D.G.R. n. 478 del 2016. Le centraline non incluse nel Programma di Valutazione sono: Boncompagni per l'Agglomerato di Roma e le restanti 8 in zona Litoranea: Civitavecchia Morandi, Civitavecchia Porto, Fiumicino Porto, Aurelia, San Gordiano, Santa Marinella, Allumiere e Tolfa (queste ultime 5 appartenenti alla rete "ex-ENEL").

Nel 2017 la rete di monitoraggio attorno alla Centrale ENEL TVN è costituita dalle stazioni fisse riportate nella Tabella 8 con le informazioni di posizione e inquinanti monitorati. Sono riportate sia le stazioni della rete di ARPA Lazio (Civitavecchia: via Togliatti e Porto) sia quelle storicamente d'interesse per le emissioni della Centrale ENEL gestite inizialmente dal Consorzio e quindi da ARPA dal 2016. La dislocazione delle stazioni di misura sul territorio regionale viene riportata in Figura 5.

Tabella 8. Dati anagrafici della rete di monitoraggio. Anno 2017.

ID	Nome stazione	Tipo	Elev	X	Y	NO ₂	O ₃	PM ₁₀	PM _{2,5}	SO ₂	CO	C ₆ H ₆
101	Aurelia	S	72	730375	4669000	•		•				
102	S. Agostino	S	16	726625	4671350	•	•	•				
103	Fiumaretta	I/U	1	730375	4665075	•		•	•	•	•	•
104	Faro	F/R	174	732900	4664650	•		•	•	•		
105	Campo Oro	F/R	74	733250	4663000	•		•	•	•		
106	S. Gordiano	F/R	87	733100	4661900	•		•				
107	Allumiere via Aldo Moro	I/R	467	739850	4671700	•	•	•	•	•		
108	Tolfa	I/R	576	742654	4671059	•		•				
111	Monte Romano	I/R	286	738750	4683875	•		•				
14	Allumiere via del Faggeto	F/R	532	740326	4671399	•	•	•		•		
15	via Togliatti (CV)	U	26	731771	4663747	•	•	•		•	•	
60	Porto (CV)	U	6	730578	4664294	•		•		•		
83	Villa Albani (CV)	T/U	34	731401	4664590	•	•	•				
84	Via Morandi (CV)	U	22	732117	4663222	•	•					
85	Via Roma (CV)	T/U	21	731176	4664008	•					•	

Legenda: tipologia: S= suburbana; I= industriale; U= urbana; F= Fondo urbano; R= rurale, T= traffico. L'elevazione è in metri s.l.m. X, Y coordinate in metri nella la proiezione universale trasversa di Mercatore (UTM) zona 32. In grassetto sono evidenziate le centraline non incluse nel Programma di Valutazione.

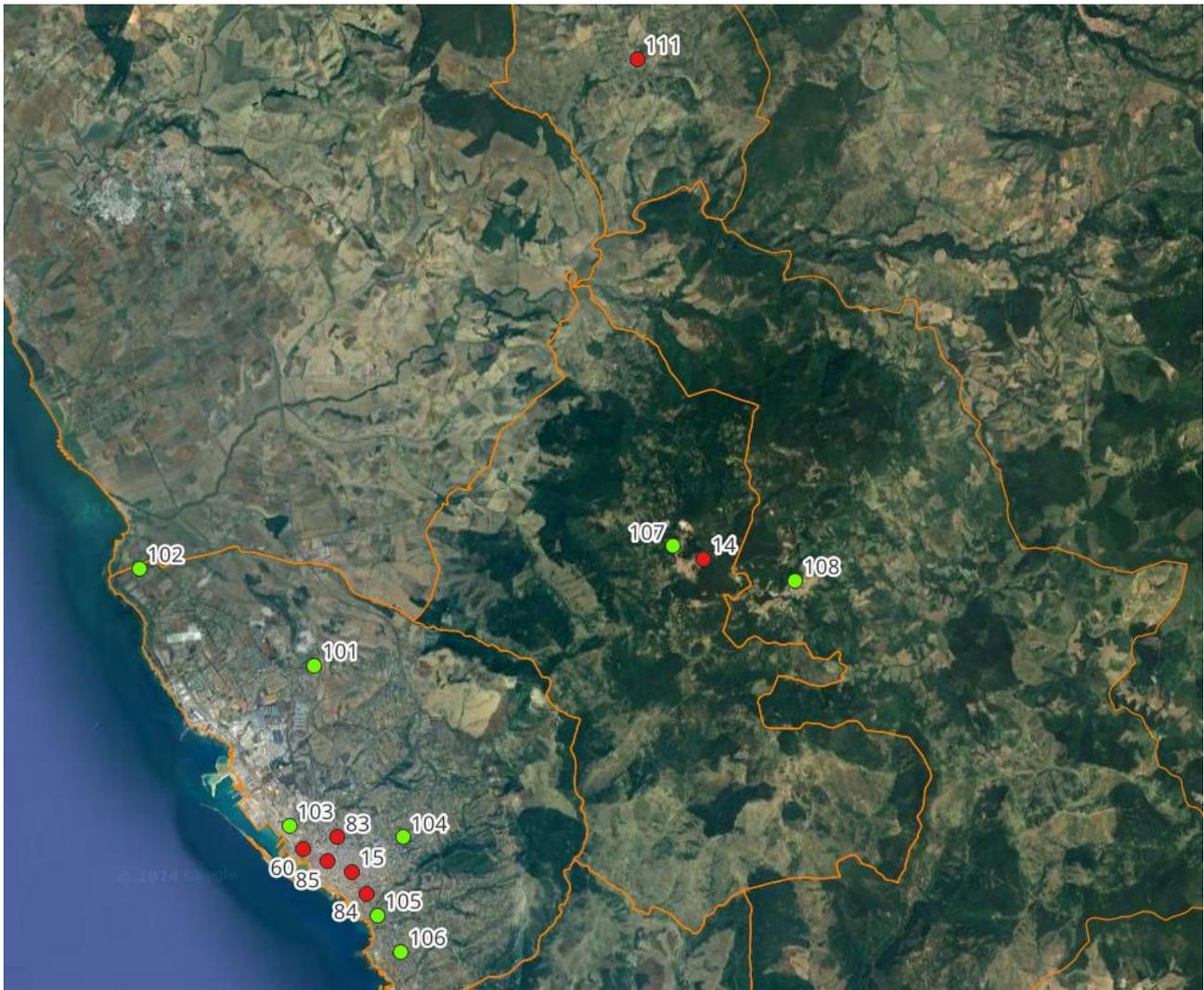
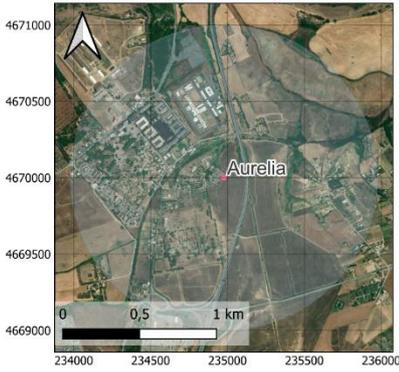


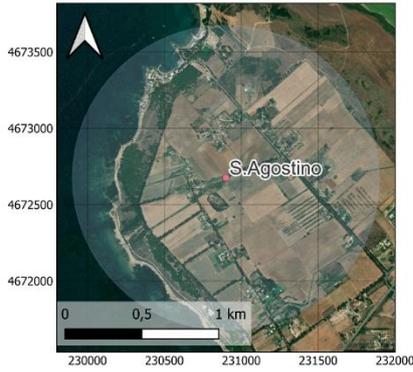
Figura 5. Distribuzione spaziale della rete di monitoraggio nell'area di studio (in verde le stazioni ARPA Ex-ENEL, in rosso le stazioni appartenenti alle reti traffico-porto).

La rete copre quindi un territorio che si estende per due provincie della Regione Lazio: Roma e Viterbo. L'aerofotogramma in figura mostra la dislocazione, sul territorio di interesse, delle postazioni. La rete di rilevamento si estende quindi fino ad una distanza di circa 22 km (Monte Romano) dal punto di emissione (Civitavecchia). Nella figura seguente viene presentata, utilizzando immagini da satellite, la collocazione ambientale e territoriale delle centraline considerando un'area di raggio pari a 1 km attorno alla stazione di misura.

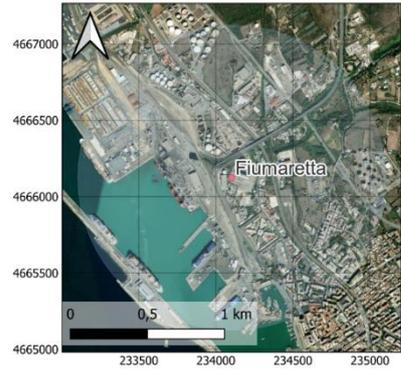
Aurelia



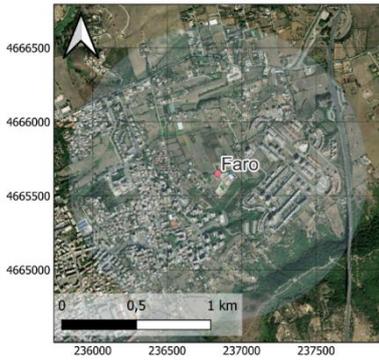
S. Agostino



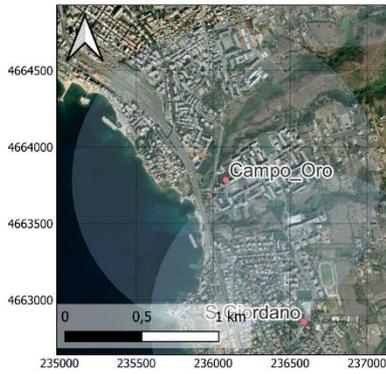
Fiumaretta



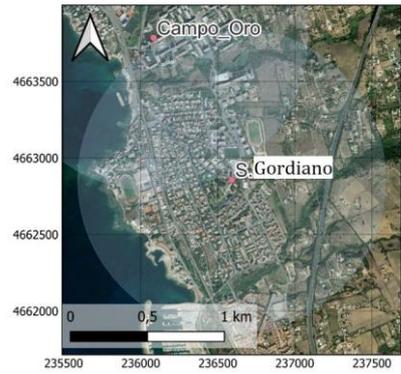
Faro



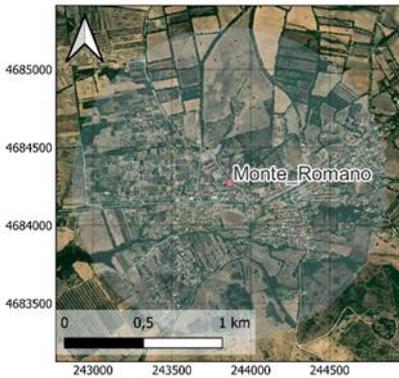
Campo Oro



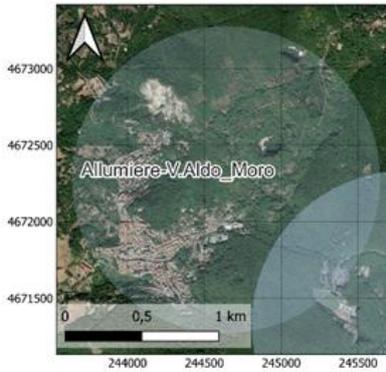
S. Gordiano



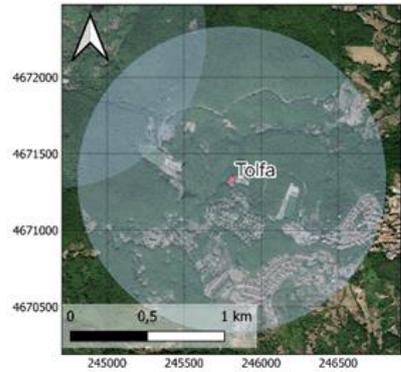
Monte Romano



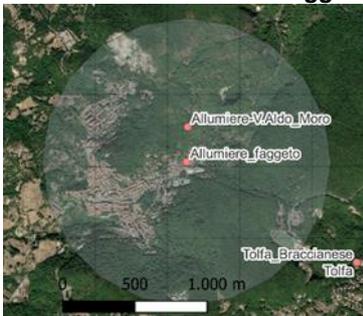
Allumiere – V. Aldo Moro



Tofia



Allumiere via del Faggeto



Civitavecchia via Togliatti



Civitavecchia via Roma



Civitavecchia Villa Albani

Civitavecchia via Morandi

Civitavecchia Porto



Figura 6. Dettaglio delle centraline ottenuto mediante utilizzo di immagini satellitari. Il dettaglio è ingrandito per mostrare l'area circostante a ciascuna centralina entro un raggio di 1 km (Map data ©2015 Google).

Da tali immagini emergono le seguenti informazioni relative alle diverse centraline:

- **Aurelia:** copre principalmente un'area suburbana, con una combinazione di edifici residenziali e aree agricole circostanti, caratterizzata dalla presenza di infrastrutture stradali primarie;
- **S. Agostino:** risulta localizzata prevalentemente in una zona rurale e costiera, con una copertura che include campi agricoli e aree naturali adiacenti alla costa;
- **Fiumaretta:** si trova in un'area mista, con una significativa presenza industriale dovuta alla vicinanza con un porto e zone di traffico commerciale. Include anche alcune aree urbane periferiche;
- **Faro:** copre una zona principalmente urbana, con edifici residenziali densi e infrastrutture stradali. La zona è rappresentativa di una tipica area periferica cittadina;
- **Campo Oro:** posta in un contesto urbano vicino alla costa; la copertura spaziale mostra un mix di aree residenziali e strade principali;
- **S. Gordiano:** copre un'area costiera con un mix di territorio urbano e rurale, comprendente sia edifici residenziali che spazi verdi e agricoli;
- **Allumiere – via Aldo Moro e via del Faggeto; Tolfa:** coprono prevalentemente aree boschive e montane, essendo localizzate in zone collinari a un'elevazione superiore rispetto alle altre stazioni. La loro posizione in contesti rurali e naturali le distingue dalle altre;
- **Monte Romano:** è situata in una zona rurale e agricola, con una vasta copertura di campi coltivati e aree naturali circostanti;
- **Civitavecchia - via Togliatti, via Roma, Villa Albani e via Morandi** sono poste all'interno dell'area urbana;
- **Civitavecchia Porto:** all'interno dell'area urbana in prossimità dell'area portuale.

4.1 Metodi di misura

I metodi di misura impiegati per gli inquinanti considerati nel presente rapporto, conformi alla normativa tecnica, sono riportati nella seguente tabella.

Tabella 9. Metodi di misura in accordo con la normativa vigente

Inquinante	Standard di riferimento UNI	Metodo di misura	Incertezza espansa (%)
SO ₂	EN14212:2012	Misura per fluorescenza ultravioletta	15
NO e NO ₂	EN14211:2012	Misura per chemiluminescenza	25
PM ₁₀ e PM _{2.5}	EN2341:2014 EN16450:2017	Misura di concentrazione di massa	25
O ₃	EN14625:2012	Misura per fotometria ultravioletta	15

Per quasi tutti gli inquinanti il limite minimo di rilevabilità è di circa $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e quindi gli analizzatori impiegati nella rete, conformi alle norme di cui alla tabella, sono da considerarsi adeguati al monitoraggio in continuo. Il limite minimo di rilevabilità non è l'unico parametro importante in quanto, per ogni tipo di analizzatore, deve essere valutata anche l'incertezza espansa delle misure. Il parametro tiene conto non solo dell'incertezza intrinseca dello strumento, ma anche dalle condizioni di funzionamento. L'incertezza espansa è stabilita nell'Allegato I del Dlgs 155. La conformità degli strumenti di misura agli obiettivi di qualità previsti, viene dimostrata attraverso misure di calibrazione che vengono effettuate con regolarità utilizzando miscele standard.

Il Decreto autorizzativo della Centrale ENEL impone che tutte le strumentazioni impiegate nelle reti di rilevamento siano certificate conformemente agli standard di cui sopra. L'equivalenza al metodo standard dimostra che la qualità delle misure è conforme a quanto richiesto dal decreto stesso all'allegato I (Obiettivi di qualità dei dati). Da questo punto di vista, i dati forniti dalla rete sono da considerarsi in linea con la qualità richiesta dalla legislazione vigente.

5 Misure di concentrazione e verifica degli standard

In questo capitolo si riportano i valori osservati degli inquinanti relativi alle misure della rete di qualità dell'aria per l'anno 2017. Sono state elaborate le statistiche normate per tutte le stazioni della rete di ARPA Lazio (Tabella 15) I valori sono confrontati con i valori limite previsti dal Dlgs 155/2010 che derivano dalla Direttiva 2008/50/CE e che sono i valori limiti vigenti nell'annualità riferita a questo rapporto tecnico.

Inoltre, i dati rilevati vengono messi a confronto con quelli stimati dalle emissioni della Centrale al fine di valutare, nel limite del possibile, il contributo della Centrale rispetto a quello delle altre sorgenti di inquinamento.

Le valutazioni di cui sopra sono eseguite per i seguenti inquinanti:

- Materiale Particolato PM₁₀ e PM_{2.5};
- Biossido di azoto;
- Ozono;
- Biossido di zolfo.

Relativamente alle stazioni citate nel capitolo "rete di rilevamento", la tabella successiva mostra i valori di concentrazione degli inquinanti osservati nell'annualità 2017 ed elaborati secondo quanto richiesto dalla normativa vigente. Durante l'anno 2017 non sono stati registrati superamenti degli standard di qualità prescritti per gli inquinanti considerati.

Tabella 10. Standard di qualità calcolati dalle misure rilevate alle stazioni (in grassetto superamenti del valore limite).

Centralina	ID	PM ₁₀		PM _{2.5}	NO ₂	SO ₂	O ₃	
		Media annuale	(> 50)	Media annuale	Media annuale	Media annuale	AOT40	(>120)
Aurelia	101	12.7	0	-	8.6	-	-	-
S. Agostino	102	15.9	1	-	7.4	-	6172	16
Fiumaretta	103	17.9	0	9.8	17.8	1.6	-	-
Faro	104	17.4	1	8.5	10.3	0.7	-	-
Campo Oro	105	17.9	0	8.9	12.3	1.1	-	-
S. Gordiano	106	19.3	0	-	14.1	-	-	-
Allumiere - via Aldo Moro	107	15.9	0	9.1	7.0	0.7	5345	0
Tolfa	108	14.1	0	-	8.2	-	-	-
Monte Romano	111	16.5	0	-	5.5	-	-	-
Allumiere - via del Faggeto	014	10.9	0	-	8.5	1.0	16403	26
CV - via Togliatti	015	21.8	2	-	21.1	0.5	14640	22
CV - Porto	060	20.4	1	-	26.1	1.1	-	-
CV - Villa Albani	083	21.6	2	-	26.1	-	3493	2
CV - via Morandi	084	-	-	-	28.7	-	2817	0
CV - via Roma	085	-	-	-	39.4	-	-	-

Legenda: Le concentrazioni medie annuali sono espresse in µg/m³; "-": dato non rilevato; PM₁₀ (>50): Numero di superamenti del valore di 50 µg/m³ per la media giornaliera (consentiti 35 superamenti); O₃ (>120): Numero di superamenti del valore limite di 120 µg/m³ calcolato come massimo giornaliero della media mobile su 8 ore (valore obiettivo, massimo 25 superamenti); O₃ (AOT40): Sommatoria delle differenze tra le concentrazioni orarie di ozono superiori a 80 µg/m³ e 80 rilevate da maggio a luglio in orario 8-20 (valore limite 18000 µg/(m³ h) come media su 5 anni).

5.1 Particolato PM10

5.1.1 Sintesi dei dati

Nella tabella seguente sono riportate le elaborazioni conformi a quanto previsto dal Dlgs 155/2010. Al fine di evidenziare possibili eventi di inquinamento naturale (es. Polveri sahariane) nella tabella viene riportato il giorno corrispondente al valore massimo registrato nel corso del 2017.

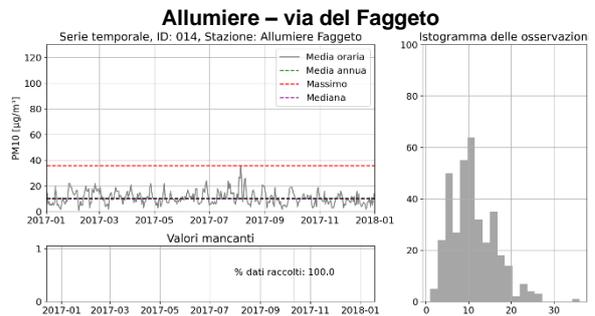
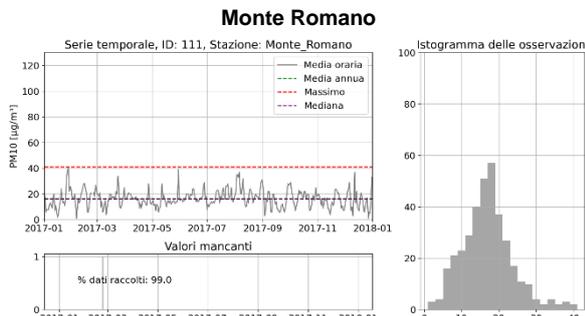
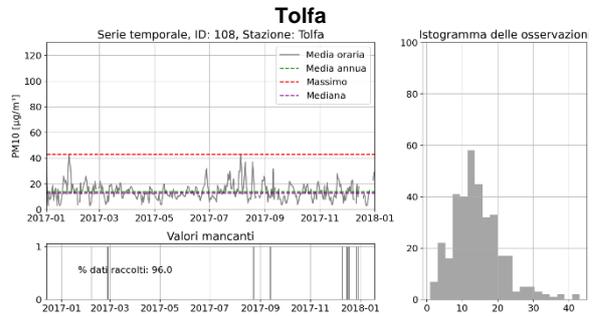
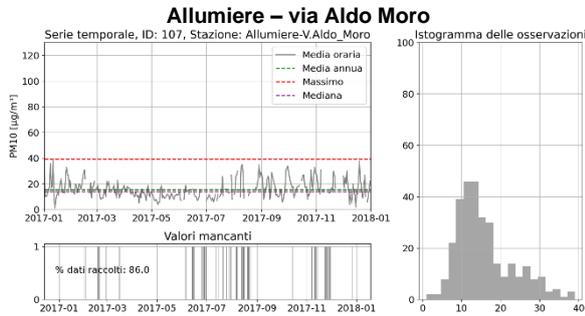
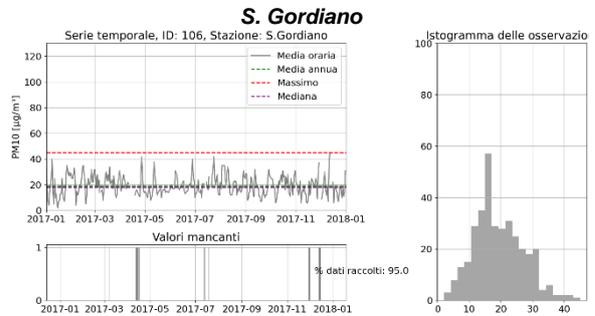
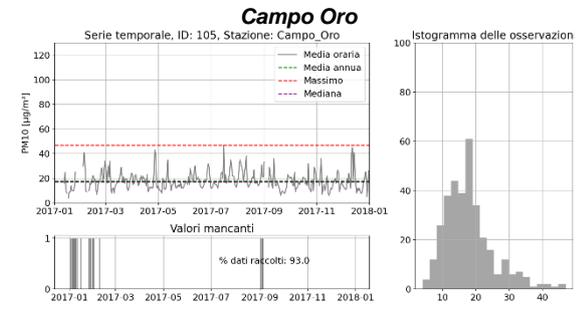
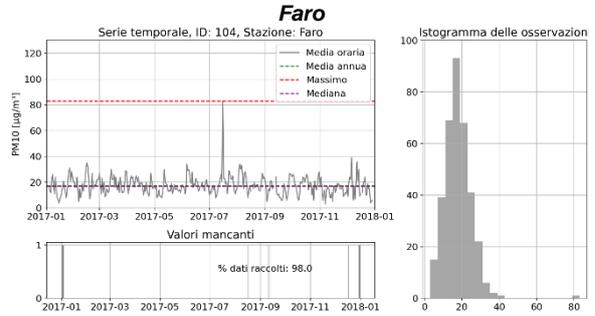
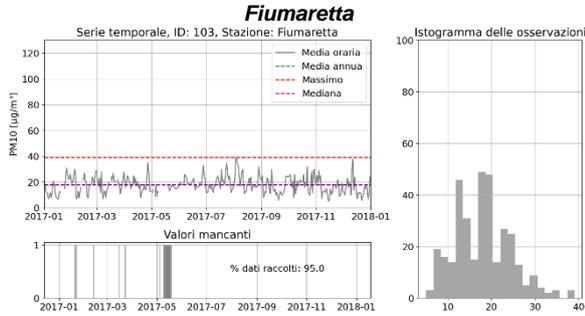
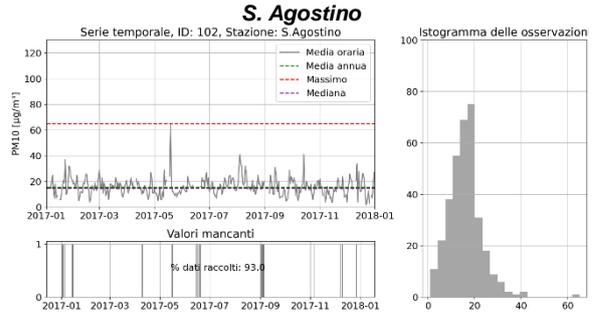
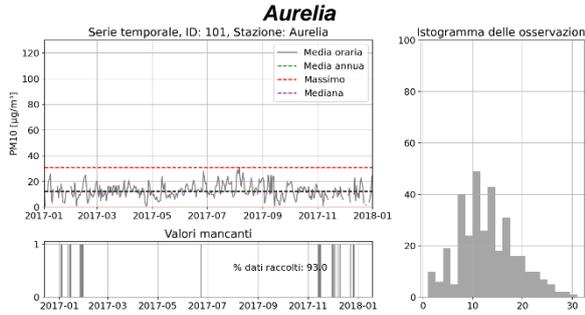
Tabella 11. Standard di legge relativi al PM₁₀ [µg/m³].

Stazione	ID	% Dati Raccolti	Max media giornaliera	Data valore Max	Media annua	(>50)
Aurelia	101	93.2%	31	06/08/2017	12.7	0
S. Agostino	102	93.2%	65	19/05/2017	15.9	1
Fiumaretta	103	94.8%	39	04/08/2017	17.9	0
Faro	104	97.8%	83	16/07/2017	17.4	1
Campo Oro	105	92.9%	47	16/07/2017	17.9	0
S. Gordiano	106	95.3%	45	12/12/2017	19.3	0
Allumiere – via Aldo Moro	107	86.0%	39	01/01/2017	15.9	0
Tolfa	108	96.2%	43	26/01/2017	14.1	0
Monte Romano	111	99.5%	41	28/01/2017	16.5	0
Allumiere - via del Faggeto	14	99.7%	36	05/08/2017	10.9	0
CV - via Togliatti	15	97.3%	120	16/07/2017	21.8	2
CV – Porto	60	99.7%	59	12/12/2017	20.4	1
CV - Villa Albani	83	99.5%	93	16/07/2017	21.6	2

Ad eccezione della stazione Allumiere – via Aldo Moro (86%), le stazioni hanno raccolto più del 90% dei dati disponibili. I valori massimi rilevati da diverse centraline il giorno 16 luglio sono stati causati da vasti incendi su più fronti che hanno interessato la zona nord di Civitavecchia, in località Molacce, nei pressi dell'uscita autostradale di Civitavecchia nord (<https://www.romatoday.it/cronaca/incendio-civitavecchia-16-luglio-2017.html>). Al di fuori dell'area urbana di Civitavecchia i valori medi annui presentano valori compresi tra 10.9 e 19.3 µg/m³; i valori più elevati si riscontrano nelle stazioni più a ridosso dell'area urbana di Civitavecchia (S. Gordiano, Campo Oro e Fiumaretta) mentre quelli inferiori risultano nelle centraline più distanti dalle sorgenti urbane locali e dalla centrale ENEL (Aurelia e Allumiere – via Aldo Moro e via del Faggeto). Nell'area urbana di Civitavecchia i valori medi sono più elevati e sono compresi tra 20.4 e 21.8 µg/m³. In generale il PM₁₀ non presenta concentrazioni medie annue preoccupanti e tutte ampiamente al di sotto del limite di 40 µg/m³. La legislazione ammette il superamento della media giornaliera di 50 µg/m³ che, su base annuale, dovrebbe essere limitato a non più di 35 eventi. Il numero massimo di superamenti registrati è stato pari a due e quindi ampiamente al di sotto del limite stabilito dalla legislazione vigente.

5.1.2 Andamento temporale

Nella figura seguente (Figura 7) sono presentati, per i diversi siti di misura, i grafici che riportano le serie temporali delle concentrazioni giornaliere di PM₁₀, percentuale di dati disponibili e l'istogramma delle osservazioni.



Civitavecchia – via Togliatti

Civitavecchia – Porto

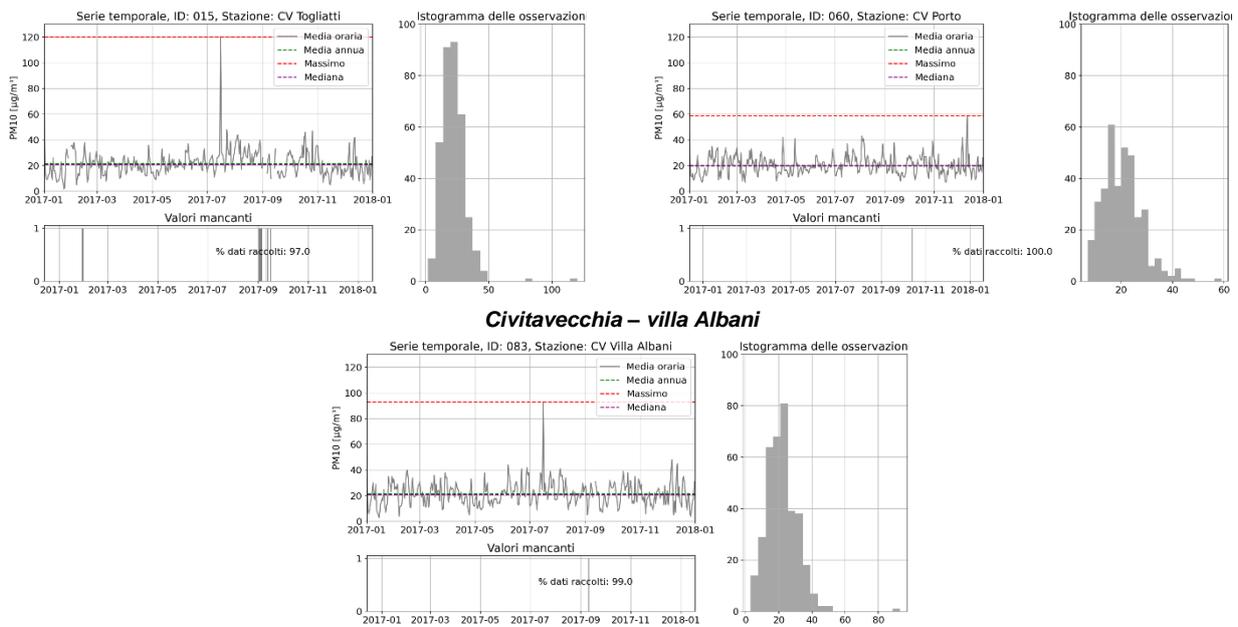
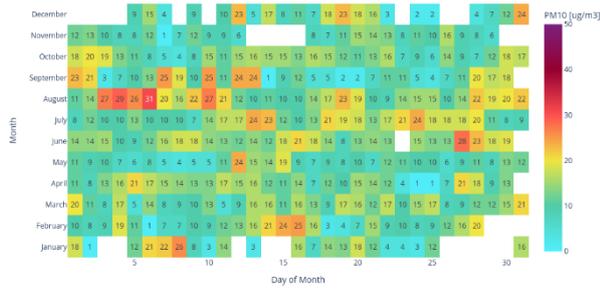


Figura 7. PM₁₀, anno 2017: serie temporale delle concentrazioni giornaliere (alto sx); percentuale di dati raccolti (basso sx); istogramma delle osservazioni (dx).

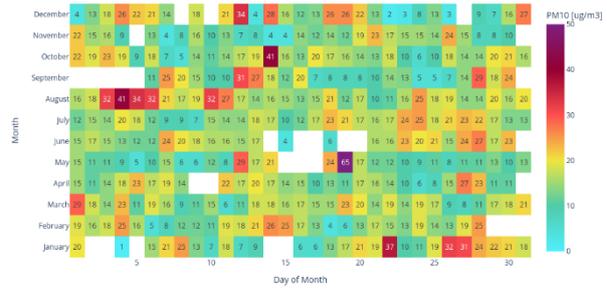
Al fine di evidenziare eventi di inquinamento registrati contemporaneamente da più stazioni e quindi potenzialmente attribuibili ad eventi di trasporto di polveri a lunga distanza (es. polveri Sahariane), nella figura seguente (Figura 8) sono presentati i grafici “*heatmap*” delle osservazioni giornaliere dei livelli di PM₁₀ (in µg/m³) rilevate nel 2017. Mediante tale rappresentazione, i valori di PM₁₀ sono rappresentati cromaticamente, con colori che variano dal blu (valori bassi) al rosso (valori elevati); il colore viola indica le giornate nelle quali si è verificato un superamento del valore di 50 µg/m³. Le colonne rappresentano i giorni del mese e le righe i mesi dell'anno.

L’esame di tale figura evidenzia un aspetto significativo dell’inquinamento da polveri PM₁₀: le concentrazioni massime interessano quasi uniformemente tutte le stazioni. Nella prossima tabella (Tabella 12) sono riportate le concentrazioni massime osservate (superiori a 30 µg/m³) in alcuni episodi occorsi nel 2017. Questi episodi sono riscontrati simultaneamente in tutte le stazioni e sono quindi indice di inquinamento diffuso non riconducibile ad una specifica sorgente. Infatti, tali episodi sono tipici di eventi di trasporto di sabbia proveniente dal Sahara in presenza di particolari condizioni meteorologiche.

Aurelia



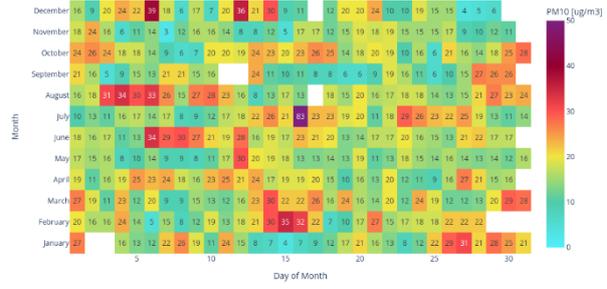
S. Agostino



Fiumaretta



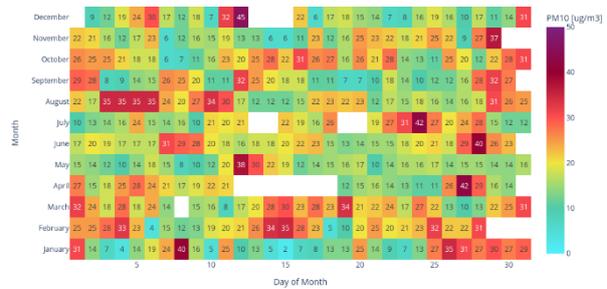
Faro



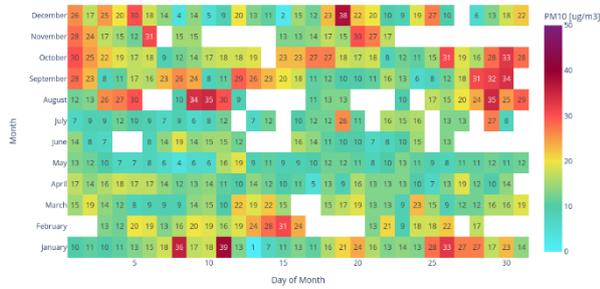
Campo Oro



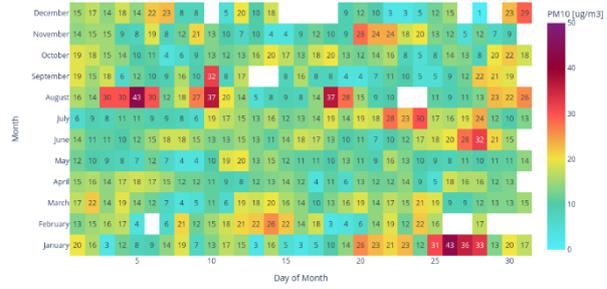
S. Gordano



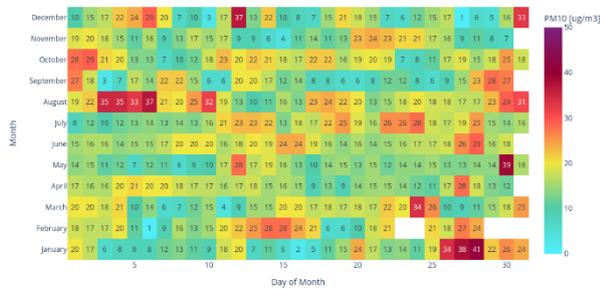
Allumiere – via Aldo Moro



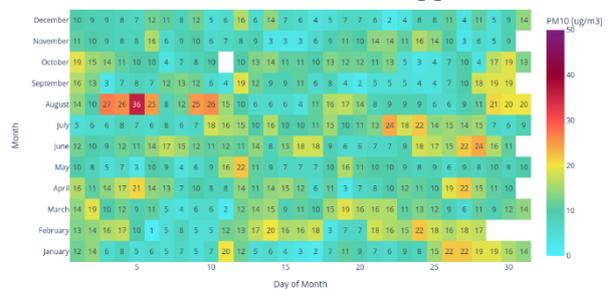
Tolfa



Monte Romano



Allumiere – via del Faggeto



Civitavecchia – via Togliatti

Civitavecchia – Porto



Civitavecchia – villa Albani



Figura 8. Grafici “heatmap” delle concentrazioni giornaliere di PM₁₀ [µg/m³].

Tabella 12. Concentrazioni massime osservate (medie giornaliere) di PM₁₀ [µg/m³]

Giorno	Conc. Max	Stazione
14 e 15 febbraio	35	San Gordiano
28 febbraio e 1° marzo	32	San Gordiano
27 e 28 aprile	43	Faro
12 maggio	38	San Gordiano
28 giugno	40	Faro
23 e 24 luglio	42	San Gordiano
3-6 agosto	35	San Gordiano
9-11 agosto	35	Allumiere
29-31 agosto	35	Allumiere
29 ottobre e 1° novembre	31	S. Gordiano
6 novembre	36	Campo Oro
20 novembre	30	Allumiere
5-6 dicembre	39	Faro
11-12 dicembre	45	S. Gordiano
19 dicembre	38	Allumiere

5.1.3 Episodi di inquinamento naturale (Polveri sahariane)

La metodologia proposta, per l'identificazione degli episodi di avvezione di polveri sahariane, prevede l'utilizzo dei campi prodotti dal modello di rianalisi europeo di CAMS che includono il contributo delle polveri sahariane ai livelli di PM₁₀. Successivamente, si procede alla valutazione della presenza di picchi di concentrazione nella rete di monitoraggio del comprensorio di Civitavecchia nelle date individuate. Purtroppo, non è stato possibile applicare tale metodologia perché tali campi non sono disponibili per l'anno 2017. Dallo studio prodotto durante il progetto

DIAPASON (Barnaba et al., 2017)¹ emerge tuttavia che, durante tale anno, sono stati registrati il minor numero di episodi di intrusioni di polveri naturali provenienti dal Sahara.

¹ Barnaba F, Bolignano A, Di Liberto L, Morelli M, Lucarelli F, Nava S, Perrino C, Canepari S, Basart S, Costabile F, Dionisi D, Ciampichetti S, Sozzi R, Gobbi GP. Desert dust contribution to PM10 loads in Italy: Methods and recommendations addressing the relevant European Commission Guidelines in support to the Air Quality Directive 2008/50. *Atmospheric Environment*, 161, 2017, 288-305. ISSN 1352-2310..

5.2 Particolato PM_{2.5}

5.2.1 Sintesi dei dati

Nella tabella seguente sono riportate le elaborazioni conformi a quanto previsto dal Dlgs 155/2010.

Tabella 13. Standard di legge relativi al PM_{2.5} [µg/m³].

Stazione	ID	% Dati Raccolti	Max media giornaliera	Data valore Max	Media annua
Fiumaretta	103	96%	54	16/3/2017	9.8
Faro	104	94%	72	16/7/2017	8.5
Campo Oro	105	92%	34	16/7/2017	8.9
Allumiere - via Aldo Moro	107	95%	37	1/1/2017	9.1

Analogamente a quanto osservato per il PM₁₀, la frazione fine non registra concentrazioni medie annue particolarmente elevate. Le concentrazioni medie annue risultano inferiori a 10 µg/m³, con una variabilità pari a circa il 10%, e quindi ampiamente al di sotto del valore limite del Dlgs 155 pari a 25 µg/m³. Si riscontra inoltre che per i siti di Faro e Campo Oro il massimo registrato corrisponde allo stesso giorno in cui si è registrato il valore massimo di PM₁₀, concludendo che tali picchi sono influenzati da eventi comuni, in questo caso l'episodio incendiario delle Molacce.

Nelle quattro stazioni ove sono disponibili misure sia di PM₁₀ sia di PM_{2.5} le misure dei due parametri risultano essere coerenti ed il rapporto PM_{2.5}/PM₁₀ è compreso tra il 48 ed il 57%.

Nella seguente Figura 9 sono rappresentati i rapporti PM_{2.5}/PM₁₀ per le quattro stazioni in cui sono disponibili misure di entrambi i parametri. In tale figura non vengono considerate osservazioni per le quali tale rapporto è maggiore ad uno. Il rapporto più elevato tra i due parametri si osserva nella stazione di Allumiere - Aldo Moro, situata a 467 m s.l.m. in una zona montuosa e distante dal mare. Tale risultato è attribuibile a diversi fattori quali il minor contributo dei composti derivanti sia dal sale marino sia dal traffico veicolare. Tale risultato è confermato dalla figura seguente (Figura 10), nella quale viene mostrata la ripartizione tra la frazione fine (PM_{2.5}) e grossolana (PM_{2.5-10}) nelle quattro centraline, che evidenzia valori simili per la frazione fine ed il minore contributo di quella grossolana nella stazione di Allumiere.

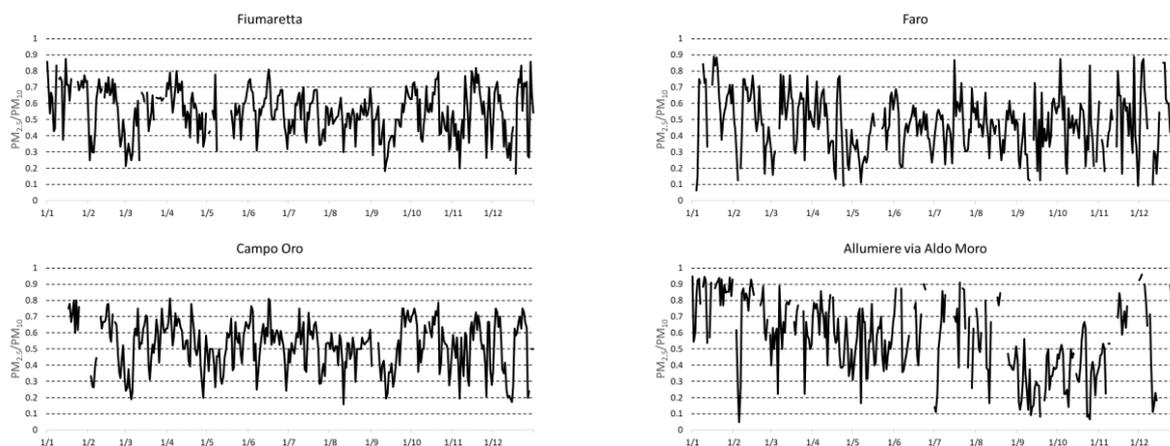


Figura 9. PM_{2.5}, anno 2017: serie temporale dei valori giornalieri del rapporto PM_{2.5}/PM₁₀.

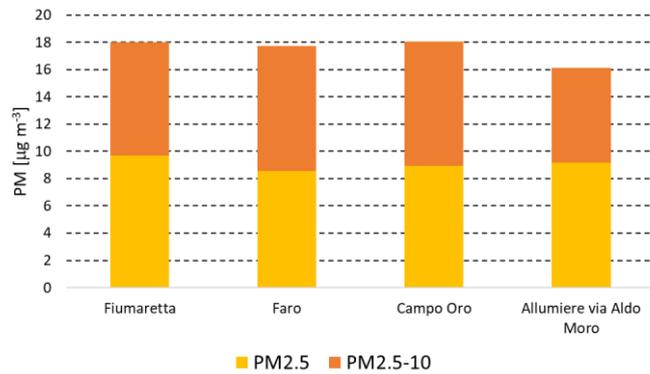


Figura 10. Ripartizione tra la frazione fine PM_{2.5} e grossolana PM_{2.5-10}

Le serie temporali correlate di istogrammi delle osservazioni e al grafico dei dati mancanti per ciascun sito sono riportate nella figura seguente (Figura 11). L'andamento temporale del PM_{2.5} non mostra variazioni significative nel tempo; le concentrazioni sono pressoché costanti e vi è un aumento nei mesi estivi, probabilmente a causa della più intensa attività fotochimica che determina la formazione aerosol secondario che è maggiormente presente nella frazione fine del particolato.

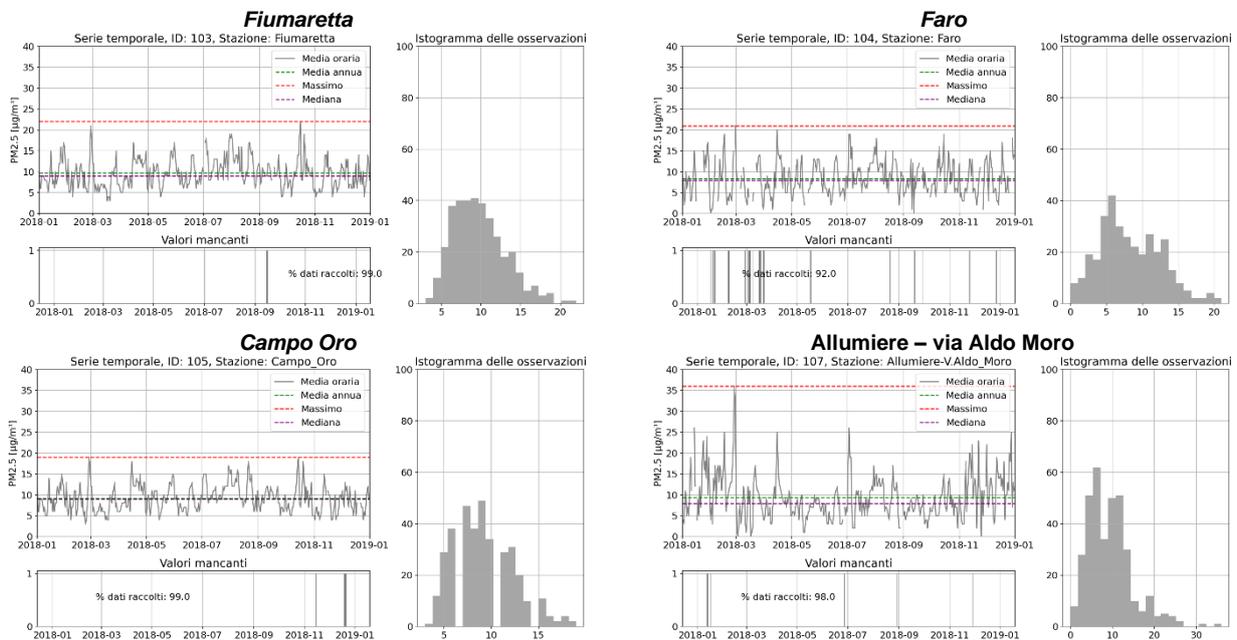


Figura 11. PM_{2.5}, anno 2017: serie temporale delle concentrazioni giornaliere (alto sx); percentuale di dati raccolti (basso sx); istogramma delle osservazioni (dx).

5.3 Biossido di azoto

5.3.1 Sintesi dei dati

I dati di NO₂ sono sintetizzati nella tabella seguente che riporta le elaborazioni conformi a quanto previsto dal Dlgs 155/2010.

Tabella 14. Standard di legge relativi a NO₂ [µg/m³].

Stazione	ID	% Dati Raccolti	Media annua
Aurelia	101	96.6%	8.6
S. Agostino	102	93.5%	7.4
Fiumaretta	103	92.5%	17.8
Faro	104	98.4%	10.3
Campo Oro	105	95.7%	12.3
S. Gordiano	106	99.0%	14.1
Allumiere - via Aldo Moro	107	95.7%	7.0
Tolfa	108	96.2%	8.2
Monte Romano	111	97.2%	5.5
Allumiere - via del Faggeto	14	87.6%	8.5
CV - via Togliatti	15	92.0%	21.1
CV - Porto	60	95.7%	26.1
CV - Villa Albani	83	94.0%	26.1
CV - via Morandi	84	92.4%	28.7
CV - via Roma	85	95.3%	39.4

I dati di biossido di azoto si riferiscono a quindici stazioni di campionamento e mostrano valori compresi tra 5.5 e 39.4 µg/m³ dove il livello minimo è registrato a Monte Romano, posta in area remota, mentre i valori più elevati sono quelli registrati nella stazione di via Roma situata all'interno del Comune di Civitavecchia.

Ciò è in linea con la natura di questo inquinante che è prodotto da una grande variabilità di sorgenti di NO a livello del suolo che insieme contribuiscono alla formazione di NO₂. In particolare, la sorgente più intensa al livello del suolo è quella dovuta a traffico veicolare. La variabilità dei dati è superiore a quella verificata per le componenti nel materiale particolato: il valore medio e la deviazione standard delle concentrazioni misurate sono rispettivamente pari a 16 e 17.8 µg/m³. Ciò non deve meravigliare tenendo conto della variabilità delle sorgenti di emissione del precursore NO e della variabilità dei processi che portano alla formazione ed alla rimozione di NO₂. I dati sono conformi al Dlgs 155 che prevede un limite di 40 µg/m³ quale media annua.

Il secondo limite stabilito per questo inquinante (200 µg/m³ da non superare per più di 24 volte l'anno) non viene superato; e questo per due motivi: valori pari a 200 µg/m³ richiedono la presenza di una grande quantità di ossidanti che, nell'atmosfera ambientale, non sono stati mai riscontrati. Il secondo motivo è legato alla reattività degli ossidanti che non permettono il raggiungimento di concentrazioni elevate. In altri termini, le reazioni radicaliche in queste condizioni si auto estinguono.

5.3.2 Processi chimico-fisici che coinvolgono il biossido di azoto

Con il termine ossidi di azoto (NO_x) si intende la somma dei due ossidi (NO ed NO₂), ossia l'ossido e il biossido di azoto. Poiché la specie NO non comporta problemi per l'ambiente, l'attenzione viene limitata al biossido di azoto che, invece, costituisce uno degli inquinanti più importanti. L'importanza del biossido di azoto in relazione alla salute dei soggetti esposti è testimoniata da

numerosi studi epidemiologici recenti. Questa specie, al pari dell'ozono, è un inquinante secondario. Infatti, esso viene emesso in basse quantità dalle sorgenti di emissione che, invece, emettono grandi quantità di NO. Le principali sorgenti di emissione sono quelle ove si realizzano combustioni; quindi, esse sono costituite da traffico veicolare, riscaldamento domestico ed industrie, ossia da un'ampia variabilità di sorgenti. Reazioni di ossidazione in atmosfera trasformano l'ossido in biossido di azoto. Queste reazioni sono provocate principalmente dall'ozono e da radicali perossido ($R-O_2\bullet$) che vengono anche essi prodotti nel ciclo fotochimico di produzione dell'ozono. Oltre alle reazioni di formazione, le concentrazioni di biossido di azoto sono anche dipendenti dalle reazioni di rimozione. Tra queste, assumono particolare importanza le reazioni con il radicale $OH\bullet$ che trasformano il biossido in acido nitrico che, in presenza di ammoniaca, dà luogo alla formazione di nitrato di ammonio e quindi di particolato inorganico secondario. Questa sorgente di particolato è significativa nei mesi invernali, in quanto nei mesi estivi il nitrato di ammonio si dissocia nuovamente nei suoi precursori.

Le concentrazioni ambientali di biossido di azoto sono dunque il risultato di complessi processi di emissione, formazione e di rimozione che sono strettamente legate alla presenza di perossidi e quindi di inquinamento fotochimico. È però possibile fornire alcune indicazioni di massima circa l'evoluzione di questo inquinante: la sua concentrazione raggiunge valori più elevati quando maggiore è la stabilità atmosferica. Questa condizione si realizza nelle prime ore del mattino e nel tardo pomeriggio; nelle ore centrali della giornata prevalgono invece condizioni di instabilità atmosferica che portano al suolo masse d'aria precedentemente stazionanti in quota. In queste condizioni, la diluizione degli inquinanti porta le concentrazioni di NO_2 ai livelli minimi. Tali condizioni si verificano sia nei mesi invernali che estivi come mostrato nella figura seguente (Figura 12) relativamente alla stazione di S. Gordiano in due giorni rappresentativi di situazioni estive (13 luglio) ed invernali (29 gennaio). Il biossido di azoto presenta due picchi di concentrazione al mattino ed al pomeriggio inoltrato; separati da un intervallo temporale che nei mesi invernali è più ridotto. Ciò è causato dalla presenza di turbolenze verticali che si innescano a causa del riscaldamento della superficie e che trasporta masse d'aria da quote più elevate. Queste masse d'aria non sono inquinate e quindi provocano una riduzione dei livelli di inquinamento. La finestra di riduzione è quindi più elevata nei mesi estivi. Nel tardo pomeriggio, le condizioni di stabilità atmosferica tornano a prevalere con il conseguente aumento della concentrazione di biossido di azoto.

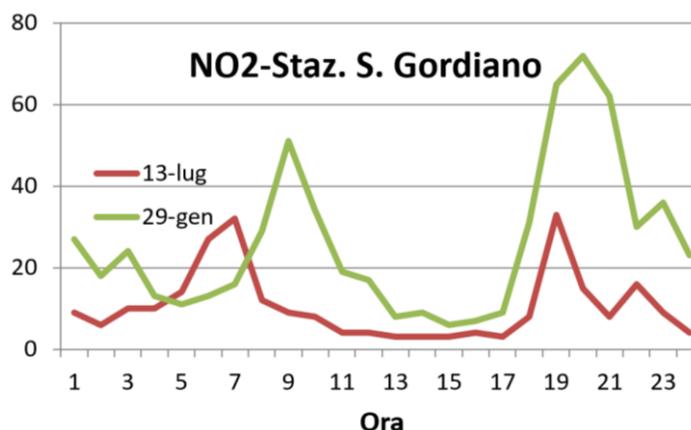


Figura 12. Andamento medio giornaliero di NO_2 [$\mu g/m^3$] in un giorno tipo invernale ed estivo nella stazione S. Gordiano.

Al fine di considerare le complesse reazioni fotochimiche che coinvolgono gli ossidi di azoto e l'ozono (si veda l'Allegato C) viene introdotta una nuova specie, detta "OX" ossidante totale, che è definita come la somma di ozono e biossido di azoto. Questo parametro consente di rappresentare la produzione fotochimica di ozono perché i ratei di produzione/rimozione di tale parametro sono indipendenti dalle reazioni fotochimiche, veloci, che convertono O_3 in NO_2 .

Il grafico successivo (Figura 13) mostra l'andamento delle concentrazioni di NO₂, O₃ ed Ox nella stazione di S. Agostino il 21 luglio. Le concentrazioni di NO₂ e O₃ sono anti-correlate e, nel periodo in cui i livelli di biossido di azoto sono molto bassi, le concentrazioni di ozono mostrano i valori più elevati. È dunque evidente che il trasporto verticale delle masse d'aria porta a livello del suolo concentrazioni rilevanti di ozono.

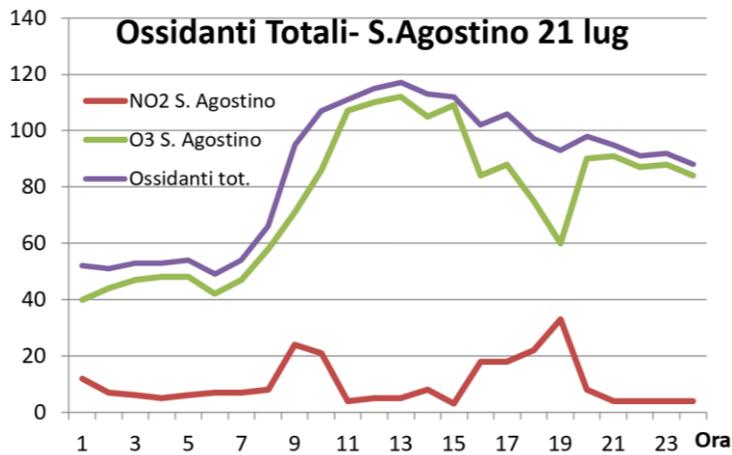
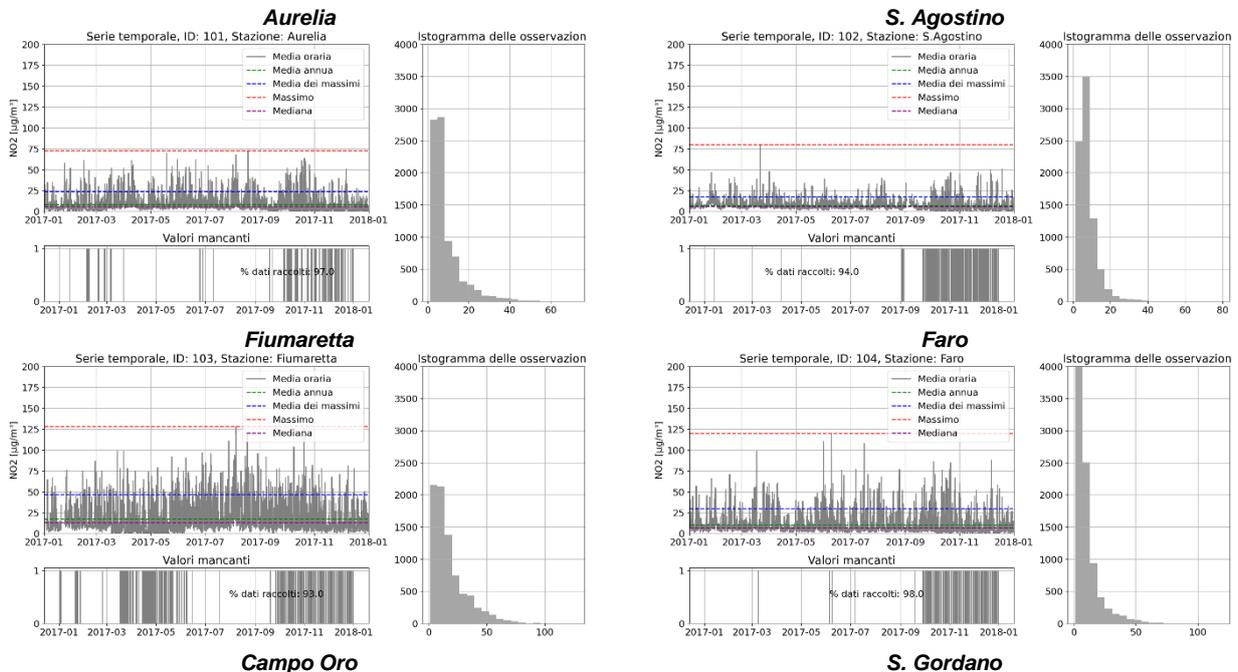
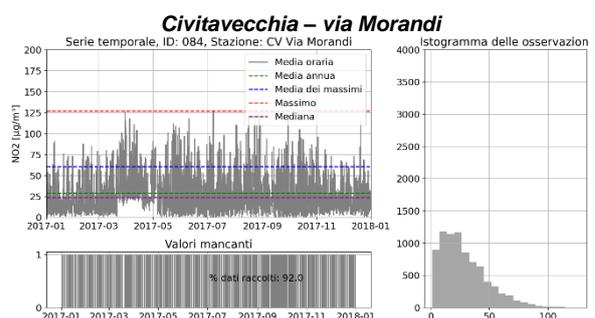
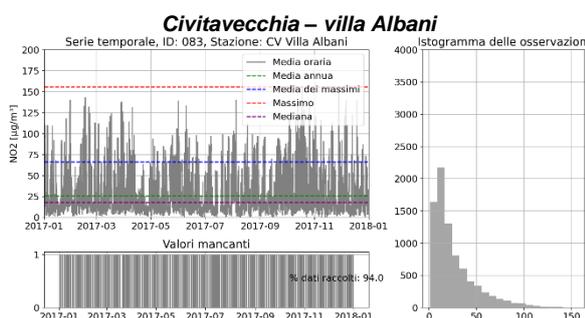
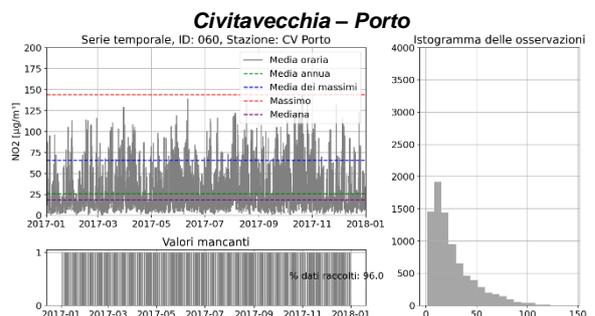
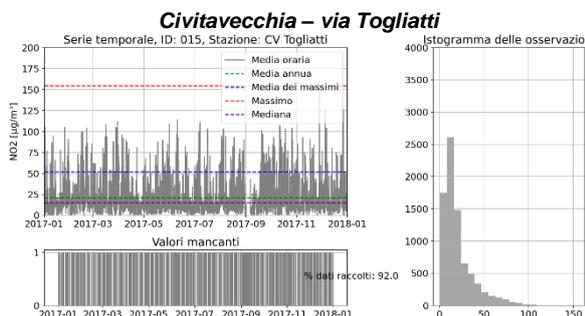
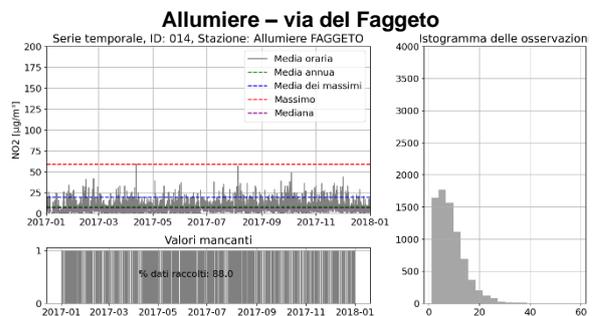
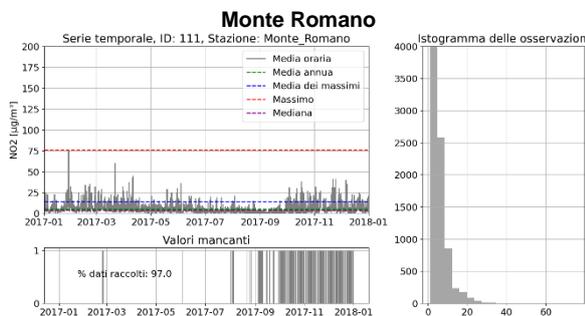
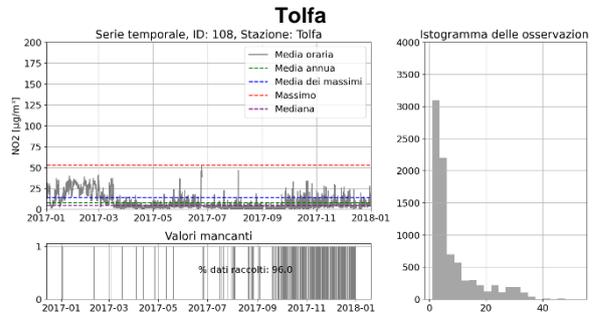
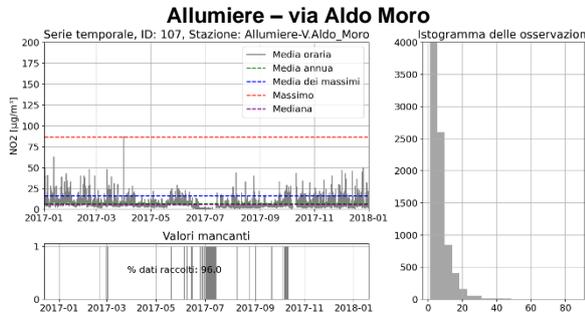
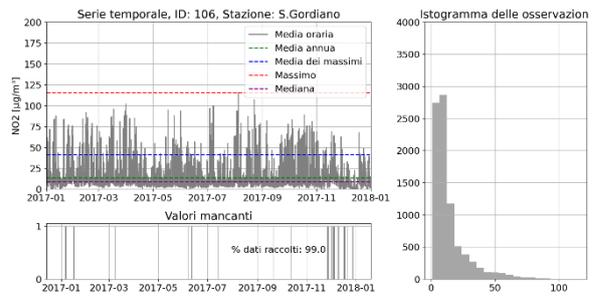
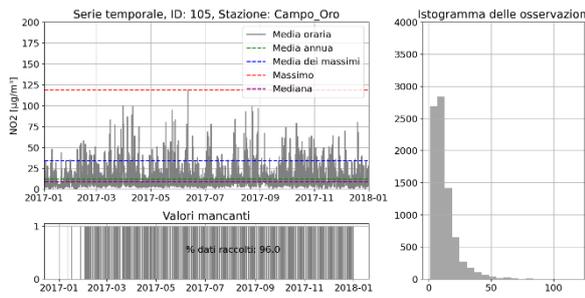


Figura 13. Andamento delle concentrazioni orarie di NO₂, O₃ ed OX (ossidanti totali) nella centralina S. Agostino.

5.3.3 Andamento temporale del biossido di azoto

Nella figura seguente (Figura 14) sono presentate, per i diversi siti di misura, i grafici che riportano le serie temporali delle concentrazioni giornaliere di NO₂, percentuale di dati disponibili e l'istogramma delle osservazioni.





Civitavecchia – via Roma

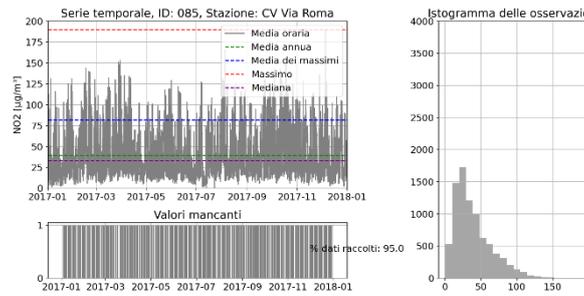


Figura 14. NO₂, anno 2017: serie temporale delle concentrazioni giornaliere (alto sx); percentuale di dati raccolti (basso sx); istogramma delle osservazioni (dx).

Per analizzare ulteriormente gli andamenti temporali mostrati nella precedente figura, è stata condotta un’analisi di decomposizione delle serie temporali sull’intera finestra temporale del 2017. Tale analisi si basa sul seguente modello di decomposizione:

$$y_t = T_t + S_{t24} + S_{t168} + R_t$$

ove y_t è la serie temporale di partenza, T_t , S_{t24} , S_{t168} e R_t indicano le componenti di tendenza (trend) rispettivamente annuale, stagionale giornaliera, settimanale ($t168=24 \cdot 7$) e residua.

Nella figura seguente (Figura 15) viene presentata, per la centralina S. Gordiano, l’analisi di decomposizione della serie temporale riferita al mese di marzo. Si nota una variazione del trend con concentrazioni più elevate nelle settimane centrali, attribuibili a fattori climatici come la temperatura e la variazione dell’altezza dello strato limite. Infatti, se si osserva l’andamento dell’altezza di mescolamento durante la stessa finestra temporale, si nota che nelle settimane centrali si riscontra un valore più basso e di conseguenza a concentrazioni più alte. L’andamento dell’altezza di mescolamento ricavata dalle re-analisi di clima del modello ERA5² è riportato in Figura 16.

Il comportamento giornaliero evidenzia i due tipici picchi di traffico legati alle attività lavorative e scolastiche in ambito urbano, mentre la componente settimanale mostra un calo delle concentrazioni durante il fine settimana, con un andamento regolare nei giorni feriali.

Nella figura seguente (Figura 17) si riporta la corrispondente analisi di decomposizione della serie temporale riferita al mese di marzo per la stazione di Allumiere – via Aldo Moro a carattere rurale. L’andamento del trend è simile a quello ricavato per la stazione di S. Gordiano e conferma da un lato la dipendenza dall’altezza di mescolamento e dall’altro il rilevante contributo del traffico veicolare (si veda la componente settimanale).

^{2 2} Il modello ERA5 è il quinto modello della serie di modelli "ERA" (European Reanalysis), prodotti dal Centro Europeo per le Previsioni Meteorologiche a Medio Periodo (ECMWF). ERA5 è stato sviluppato per fornire una rappresentazione globale e dettagliata delle condizioni atmosferiche a partire dal 1950 fino al presente. È una re-analisi climatica che utilizza i dati storici di osservazione (stazioni meteorologiche, satellitari e altre fonti) per "ricostruire", il più accuratamente possibile, le condizioni atmosferiche passate.

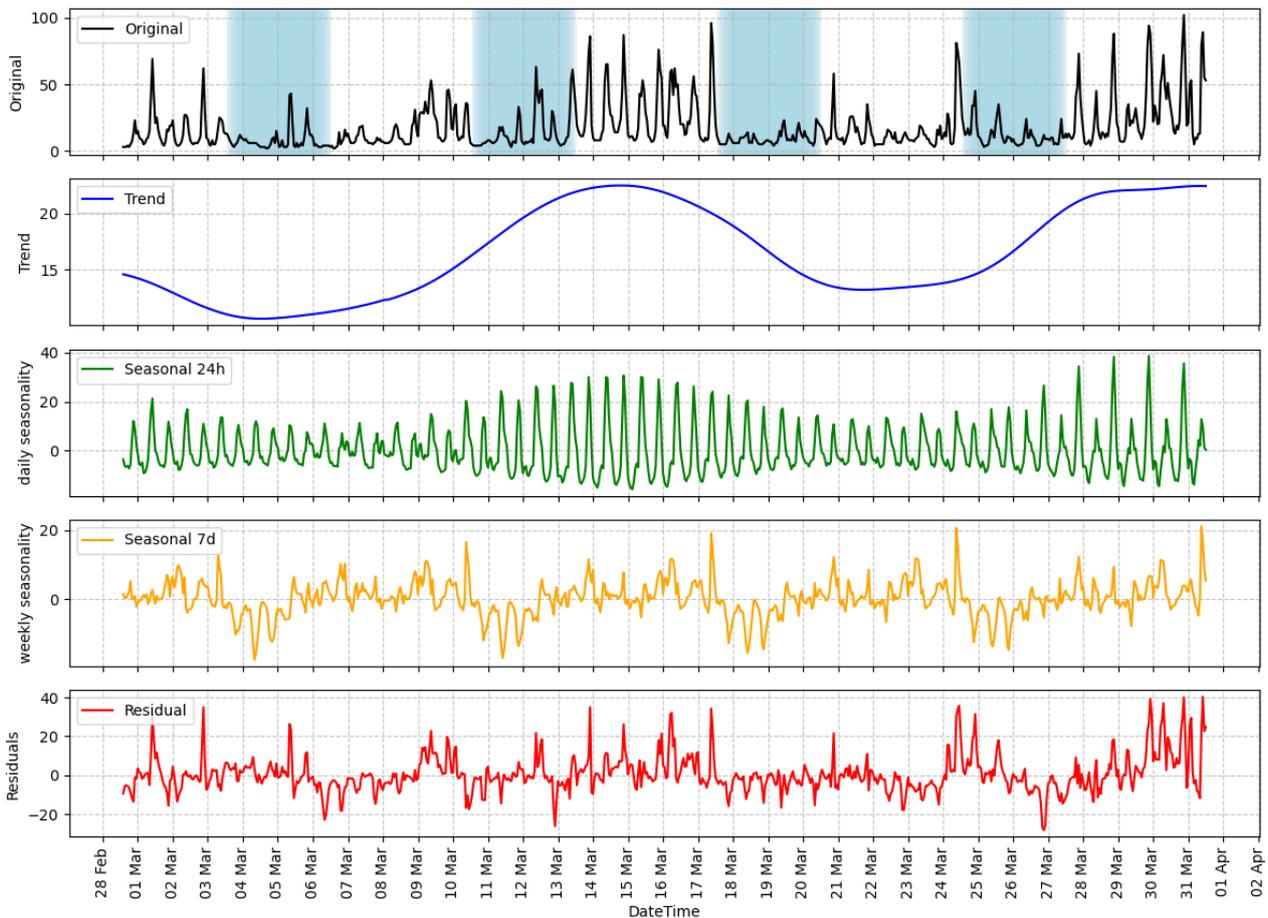


Figura 15. Stazione S. Gordiano, marzo 2017: decomposizione della serie temporale di NO₂; le aree in blu corrispondono ai fine settimana.

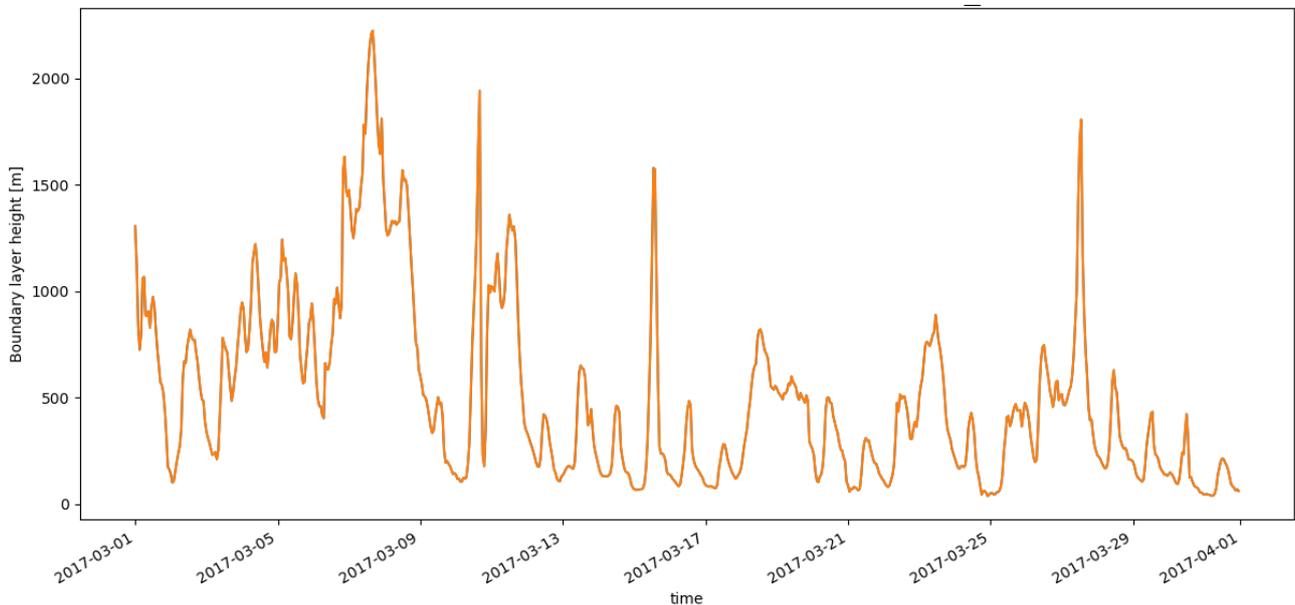


Figura 16. Profilo altezza di rimescolamento (Boundary layer height) estratto dalle re-analisi di ERA5 a risoluzione 0.1 ° X 0.1°, marzo 2017.

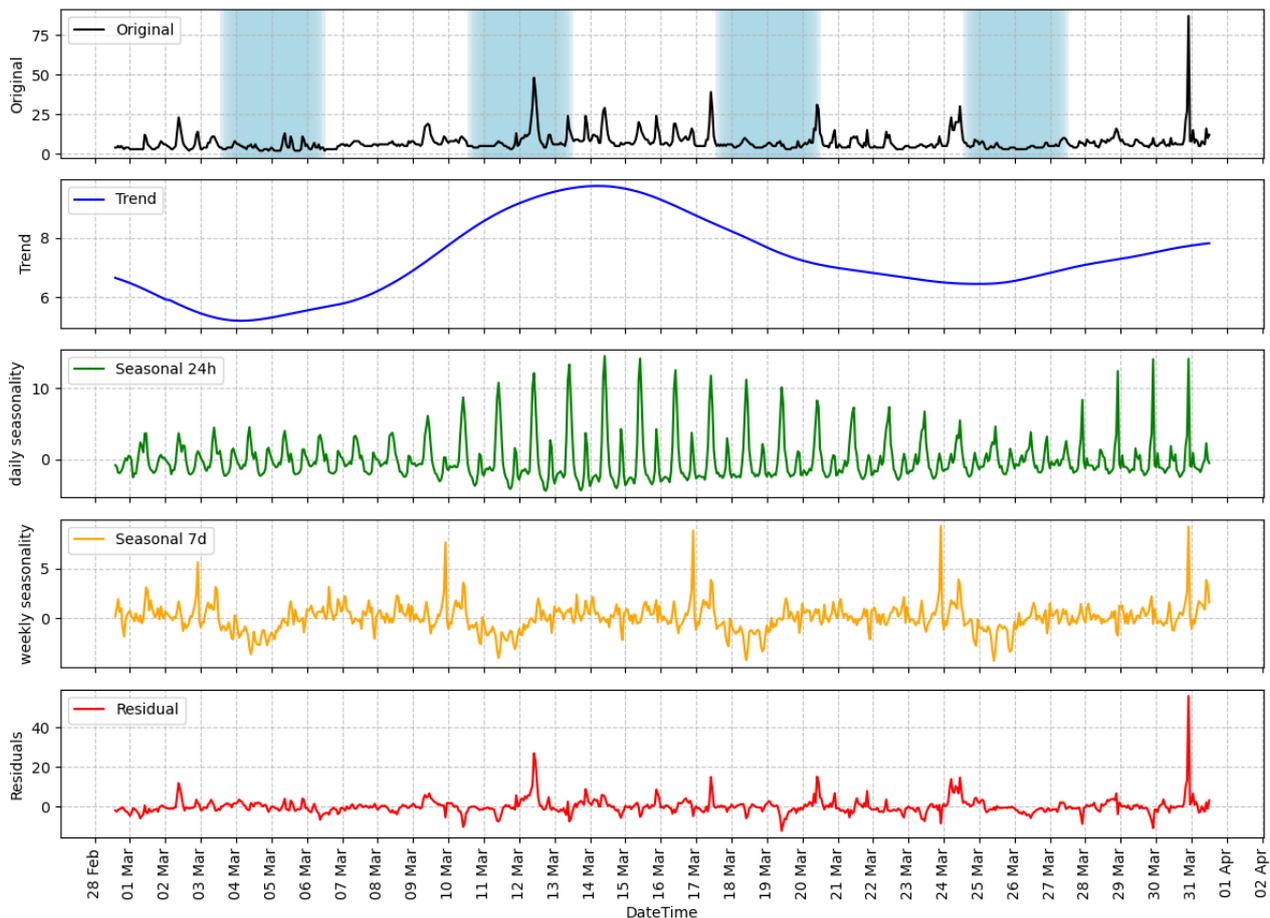


Figura 17. Stazione Allumiere – via Aldo Moro, marzo 2017: decomposizione della serie temporale di NO₂; le aree in blu corrispondono ai finesettimana.

5.3.4 Rose di concentrazione di NO₂

Avendo a disposizione sia i dati di concentrazione misurati presso le stazioni di qualità dell'aria, sia i dati meteorologici raccolti presso la centrale ENEL, è possibile mettere in relazione le due informazioni per realizzare delle rose di concentrazione. Questi grafici visualizzano come le concentrazioni di NO₂ variano in base alla direzione del vento. Ad esempio, si potrebbero osservare concentrazioni più elevate per specifiche direzioni di provenienza del vento.

Quest'analisi è stata condotta utilizzando le misure di concentrazione di NO₂ per l'anno 2017, disponibili su base oraria e quindi riconducibili al dato meteorologico orario misurato presso ENEL. In particolare, sono state selezionate le stazioni più vicine alla centrale con l'obiettivo di verificare se, nei momenti in cui queste si trovano sottovento rispetto all'impianto, si registra un incremento significativo delle concentrazioni rilevate. Inoltre, selezionando le stazioni più prossime, si può considerare rappresentativo il dato meteorologico misurato presso ENEL.

Come analisi preliminare, la Figura 18 mostra una mappa delle stazioni di qualità dell'aria con una rappresentazione della rosa dei venti ottenuta dai dati misurati presso la centrale nel 2017, collocata in corrispondenza della centrale stessa. Considerando che i venti prevalenti sono quelli che provengono dalla direzione NE, si può dedurre che i pennacchi prodotti dalla centrale non abbiano un'influenza preponderante sulle concentrazioni misurate presso le stazioni vicine. Questi venti infatti trasportano i pennacchi verso il mare. In particolare, la stazione che risulta sottovento per la maggior parte del tempo è quella di S. Agostino, sottovento per il 12% del tempo. A seguire, Aurelia e poi Fiumaretta, sottovento rispettivamente per il 10% e per il 5% del tempo.

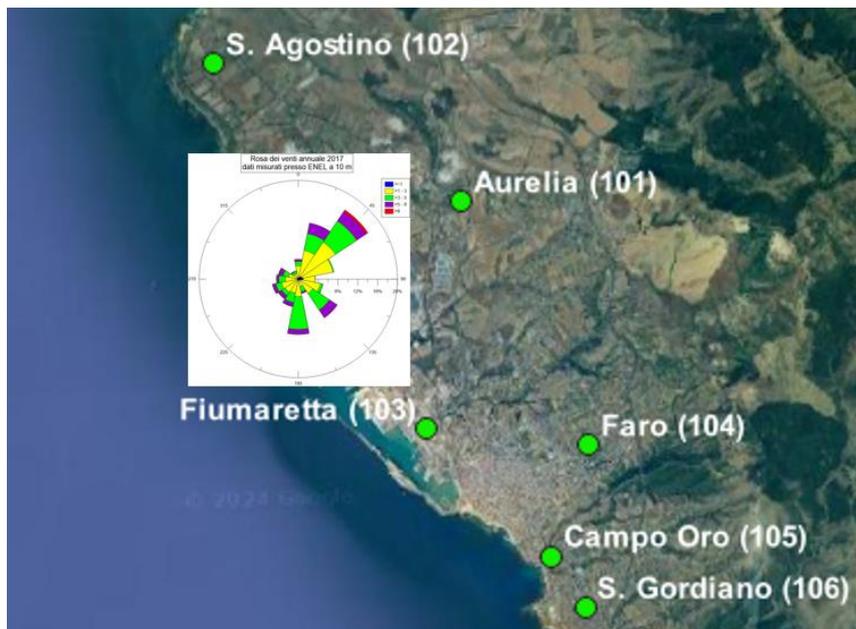


Figura 18. Mappa della rete di monitoraggio della qualità dell'aria, con la rosa dei venti elaborata dai dati raccolti presso la centrale a 10 m di altezza nel 2017, mostrata in corrispondenza della stessa centrale.

Di seguito in Figura 19 si riportano le rose di concentrazione ottenute dai dati misurati presso le tre stazioni più prossime. Le rose sono raffigurate in corrispondenza delle stesse stazioni, per una migliore visualizzazione dell'effetto della centrale rispetto alla posizione delle stazioni di misura. Considerando quindi S. Agostino e Aurelia, non si osservano concentrazioni marcatamente più elevate per le direzioni che portano le stazioni ad essere sottovento rispetto alla centrale ENEL. Le concentrazioni orarie più alte, superiori a $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, si verificano in entrambi i casi con venti provenienti dai quadranti a S e NE. Questo può indicare l'effetto combinato della molteplicità di sorgenti che insistono sul territorio. L'altra stazione, quella di Fiumaretta, è una stazione da traffico e presenta valori di concentrazione più elevati rispetto alle precedenti, con una percentuale di dati misurati superiori a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ di circa il 18%. In questa stazione emerge quindi l'effetto di sorgenti locali e non risulta possibile individuare un contributo marcato relativo alla centrale.

In Figura 20 si riportano nel dettaglio le rose di concentrazione di NO_2 per le tre stazioni in prossimità della centrale, per l'anno 2017.

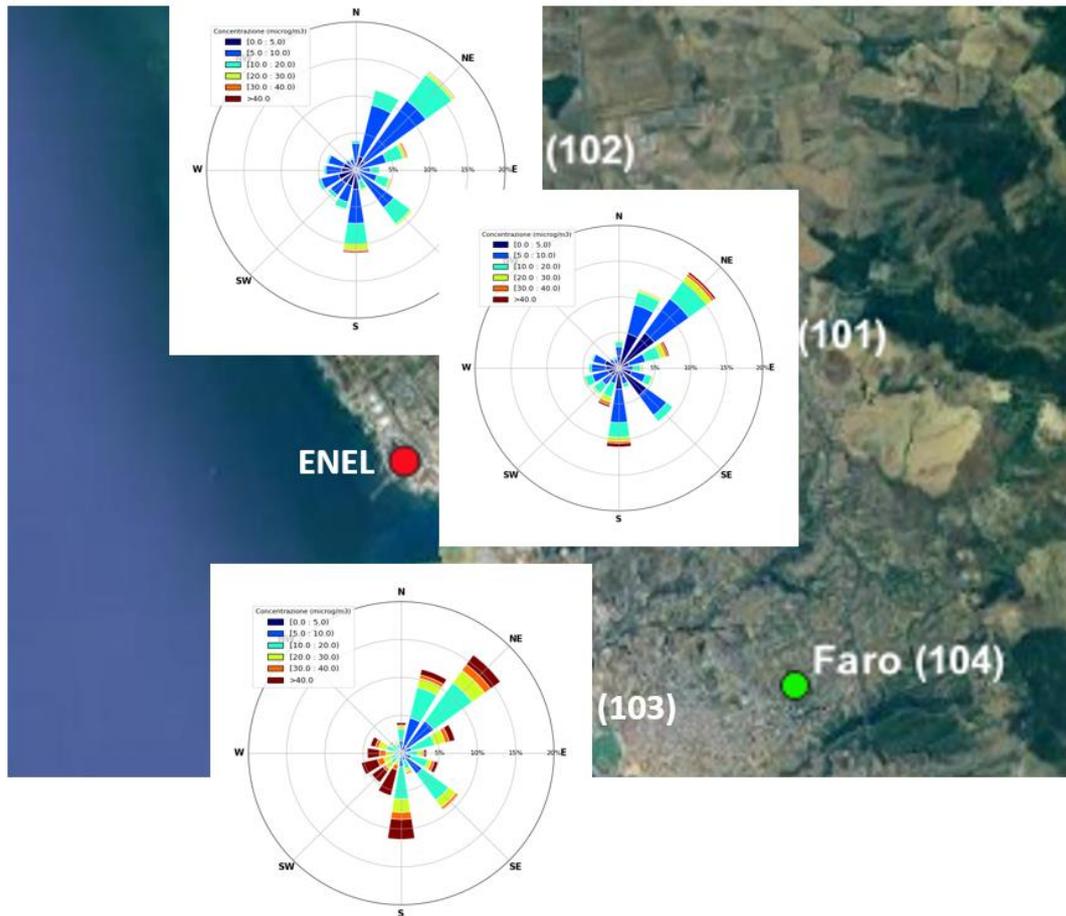


Figura 19. Rose di concentrazione ricavate dai dati di NO₂ raccolti dalle stazioni di Aurelia, S. Agostino e Fiumaretta nel 2017 in corrispondenza delle stesse stazioni.

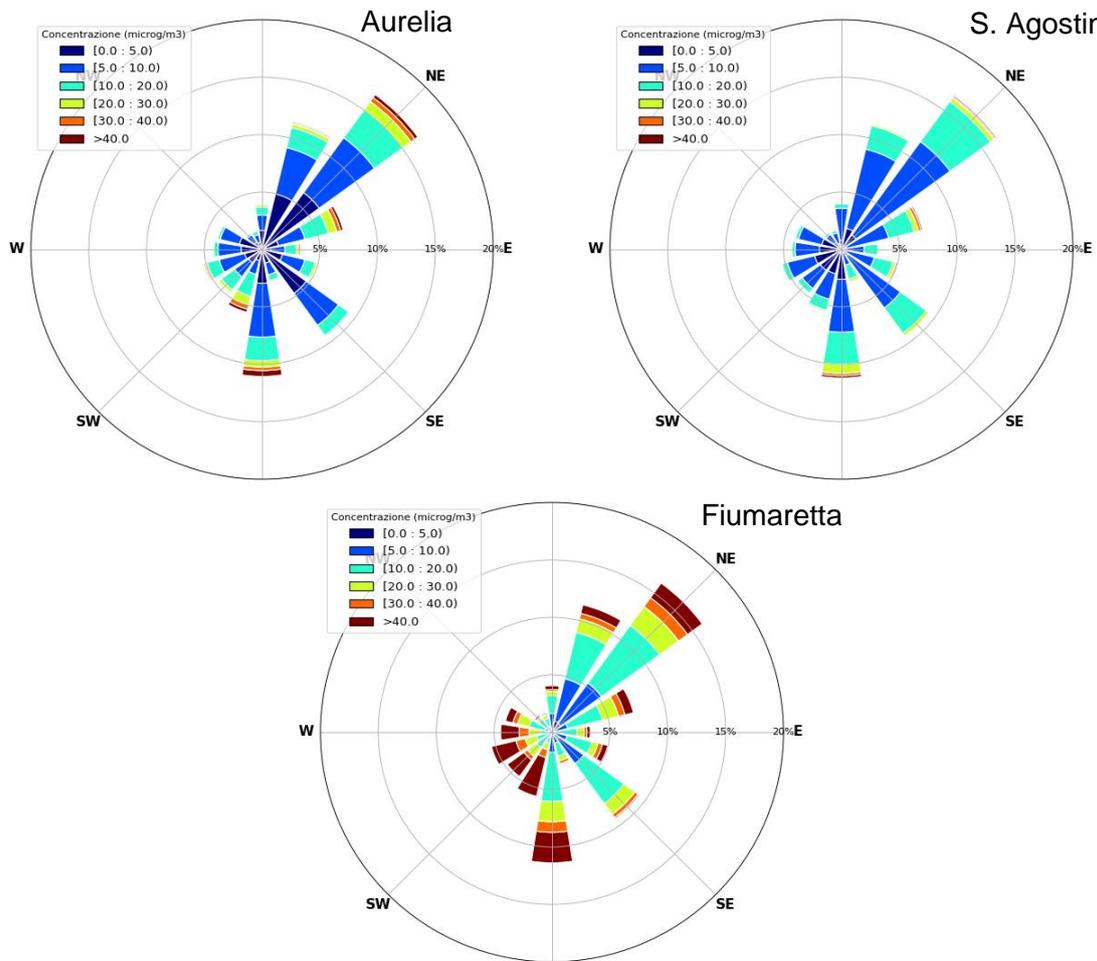


Figura 20. Dettaglio delle rose di concentrazione ricavate dai dati di NO₂ raccolti dalle stazioni di Aurelia, S. Agostino e Fiumaretta nel 2017.

5.4 Ozono

In Appendice C vengono descritti più in dettaglio i meccanismi chimico-fisici che coinvolgono questo inquinante e ne determinano l'accumulo nei bassi strati dell'atmosfera.

5.4.1 Sintesi dei dati

I dati di Ozono sono sintetizzati nella tabella seguente che riporta le elaborazioni conformi a quanto previsto dal Dlgs 155/2010. Premesso che in nessuna stazione sono stati rilevati superamenti della soglia di informazione e di allarme, rispettivamente pari a 180 e 240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, la rete di rilevamento ha mostrato superamenti del valore obiettivo (120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ della media mobile di 8 ore da non superare per più di 25 volte l'anno) nella centralina di via del Faggeto posta nell'area di Allumiere. Non sono stati registrati superamenti per il parametro AOT40 (pari a 18.000 $\mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$ come media su 5 anni che comunque non è un limite, ma un valore obiettivo, in particolare per quanto riguarda possibili danni alla vegetazione).

Tabella 15. Standard di legge relativi all'ozono.

Stazione	ID	Dati Raccolti %	Media annuale ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Superamenti Valore Obiettivo	AOT40 ($\mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$)
S. Agostino	102	98.7%	61.8	16	6172
Allumiere - Via Aldo Moro	107	99.1%	70.7	0	5345
Allumiere - via del Faggeto	14	98.4%	84.5	26	16403
CV via Togliatti	15	97.2%	64.5	22	14640
CV Villa Albani	83	98.9%	59.3	2	3493
CV via Morandi	84	97.2%	58.2	0	2817

Il rendimento delle stazioni è molto elevato e superiore ai requisiti minimi. Il valore più elevato per la concentrazione media annuale si registra nella centralina Allumiere - via del Faggeto, pari a 84.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Interessante è il confronto tra le centraline Allumiere - Via Aldo Moro e S. Agostino: la centralina Allumiere - Via Aldo Moro presenta concentrazioni medie annuali superiori a quelle registrate a S. Agostino; vice versa quest'ultima presenta 16 superamenti del valore obiettivo (120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) contro nessun superamento riscontrato nella stazione di Allumiere. Il fatto che nella stazione Allumiere vi sia un numero minore di superamenti, nonostante la media più elevata, è un chiaro segnale che l'ozono nella stazione S. Agostino è anche dovuto alle emissioni locali. In questo caso, la catena fotochimica di produzione dell'ozono si aggiunge all'ozono che è trasportato dagli strati più alti della troposfera per fumigazione verticale durante i periodi di turbolenza verticale.

A titolo di esempio, si riporta nel grafico successivo l'andamento della concentrazione di Ozono nelle due stazioni relative al giorno 18 luglio 2017.

Nelle ore notturne, l'ozono è costantemente più elevato nella stazione di Allumiere, mentre a S. Agostino la concentrazione è inferiore a causa delle reazioni chimiche che consumano ozono nello strato rimescolato. Il persistente valore più elevato nelle ore notturne causa un incremento della concentrazione media che, infatti, è più elevata ad Allumiere. L'analisi dei gradienti di ozono mostra che l'aumento della concentrazione a S. Agostino si nota dalle primissime ore del mattino, mentre ad Allumiere l'aumento è posticipato di 2-3 ore. È quindi evidente che nelle prime ore del mattino prevalgono le reazioni fotochimiche all'interno del PBL di S. Agostino, mentre la stazione di Allumiere denota un aumento della concentrazione di ozono solo nelle ore nelle quali si instaura il rimescolamento verticale causato dalla turbolenza atmosferica. I due effetti si sommano nella stazione S. Agostino che quindi misura livelli di picco più elevati e questo spiega i più alti livelli osservati nel pomeriggio che portano quindi ad un aumento del numero di superamenti delle concentrazioni obbiettivo (120 e 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ rispettivamente).

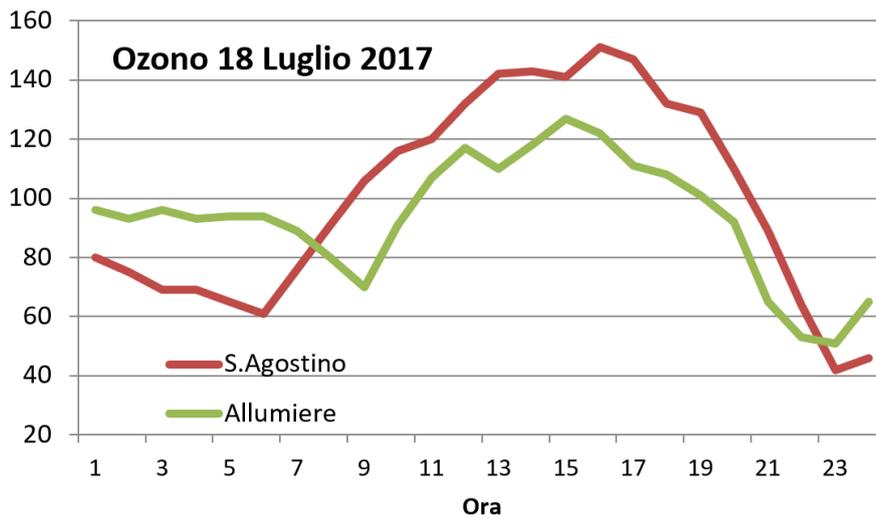


Figura 21. Andamento delle concentrazioni orarie di O₃ a S. Agostino e Allumiere il 18/7/2017.

Il grafico successivo mostra un esempio dove l'andamento della concentrazione di ozono a S. Agostino è simile al precedente, ma con un picco più contenuto che, come nel caso precedente, inizia alle prime ore del mattino per raggiungere livelli più bassi (110 contro 150 µg/m³). Per quanto riguarda la stazione di Allumiere, la concentrazione si mantiene quasi stazionaria. Ciò è dovuto a un efficiente rimescolamento dell'atmosfera che si estende per tutta la giornata e che interessa dal primo pomeriggio, anche la stazione di S. Agostino.

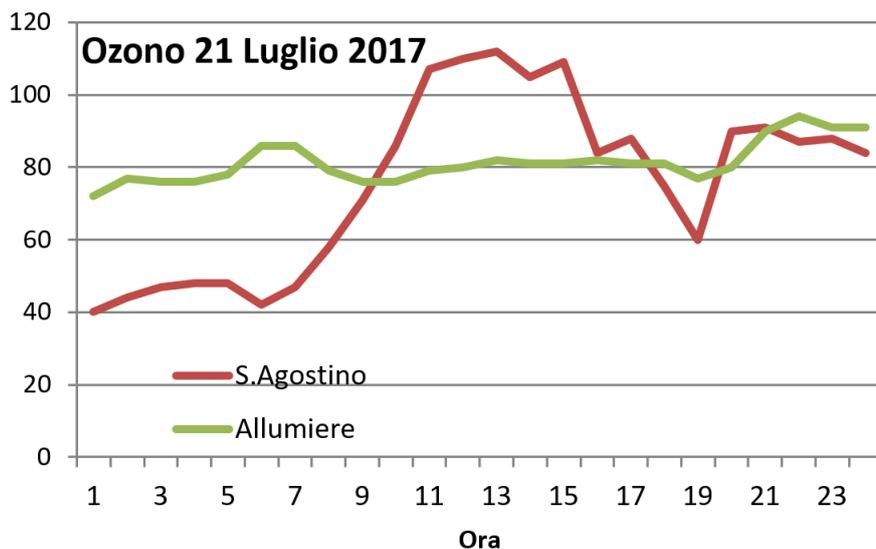


Figura 22. Confronto tra gli andamenti della concentrazione di O₃ a Sant'Agostino e Allumiere il 21/7/2017.

In conclusione, si può affermare che la presenza di ozono nell'ambiente atmosferico del territorio è in gran parte dovuta ai fenomeni di trasporto verticale che avvengono quando si innescano fenomeni di turbolenza. Per le stazioni, come quelle di S. Agostino, sensibili alle emissioni locali al livello del suolo, vi sono fenomeni di formazione che si innescano nelle prime ore della mattinata, ossia quando vi è completo disaccoppiamento tra lo strato limite e la troposfera libera. Appare evidente che, in queste condizioni, l'apporto della centrale sulla qualità dell'aria è molto limitato, oppure assente.

5.4.2 Andamento temporale dell'ozono

Nella figura seguente (Figura 23) sono mostrati gli andamenti temporali delle concentrazioni medie giornaliere di ozono misurate nelle diverse centraline di qualità dell'aria. Analizzando più in dettaglio tale figura si evidenziano valori generalmente più elevati nelle stazioni di Allumiere, valori intermedi nella stazione S. Agostino e valori inferiori nelle centraline poste nell'area urbana di Civitavecchia ove le maggiori emissioni di ossidi di azoto, emessi prevalentemente dal traffico veicolare, limitano la concentrazione di ozono.

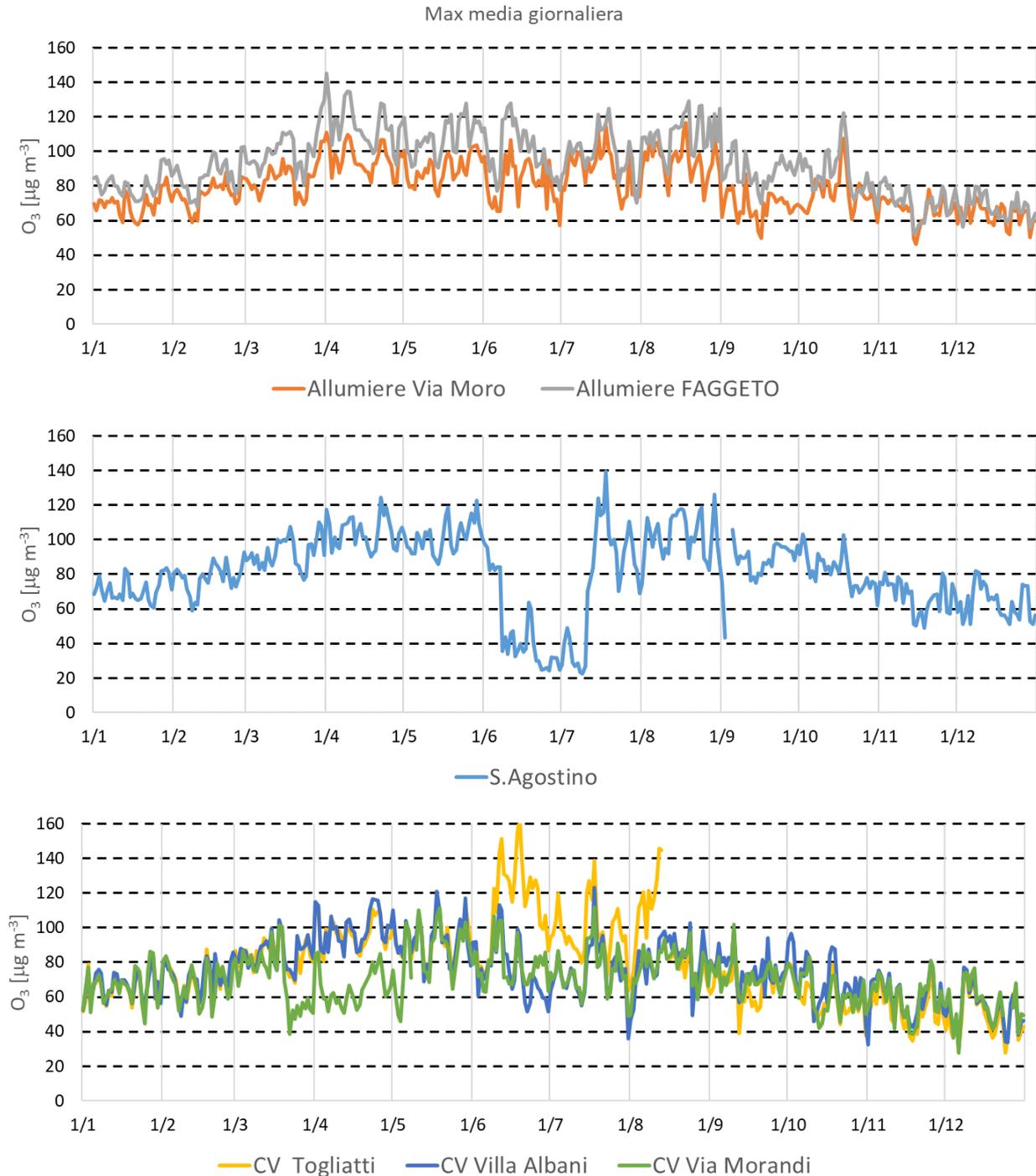


Figura 23. Concentrazione media massima giornaliera di ozono calcolata su 8 ore misurata nelle centraline.

L'esame di tale figura evidenzia andamenti anomali di ozono nelle stazioni S. Agostino e Civitavecchia – via Togliatti durante i mesi giugno e luglio che possono essere determinati da malfunzionamenti dell'apparato di misura. Di seguito viene presentato un approfondimento

considerando le stazioni Allumiere – via Aldo Moro e S. Agostino. Poiché i valori registrati nella stazione di S. Agostino tra giugno e luglio si discostano significativamente dalle altre stazioni, nelle figure seguenti tali misure sono state assunte affette da errori strumentali e quindi non considerate. Le due stazioni di misura sono poste in aree rurali (S. Agostino) e semi-rurali (Allumiere – Via Aldo Moro) e quindi rappresentative di aree caratterizzate da un regime fotochimico NO_x-limitato. Nella figura seguente (Figura 24) sono mostrati gli andamenti temporali delle concentrazioni medie giornaliere di ozono misurate nelle due stazioni che risultano essere piuttosto simili e confermano il carattere ubiquitario di tale inquinante. Analizzando più in dettaglio tale figura si evidenziano valori generalmente più elevati nella stazione di Allumiere.

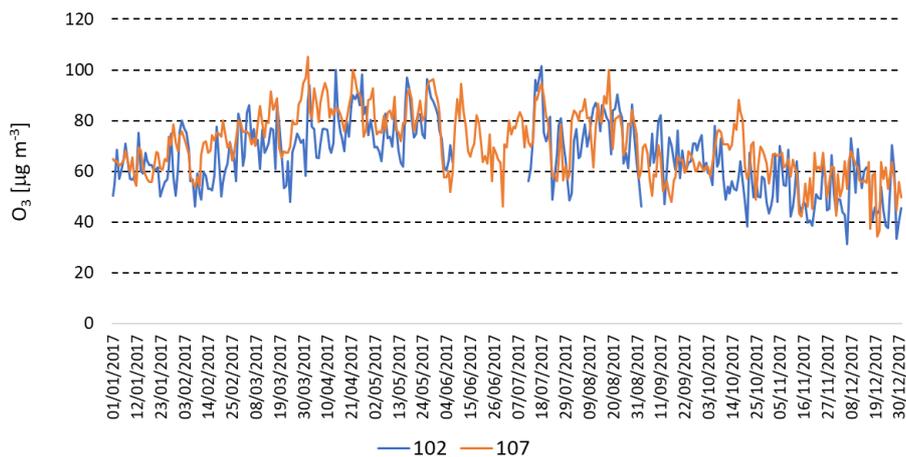


Figura 24. Concentrazioni medie giornaliere misurate di ozono nelle stazioni S. Agostino (102) ed Allumiere – Via Aldo Moro (107).

Al fine di interpretare tale risultato, nella figura seguente (Figura 25), vengono mostrati gli andamenti temporali di OX e ossidi di azoto nelle due stazioni. OX è definito come la somma di ozono e biossido di azoto ed è detto “ossidante totale”. Questo parametro consente di rappresentare la produzione fotochimica di ozono perché i ratei di produzione/rimozione di tale parametro sono indipendenti dalle reazioni fotochimiche, veloci, che convertono O₃ in NO₂. Per tale ragione, tale parametro viene utilizzato per dedurre la produzione fotochimica di O₃. L’esame di tale figura evidenzia livelli di ossidante totale e ossidi di azoto più elevati nella stazione di Allumiere posta in prossimità del centro abitato e quindi maggiormente influenzata dalle emissioni antropiche di NO_x. I livelli più elevati di ozono nella stazione di Allumiere sono quindi attribuibili ai più elevati livelli di NO_x che in aree NO_x-limitate determinano una maggiore produzione di ozono. In particolare, la stazione Allumiere è posta a 467 m s.l.m. in una zona montuosa soggetta a regimi di brezza di monte e di valle caratterizzati da movimenti d’aria dalla valle verso la montagna durante le ore diurne. Durante tali ore i precursori (VOC e NO_x) emessi dall’area urbana e portuale di Civitavecchia vengono trasportati verso le zone montuose e durante tale percorso i processi fotochimici danno luogo alla formazione di ozono. In aggiunta, la presenza di aree boschive con conseguenti emissioni di VOC di origine biogenica possono dar luogo alla ulteriore formazione di ozono. Nella Figura 26 sono mostrati gli andamenti mensili delle concentrazioni di ozono che confermano il tipico comportamento per tale inquinante con valori più elevati durante le stagioni primaverile ed estiva. I valori inferiori registrati durante i mesi di giugno e luglio sono attribuibili a condizioni meteorologiche che non hanno permesso l’accumulo di tale inquinante durante i due mesi.

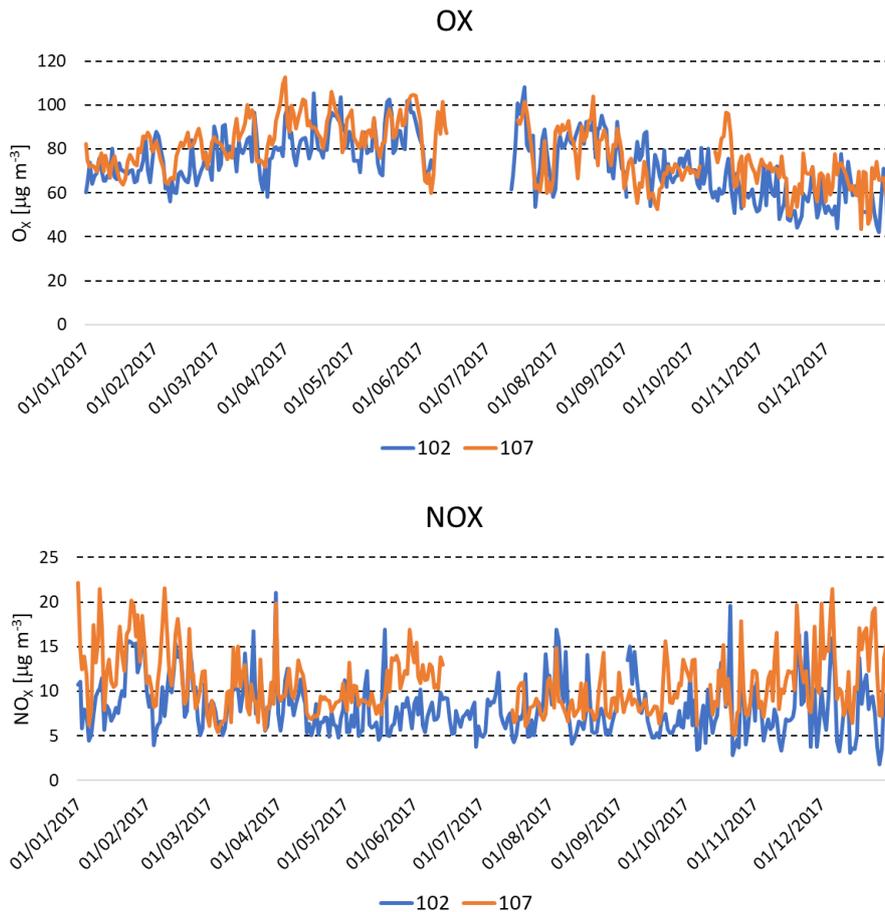


Figura 25. Concentrazioni medie giornaliere misurate di ossidante totale (OX) e ossidi di azoto (NOx) nelle stazioni S. Agostino (102) ed Allumiere – Via Aldo Moro (107).

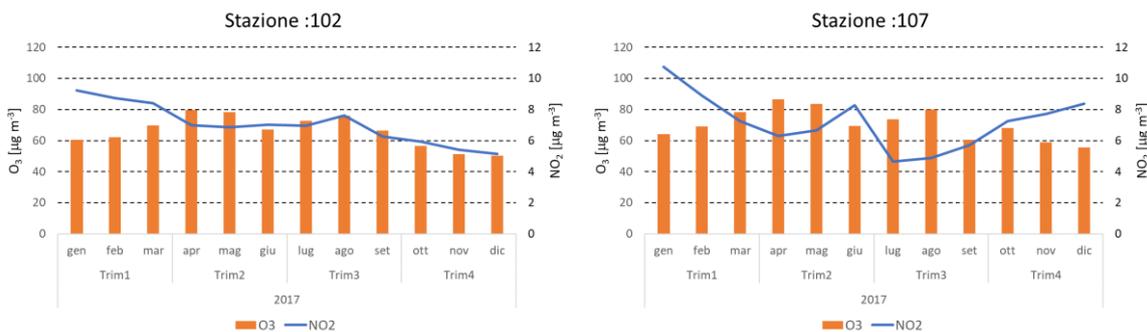


Figura 26. Concentrazioni medie mensili di ozono nelle stazioni S. Agostino (102) ed Allumiere – Via Aldo Moro (107).

Particolarmente interessante è l'esame della successiva Figura 27 che mostra gli andamenti giornalieri di ozono relativi ai quattro trimestri (gennaio-marzo, aprile-giugno, luglio-settembre e ottobre-dicembre) rilevati nelle due stazioni. Meno pronunciata è la variazione giorno-notte osservata nella stazione di Allumiere con valori medi notturni particolarmente elevati, compresi tra 60 e 80 $\mu\text{g m}^{-3}$. Lo sviluppo dello strato di rimescolamento a partire dalle ore 8-9 durante le stagioni primaverile ed estiva, associato all'aumento della radiazione solare, ha un effetto più pronunciato sulla stazione di S. Agostino rispetto alla stazione di Allumiere. Tali andamenti sono attribuibili alla localizzazione ed alla quota altimetrica delle due stazioni. La stazione S. Agostino è

posta lungo la costa tirrenica e quindi significativamente influenzata dal trasporto di ozono dal mare, ove i livelli sono generalmente elevati, durante le ore diurne a seguito dell'instaurarsi del regime di brezza di mare. La stazione di Allumiere si trova invece all'interno, sui rilievi dei monti della Tolfa, ed i livelli di ozono risultano maggiormente influenzati sia dal trasporto a meso-scala sia dalla circolazione di brezza di valle che determina, durante le ore diurne, l'ulteriore trasporto di ozono proveniente dall'area urbana di Civitavecchia. Vista la complessità delle dinamiche di questo inquinante si può escludere la diretta correlazione con l'esercizio della centrale.

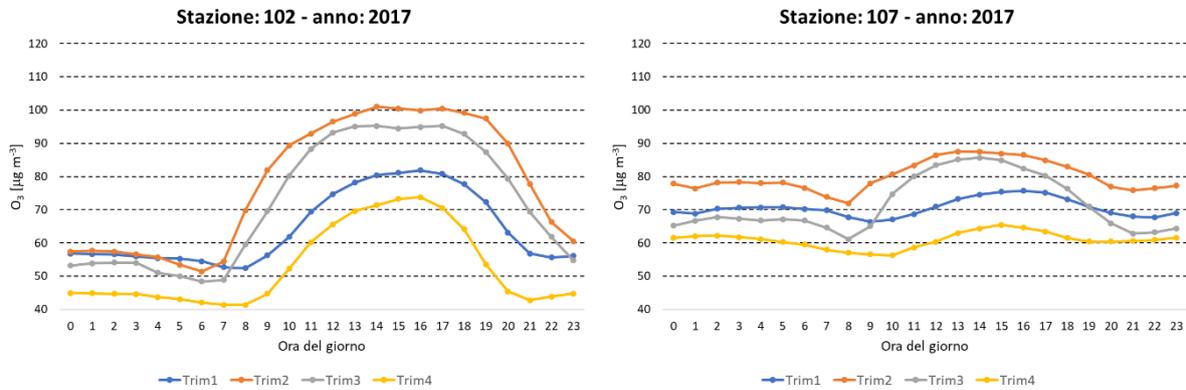


Figura 27. Concentrazioni medie orarie di ozono nelle stazioni S. Agostino (102) ed Allumiere (107) suddivise per trimestre: 1 (gen-mar), 2 (apr-giu), 3 (lug-set) e 4 (ott-dic).

5.4.3 Protezione della vegetazione (AOT40)

L'indicatore AOT40 esprime l'esposizione cumulata all'ozono al di sopra della soglia di concentrazione di 40 ppb ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$) per la vegetazione e culture. Il valore obiettivo previsto dal Dlgs 155 è pari a $18000 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$ come media su 5 anni. Il valore più elevato calcolato per tale indice, relativamente all'anno 2017 (Tabella 15), è stato pari a $16403 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$ (stazione Allumiere – via del Faggeto); tale valore è inferiore al valore obiettivo e quindi non si evidenziano possibili criticità riguardo alla protezione di tali recettori.

5.5 Biossido di zolfo

5.5.1 Sintesi dei dati

I dati di Biossido di Zolfo sono sintetizzati nella tabella seguente che riporta le elaborazioni conformemente a quanto previsto dal Dlgs 155/2010 per le stazioni di rilevamento attive. Si evidenzia la presenza di valori di concentrazione elevati, soprattutto nella fase transitoria tra la gestione da parte dell'Osservatorio e di ARPAL, giustificabili con i temporanei malfunzionamenti strumentali. In generale, comunque, i valori misurati sono molto vicini al limite di rilevabilità dello strumento, altro aspetto da tenere in considerazione per valutare l'affidabilità del dato acquisito.

Tabella 16. Standard di legge relativi a SO₂ [µg/m³].

ID	Descrizione	Dati Raccolti %	Media annuale	Media massima oraria
103	Fiumaretta	93.8	1.6	103.1
104	Faro	93.2	0.7	36.8
105	Campo Oro	82.8	1.1	13.4
107	Allumiere - via Aldo Moro	95.3	0.7	16.7
014	Allumiere- via del Faggeto	94.5	1.0	24.7
015	CV – via Togliatti	58.8	0.5	14.6
060	CV - Porto	88.9	1.1	48.3

Per quanto riguarda questo inquinante, si osserva che le sue concentrazioni rilevate dalla rete appaiono molto basse. Infatti, non sono stati osservati superamenti dello standard 125 µg/m³ (valido su base giornaliera) e 350 µg/m³ valido su base oraria.

I valori medi rilevati sono dell'ordine del valore di concentrazione minima rivelabile dal sistema di rilevamento; a tali livelli le misure sono affette da incertezze che riducono l'affidabilità delle misure effettuate. Poiché i dati mostrano concentrazioni molto al di sotto dei valori limite, tale inquinante non costituisce un problema ambientale.

Il valore massimo osservato nella stazione di Fiumaretta (103,10 µg/m³) appare molto elevato se confrontato con il valore medio annuale di 1,6 µg/m³ per cui detto valore è stato esaminato in dettaglio. L'evento si è verificato nella tarda serata del giorno 28 febbraio quando il biossido di zolfo da 0,6-0,8 µg/m³ è cresciuto nelle ore successive a 3,3-21,9 per raggiungere 103,10 alle 23:00 per poi tornare nelle due ore successive a 2,4 e 1,2 µg/m³ rispettivamente. In detta giornata le concentrazioni medie di PM_{2.5} e PM₁₀, che vengono misurate come media delle 24 ore, non hanno registrato valori anomali; per contro, nello stesso orario si è osservato un aumento consistente della concentrazione di biossido di azoto (fino a 74 µg/m³) che però ha interessato solo la stazione di Fiumaretta. Trattasi quindi di un evento locale sulla natura del quale si possono formulare molte ipotesi.

5.5.2 Andamento temporale del biossido di zolfo

L'andamento temporale del biossido di zolfo nelle centraline Fiumaretta, Faro, Campo Oro e Allumiere - via Aldo Moro è presentato in Figura 28. Come si può osservare, le concentrazioni rilevate sono spesso ben inferiori a 2 µg/m³ con una frequente mancanza di dati regolari durante tutto l'anno, probabilmente dovuta alla prossimità del limite di sensibilità della strumentazione. Con l'eccezione della stazione di Campo Oro, le altre stazioni mostrano picchi principalmente durante i mesi estivi, in corrispondenza della stagione degli incendi. Il picco massimo registrato presso la stazione di Faro coincide con quello rilevato nelle misure di PM_{2.5} e PM₁₀ nello stesso giorno, riconducibile all'incendio delle Molacce. Un altro picco significativo è stato rilevato a Fiumaretta il 16 marzo, anche questo correlato a un aumento delle concentrazioni di PM_{2.5}.

Nella figura seguente (Figura 29) sono mostrati i grafici a dispersione che mostrano i rapporti NOX/SO₂ misurati nelle diverse centraline in funzione del rapporto alle emissioni di NOX/SOX dai 3 gruppi di produzione della Centrale. L'esame di tale figura unitamente ai dati riportati nella tabella successiva evidenziano l'assenza di relazione lineare tra le due variabili. Tali risultati confermano la presenza di fenomeni complessi che interessano le specie emesse dalla Centrale e l'impossibilità di correlare l'esercizio della Centrale e i livelli di qualità dell'aria misurati.

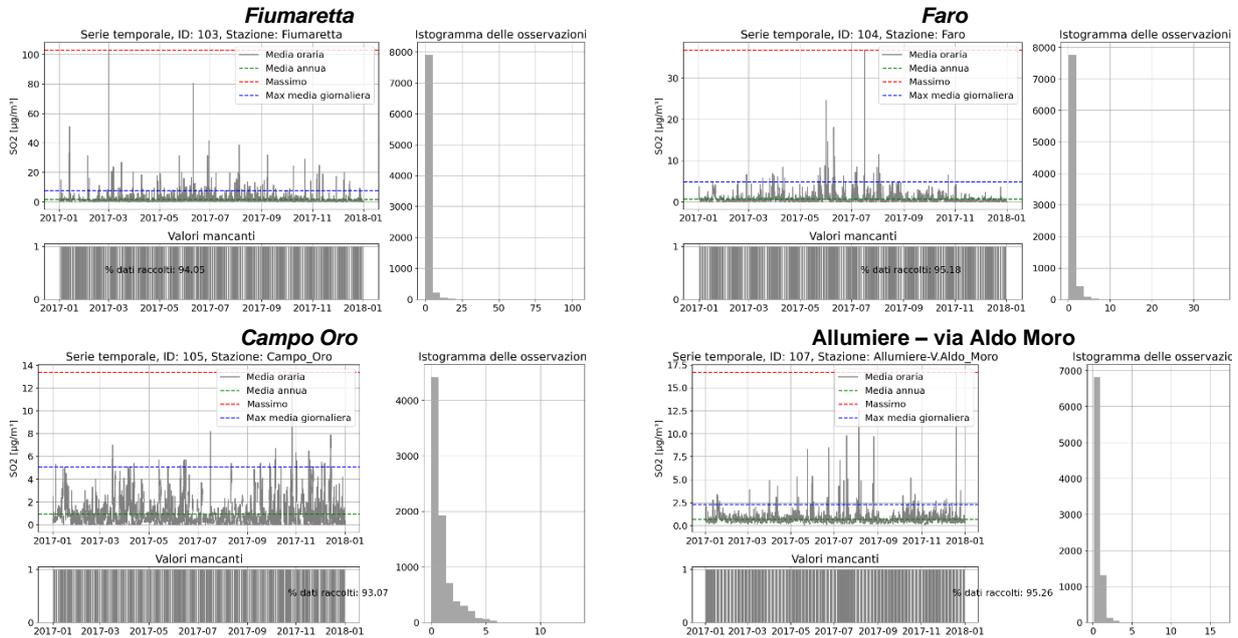


Figura 28. SO₂, anno 2017: serie temporale delle concentrazioni giornaliere (alto sx); percentuale di dati raccolti (basso sx); istogramma delle osservazioni (dx).

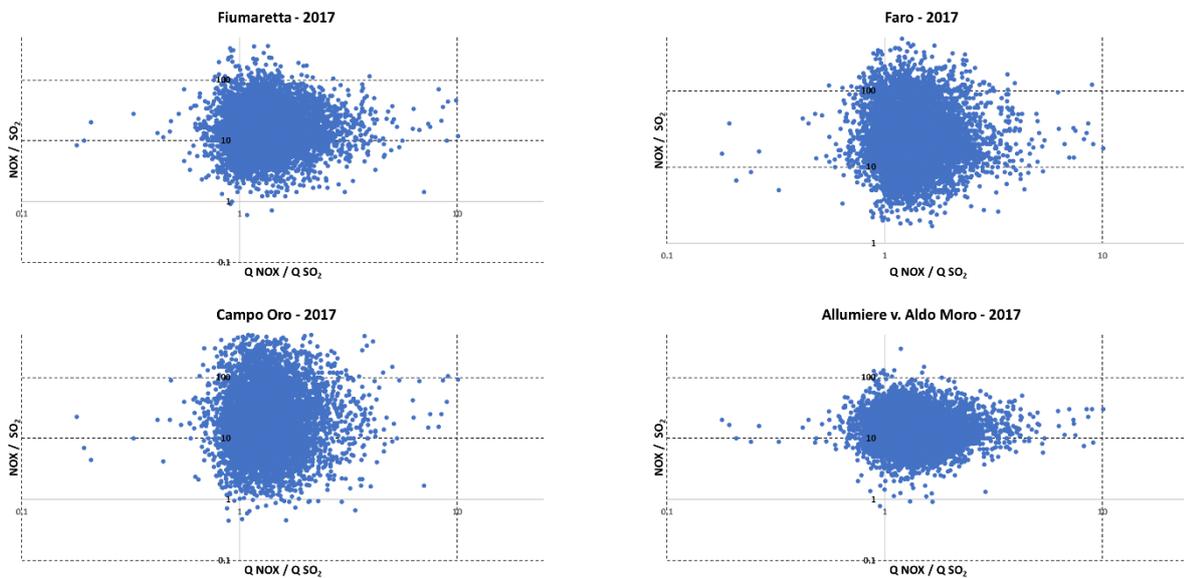


Figura 29. Rapporti NOX/SO₂ misurati nelle diverse centraline in funzione del rapporto delle emissioni NOX/SOX dai 3 gruppi di produzione della Centrale. I rapporti sono rappresentati in scala logaritmica.

Tabella 17. Analisi di correlazione tra i rapporti NOX/SO₂ misurati nelle diverse centraline ed il rapporto delle emissioni NOX/SOX dai 3 gruppi di produzione della Centrale.

Centraline	NOX/SO ₂	Correlazione	Dati disp.	QNOX/QSOX
Fiumaretta	21.8	-0.024	0.912	1.4
Faro	35.9	-0.032	0.908	
Campo Oro	41.3	0.010	0.780	
Allumiere v. Aldo Moro	16.8	-0.029	0.926	

5.6 Cluster Analysis (PM₁₀ e NO₂)

L'analisi di clustering è stata utilizzata per raggruppare le stazioni di monitoraggio di PM₁₀ ed NO₂ in base all'andamento delle loro concentrazioni nel tempo. I dati sono stati standardizzati (normalizzati ad 1) per uniformare le diverse stazioni e ridotti dimensionalmente tramite l'Analisi delle Componenti Principali (PCA), che ha semplificato le serie temporali in due componenti principali. Per individuare il numero ottimale di cluster, è stato applicato, sulle componenti della PCA, l'algoritmo K-means, che provvede a raggruppare le stazioni con andamenti simili. È stato quindi scelto il numero di cluster in base alla misura di coesione all'interno dei gruppi. Infine, le stazioni sono state assegnate ai rispettivi cluster, mostrando come i valori medi variano tra i gruppi.

La Figura 30 presenta i quattro cluster identificati per la rete osservative del PM₁₀. Il Cluster 2, che comprende un'unica stazione (Allumiere - via Aldo Moro), mostra valori di PM₁₀ più elevati durante il secondo semestre dell'anno. Gli altri cluster evidenziano andamenti più simili, con il Cluster 0 che si distingue per valori di PM₁₀ più bassi nei mesi invernali.

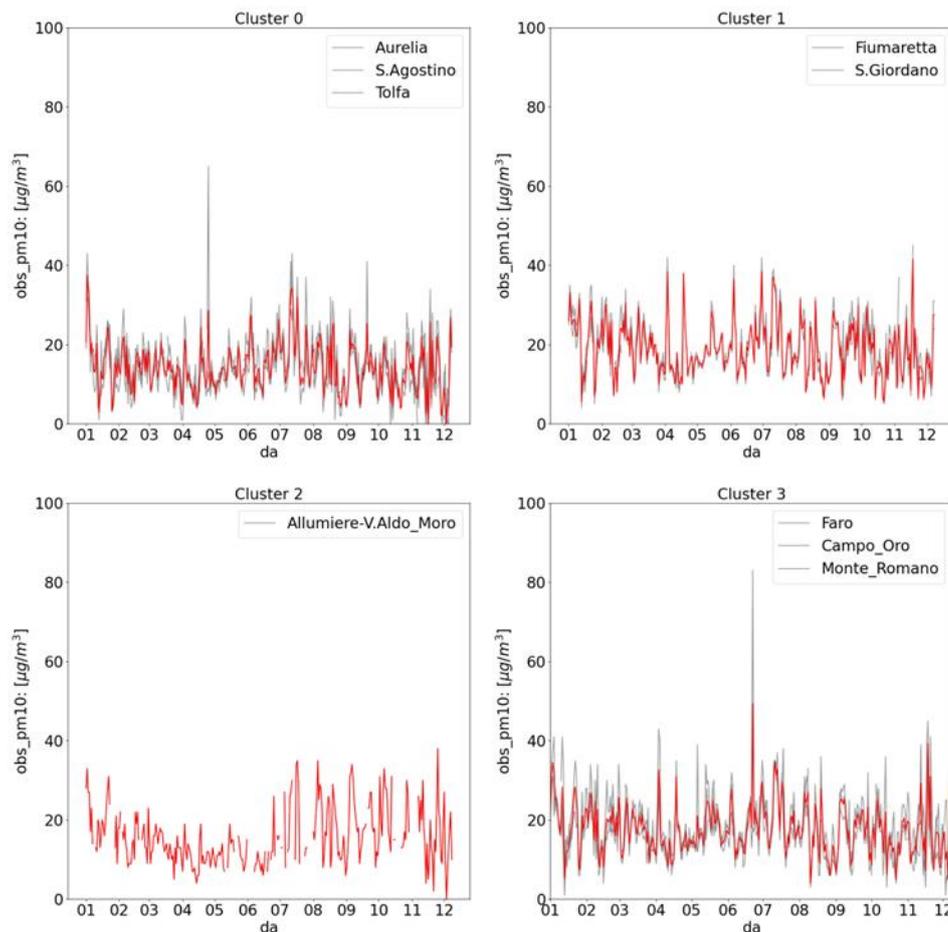


Figura 30. Andamento delle concentrazioni di PM₁₀ per i quattro cluster identificati mediante l’algoritmo “K-means”. Ogni pannello mostra le stazioni incluse in ciascun cluster, evidenziando similitudini nei pattern temporali delle concentrazioni.

Una parte fondamentale dell'analisi riguarda la classificazione delle stazioni la cui tipologia non è disponibile presso il sito dell'ARPA (<https://www.arpalazio.it/ambiente/aria/comprendorio-civitavecchia>). Questa è stata effettuata assegnando alle stazioni non classificate la tipologia prevalente tra quelle presenti nel medesimo cluster. Ad esempio, nel Cluster 0, che include la stazione di S. Agostino di background rurale (RB), alle stazioni non classificate è stata assegnata la tipologia "RB". La classificazione ricavata è riportata in Tabella 18.

Tabella 18. Confronto tra tipologia ARPA e tipologia K-means per le stazioni di monitoraggio PM₁₀ incluse nel programma di valutazione della qualità dell’aria regionale

Cluster	Stazione	Tipologia ARPA	Tipologia K-Means
0	Aurelia	-	RB
	S. Agostino	RB	RB
	Tolfa	-	RB
1	Fiumaretta	UT	UT
	S. Gordiano	-	UT
2	Allumiere Aldo Moro	-	-
3	Faro	UB	UB
	Campo Oro	UB	UB
	Monte Romano	SB	UB

La successiva Figura 31 presenta i sei cluster identificati per la rete osservative del biossido di azoto. Il cluster 3 include la sola stazione Tarquinia che presenta pochi dati, probabilmente non

ancora calibrati per l'esercizio operativo. Tolfa e Monte Romano hanno un carattere di fondo rurale (rural remote), mentre Fiumaretta (cluster 1) e S. Gordiano (cluster 2) hanno andamento tipico delle stazioni di traffico. Tuttavia, queste due stazioni non sono state raggruppate poiché, tra aprile e giugno 2017, la stazione di Fiumaretta mostra dati registrati piuttosto bassi, che si discostano dalla stazione di S. Gordiano e che possono essere attribuibili a un malfunzionamento della centralina. Infine, Faro e Campo Oro risultano essere stazioni di fondo urbano, mentre Aurelia, S. Agostino e Allumiere-V.Aldo Moro hanno un andamento riconducibile a concentrazioni di biossido d'azoto di un contesto rurale o semi-rurale.

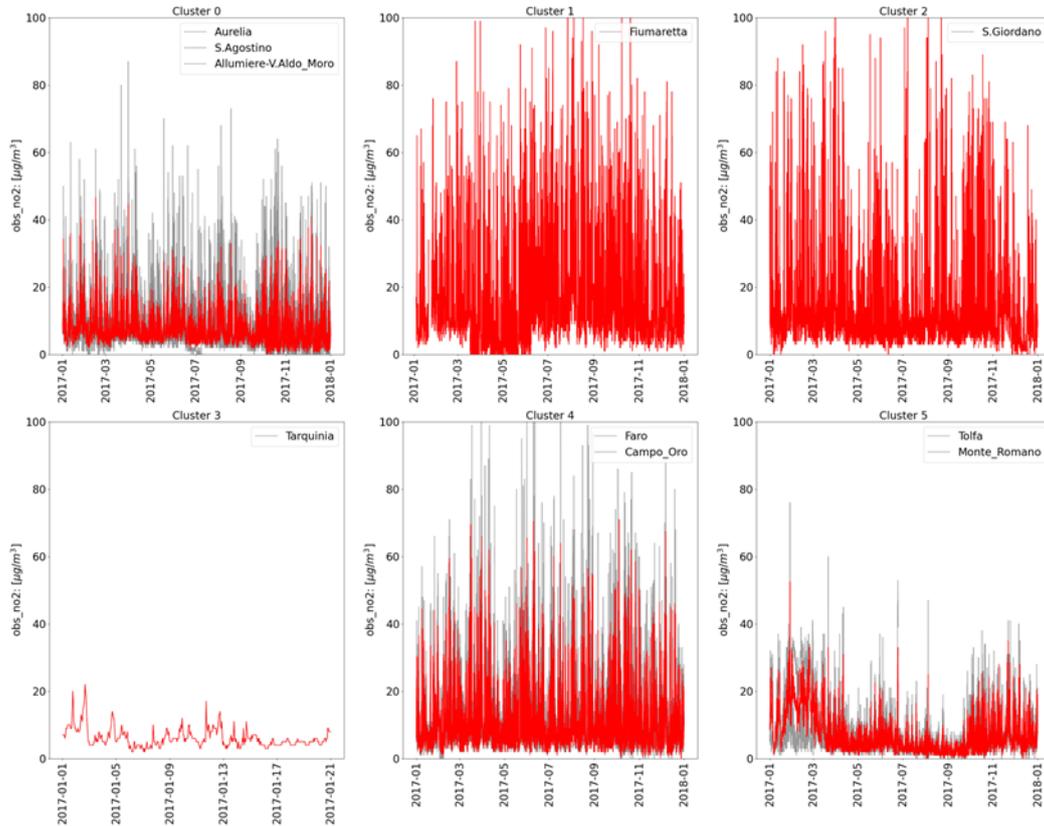


Figura 31. Andamento delle concentrazioni di NO₂ per i sei cluster identificati mediante l’algoritmo “K-means”. Ogni pannello mostra le stazioni incluse in ciascun cluster, evidenziando similitudini nei pattern temporali delle concentrazioni.

6 Valutazione della distribuzione dell'inquinamento in aree non coperte o coperte parzialmente dalla rete di rilevamento

La distribuzione dell'inquinamento in aree non coperte dalla rete di rilevamento ex-ENEL è stata elaborata mediante l'utilizzo dell'algoritmo *machine learning* denominato *Random Forest* (Breiman, 2001), nel seguito RF, per produrre corrispondenti mappe di qualità dell'aria sul dominio di studio, alla risoluzione spaziale di 500 m nelle due direzioni x: Ovest-Est e y: Sud-Nord nel sistema di coordinate UTM WGS84 - zona 33. I parametri della griglia di calcolo relativa a tale dominio sono i seguenti: centro della cella a SW del dominio: $x = 223293$ m, $y = 4656210$ m (longitudine 11.659, latitudine 42.01); centro della cella a NE del dominio: $x = 253293$ m, $y = 4686210$ m (longitudine 12.01, latitudine 42.29); passo di griglia lungo x e y: 500 m; numero di celle in x e y: 60. Il dominio di calcolo con la posizione delle stazioni utilizzate per addestrare il modello è riportato in Figura 32.

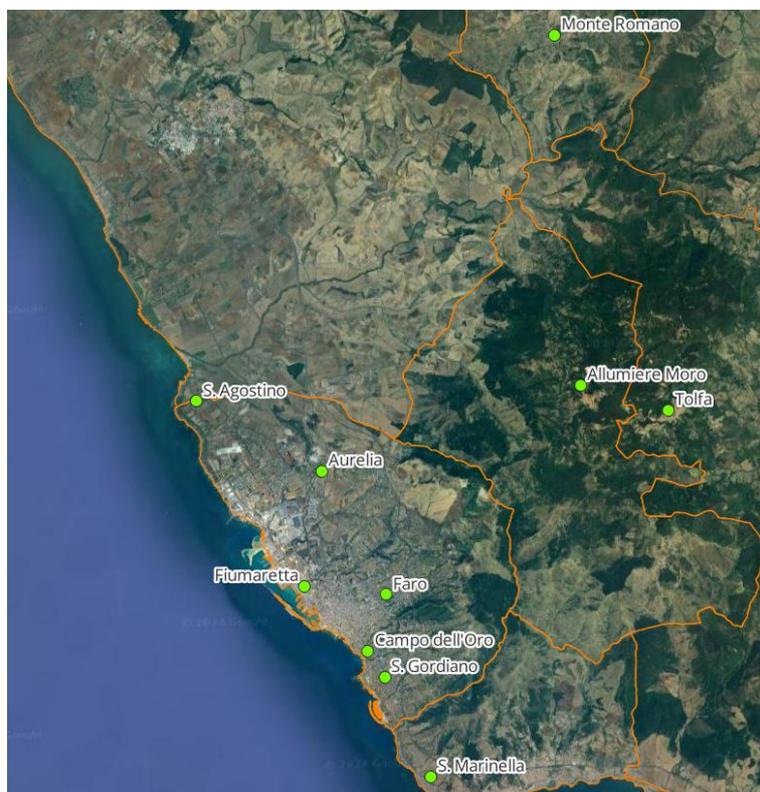


Figura 32. Distribuzione spaziale della rete di monitoraggio attiva nel 2017

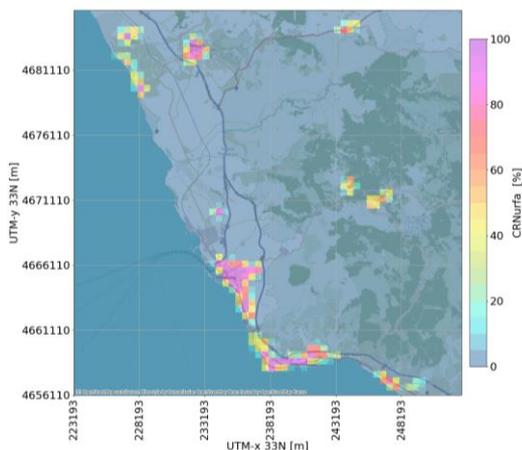
L'algoritmo ML-RF consiste in un insieme di alberi decisionali (da cui "foresta") adatto a risolvere problemi di classificazione (separazione dei dati in classi) e di regressione. Esso è stato sviluppato per risolvere gli errori di *over-fitting* (si verificano quando un modello raggiunge buoni risultati sui dati di addestramento ma scarse performance sui dati di controllo) e di alta varianza tipici di un singolo albero decisionale. Ogni albero, viene costruito con un *bootstrap* dei dati di input e ad ognuno viene assegnato casualmente un sottoinsieme di predittori (Liaw e Wiener, 2002). L'*output* finale dell'insieme è calcolato facendo la media degli output di ogni singolo albero.

L'applicazione dell'algoritmo ML-RF si articola in due fasi: la prima finalizzata al suo addestramento, ovvero alla sua capacità di riprodurre le concentrazioni osservate nei siti di

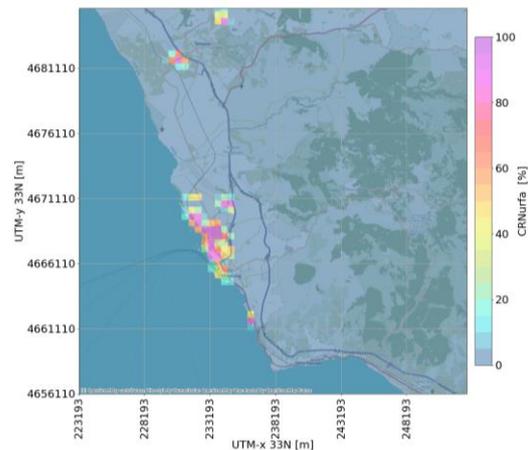
monitoraggio (fase di training) sulla base di un insieme di predittori. La seconda, detta di inferenza o generalizzazione, è volta a stimare le concentrazioni nelle celle della griglia dove non sono disponibili osservazioni.

Nel caso in esame, il ML-RF utilizzato ricorda un approccio geostatistico simile al kriging per stimare i valori di una variabile presso una stazione/cella basandosi sui dati delle stazioni vicine. In fase di addestramento, per ogni stazione, viene calcolata una variabile che rappresenta una combinazione ponderata a partire dalle misurazioni delle stazioni vicine. Le dipendenze tra le stazioni possono essere descritte in vari spazi metrici, come quello delle coordinate spaziali (distanza geografica) o di uso del suolo (ad esempio, utilizzando il Corine Land Cover – CLC. Anno riferimento 2017, il più recente disponibile al momento della redazione del presente report di qualità dell'aria 2017). Questa variabile di 'lag spaziale' viene successivamente usata come predittore nei punti non misurati. Nel caso in esame la variabile *lag spaziale* si basa sul Corine Land Cover basato su nove classi di uso: Tessuto urbano (CRNurfa); Unità industriali, commerciali e di trasporto (CRNinco); aeroporti (CRNairp); altre superfici artificiali (CRNoart); aree agricole (CRNagri); foreste (latifoglie, conifere o miste, CRNfore); prati, aree arbustive, pianura brulla, spiagge naturali (CRNnatu); masse d'acqua (CRNwate). Le mappe di CLC sono riportate in Figura 33.

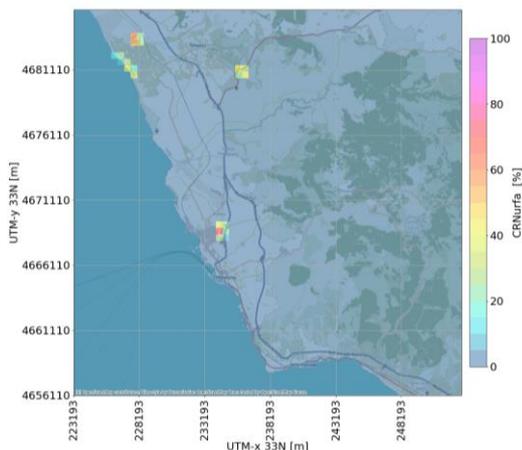
Tessuto urbano



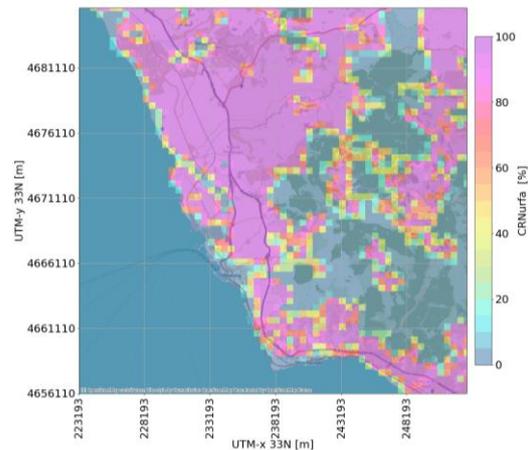
Unità industriali, commerciali e di trasporto



Altre superfici artificiali



Aree agricole



Foreste

Aeroporti

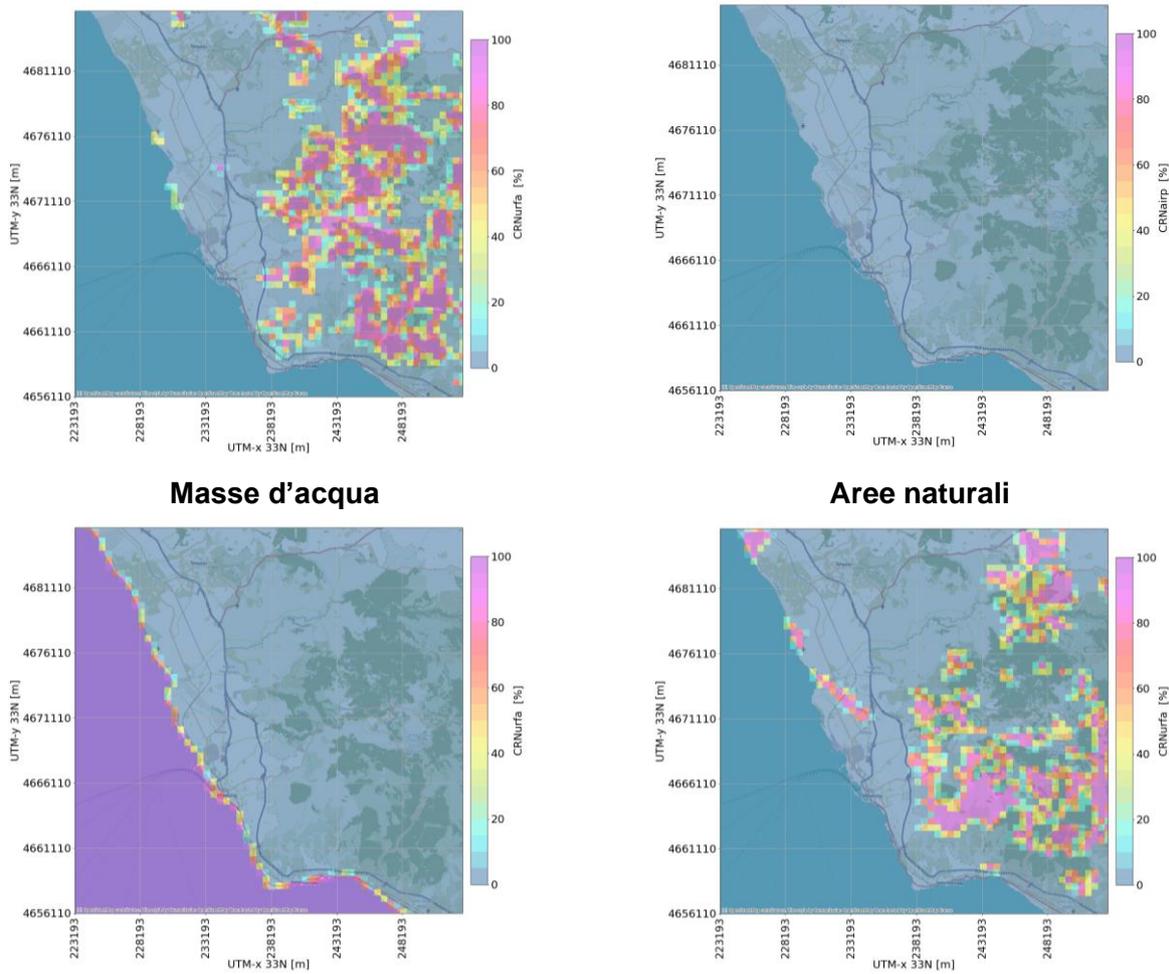


Figura 33. Predittori di copertura del suolo secondo Corine Land Cover 2017. Risoluzione 500m

Il predittore 'lag spaziale' è prodotto nel seguente modo: un modello di "K-Nearest Neighbors" (KNN) individua le stazioni più vicine a quella di interesse nello spazio metrico scelto. Per ciascuna stazione, viene quindi calcolato un peso per le stazioni vicine, basato su una funzione esponenziale che dipende dalla correlazione tra le serie temporali delle stazioni stesse. In questo modo, le stazioni con una correlazione più forte e più vicine influenzano maggiormente la previsione, consentendo di stimare valori più accurati per la stazione target.

Per valutare l'incertezza dei risultati generati dal modello, vengono addestrati due ulteriori modelli di RF, una per il quantile 0.159 e l'altra per il quantile 0.841. Questi modelli vengono poi utilizzati per fornire un intervallo di confidenza, che rappresenta la gamma di possibili valori che la previsione potrebbe assumere, aiutando così a quantificare l'incertezza nelle stime.

In aggiunta al predittore di lag spaziale sono stati utilizzati:

- il predittore di elevazione media (ELEV, Figura 34) ottenuta dal Servizio Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) – European Digital Elevation Model è stato impiegato per tenere conto della differente quota delle stazioni di misura;
- il giorno dell'anno, o giorno giuliano, che va da 1 (il primo gennaio) a 365 (il 31 dicembre, 366 negli anni bisestili), viene spesso usato come indicatore della stagione. In questo lavoro, il giorno giuliano non viene usato direttamente come predittore, perché distingue maggiormente tra il 31 dicembre e il primo gennaio, che sono date consecutive, che tra il primo gennaio e il primo luglio, che hanno stagionalità opposte. Si è scelto di usare invece il seno e il coseno del giorno giuliano moltiplicato per $2\pi/365$ (*julianday_x*, *julianday_y*), perché questa coppia di indicatori è ciclica. Analogamente sono stati definiti il seno e il coseno dei giorni della settimana moltiplicati per $2\pi/7$ (*dayofweek_x*, *dayofweek_y*), di modo di invitare il modello a tenere conto

della differenza tra giorni feriali e giorni festivi. Infine, nel caso di variabili orarie si è scelto di usare il seno e il coseno dell'ora del giorno moltiplicato per $2\pi/24$ (*hours_x*, *hours_y*).

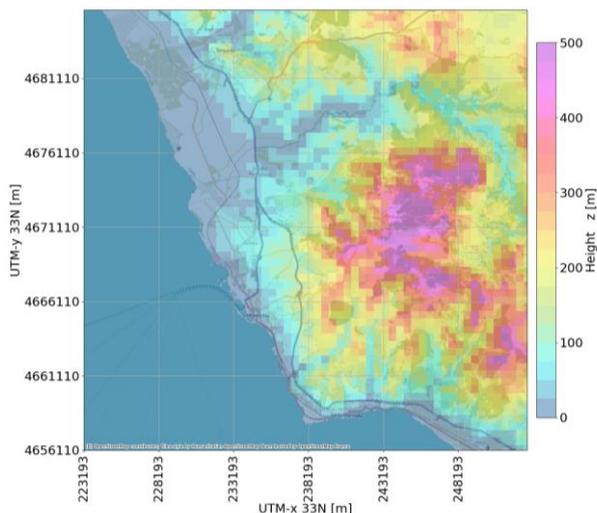


Figura 34. Predittore di elevazione media EU-DEM.

L'algoritmo è stato impiegato per i seguenti inquinanti: PM_{10} e NO_2 per i quali sono disponibili informazioni fornite da un numero sufficiente di stazioni per effettuare l'analisi.

I due modelli di ML-RF, allenati per gli inquinanti con le principali informazioni, sono riportati in Tabella 19.

Tabella 19. Informazioni dei modelli di RF per PM_{10} e NO_2

	Iper-parametri	Predittori
PM_{10}	n_estimators: 200 criterion: squared_error, max_depth:200, min_samples_split:2, min_samples_leaf:3, max_features:0.85, max_leaf_nodes:100	dayofweek_x, dayofweek_y, julianday_x, julianday_y, lag_landuse_distance_obs_pm10, ELEV
NO_2	n_estimators: 200 criterion: squared_error, max_depth:200, min_samples_split:2, min_samples_leaf:3, max_features:0.85, max_leaf_nodes:100	dayofweek_x, dayofweek_y, julianday_x, julianday_y, lag_landuse_distance_obs_no2, ELEV, hours_x, hours_y

In Figura 35 sono riportate le mappe relative alle concentrazioni media annuale ad i rispettivi intervalli di confidenza per il PM₁₀ ed il biossido di azoto. L'intervallo di confidenza quantifica l'incertezza nelle stime ed è stato calcolato utilizzando due modelli RF addestrati per i quantili 0.159 e 0.841. L'interpretazione combinata delle due mappe consente di valutare la distribuzione spaziale sia delle concentrazioni medie annuali sia della robustezza delle stime. Per quanto riguarda il PM₁₀, le zone urbane presentano non solo le concentrazioni più elevate, ma anche una relativa sicurezza nei valori stimati, come dimostrato dalla minore incertezza nel secondo grafico. Tuttavia, nelle aree rurali o meno densamente monitorate, nonostante le concentrazioni di PM₁₀ siano basse, l'incertezza nelle previsioni aumenta, suggerendo una minore precisione del modello in quelle aree. Per quanto riguarda il biossido di azoto si riscontrano concentrazioni più elevate a sud e lungo la costa ma allo stesso tempo maggiore incertezza da parte del modello nello stimare alti valori di concentrazione, come mostrato dalla relativa mappa di incertezza.

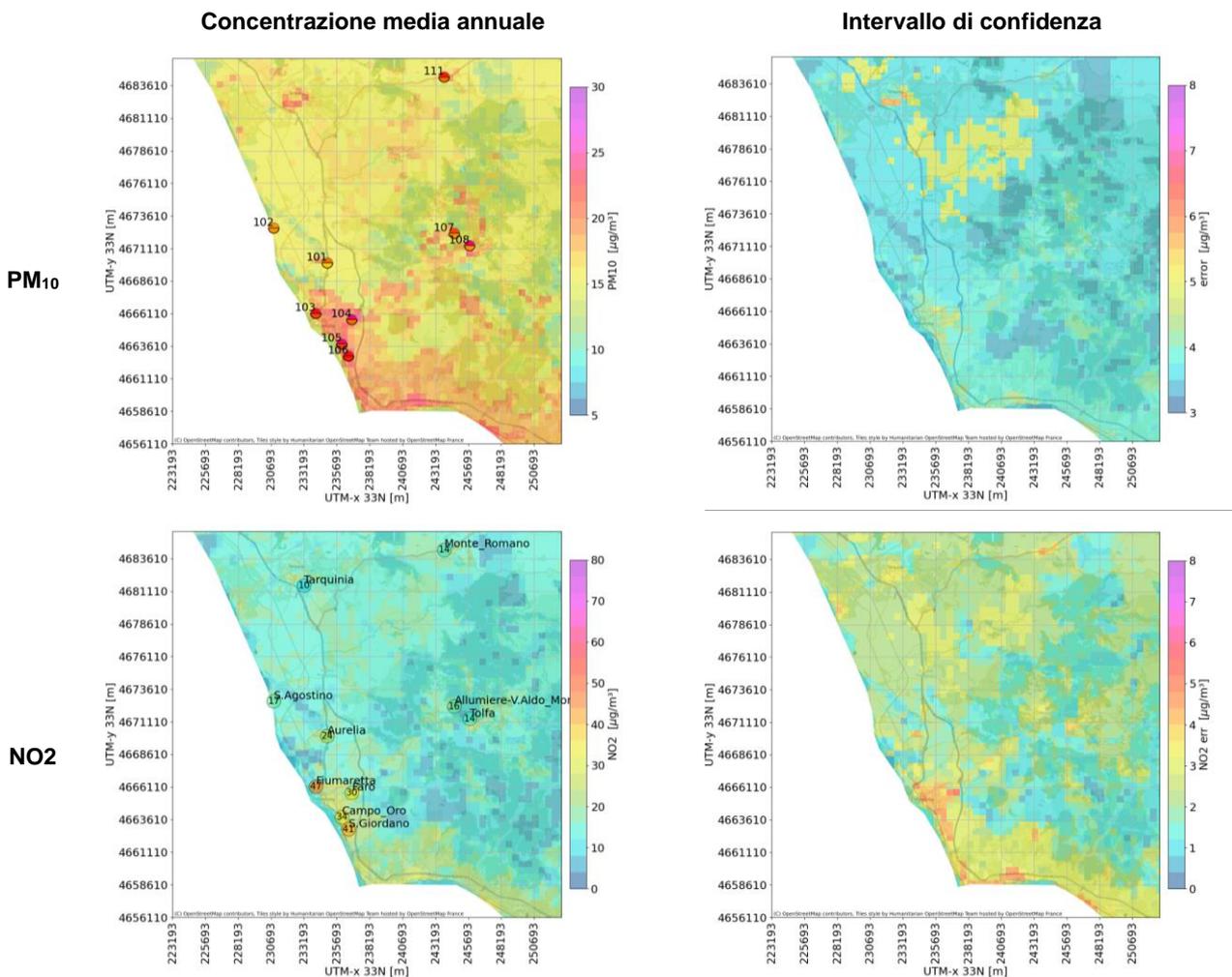


Figura 35. PM₁₀ ed NO₂: mappe di concentrazione media annuale ed intervallo di confidenza.

6.1 Scores e validazione

Per valutare il successo degli algoritmi nell'avvicinare la stima ai dati è stato usato l'indice statistico Root-Mean-Square Error (RMSE), ovvero la radice quadrata dello scarto quadratico medio tra stima e osservazioni. Tale metrica è stata usata anche per selezionare gli iper-parametri dei modelli.

La procedura di validazione utilizzata è la cross-validazione innestata, che consiste nell' eseguire una cross-validazione a 5-fold "esterna" e, per ciascuna fold, un'altra cross-validazione "interna" per l'ottimizzazione degli iper-parametri. Lo score complessivo è quindi la media degli score di ciascuna fold del loop esterno. Sebbene sia più esosa in termini di tempi di calcolo, tale procedura

garantisce una maggiore robustezza dei risultati, rispetto ad una cross-validazione standard. Nella Tabella 20 sono riportati la media e la Deviazioni Standard di RMSE relativi all'algoritmo ML-RF con la procedura di validazione.

Tabella 20. Media e Deviazioni Standard di RMSE [$\mu\text{g m}^{-3}$] per i Modelli RF

MODELLO		NO ₂	PM ₁₀
RF – validazione	Media	5.8	4.9
	Dev. Std	0.7	0.5

6.2 Analisi della rappresentatività della rete per le successive indagini epidemiologiche

La Figura 36 presenta la composizione percentuale delle diverse classi di copertura del suolo (CLC) all'interno di un raggio di 1 km attorno a ciascuna stazione di monitoraggio. Le categorie di uso del suolo secondo la classificazione Corine Land Cover includono: aree urbanizzate (URFA), aree industriali e commerciali (INCO), aeroporti (AIRP), aree agricole (AGRI), foreste (FORE), aree naturali (NATU), acque (WATE) e altri usi del suolo (OART). Si nota una variabilità significativa nella composizione del territorio attorno alle diverse stazioni con una predominanza di aree agricole e una presenza variabile di aree forestali, naturali ed urbanizzate. Ad eccezione della stazione di S. Agostino, la maggior parte delle stazioni è situata in prossimità di centri urbani, mentre soltanto Aurelia e Fiumaretta coprono aree industriali nel raggio esaminato. L'analisi della distribuzione delle aree industriali, mostrata nella figura del CLC, evidenzia come queste siano concentrate principalmente nei pressi dell'impianto ENEL, con la stazione di Fiumaretta che copre solo parzialmente tale area. Tuttavia, l'analisi meteorologica in termini di direzioni di dispersione atmosferica suggerisce che la posizione attuale di questa stazione non sia ideale per monitorare adeguatamente le emissioni dell'impianto, in quanto si trova in una posizione sfavorevole rispetto alle correnti prevalenti. Per migliorare l'efficacia del monitoraggio, sarebbe consigliabile collocare una stazione a nord dell'impianto, garantendo una migliore rappresentatività delle condizioni di dispersione. Infine, si può notare come le stazioni Allumiere - via Aldo Moro e Tolfa abbiano una simile impronta d'uso del suolo così come Tarquinia e Monte Romano.

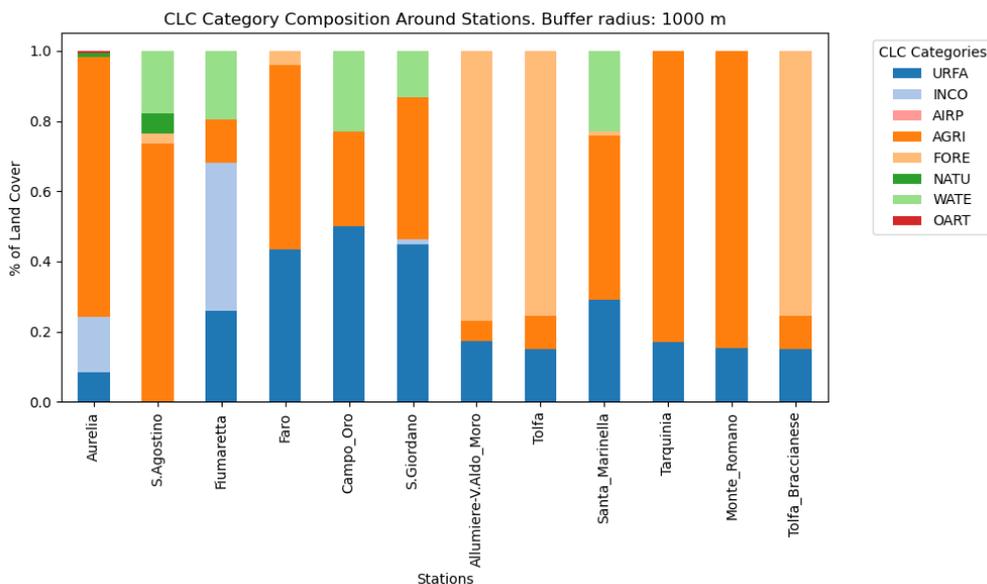


Figura 36. Composizione dell'uso del suolo nell'area di 1 km di raggio intorno a ciascuna stazione.

La composizione della copertura del suolo complessiva sia nel dominio di Civitavecchia che attorno le stazioni in un raggio di 1 km è mostrata nelle successive Figura 37 e Figura 38. La composizione totale sul dominio evidenzia che le aree agricole (49.8%) e forestali (31.0 %)

costituiscono la maggior parte del territorio. Il confronto con le sole stazioni evidenzia che la classe prati, aree arbustive, pianura brulla, spiagge naturali (NATU) è sottorappresentata.

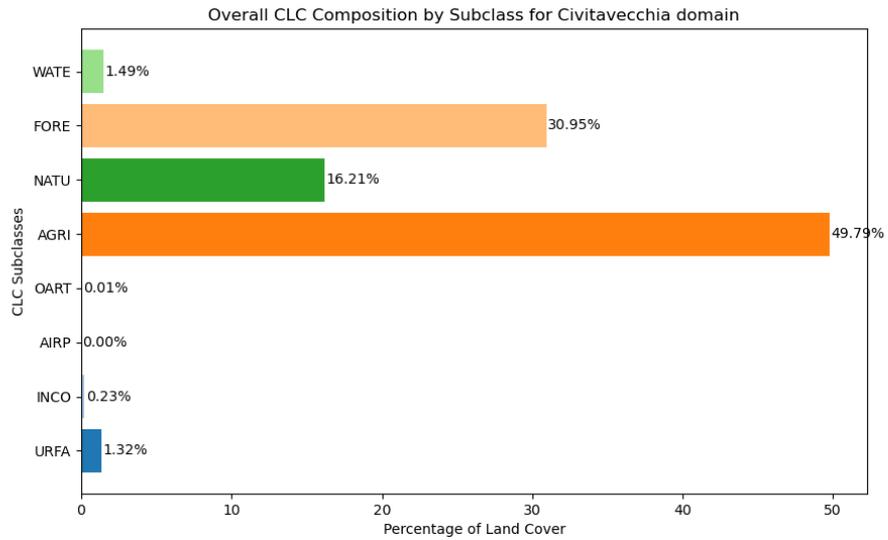


Figura 37. Composizione dell'uso del suolo nel dominio di Civitavecchia.

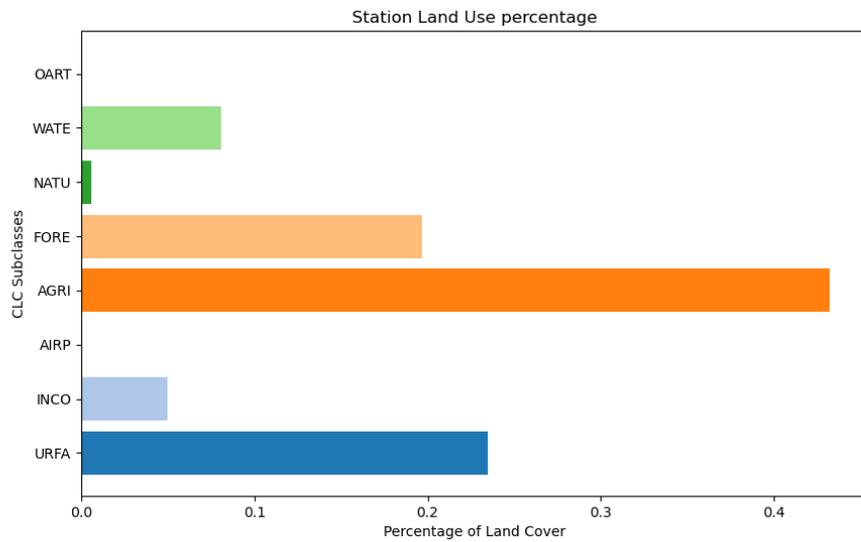


Figura 38. Composizione dell'uso del suolo attorno le stazioni in un raggio di 1 km.

7 Conclusioni

Questo documento riporta i risultati di uno studio finalizzato alla valutazione della qualità dell'aria nell'area circostante la Centrale ENEL Torvaldaliga Nord relativa all'anno 2017. Tale area comprende i Comuni facenti parte del Consorzio per la gestione dell'Osservatorio Ambientale. Lo studio è stato effettuato utilizzando le misure di concentrazione di biossido di zolfo (SO₂), biossido di azoto (NO₂), ozono (O₃) e particolato (PM₁₀, PM_{2.5}) ottenute dagli analizzatori automatici presenti nelle stazioni di misura della rete regionale della qualità dell'aria gestita da ARPA Lazio, accoppiati con i dati emissivi della suddetta centrale ed alle misure meteorologiche indicative di fenomeni di trasporto.

Lo studio ha cercato di rispondere all'obiettivo specifico di approfondire il legame tra inquinamento ed emissioni della centrale. L'esame dei dati forniti dalla rete osservativa non ha evidenziato una correlazione evidente tra i valori medi o di picco degli inquinanti misurati e l'esercizio della centrale. Al fine di meglio interpretare i dati osservati, nel presente rapporto sono fornite informazioni relative alla complessità dei processi chimico-fisici che determinano i fenomeni di inquinamento atmosferico, alternando spiegazioni teoriche e grafiche esplicative realizzate sulla base dei dati locali.

Sulla base dei dati di inquinamento atmosferico disponibili per l'anno 2017, è possibile formulare le conclusioni che seguono.

La centrale ENEL di Civitavecchia è un impianto termoelettrico a polverino di carbone costituito da tre gruppi funzionanti aventi capacità produttiva di circa 2000 MW attraverso la combustione di circa 4,5 milioni di tonnellate l'anno di carbone. Questi numeri lascerebbero prevedere un notevole impatto sul territorio che è tuttavia fortemente mitigato sia dai dispositivi antiinquinamento installati, con i quali sono trattati i reflui gassosi e quindi le emissioni, sia dall'elevata altezza del camino di emissione. L'efficienza degli impianti di abbattimento degli inquinanti principali (polveri, biossido di zolfo ed ossidi di azoto) è continuamente verificata mediante un sistema di monitoraggio continuo nel camino (SME). Per quanto riguarda il camino di emissione, si rileva che esso ha un'altezza fisica di 250 metri che però, in fase operativa, assomma anche la spinta entalpica dei fumi portando l'altezza di emissione dei fumi a quote anche molto superiori. L'effetto combinato dei dispositivi antiinquinamento e dell'altezza delle emissioni determina un'elevata diluizione dei fumi e quindi ad un ridotto impatto sulla qualità dell'aria nel territorio circostante.

La condizione meteorologica della zona è altresì segnata da stabilità atmosferica che si osserva nelle ore pomeridiane e serali; in questi momenti si verifica un disaccoppiamento tra le masse d'aria in quota e quelle a livello del suolo; gli inquinanti rilasciati al suolo vengono intrappolati nei bassi strati atmosferici provocando il loro accumulo.

Normalmente, le condizioni di stabilità vengono meno nelle ore pomeridiane durante le quali vi è un rimescolamento tra le masse d'aria in quota ed al suolo con conseguente diluizione degli inquinanti emessi al suolo. Durante tali ore le concentrazioni di biossido di azoto si riducono e parallelamente risulta un aumento dei livelli di ozono a seguito del trasporto verso il suolo di masse d'aria in quota ricche di ozono. Durante tali ore, inoltre, il regime prevalente dei venti è di brezza di monte che determina il trasporto dei fumi emessi dalla centrale al largo verso il mare.

Queste semplici considerazioni portano alla conclusione che la centrale non impatta in modo rilevante e diretto sul territorio circostante, aspetto che viene tuttavia meglio verificato attraverso le misure sperimentali effettuate nelle stazioni di monitoraggio.

La rete di monitoraggio dell'inquinamento dell'atmosfera nell'area di Civitavecchia e dintorni copre un elevato numero di siti rappresentativi delle diverse aree del territorio in esame ed è quindi idonea per valutare il possibile impatto delle emissioni della centrale ENEL. La rete di rilevamento è gestita inoltre in accordo con i criteri di qualità stabiliti dalla legislazione corrente (Dlgs 155/2010 derivante dal recepimento della Direttiva 50/2008 sulla qualità dell'aria).

I dati raccolti dalle stazioni di monitoraggio indicano che le concentrazioni degli inquinanti a terra sono molto basse. Questi non solo rispettano i limiti di legge, ma nella maggior parte dei casi si trovano molto lontani dalle soglie stabilite. Tutti gli inquinanti esaminati non superano i limiti né gli obiettivi a lungo termine fissati dalla normativa attuale. La qualità dell'aria nell'area considerata, dove vivono circa 100.000 persone, non mostra pertanto criticità rilevanti.

L'analisi delle concentrazioni giornaliere di PM₁₀ mediante la rappresentazione "heatmap" fornisce utili indicazioni circa la simultaneità di picchi di concentrazione attribuibili ad eventi particolari quali incendi ed eventi di trasporto di polveri provenienti dal Sahara. Tale analisi ha evidenziato il significativo impatto dei vasti incendi che hanno interessato la zona nord di Civitavecchia, in località Molacce, durante il mese di luglio. L'indisponibilità di campi prodotti dal modello di rianalisi europeo CAMS, che includono il contributo delle polveri sahariane ai livelli di PM₁₀, non ha permesso di procedere alla identificazione di episodi di intrusione di polveri naturali provenienti dal Sahara. I risultati ottenuti nell'ambito del progetto DIAPASON hanno evidenziato che nel corso del 2017 sono stati registrati il minor numero di tali episodi.

Similarmente, si possono trarre conclusioni riguardo a un altro inquinante significativo per la protezione della salute pubblica, vale a dire il biossido di azoto. Anche questo inquinante non supera mai i limiti stabiliti e la sua concentrazione rimane ben al di sotto dei limiti che proteggono la salute della popolazione esposta. L'analisi delle mappe di concentrazione relative alle stazioni vicine alla centrale mostra l'effetto combinato delle diverse sorgenti presenti sul territorio e non mette in luce il contributo diretto delle emissioni della centrale. L'analisi successiva, mirata a esaminare eventuali relazioni tra i rapporti NOX/SO₂ rilevati nelle diverse stazioni e i relativi rapporti NOX/SOX emessi dai 3 gruppi di produzione della Centrale, non ha rivelato alcuna correlazione tra le due variabili analizzate. Tali risultati attestano la presenza di fenomeni complessi che coinvolgono le specie emesse dalla Centrale e dalle sorgenti presenti nel territorio considerato, nonché l'impossibilità di correlare le operazioni della Centrale con i livelli di qualità dell'aria rilevati.

Per quanto riguarda i livelli di ozono, si osserva che la dinamica di formazione e trasporto di questo inquinante è molto complessa ed è molto difficile stabilire un nesso di causalità tra emissioni e concentrazioni. Tra l'altro, i precursori dell'ozono sono anche di origine naturale e questo ne complica l'attribuzione alle varie sorgenti. I livelli di ozono osservati nell'area di Civitavecchia si pongono agli stessi livelli di quelli osservati in altre aree sia costiere sia interne dimostrando così la natura regionale ed interregionale di questo inquinante. L'altro indicatore di ozono, ossia il parametro AOT₄₀, rientra ampiamente nei valori stabiliti dalla legislazione.

In definitiva l'analisi dei dati rilevati nell'anno di riferimento 2017 non mostra criticità e si allinea con altre realtà Regionali dimostrando così lo scarso impatto atmosferico della centrale ENEL sul territorio circostante.

Mediante l'utilizzo di un algoritmo *machine learning* denominato *Random Forest* sono state prodotte mappe di concentrazione media annuale di PM₁₀ e NO₂ e relative incertezze su un dominio di dimensioni pari a 30 x 30 km² attorno alla Centrale ENEL TVN alla risoluzione spaziale di 500 m. In tal modo è possibile estendere l'informazione fornita dalla rete osservativa ad aree ove non sono disponibili informazioni sperimentali. Per quanto riguarda il PM₁₀, le zone urbane presentano non solo le concentrazioni più elevate, ma anche una relativa sicurezza nei valori stimati, come dimostrato dalla minore incertezza. Tuttavia, nelle aree rurali o meno densamente monitorate, benché le concentrazioni di PM₁₀ siano inferiori, l'incertezza nelle previsioni aumenta, suggerendo una minore precisione del modello in tali aree. Per quanto riguarda il biossido di azoto si stimano concentrazioni più elevate a sud e lungo la costa associate, tuttavia, ad una maggiore incertezza.

I risultati prodotti in questo studio possono costituire infine un'utile premessa per ulteriori valutazioni sanitarie.

8 Appendice

A. Campagna sperimentale meteorologica

L'indagine sperimentale realizzata dal Consorzio e CNR ISAC, presso la Riserva delle Saline di Tarquinia, situata sulla costa tirrenica e distante circa 10 Km dalla Centrale, ha fornito informazioni utili alla caratterizzazione meteorologica dell'area interessata dalle emissioni della Centrale ENEL. Tale indagine è iniziata nel maggio 2015 e, dopo alcune interruzioni, proseguita dal novembre 2015 all'agosto 2016. Nel sito di misura, CNR-ISAC ha mantenuto operativo un sistema di monitoraggio di parametri meteorologici molto avanzato mediante il quale sono stati rilevati in continuo i parametri meteo e micrometeorologici che forniscono informazioni importanti relative allo sviluppo temporale e spaziale della circolazione di brezza nella zona di confine tra il mare e la superficie terrestre. In particolare, sono state prodotte informazioni rilevanti riguardo la:

- struttura verticale della turbolenza termica;
- struttura tridimensionale del campo di vento;
- altezza dello strato rimescolato;
- parametri che caratterizzano la turbolenza atmosferica;
- radiazione ad onda corta e lunga (bilancio radiativo).

I risultati di tale campagna forniscono indicazioni molto attendibili circa la meteorologia locale e, pur tenendo conto della inter-variabilità annuale, sono molto rappresentativi della meteorologia della costa tirrenica e possono essere estese anche agli anni successivi la loro acquisizione.

a) *Analisi anemologica*

Di seguito vengono riassunte le caratteristiche più significative dei dati anemologici e le implicazioni relative alla qualità dell'aria per i diversi mesi:

- durante il mese di novembre la velocità del vento è risultata inferiore a 3 m/s, ad eccezione di alcuni giorni durante i quali ha raggiunto valori relativamente elevati. Nei periodi di minore intensità, il vento proviene prevalentemente dalla direzione E a causa della brezza di monte; mentre nei periodi con maggiore intensità, i venti provengono da W a causa delle brezze di mare. Velocità elevate sono in corrispondenza di eventi turbolenti, con venti provenienti dai quadranti N e W, in condizioni di bassa pressione, durante i quali si assiste ad una elevata varianza della componente verticale del vento e dell'energia cinetica turbolenta. In queste condizioni, l'atmosfera è molto rimescolata;
- nel mese di dicembre si osserva un lungo periodo di calma di vento. La direzione prevalente è sempre E, mentre durante il giorno, la direzione tende a stabilizzarsi da N-W. La temperatura subisce un leggero calo, mentre gli eventi di elevata varianza della velocità verticale sono rari, segno questo di marcata stabilità atmosferica.
- al contrario, in gennaio si nota un breve periodo di stabilità, mentre nella maggior parte dei casi si osservano elevate velocità del vento (>8 m/s) proveniente dai quadranti meridionali e orientali. L'elevata varianza della velocità verticale è segno evidente di forte turbolenza con rimescolamento dell'atmosfera molto attivo. Ciò è evidentemente causato da perturbazioni che contribuiscono a disperdere efficacemente gli eventuali inquinanti presenti sia in quota che a livello del suolo;
- a febbraio si notano elevate velocità del vento che spesso supera i 5 m/s ed in alcuni casi supera il valore di 8 m/s. Non si osserva la regolarità tipica dei periodi di stabilità. La temperatura non subisce variazioni di rilievo, mentre la turbolenza atmosferica, appare costantemente elevata in tutto il periodo;
- nel mese di marzo la temperatura comincia ad aumentare, mentre la velocità del vento si mantiene su valori relativamente elevati con picchi che superano i 10 m/s. Anche in questo caso la varianza della velocità verticale risulta molto elevata, segno di turbolenza atmosferica molto attiva. Le velocità del vento più contenute sono associate alla brezza di terra con direzione E, mentre le più elevate sono caratteristiche di provenienze occidentali;

- ad aprile la temperatura non mostra un aumento dei gradienti giorno/notte (circa 10°C) dovuti all'aumentata radiazione solare, mentre la velocità del vento si attesta generalmente al di sotto dei 6 m/s, con direzione prevalente da E di notte e da W di giorno a causa del regime di brezza che prevale in queste condizioni. La varianza della velocità verticale del vento mostra valori molto bassi di notte e relativamente elevati nel corso della giornata quando si sviluppano fenomeni di spiccata turbolenza con venti prevalenti dai quadranti occidentali;
- tale situazione è anche caratteristica del mese di maggio quando la temperatura media aumenta di circa 6-8 °C causa un aumento consistente dell'irraggiamento solare. La velocità media del vento aumenta e, in alcuni casi, supera 8 m/s con provenienza prevalente dai quadranti meridionali. Nelle giornate di relativa calma di vento, l'incremento della velocità del vento si nota nel corso delle ore diurne con provenienze dai quadranti occidentali. In questo periodo si osservano valori elevati della velocità verticale e quindi di turbolenza;
- nel mese di giugno la temperatura è in aumento fino a 30 °C dovuta ad un ulteriore aumento dell'irradiazione solare che raggiunge i 230 W/m². La velocità media del vento si riduce e mantiene le caratteristiche di brezza, ossia provenienza da occidente nelle ore centrali della giornata e da oriente nelle ore notturne. Nelle ore diurne si osservano netti fenomeni di turbolenza con elevati valori della varianza della velocità verticale e quindi di efficiente rimescolamento.
- a luglio, l'irradiazione solare è molto elevata: la velocità del vento non supera generalmente 3 m/s (venti da sud), e, in alcuni giorni, 6 m/s (venti da ovest). I valori meno elevati si osservano di notte in corrispondenza dei venti da Est (brezza di terra). La temperatura si stabilizza a valori elevati (30 °C), mentre le turbolenze atmosferiche si accentuano nelle ore diurne;
- agosto vede un cambiamento della situazione in quanto mentre alcune giornate mostrano il comportamento osservato a luglio, in altre giornate la velocità del vento assume valori più elevati in corrispondenza di provenienze orientali. Questi eventi sono associati ad un'elevata turbolenza, quindi ad un profondo rimescolamento verticale. Le velocità meno intense sono osservate di notte in presenza di venti da est (brezza di terra), quelle più intense di giorno quando prevalgono venti da sud e da ovest. L'andamento generale di entrambi i parametri è caratteristico di un sistema di circolazione locale a mesoscala, come quello di brezza. La temperatura si stabilizza a valori elevati, ma in discesa rispetto ai valori di inizio mese.

Nella figura seguente viene mostrata la rosa dei venti relativa al periodo di studio, caratterizzata da venti prevalenti da NE, quale risultato delle brezze di monte, e dai quadranti meridionali risultanti dalla componente sinottica. Sono anche evidenti le componenti occidentali, la maggior parte delle quali dovute alla brezza di mare.

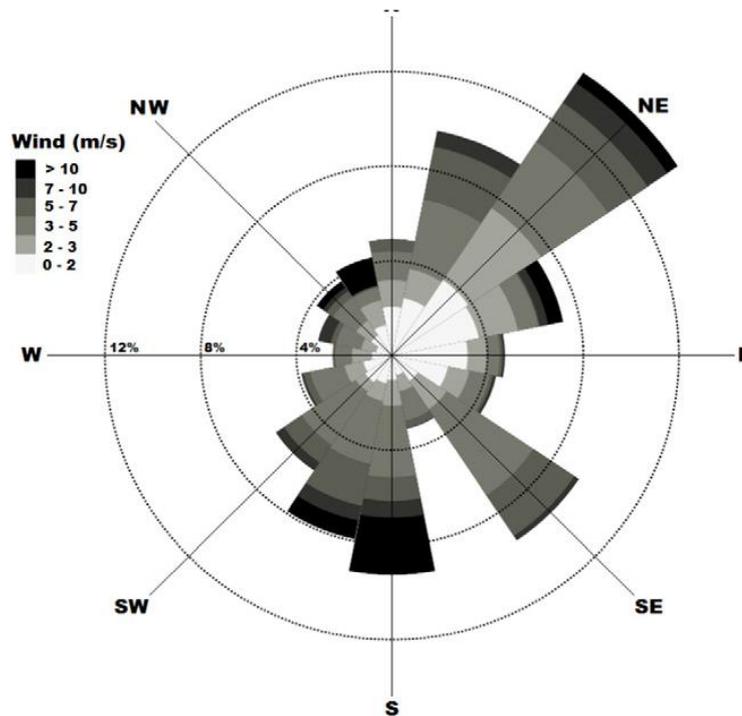


Figura A1. Rosa dei venti relativa alla indagine realizzata dal Consorzio e CNR ISAC

b) La struttura verticale dell'atmosfera

L'impiego di strumentazione SODAR ha permesso di valutare le caratteristiche dell'atmosfera in quota e, conseguentemente, di meglio valutare l'impatto di inquinanti emessi da sorgenti elevate quali quelli prodotti dalla Centrale ENEL. Ciò offre la possibilità di osservare il campo di vento a diverse quote e, soprattutto, di valutare l'evoluzione dell'altezza dello strato rimescolato (PBL).

Per quanto riguarda la componente verticale del campo di vento, durante il periodo invernale la velocità del vento alla quota più bassa generalmente non supera 4 m/s, i valori massimi (8 m/s) sono osservati durante le ore centrali della giornata in corrispondenza della brezza di mare. La velocità del vento aumenta con la quota a tutte le ore arrivando fino a 12 m/s. Le circolazioni prevalenti, oltre la brezza di terra (provenienza orientale), sono le circolazioni alla scala sinottica da sud e da nord responsabili dei venti di maggiore intensità. A terra, è evidente il passaggio dalla brezza di terra (venti da E) alla brezza di mare (venti da O - SO). A partire dalla quota di 80 m, oltre alla brezza di terra prevalgono le circolazioni alla scala sinottica da sud e da nord alle quali corrispondono le velocità del vento più elevate. Nel corso della primavera, si osserva che i venti aumentano di intensità con la quota con i venti di provenienza meridionale che sono responsabili dei valori più alti della velocità del vento. Il regime di brezza è quindi difficilmente rilevabile in quanto prevalgono i flussi a scala sinottica che provocano un aumento della velocità nei settori NE, SE e NW,

Nei mesi estivi, il vento si mantiene a livelli di velocità contenuti con valori più elevati nel corso delle ore diurne in corrispondenza della brezza di mare e dei venti di scala sinottica provenienti dalla direzione S. Le misure in quota dimostrano l'esistenza di due campi di vento. Il primo associato al regime di brezza, ed il secondo associato alla scala sinottica.

I dati SODAR consentono di stabilire le condizioni dello strato rimescolato, e quindi le condizioni di stabilità della atmosfera, mediante l'analisi del profilo termico. Nelle ore più calde del giorno, si osserva una forte instabilità termica dovuta ad un chiaro gradiente verticale negativo della temperatura. In queste condizioni vi è un notevole rimescolamento dell'atmosfera che disperde efficacemente gli inquinanti emessi al suolo; mentre ricadono gli inquinanti emessi in quota anche se diluiti. In condizioni di neutralità termica, si osserva una transizione verso le condizioni di stabilità. Questa si osserva tipicamente nelle ore notturne in presenza di condizioni sinottiche anticicloniche con conseguente condizioni di dispersione verticale ridotte praticamente a valori nulli. In queste condizioni i gradienti termici sono positivi e quindi l'atmosfera diviene molto stabile.

Ciò consente di prevedere la stagnazione degli inquinanti emessi a livello del suolo, mentre quelli emessi ad alta quota non raggiungono gli strati più bassi dell'atmosfera.

Dai dati si deduce che velocità e direzione del vento subiscono una variazione significativa con la quota. Pertanto, è utile e necessario disporre dell'intero profilo verticale di queste variabili, al fine di meglio comprendere e monitorare l'evoluzione della situazione meteorologica e micrometeorologica locale. Infatti, la velocità del vento aumenta sensibilmente con la quota, e in soli cento metri è possibile trovare valori quattro volte superiori a quelli misurati a terra, accompagnati da una significativa variazione della direzione. Durante il giorno si osserva l'alternarsi della brezza di mare e di terra in tutte le stagioni. Questo andamento è sempre presente alla superficie. La brezza è a regime nelle ore centrali della giornata con intensità di picco intorno alle 15:00 LST (velocità massima del vento 6 m/s, velocità media di 4 m/s) e direzione prevalente nell'intervallo W-NW. Durante l'inverno il fronte di brezza ha uno spessore modesto, inferiore ad 80 m. Alle quote sovrastanti prevale la circolazione sinottica in genere da settori meridionali. Questa circolazione, responsabile dei venti di maggiore intensità, diventa prevalente soprattutto nel periodo invernale. Durante la primavera lo spessore del fronte di brezza aumenta fino a raggiungere e superare, in estate, i 190 m. La circolazione sinottica dalla direzione Sud, particolarmente evidente in quota durante il periodo invernale, è meno intensa durante l'estate, quando la circolazione locale di brezza è più intensa. La brezza di terra (centrata nel settore di provenienza E) è confinata in uno strato di spessore più modesto: osservabile soltanto in prossimità del terreno durante l'inverno e la primavera, arriva ad essere rilevabile in quota solo nel periodo estivo. Durante l'inverno, in quota, sono spesso presenti venti da N per tutta la giornata, caratterizzati da intensità relativamente elevate. Durante il giorno, soprattutto d'estate, prevale una circolazione locale di brezza (direzione SW) modulata spesso da forzanti sinottiche (estensione fino al settore S).

Durante l'estate la PBL non supera i 500-600 m, i valori massimi sono osservati nelle ore diurne, mentre quella osservata nello strato stabile in genere non supera 200-300 m. L'evoluzione stagionale dell'altezza di mescolamento (Mixing Layer Height - MLH) relativa allo strato stabile è molto debole in quanto la forzante maggiore è la velocità di attrito, che dipende essenzialmente dalla velocità del vento, caratterizzata da una evoluzione stagionale molto poco marcata.

2017 In conclusione, si può affermare il regime di brezza è tale che nelle ore diurne le emissioni della Centrale sono dirette verso l'interno ed interessano quindi l'ambiente circostante occidentale. In queste condizioni prevalgono forti fenomeni di trasporto verticale che causano fenomeni di looping con trasferimento a terra di inquinanti che possono anche raggiungere concentrazioni relativamente elevate. Esse sono comunque di durata molto breve per cui l'effetto globale risulta poco consistente. Durante i periodi di brezza proveniente da terra, gli inquinanti sono trasportati verso il mare e possono ritornare a terra solo in condizioni di grande diluizione ed a latitudini superiori od inferiori in funzione della situazione sinottica a mesoscala. Nella maggior parte dei casi, nelle ore notturne si sviluppa uno strato rimescolato di altezza limitata che influisce principalmente sulle concentrazioni di inquinanti emessi a livello del suolo, principalmente dovuti a traffico veicolare e ad emissioni civili (compreso il riscaldamento domestico). In queste condizioni di elevato inquinamento nei bassi strati dell'atmosfera, il contributo della Centrale è irrilevante.

B. PM₁₀: riferimento a studi di Source apportionment

In uno studio di source apportionment di PM₁₀ di Cesari et al. (2016)³ condotto nei siti di S. Agostino, Borgo Aurelia e Parco Antonelli, è stata analizzata la composizione chimica, evidenziando una somiglianza statistica delle misure tra i siti non urbani di Borgo Aurelia e S. Agostino. Questo risultato è coerente con i dati presentati nel capitolo 5.6, ottenuti tramite l'analisi di clustering delle serie temporali, e conferma la validità dell'approccio. Al contrario, nello studio si riporta che il sito urbano di Parco Antonelli si discosta significativamente in termini di composizione chimica, con concentrazioni maggiori di PM₁₀, OC, EC, NO₃⁻, Ca²⁺, Al, Si, Ti, Mn, Fe, Cu e Zn. Inoltre, per quanto riguarda la mediana delle concentrazioni di Na⁺, Cl⁻, Mg²⁺ e Br, non sono emerse differenze in quanto queste specie sono principalmente influenzate da spray marino, distribuito in maniera omogenea sul territorio. La campagna sperimentale è stata condotta dal febbraio 2010 all'agosto 2014 relativamente al materiale particolato sospeso, accompagnate da modelli in grado di ricostruire le possibili sorgenti di inquinamento in un determinato recettore. Nel corso delle diverse campagne (estive ed invernali) nel periodo di cui sopra, sono stati campionati circa 350 filtri di particolato sui quali sono state eseguite le analisi per la stima dei diversi contributi emissivi. Anche se i campioni si riferiscono ad un periodo di tempo diverso da quello relativo al presente rapporto, è significativo osservare che lo studio fornisce il contributo percentuale della Centrale al contenuto del materiale particolato PM₁₀. I campionamenti sono stati eseguiti in tre siti nel Comune di Civitavecchia e precisamente nei siti di cui alla tabella successiva.

Tabella B1. Le tre stazioni di rilevamento di PM10 per la campagna sperimentale

Sito	Longitudine	Latitudine	Distanza dalla Centrale (m)
Sant'Agostino	11 47 54.00 E	42 05 13.99 N	3.300 - N
Borgo Aurelia	11 47 43.64 E	42 08 24.83 N	2.800 - ENE
Parco Antonelli	11 47 54.00 E	42 05 13.99 N	5.800 - SW

Insieme ai campioni, sono state valutate direzioni e velocità del vento che mostrano valori sistematicamente simili a quelli osservati dalla stazione meteo della Centrale. In particolare, le frequenze massime della direzione del vento si riscontrano nelle direzioni NE, S, SE

Sui campioni di particolato PM₁₀ sono state eseguite misure di concentrazione di diversi anioni e cationi caratteristici del profilo chimico delle emissioni più significative dell'area (Centrale ENEL, traffico veicolare, riscaldamento domestico, spray marino, combustione di vegetali etc.). I dati sono stati poi trattati con un modello statistico PMF (Positive Matrix Factorization).

Il risultato dell'applicazione dei modelli alle misure sperimentali, dimostrano che il contributo medio della Centrale all'inquinamento atmosferico da polveri PM₁₀ è contenuto a non più del 1-2%; naturalmente per i siti presi in esame. Considerando che la dispersione del pennacchio di emissione della Centrale avviene su un dominio spaziale molto più ampio, è possibile che nel campo remoto il contributo sia superiore, ma pur sempre limitato a valori percentuali relativamente modesti.

Altri studi in letteratura hanno analizzato il contributo della Centrale ENEL TVN alle concentrazioni di PM₁₀ nell'area. Lo studio di Contini et al., 2016⁴ ha valutato l'impatto della Centrale ENEL TVN

³ D. Cesari, A. Donateo, M. Conte, D. Contini, Inter-comparison of source apportionment of PM10 using PMF and CMB in three sites nearby an industrial area in central Italy, Atmospheric Research, 182, 2016,

⁴ D. Contini, D. Cesari, M. Conte, A. Donateo "Application of PMF and CMB receptor models for the evaluation of the contribution of a large coal-fired power plant to PM10 concentrations" Science of the Total Environment 560-561 (2016) 131-140.

sulle misurazioni di PM10 effettuate presso i siti di Borgo Aurelia (fondo urbano), S. Agostino (rurale) e Parco Antonelli (urbano). I risultati hanno mostrato che la Centrale contribuisce approssimativamente per il 2% ai livelli di PM₁₀ nell'area, con variazioni minime tra i diversi siti di monitoraggio. Lo studio ha utilizzato i modelli di ricettore Positive Matrix Factorization (PMF) e Chemical Mass Balance (CMB) per valutare l'impatto della Centrale, sottolineando le difficoltà nel distinguere i contributi della Centrale dalle fonti crostali, in particolare per i composti a base di silicio e alluminio.

Uno studio analogo, condotto su quattro siti industriali (Cesari, Merico, et al.) ha confrontato i risultati con quelli ottenuti per la Centrale ENEL TVN. I risultati confermano quanto osservato nello studio precedente, evidenziando un contributo minimo delle centrali limitrofe al PM₁₀ misurato. Inoltre, il contributo della Centrale TVN risulta minore rispetto a quello riscontrato per la Centrale termoelettrica ENEL "Federico II", probabilmente a causa dell'altezza maggiore del camino della Centrale TVN.

Inoltre, dal 2015 al 2016, è stata effettuata una campagna di studio ambientale basata su una rete di bio-monitoraggio avente per soggetto la popolazione lichenica in aree potenzialmente interessate dalle ricadute della Centrale ENEL. Le osservazioni spaziano dall'anno 2008 al 2015 su un'area di studio comprendente i Comuni di Civitavecchia, Tarquinia, Monte Romano, Blera, Allumiere e Tolfa; quindi un'area relativamente vasta che copre quasi interamente il territorio potenzialmente interessato alle emissioni della Centrale. Oltre allo studio della biodiversità lichenica, le stazioni di campionamento sono state anche utilizzate per studi di bio-accumulo, in particolare di elementi chimici metallici. È, infatti, ben noto che le popolazioni licheniche sono particolarmente sensibili alla presenza di sostanze inquinanti che ne provocano la loro riduzione. Questa indagine, oltre ad essere caratterizzata dall'elevato sviluppo territoriale, è anche rilevante in quanto comprende un elevato numero di punti di campionamento (78) ed è quindi caratterizzata da elevata risoluzione spaziale. Il dato di Indice di Biodiversità lichenica determinato dal 2008 al 2015 non mostra valori statisticamente diversi supportando così l'ipotesi di una mancanza di cambiamenti nei dati di diversità lichenica nell'intera area di studio. Per cui, dalle risultanze delle campagne si può concludere che la lista floristica non ha subito variazioni rilevanti in specie. Le comunità di licheni presenti sugli alberi della rete non hanno subito variazioni sostanziali nel periodo oggetto dell'indagine, e le differenze nei valori di IBL delle cinque indagini sono molto contenute e non sono risultate significative.

I dati di bio-accumulo si riferiscono a 22 stazioni che, pur essendo in numero ridotto rispetto alle stazioni di bio-monitoraggio, costituiscono pur sempre un numero significativo di siti di misura. Il dato di bio-accumulo degli elementi chimici misurati è stato valutato in termini di arricchimento rispetto al contenuto delle stesse specie nel terreno. I siti in posizione settentrionale rispetto alla Centrale non mostrano fattori di arricchimenti rilevanti. Poiché sono questi i siti dove la direzione prevalente dei venti comporta un impatto della Centrale più elevato, se ne deduce che detto impatto si può considerare minimo. Fattori di arricchimento più elevati si riscontrano invece nelle stazioni ai margini orientali e meridionali dell'area di studio. I fattori più elevati di arricchimento sono tipici delle prime propaggini dei monti della Tolfa ed in alcune aree a nord di Tolfa ed Allumiere. Comunque, il bio-accumulo risente molto della natura vulcanica del territorio che conferisce alle deposizioni uno spiccato carattere crostale.

I dettagli di questa indagine sono reperibili nel Rapporto conclusivo relativo all'indagine lichenica ⁵.

⁵ "Indagine lichenologica nel territorio circostante la città di Civitavecchia-Campagna 2015" rapporto tecnico del Dipartimento di Farmacia dell'Università di Genova

C. Ozono

L'ozono è un inquinante secondario prodotto di complesse reazioni fotochimiche che coinvolgono composti organici volatili (VOC) e ossidi di azoto (NOx), detti precursori, in presenza di radiazione solare. I livelli di ozono tendono ad essere più alti durante il giorno, durante l'estate o la stagione calda. Le condizioni meteorologiche influenzano i livelli di tale inquinante, in particolare la temperatura e la velocità del vento (es. trasporto di precursori da aree urbane, scale spaziali dell'ordine di decine/centinaia di chilometri). Moti convettivi possono dar luogo ad un aumento dei livelli di ozono a seguito del trasporto di ozono dagli strati più elevati, ove tale inquinante è presente in maggiore quantità, verso il suolo.

Nella bassa troposfera, l'ozono è prodotto sia da sostanze naturali che da fonti antropiche. I precursori antropici dell'ozono provengono da un'ampia varietà di sorgenti fisse e mobili attraverso processi di combustione e di evaporazione (VOC); i precursori naturali derivano dalla vegetazione (VOC biogenici) e, relativamente agli NOx, da intrusioni stratosferiche, fulmini, suolo e incendi.

Un importante indicatore dell'inquinamento atmosferico è il radicale ossidrilico (OH*) che si forma a seguito della foto-dissociazione dell'ozono. Tale radicale è molto reattivo tende a legarsi con sostanze inquinanti, quali il monossido di carbonio, l'ossido di azoto, l'anidride solforosa, ecc., trasformandoli in composti idrosolubili che vengono rimossi dalla troposfera a seguito delle precipitazioni (vedi Figura C1). Per questa ragione tale radicale viene considerato uno «scavenger», ovvero uno spazzino che «pulisce» l'atmosfera.

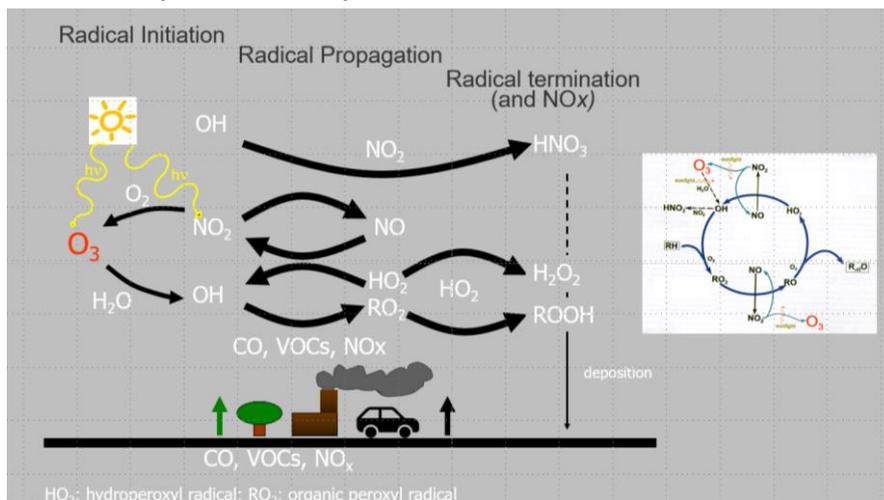


Figura C1. Meccanismo semplificato di specie radicaliche in atmosfera.

Lo studio dei tassi di produzione del radicale ossidrilico, degli NOx e dei VOC in un'area permette di determinare il suo regime fotochimico e individuare conseguentemente le politiche più efficaci di riduzione dei livelli di ozono.

In generale, quando il tasso di produzione di OH* è maggiore del tasso di produzione di NOx (scarsa presenza di NOx, aree rurali e aree suburbane sottovento) si parla di regime NOx limitato, in questa situazione, il modo più efficace per ridurre l'ozono è ridurre le emissioni attuali e future di NOx.

Viceversa, quando il tasso di produzione di OH* è inferiore al tasso di produzione di NOx (elevata presenza di NOx, aree urbane) si parla di regime VOC limitato, in questa situazione, il modo più efficace per ridurre l'ozono è ridurre le emissioni attuali e future di VOC.

Tra tali estremi esiste una regione di transizione dove l'ozono è quasi ugualmente sensibile a variazioni di NOx e VOC.

Le concentrazioni di ozono sono determinate inoltre dalle condizioni meteorologiche. Infatti, essendo l'ozono un gas molto reattivo, quando si trova in atmosfera stabile viene consumato dagli

inquinanti presenti a livello del suolo e quindi la sua concentrazione diminuisce, specialmente nelle ore notturne. Alla presenza di radiazione solare, esso si accumula determinando concentrazioni elevate. Di conseguenza, le concentrazioni mostrano minimi durante le ore notturne e massimi durante il giorno.

I processi meteorologici delle brezze, mostrati in Figura C2, portano le masse d'aria ad interessare alternativamente l'ambiente terrestre (B) e quello marino (A) dove, peraltro l'ozono si forma più facilmente grazie alla quasi raddoppiata doppia irradiazione solare dovuta alla riflessione delle radiazioni solari sulla superficie del mare. Il processo di brezza porta ozono nell'alta troposfera da dove può essere trasportato a terra per fumigazione verticale, in particolare durante i periodi di instabilità diurna. La combinazione dei due regimi di brezza e della ventilazione a grande scala verso l'area di convergenza tropicale (C), è tale da determinare un movimento a spirale (D). Dunque, con ogni probabilità, l'ozono riscontrato sull'area si può in gran parte attribuire a precursori emessi a latitudini superiori e che sono poi trasportati verso aree più meridionali. Questo semplice modello è applicabile nelle condizioni di alta pressione sinottica e quindi di stabilità atmosferica. Nei casi di instabilità, le concentrazioni di ozono a terra non sono più modulate, ma si mantengono più o meno costantemente basse. Ciò è dovuto sia alla forte diluizione dei precursori, sia alla scarsa intensità UV dovuta alla copertura del cielo.

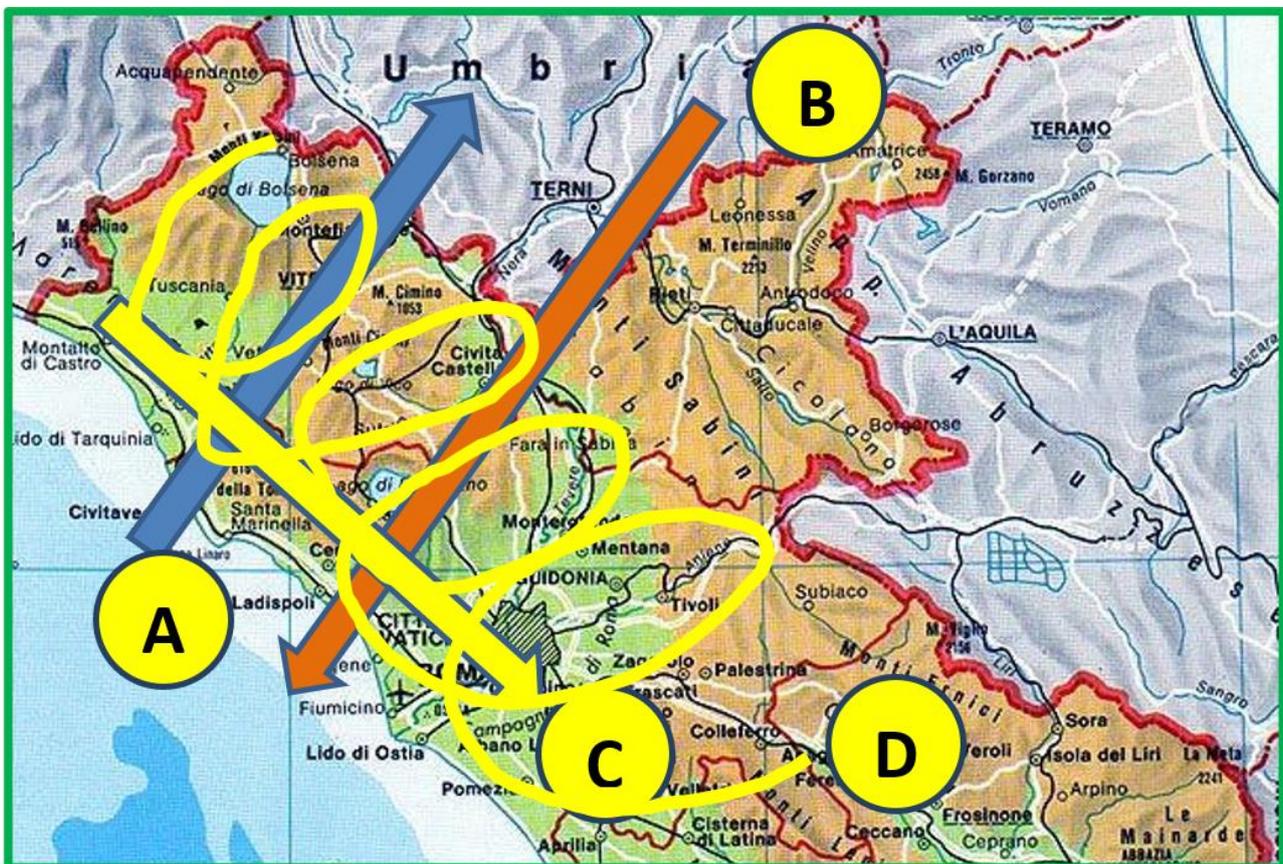


Figura C2. Schema dei fenomeni meteorologici delle brezze

L'immissione di ozono negli strati superiori della troposfera libera determina anche il suo trasporto a terra, dove reagisce con gli ossidi di azoto generando biossido di azoto. È facilmente dimostrabile che il processo genera concentrazioni di ozono e biossido di azoto che sono anticorrelate. L'ozono mostra massimi nelle ore centrali della giornata, mentre il biossido di azoto assume i valori più elevati al mattino e nelle ore serali, mentre durante il giorno assume valori bassi grazie al trasferimento verticale di masse d'aria dalla troposfera libera. La stretta relazione tra questi due inquinanti determina la definizione della loro somma chiamata "ossidanti totali".

Le dinamiche della formazione e della rimozione dell'ozono sono tali da far prevedere una stabilizzazione oppure un aumento della concentrazione a quote elevate, mentre a quote più basse, le reazioni chimiche che coinvolgono ozono portano a limitare i livelli fino a zero nel caso in cui lo strato limite sia molto basso (caso di inversione notturna). Per questo motivo, le concentrazioni più alte di ozono si riscontrano in località caratterizzate da elevate emissioni locali ed elevate altitudini.

Come già accennato in precedenza, i processi che determinano i livelli di ozono osservati sono essenzialmente due:

- reazioni fotochimiche che coinvolgono i precursori (ossidi di azoto e idrocarburi reattivi) in prossimità delle fonti di emissione. Tali reazioni danno luogo alla formazione di ozono che viene quindi trasportato dal vento verso i recettori;
- trasporto verticale di ozono presente nella troposfera libera (ove i livelli sono stabili poiché in tali strati non avvengono reazioni chimiche che ne possono causare la rimozione) verso il suolo a seguito di fumigazione turbolenta.

Già dalle prime misure effettuate in Italia, precisamente ad Ispra (VA) nel Centro Comune Ricerche negli anni 80', si era notato che le concentrazioni locali di ozono erano relativamente basse (circa $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$), mentre aumentavano fino a $80\text{-}100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in presenza di eventi di favonio (detto anche Föhn). Durante questi episodi, le masse d'aria sono trasportate dalla media e alta troposfera fino al suolo provocando elevate concentrazioni di ozono.

Dunque, al fine di quantificare l'esposizione di ozono dovuta alle sorgenti locali, e programmare conseguentemente azioni di contenimento, è necessario distinguere la quantità di ozono proveniente dalle sorgenti sopravvento al recettore (trasporto orizzontale) e dalla troposfera libera (trasporto verticale). Misure di questo tipo sono possibili tenendo conto del fatto che il tempo di vita media dell'ozono nella troposfera, una volta formato dai processi fotochimici, è di circa 23 giorni. Altre sostanze presenti nei fenomeni di inquinamento fotochimico sono invece molto meno stabili. Tra questi, assume importanza il PAN (PerossiAcetilNitrato) che appunto si forma insieme all'ozono, ma ha un tempo di vita media di circa 2 ore (alla temperatura di 20°C). Quindi, misurando simultaneamente ozono e PAN è possibile stabilire quale frazione di ozono è attribuibile ai fenomeni fotochimici a livello del suolo e quale al trasferimento diretto dalla troposfera libera.

Sebbene queste misure non siano state eseguite nell'area di Civitavecchia, è possibile fare riferimento ad un gran numero di misure che sono state effettuate in area Tirrenica nella stazione del Consiglio Nazionale delle Ricerche a Montelibretti, posta a circa 25 Km in direzione N-E dalla città di Roma. La situazione meteorologica in questo sito non è poi così dissimile da quella osservata nell'area della centrale ENEL, per cui alcune osservazioni effettuate a Montelibretti possono essere estese senza problemi ad altre aree tirreniche.

Nella figura successiva (Figura C3) si riportano i risultati di rilevazioni simultanee di ozono e PAN effettuate nel periodo estivo 24-28 giugno 2002 a Montelibretti. Come si può notare dall'esame di tale figura, i picchi di ozono sono molto più estesi di quelli relativi al PAN, segno evidente che la presenza di ozono nelle prime fasi del fenomeno (tarda mattinata) è dovuta al trasporto orizzontale, dovuto alla brezza di mare, da Roma fino al sito di misura, mentre per il restante periodo prevale il trasporto verticale dalla troposfera libera. Infatti, nelle giornate del 24 e 28 Giugno si notano segnali di ozono a concentrazione $100\text{-}150 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mentre il livello di PAN è quasi nullo. È quindi evidente che in queste due giornate, la quasi totalità dell'ozono proviene dalla troposfera libera mentre nelle altre tre giornate, la quantità di ozono presente sul sito di misura è dovuta alle due componenti (trasporto orizzontale e verticale). Il grafico sottostante di radioattività naturale costituisce una misura proxy dello stato di stabilità atmosferica: valori elevati sono tipici di stabilità che, infatti, si riscontra nelle ore notturne, mentre valori molto bassi sono tipici della presenza di rimescolamento verticale dovuto a turbolenza nelle ore diurne.

Da un punto di vista quantitativo, si può stimare che le concentrazioni di ozono dovuto a trasferimento dalla troposfera, riferite al periodo di misura, sono dell'ordine di $120\text{-}140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ che si presentano durante tutti i giorni caratterizzati da instabilità atmosferica. A queste concentrazioni, si aggiungono quelle portate dal trasporto orizzontale da Roma portando i livelli sopra i $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Molto verosimilmente, gli stessi processi avvengono nell'area di Civitavecchia e nel suo entroterra dove, però, le emissioni dei precursori di ozono sono indubbiamente più contenute di quelle emesse dalla città di Roma.

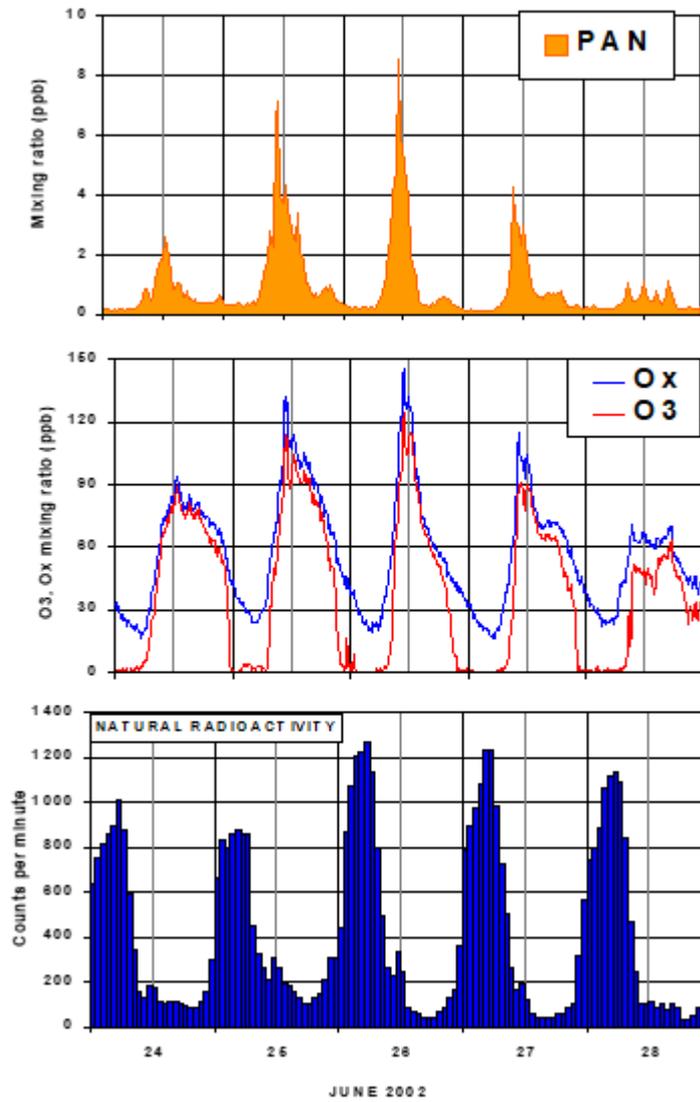


Figura C3. Misure congiunte di ozono e PAN a Montelibretti nel 2002