



ENVINT srl



RELAZIONE SULLA QUALITÀ DELL'ARIA DEL COMPENSORIO DI CIVITAVECCHIA. ANNO 2021.

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

SOMMARIO

1	Premessa	3
1.1	L'impianto ENEL di Civitavecchia	4
1.2	Altri comparti emissivi	6
2	Analisi meteorologica dell'area	10
2.1	Analisi delle misure effettuate presso la Centrale ENEL TVN	10
3	Limiti e standard di qualità dell'aria	12
4	Rete di monitoraggio della qualità dell'aria	14
4.1	Metodi di misura	18
5	Misure di concentrazione e verifica degli standard	19
5.1	Particolato PM ₁₀	20
5.1.1	Sintesi dei dati	20
5.1.2	Andamento temporale	20
5.1.3	Episodi di inquinamento naturale (Polveri sahariane)	24
5.2	Particolato PM _{2,5}	27
5.2.1	Sintesi dei dati	27
5.3	Biossido di azoto	29
5.3.1	Sintesi dei dati	29
5.3.2	Processi chimico-fisici che coinvolgono il biossido di azoto	29
5.3.3	Andamento temporale del biossido di azoto	30
5.3.4	Rose di concentrazione di NO ₂	35
5.4	Ozono	39
5.4.1	Sintesi dei dati	39
5.4.2	Andamento temporale dell'ozono	40
5.4.3	Protezione della vegetazione (AOT40)	40
5.5	Biossido di zolfo	42
5.5.1	Sintesi dei dati	42
5.5.2	Andamento temporale del biossido di zolfo	42
5.6	Cluster Analysis (PM ₁₀ e NO ₂)	44
6	Valutazione della distribuzione dell'inquinamento in aree non coperte o coperte parzialmente dalla rete di rilevamento	46
6.1	Scores e validazione	50
6.2	Analisi della rappresentatività della rete per le successive indagini epidemiologiche	51
7	Conclusioni	53
8	Appendice	55
A.	Campagna sperimentale meteorologica	56
a)	Analisi anemologica	56
b)	La struttura verticale dell'atmosfera	58

B. PM10: riferimento a studi di Source apportionment	60
C. Ozono	62

1 Premessa

Nel presente rapporto sono riportati i risultati di uno studio della qualità dell'aria, relativo all'anno 2021, 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.

Il 2021 è stata segnata dalla ripresa dopo la pandemia COVID-19 che ha avuto ripercussioni sulle attività produttive e indirettamente sulla qualità dell'aria.

I risultati e le valutazioni condotti 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 Torvaldaliga 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 il 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 bi-monitoraggio effettuate nell'area.

I dati rilevati mostrano qualche criticità relativa all'ozono relativamente al confronto delle concentrazioni con i limiti e le linee guida accettate a livello comunitario e nazionale.

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

Ozono	L'ozono viene misurato in sei siti e la sua concentrazione media annuale è compresa tra 52 (area urbana di Civitavecchia) e 84 µg/m ³ (area rurale di Allumiere). Il valore obiettivo di 120 µg/m ³ viene superato solo nella stazione di Allumiere sita in via Aldo Moro. Il valore obiettivo AOT40 per la protezione della vegetazione non è stato mai superato nel corso del 2021.
PM₁₀	Le concentrazioni medie annuali variano tra 13.7 e 24.2 µg/m ³ ed evidenziano differenze poco significative tra le diverse centraline esterne all'area urbana di Civitavecchia. Tali valori sono ampiamente al di sotto del limite di 40 µg/m ³ e corrispondono a valori compatibili con una buona qualità dell'aria. Questi dati indicano inoltre che l'inquinante è distribuito quasi uniformemente sul territorio. La legislazione ammette un numero massimo di 35 superamenti del valore limite di 50 µg/m ³ relativo alla media giornaliera. Il numero massimo di superamenti, pari a otto, quindi ampiamente al di sotto del valore limite, è stato registrato dalla centralina Allumiere - via del Faggeto. Ulteriori approfondimenti hanno evidenziato che alcuni picchi di concentrazione registrati dalla rete osservativa sono di origine naturale (polveri desertiche).
PM_{2.5}	Le concentrazioni medie annue risultano comprese tra 7.6 e 8.8 µg/m ³ , con una variabilità pari a circa il 10%, quindi ampiamente al di sotto del valore limite pari a 25 µg/m ³ . Nelle quattro stazioni ove sono disponibili misure sia di PM ₁₀ sia di PM _{2.5} il rapporto PM _{2.5} /PM ₁₀ è compreso tra il 47 ed il 55%, congruente con altri siti. Anche per questo inquinante non si identificano dunque particolari criticità.

NO₂	<p>Le concentrazioni medie annue di biossido di azoto mostrano valori compresi tra 5.2 e 37.2 µg/m³ dove il livello minimo è registrato a Allumiere - via Aldo Moro, posta in area rurale, mentre i valori più elevati sono quelli registrati nelle stazioni 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, traffico veicolare in particolare, che insieme contribuiscono alla formazione di NO₂. La variabilità dei dati è superiore a quella verificata per le componenti nel materiale particolato dovuta alla variabilità delle sorgenti di emissione del precursore NO e dei processi che portano alla formazione di NO₂.</p> <p>I dati sono tutti 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 è stato superato dalle centraline di monitoraggio. Questo inquinante è anche modulato dalla situazione meteorologica locale che determina un aumento delle concentrazioni nelle ore del mattino e nel tardo pomeriggio, in opposizione alle concentrazioni di ozono</p>
SO₂	<p>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. Non sono stati osservati superamenti dello standard 125 µg/m³ (valido su base giornaliera) e 350 µg/m³ valido su base oraria. Anche per questo inquinante le concentrazioni soddisfano ampiamente i requisiti legislativi. L'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 evidenziano l'assenza di relazione lineare tra le due variabili.</p>

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. Nel 2019 il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare ha emesso un nuovo decreto AIA, n. 284 del 30/9/2019. Le prescrizioni sono rimaste sostanzialmente inalterate rispetto alla precedente autorizzazione del 2013. In particolare, è stato introdotto il limite di media annuale delle concentrazioni monitorate in continuo delle emissioni in aria. Secondo tale decreto 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 dalle tre unità termoelettriche da 660 MW ciascuna è pari a 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 284/2019, che fissa i limiti di emissione per gli inquinanti atmosferici sia in termini di concentrazione, che di flusso di massa. La tabella contiene anche le concentrazioni prescritte per i microinquinanti.

Tabella 2. Limiti di emissione secondo il Decreto Ministeriale 284/2019

INQUINANTE/MICRO INQUINANTE	CAMPIONAMENTO	VALORI LIMITE	
		Concentrazione media	Flusso Massa (t/anno)
Polveri totali	C	10 (o) 8 (g) 5 (a) (mg/Nm ³)	160
Biossido di zolfo	C	100(o) 80 (g) 70 (a) (mg/Nm ³)	2100
Ossidi di azoto	C	100(o) 80 (g) 70 (a) (mg/Nm ³)	3450
Ammoniaca	C	5(o) 4 (g) (mg/Nm ³)	195
Monossido di carbonio	C	120 (g) 52.5 (a) (mg/Nm ³)	2000
Hg	D	0,004 (mg/Nm ³)	-
Cd+Tl	D	0,05 (mg/Nm ³)	-
As+Sb+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V+Sn	D	0,5(mg/Nm ³)	-
Be	D	0,05 (mg/Nm ³)	-
IPA	D	0,01 (mg/Nm ³)	-
Composti del Cloro (come HCl)	D	3 (t) (mg/Nm ³)	-
Composti del Fluoro (come HF)	D	2 (t) (mg/Nm ³)	-
COT	D	20 (t) (mg/Nm ³)	-
PCDD+PCDF	D	0,1 (ng I-TEQ/Nm ³)	-
PCB	D	0,1 (ng WHO-TE/Nm ³)	-

Nota: C/D: continuo/discontinuo; o/g/a/t: oraria/giornaliera/annuale/trimestrale

La Tabella 3 indica le emissioni totali analizzate a partire dai dati forniti dai sistemi di monitoraggio in continuo per l'anno 2021, per i tre gruppi di produzione dell'impianto. Dall'esame di tale tabella si può osservare che, per gli inquinanti monitorati in continuo, non sono stati superati i limiti alle emissioni di cui al DM 284/2019 grazie all'adozione di tecniche correnti di depurazione dei fumi ovvero filtri, desolficatori e De-NOx (Tabella 4). Rispetto all'anno precedente si osservano delle emissioni pressoché stabili, ben al di sotto dei limiti previsti per le emissioni in t/anno. L'energia immessa in rete nel 2021 è stata pari a 4019 GWh.

Tabella 3. Emissioni della Centrale ENEL TVN nell'anno 2021.

INQUINANTE	EMISSIONE (t/anno)
Biossido di Zolfo	956
Ossidi di Azoto	1 021
Polveri totali	40
Monossido di Carbonio	302
Ammoniaca	4
Biossido di Carbonio	4 121 013

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 97 000 abitanti (Tabella 5).

Tabella 5. Popolazione residente comunale nel 2021 (fonte ISTAT)

Comune	Prov.	Abitanti
Civitavecchia	Roma	52 069
Allumiere	Roma	3 831
Tolfa	Roma	4 828
Santa Marinella	Roma	18 516
Tarquinia	VT	16 153

Monte Romano	VT	1 914
Popolazione totale		97 311

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 nonostante la contrazione dei consumi e le interruzioni delle catene globali di produzione verificatesi durante il periodo pandemico, ha movimentato oltre 10,5 milioni di tonnellate di merci nel 2021 (fonte ISTAT) ed ha continuato a rappresentare un importante porto crocieristico del Mediterraneo con oltre 1,5 milione 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 (relativo all'anno 2017 e non ancora aggiornati al momento della stesura del presente rapporto), utilizzati da Arpa Lazio per alimentare i propri sistemi operativi previsionali per le valutazioni di qualità dell'aria sulla Regione. 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 ed 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 macrosetto 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 macrosetto 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)

Comune	NOX	PM _{2.5}	PM ₁₀	CO	SO ₂	NMVOC	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

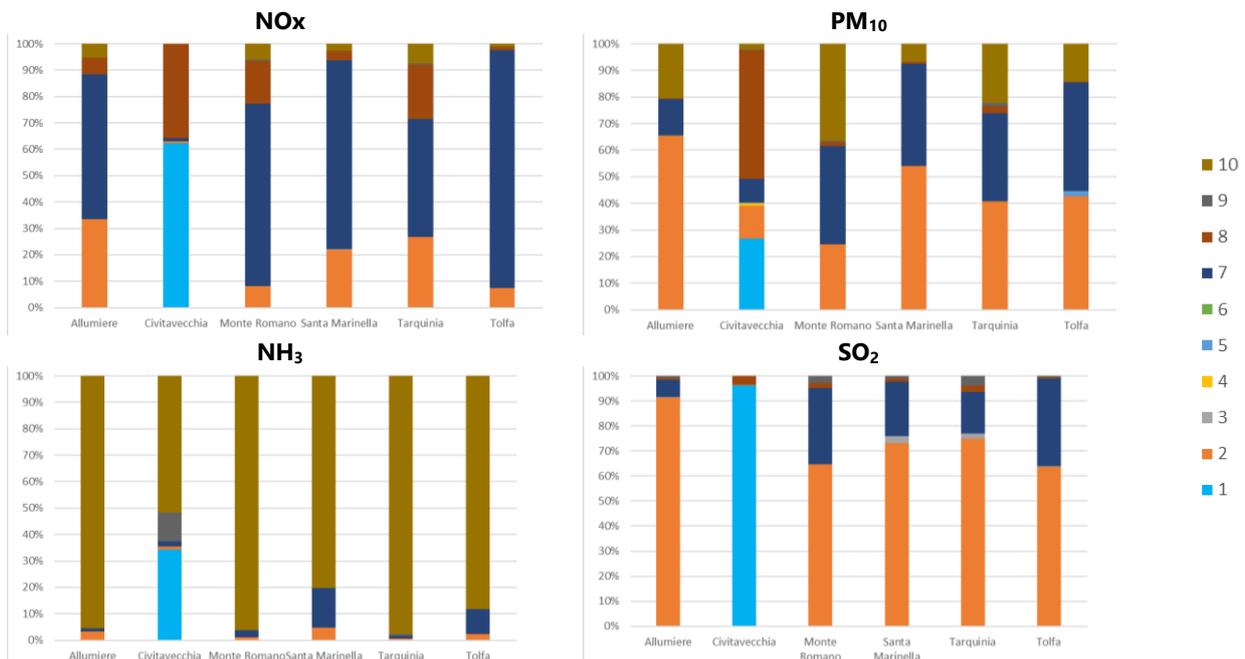


Figura 1. Contributi emissivi % dei 10 macrosettori a livello comunale (fonte: Arpa Lazio 2017).

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 2021

2.1 Analisi delle misure effettuate presso la Centrale ENEL TVN

Presso la Centrale ENEL 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 2021. I dati confermano proprio 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.

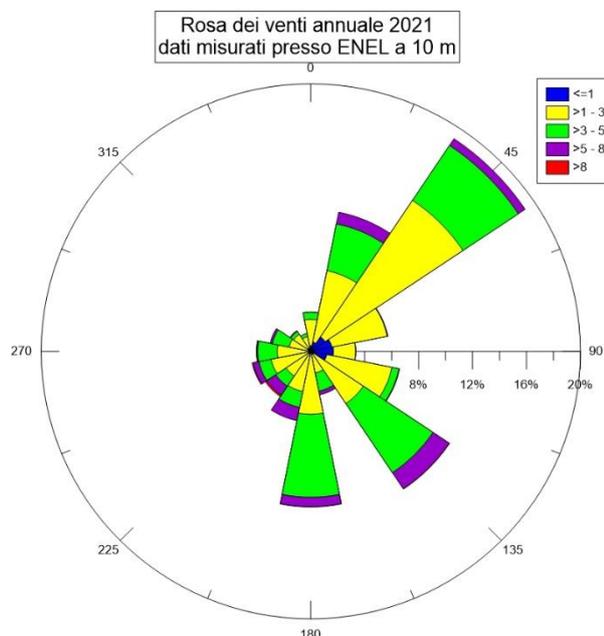


Figura 2. Rosa dei venti annuale rappresentativa dei dati misurati presso la ENEL Centrale ENEL TVN a un'altezza di 10 m per l'anno 2021

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.

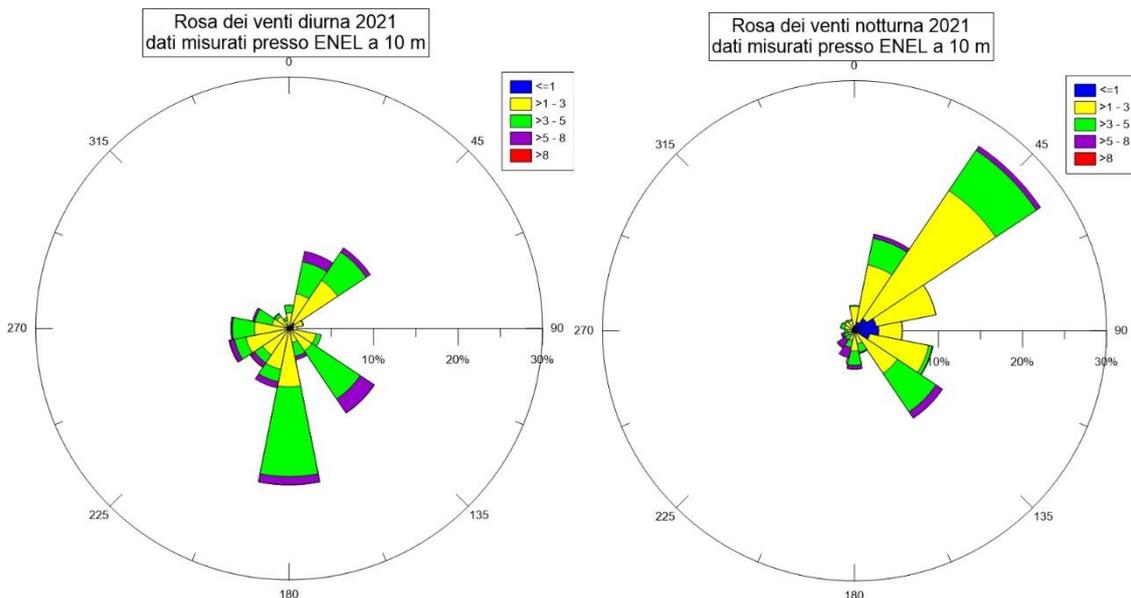


Figura 3. Rosa dei venti diurna (a sinistra) e notturna (a destra) rappresentative dei dati misurati presso la Centrale ENEL TVN a un'altezza di 10 m per l'anno 2021

La Figura 4 fornisce infine una rappresentazione dei dati misurati a una quota di 120 m per l'intero anno 2021. 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 2.7 m/s a 10 m di altezza a una media annuale di circa 16.8 m/s a 120 m.

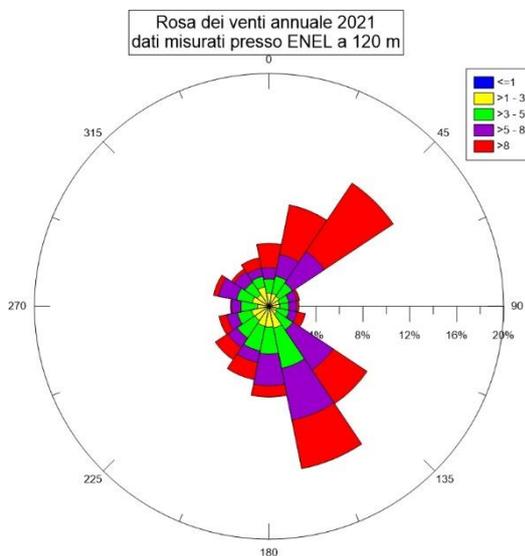


Figura 4. Rosa dei venti annuale rappresentativa dei dati misurati presso la Centrale ENEL TVN a un'altezza di 120 m per l'anno 2021

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. 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, in particolare nelle aree urbane ed industriali; ed anche nelle località nelle quali le caratteristiche della situazione meteorologica favorisce l'accumulo degli inquinanti nei bassi strati dell'atmosfera e quindi favorisce l'aumento delle concentrazioni riscontrate dai dispositivi di misura. 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.

In questo rapporto tecnico, i valori d'inquinamento atmosferico riscontrati nell'area d'interesse sono confrontati con i valori limite introdotti dal Dlgs 155/2010 (Tabella 7). Tale decreto, 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.

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 2021 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 2021.

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	•		•				
109	Santa Marinella	F/R	23	744515	4656795	•	•					
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; "*" misure disponibili dal 17/04/2021; "**" misure disponibili dal 15/06/2021

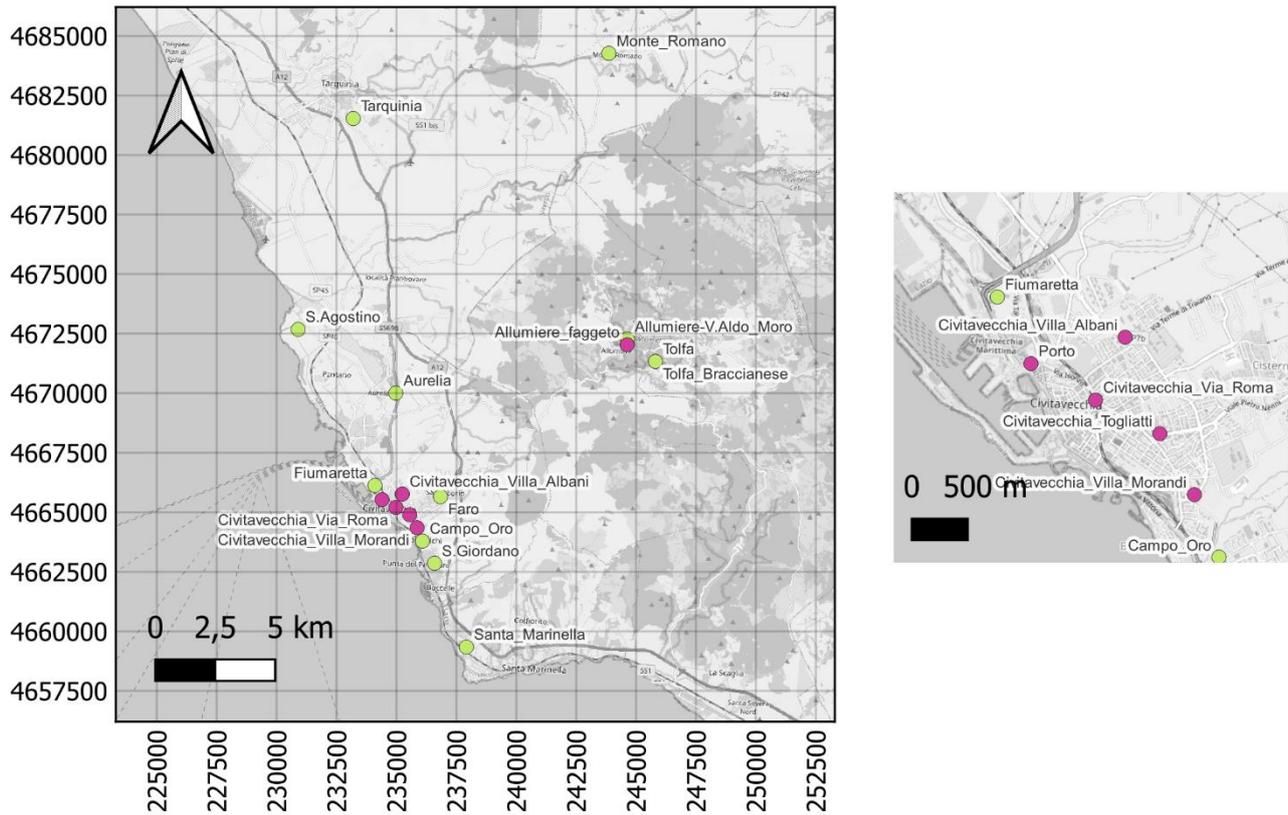
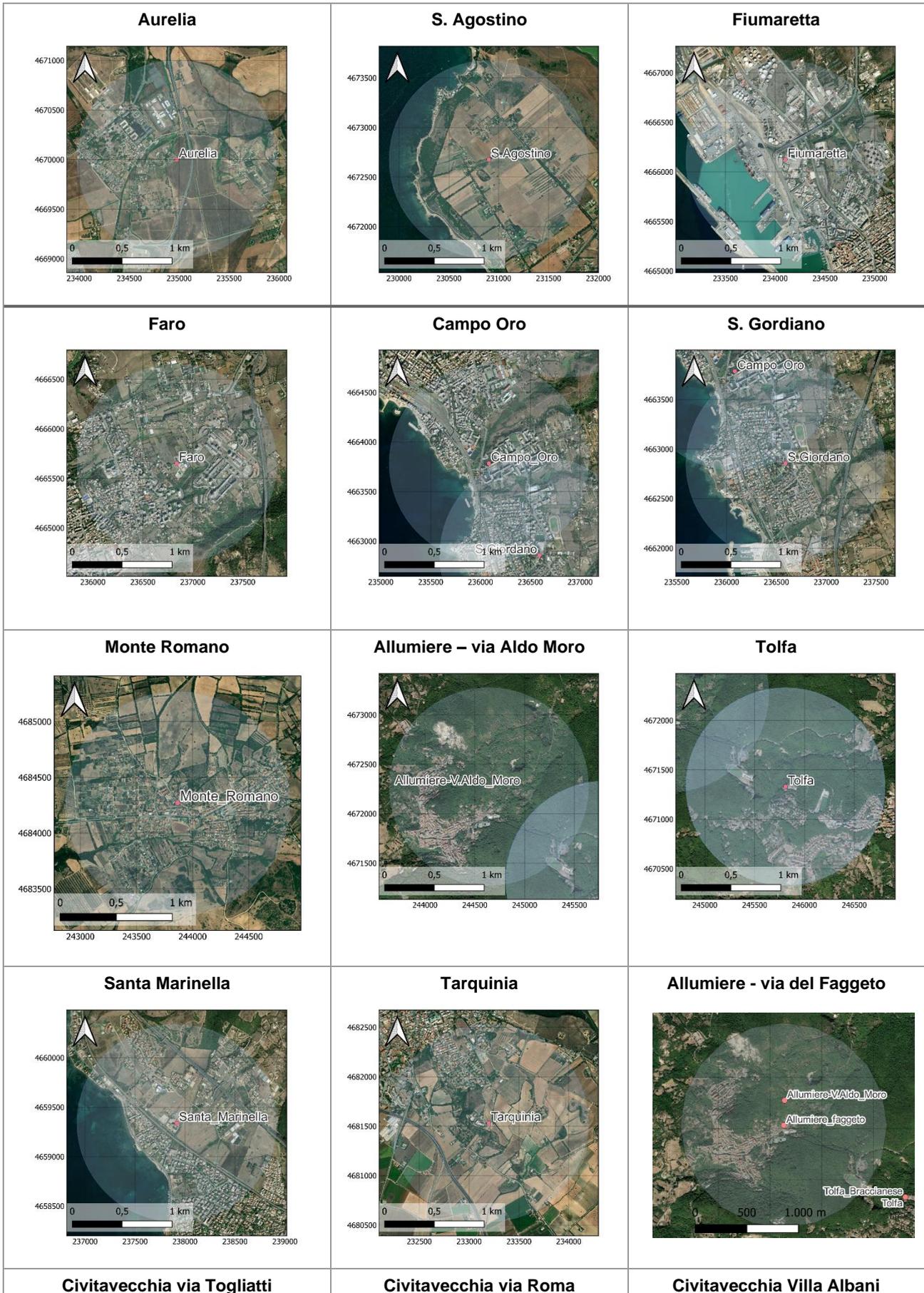


Figura 5. Distribuzione spaziale della rete di monitoraggio nell'area di studio (in verde le stazioni ARPA Ex-ENEL, in rosso le stazioni appartenenti alle reti traffico-porto).

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.



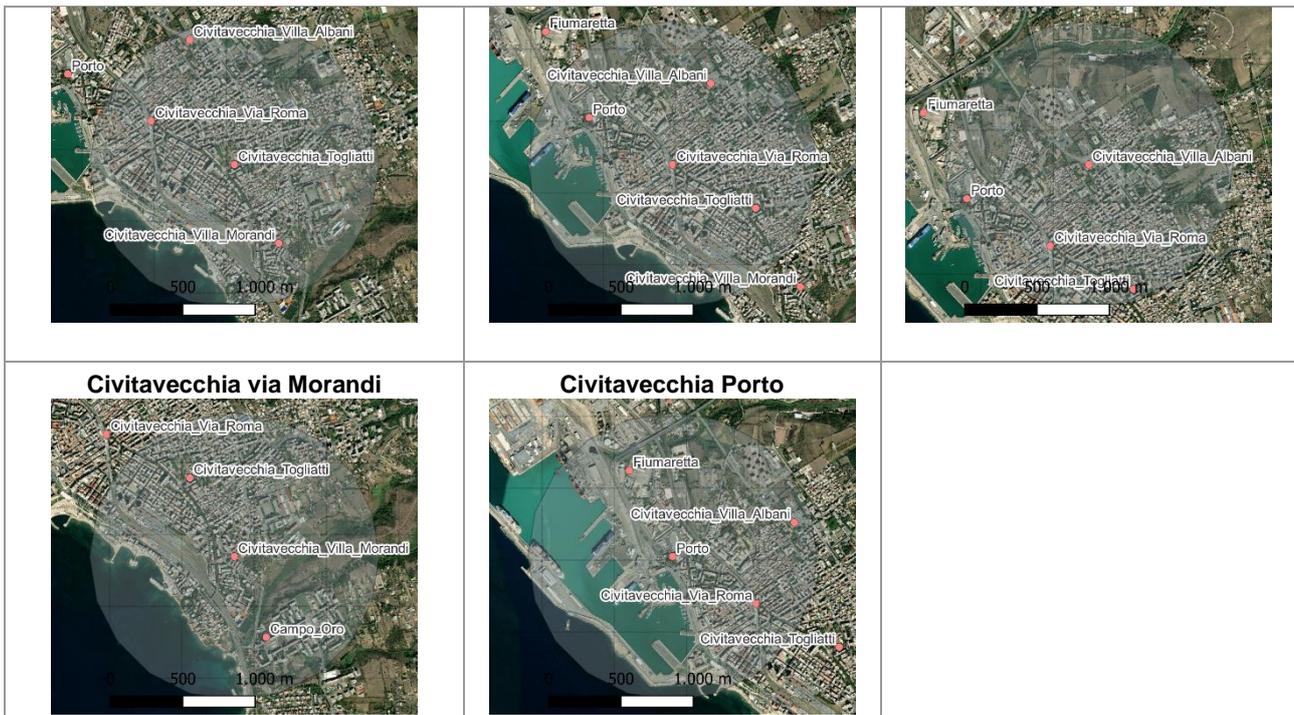


Figura 6. Dettaglio delle centraline ottenuto mediante utilizzo di immagini satellitari. Il dettaglio è ingrandito per mostrare l'area circostante a ciascuna centralina entro un raggio di 1 km (Map data ©2015 Google).

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;
- **Santa Marinella:** si trova in un'area prevalentemente urbana e costiera, vicino al mare. Sebbene sia in una zona densamente abitata, copre anche una porzione di territorio litorale, con un'elevazione inferiore rispetto alle stazioni collinari;
- **Tarquinia:** si trova in una zona che presenta una combinazione di territorio agricolo e urbano, on un'altitudine moderata, caratteristica delle aree pianeggianti che circondano il centro storico;
- **Civitavecchia - via Togliatti, via Roma, Villa Albari 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 nelle stazioni, riportati nella seguente tabella, sono conformi alla normativa tecnica vigente.

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

Inquinante	Standard di riferimento UNI	Metodo di misura	Incertezza espansa (%)
SO₂	EN14212:2012	Misura per fluorescenza ultravioletta	15
NO e NO₂	EN14211:2012	Misura per chemiluminescenza	25
PM₁₀ e PM_{2.5}	EN2341:2014 EN 16450-2017	Misura di concentrazione di massa	25
O₃	EN14625:2012	Misura per fotometria ultravioletta	15

Per quasi tutti gli inquinanti il limite minimo di rilevabilità è di circa 1 µg/m³ 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 2021. 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 2021 ed elaborati secondo quanto richiesto dalla normativa vigente. Nella tabella non sono stati inclusi i dati relativi alla centralina Santa Marinella perché attiva dal 2/6/2021 (58.6 % dati disponibili < 90%)

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	13.7	3	-	9.5	-	-	-
S. Agostino	102	16.0	3	7.6	5.8	-	5898	11
Fiumaretta	103	18.8	3	8.8	17.1	1.6	-	-
Faro	104	17.2	1	8.2	10.2	1.8	-	-
Campo Oro	105	18.3	3	8.1	12.3	0.7	-	-
S. Gordiano	106	19.9	5	-	12.6	-	-	-
Allumiere - Via Moro	107	15.7	4	8.5	5.2	1.7	15740	27
Tolfa	108	15.2	4	-	5.5	-	-	-
Santa Marinella	109	-	-	-	9.7	-	4166	1
Monte Romano	111	16.9	3	-	6.4	-	-	-
Allumiere - via Faggeto	014	14.0	8	-	7.8	-	10271	11
CV via Togliatti	015	18.8	0	-	19.7	-	909	0
CV Porto	060	17.2	1	-	22.2	-	-	-
CV Villa Albani	083	24.2	5	-	22.5	-	4221	1
CV Via Morandi	084	-	-	-	19.2	-	1070	0
CV Via Roma	085	-	-	-	37.2	-	-	-

Legenda: Le concentrazioni medie annuali sono espresse in $\mu\text{g}/\text{m}^3$; "-": dato non rilevato; PM₁₀ (>50): Numero di superamenti della media giornaliera del valore di $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (consentiti 35 superamenti); O₃ (>120): Numero di superamenti del valore limite di $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 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 $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e 80 rilevate da maggio a luglio in orario 8-20 (valore limite $18000 \mu\text{g}/(\text{m}^3 \text{ h})$ come media su 5 anni).

In corsivo vengono mostrati dati relativi a percentuale di misure raccolte inferiori a quella richiesta pari al 90%.

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 2021.

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	95.9%	83	28/07/2021	13.7	3
S. Agostino	102	93.7%	195	17/07/2021	16.0	3
Fiumaretta	103	98.9%	62	17/07/2021	18.8	3
Faro	104	95.9%	77	25/02/2021	17.2	1
Campo Oro	105	98.1%	58	25/02/2021	18.3	3
S. Gordiano	106	99.7%	73	25/02/2021	19.9	5
Allumiere – via Aldo Moro	107	96.4%	98	25/02/2021	15.7	4
Tolfa	108	97.0%	76	25/02/2021	15.2	4
Monte Romano	111	99.2%	89	25/02/2021	16.9	3
Allumiere - via del Faggeto	14	94.5%	81	25/02/2021	14.0	8
CV - via Togliatti	15	90.7%	48	24/02/2021	18.8	0
CV – Porto	60	98.9%	58	25/02/2021	17.2	1
CV - Villa Albani	83	98.9%	69	25/02/2021	24.2	5

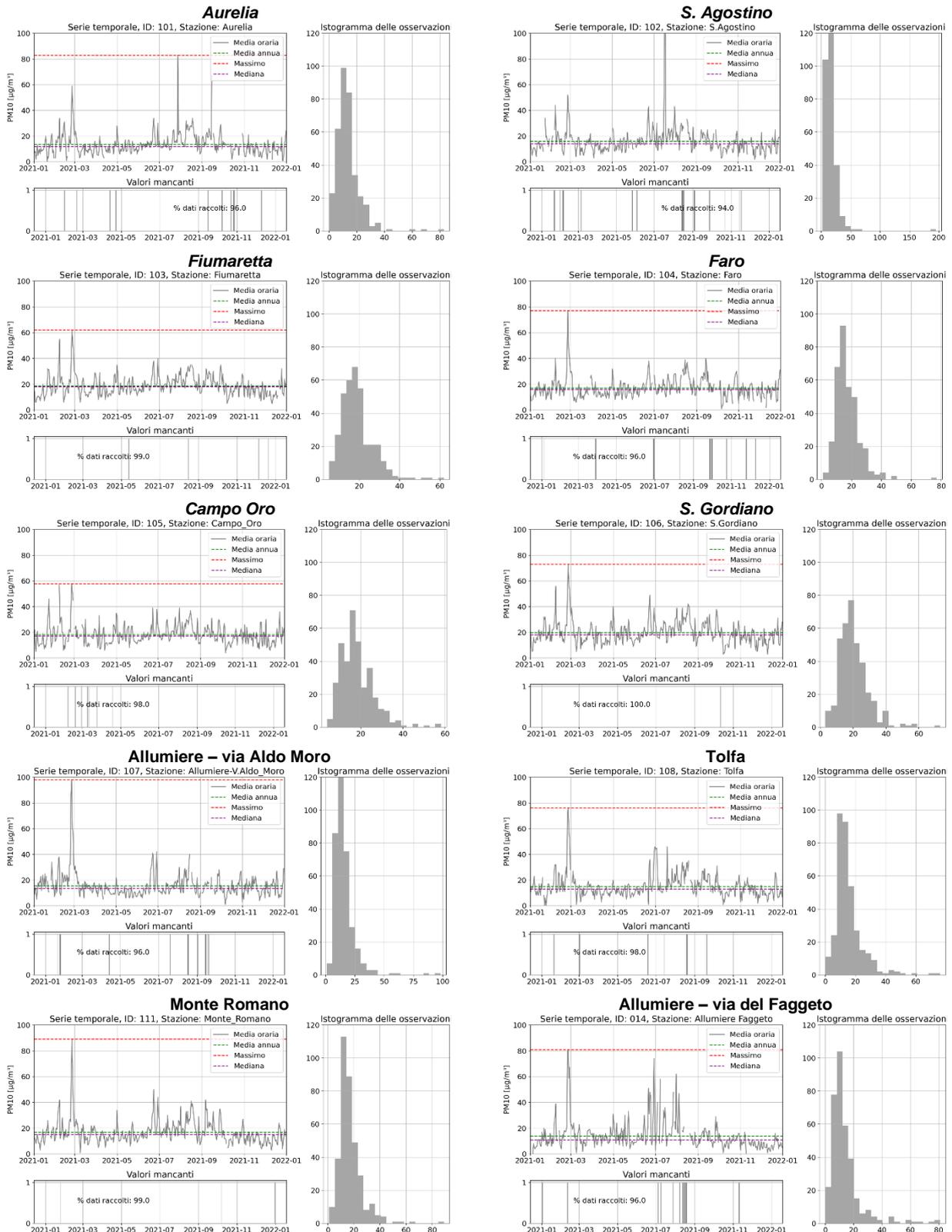
Legenda: (>50): Numero di superamenti del limite giornaliero di 50 µg/m³ (consentiti 35 superamenti)

Le concentrazioni medie annuali variano tra 13.7 µg/m³ (Aurelia) e 24.2 µg/m³ (CV – Villa Albani) ed evidenziano differenze poco significative tra diverse centraline al di fuori dell'area urbana di Civitavecchia ove i livelli medi sono più elevati. Tali valori sono ampiamente al di sotto del limite di 40 µg/m³ di media annuale e corrispondono a valori compatibili con una buona qualità dell'aria. Questi dati indicano inoltre che l'inquinante è distribuito quasi uniformemente sul territorio; i valori più elevati si registrano, oltre nell'area urbana di Civitavecchia, nelle centraline di Fiumaretta, S. Gordiano e Campo Oro ossia in quelle stazioni più a ridosso dell'area urbana di Civitavecchia, mentre quelle più basse sono riscontrate nelle stazioni Aurelia ed Allumiere che sono le più distanti dalle sorgenti urbane locali ed anche dalla Centrale ENEL. La legislazione, infatti, ammette un numero massimo di 35 superamenti della media giornaliera di 50 µg/m³ relativo alla media giornaliera. Il numero massimo di superamenti, pari a sette e quindi ampiamente al di sotto del valore limite, è stato registrato dalla centralina di S. Agostino.

5.1.2 Andamento temporale

Nella figura seguente (Figura 7) sono presentate, 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. 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 2021. 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 picchi di concentrazione registrati dalla rete osservativa in febbraio (dal 24 al 28) e agosto (dal 15 al 19). 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. Per meglio identificare possibili episodi di inquinamento naturale di questo tipo, nel paragrafo seguente vengono esaminati congiuntamente i campi prodotti dal modello di rianalisi europeo CAMS ed i dati sperimentali forniti dalle centraline della qualità dell'aria.



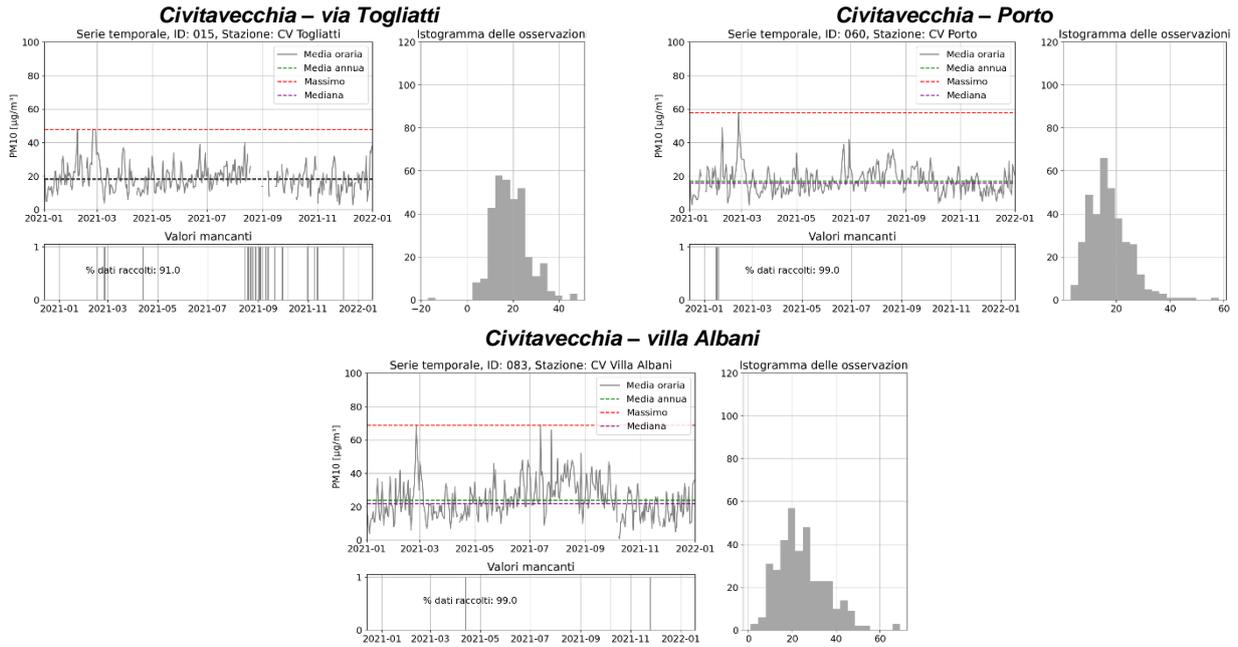
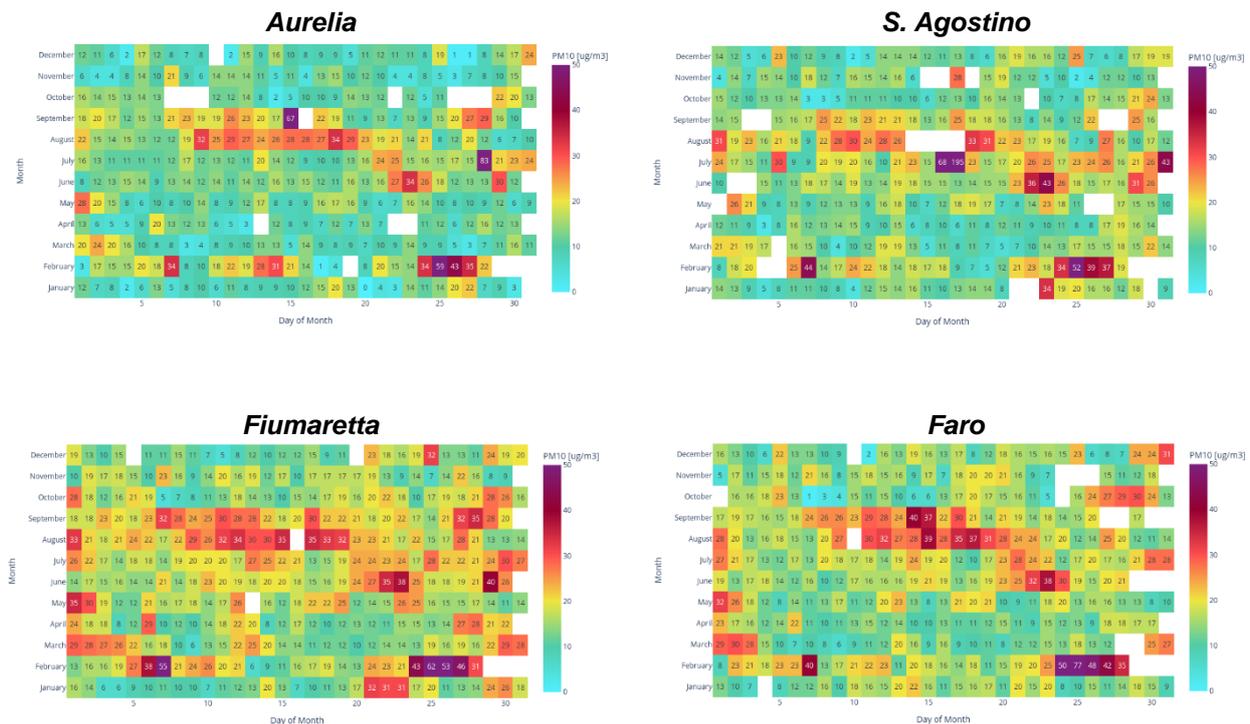
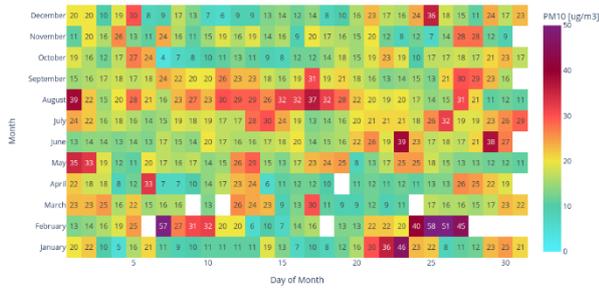


Figura 7. PM₁₀, anno 2021: serie temporale delle concentrazioni giornaliere (alto sx); percentuale di dati raccolti (basso sx); istogramma delle osservazioni (dx).

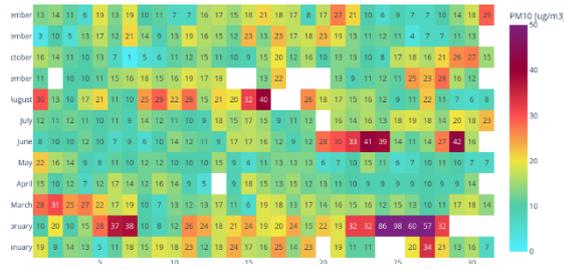


Campo Oro

S. Gordiano



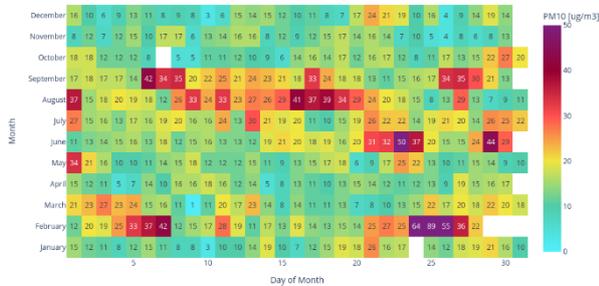
Allumiere – via Aldo Moro



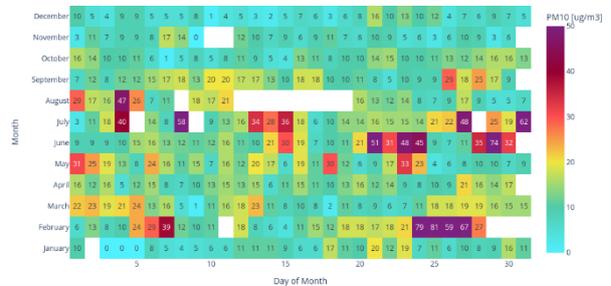
Tolfa



Monte Romano



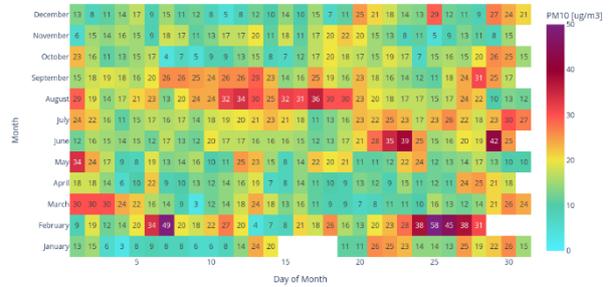
Allumiere – via del Faggeto



Civitavecchia – via Togliatti



Civitavecchia – Porto



Civitavecchia – villa Albani



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

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.

La frazione di "dust" del PM₁₀ del modello è stata mediata sull'intero dominio di studio e l'andamento temporale risultante è riportato in Figura 9. I giorni potenzialmente interessati da episodi di inquinamento naturale sono stati individuati selezionando quelli in cui la componente "dust" nei dati di rianalisi di PM₁₀ ha superato la soglia oraria di 10 µg/m³. Si evidenziano, oltre ad episodi giornalieri isolati, intervalli temporali in cui il contributo delle polveri sahariane è significativo e influenza le concentrazioni di fondo misurate dalle centraline. Tra questi emergono in particolare gli eventi del 24-26 febbraio, 21-29 giugno, 9-15 agosto e 7-11 novembre.

Le serie temporali rilevate dalla rete di monitoraggio sono state analizzate in corrispondenza dei giorni identificati e i risultati sono mostrati in Figura 10. In particolare, superamenti oltre il limite di 50 µg/m³ sono registrati nella finestra 24-26 febbraio:

- 24 febbraio: le stazioni Tolfa, Monte Romano, Allumiere Aldo Moro e Allumiere Faggeto hanno registrato superamenti del valore limite di 50 µg/m³. Le altre stazioni hanno rilevato valori più contenuti ma comunque in aumento rispetto ai giorni precedenti.
- 25 febbraio: l'intera rete di monitoraggio ha riportato concentrazioni superiori al limite di 50 µg/m³. Questa giornata segna il picco massimo dell'evento di trasporto di polveri sahariane, con alcune stazioni che hanno superato abbondantemente tale soglia.
- Il 26 febbraio, le concentrazioni di PM₁₀ hanno iniziato a diminuire rispetto al giorno precedente, ma diverse stazioni, come Tolfa, Monte Romano, Allumiere Aldo Moro e Allumiere Faggeto, S. Gordiano e Campo Oro hanno continuato a registrare valori sopra il limite di 50 µg/m³.
- Il 27 febbraio, il trend di calo è proseguito, con la maggior parte delle stazioni che hanno registrato valori rientrati sotto il limite di 50 µg/m³. Tuttavia, alcune località come Tolfa, S. Gordiano, Allumiere Aldo Moro e Allumiere Faggeto hanno misurato concentrazioni ancora oltre al limite, a testimonianza di un residuo dell'episodio sahariano.

Infine, sebbene le concentrazioni siano rimaste al di sotto dei limiti, il mese di agosto è stato caratterizzato da un allineamento delle serie temporali delle stazioni, coerente con il profilo di concentrazione delle reanalisi evidenziato nello zoom riportato in Figura 9.

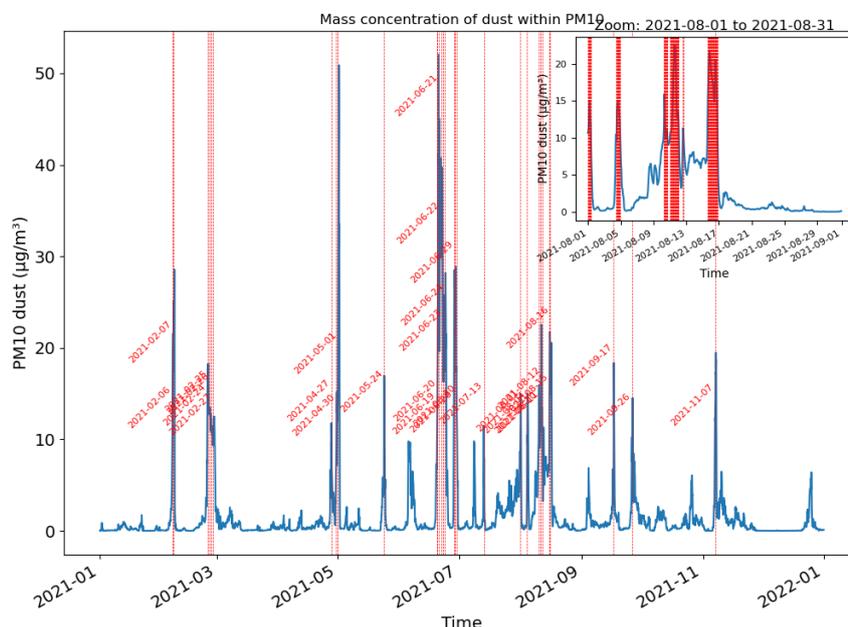
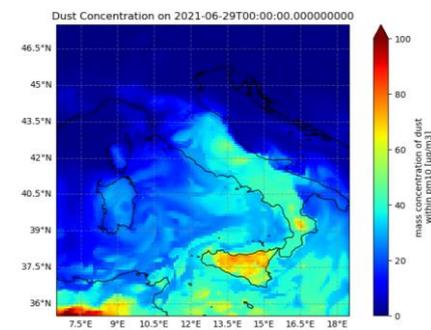
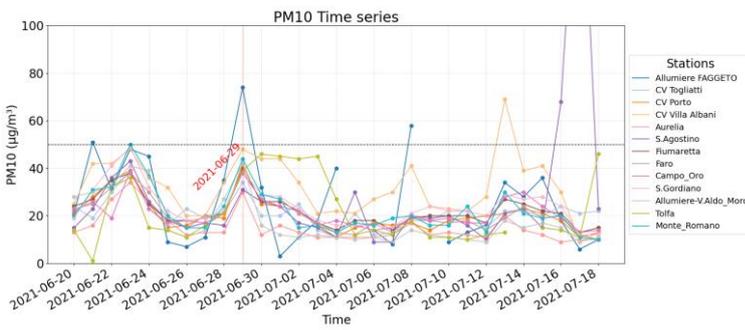
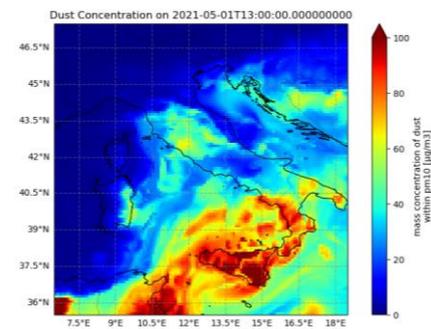
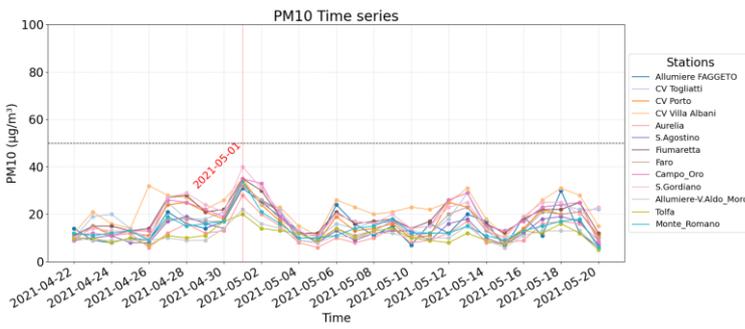
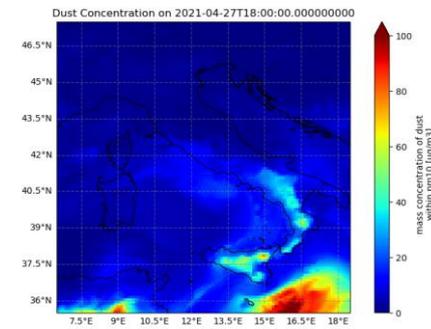
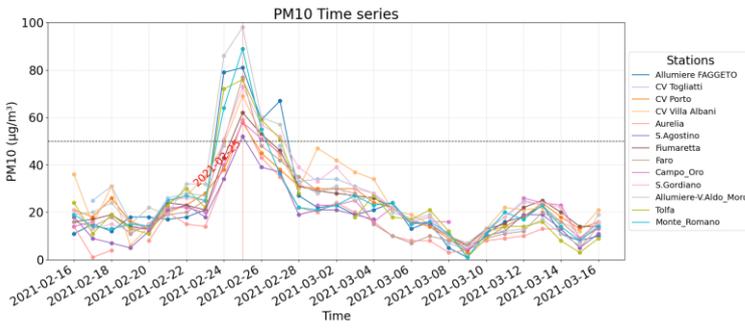
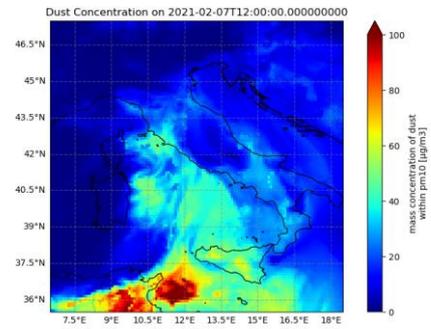
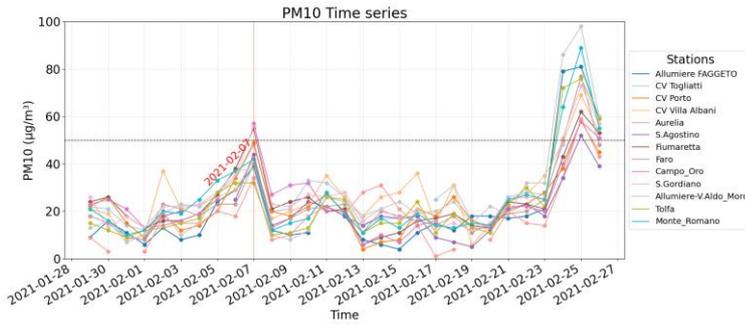


Figura 9. PM₁₀, anno 2021: giorni interessati da possibili episodi di inquinamento naturale.



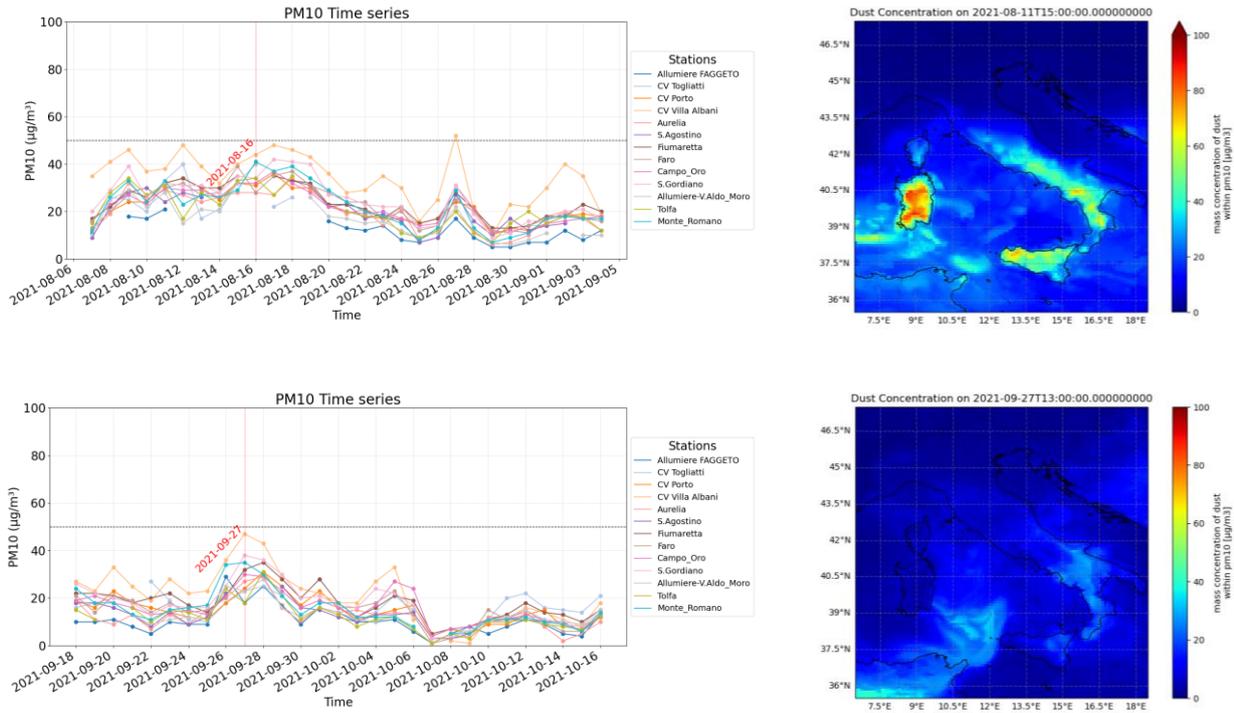


Figura 10. Giorni interessati da possibili episodi di inquinamento naturale: andamenti temporali delle concentrazioni misurate e corrispondenti mappe di rianalisi.

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

Stazione	ID	% Dati Raccolti	Max media giornaliera	Data valore Max	Media annua	PM _{2.5} /PM ₁₀
S. Agostino	102	96.2%	37.0	17/07/2021	7.6	49.9%
Fiumaretta	103	98.9%	27.0	25/02/2021	8.8	49.0%
<i>Faro</i>	<i>104</i>	<i>89.0%</i>	<i>29.0</i>	<i>25/02/2021</i>	<i>8.2</i>	<i>47.2%</i>
Campo Oro	105	97.3%	27.0	25/02/2021	8.1	46.9%
Allumiere via Aldo Moro	107	95.1%	41.0	25/02/2021	8.5	54.5%

Legenda: I dati relativi alla centralina Faro sono mostrati in corsivo perché la percentuale di dati raccolti è inferiore a quella richiesta pari al 90%.

Analogamente a quanto osservato per il PM₁₀, la frazione fine PM_{2.5} 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. Nelle cinque stazioni 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 46.9 ed il 54.5%. 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. Nella seguente Figura 11 sono rappresentati i rapporti PM_{2.5}/PM₁₀; in tale figura non vengono considerate osservazioni per le quali tale rapporto è maggiore ad uno. Tale figura evidenzia andamenti temporali di tale rapporto piuttosto differenti nelle cinque centraline dovuti ai complessi processi chimico fisici che agiscono in modo differenziato sulle diverse frazioni che compongono il particolato atmosferico (formazione di aerosol secondario – prevalente nella frazione fine-, sorgenti delle diverse frazioni granulometriche – es. risospensione di polveri dovuta al traffico veicolare -, processi di deposizione secca – deposizione al suolo senza la mediazione della pioggia o dell'umidità atmosferica -). Nella figura seguente (Figura 12) viene mostrata la ripartizione tra la frazione fine (PM_{2.5}) e coarse (PM_{2.5-10}) nelle cinque centraline che evidenzia valori simili per la frazione fine ed il minore contributo di quella grossolana nella stazione di Allumiere.

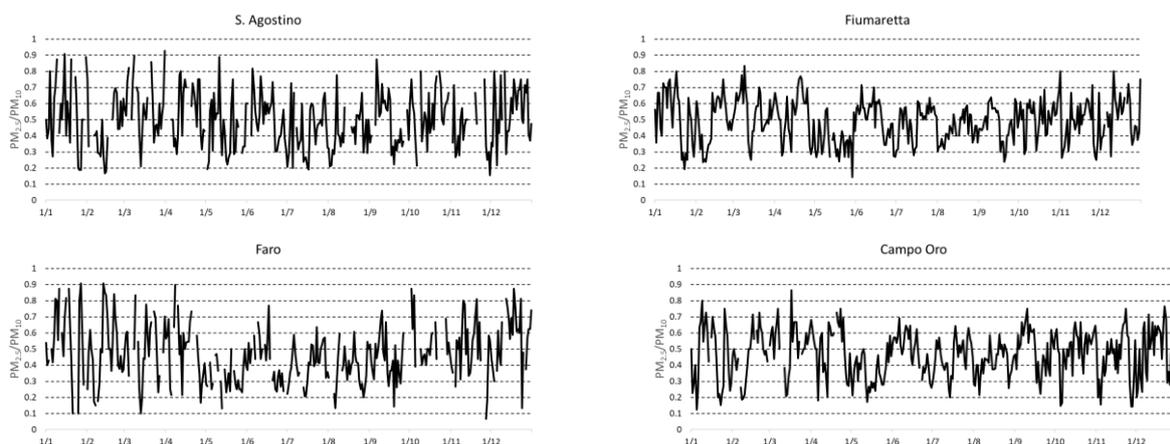




Figura 11. PM_{2.5}, anno 2021: serie temporale dei valori giornalieri del rapporto PM_{2.5}/PM₁₀.

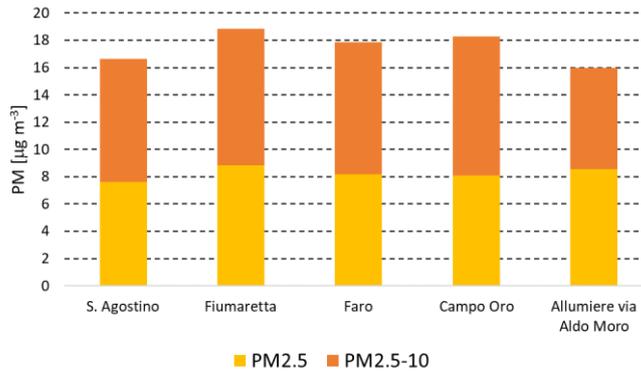


Figura 12. Ripartizione tra la frazione fine PM_{2.5} e grossolana PM_{2.5-10}

Le serie temporali correlate di istogrammi delle osservazioni e al grafico dei dati mancanti per ciascun sito sono riportate nella figura seguente (Figura 13).

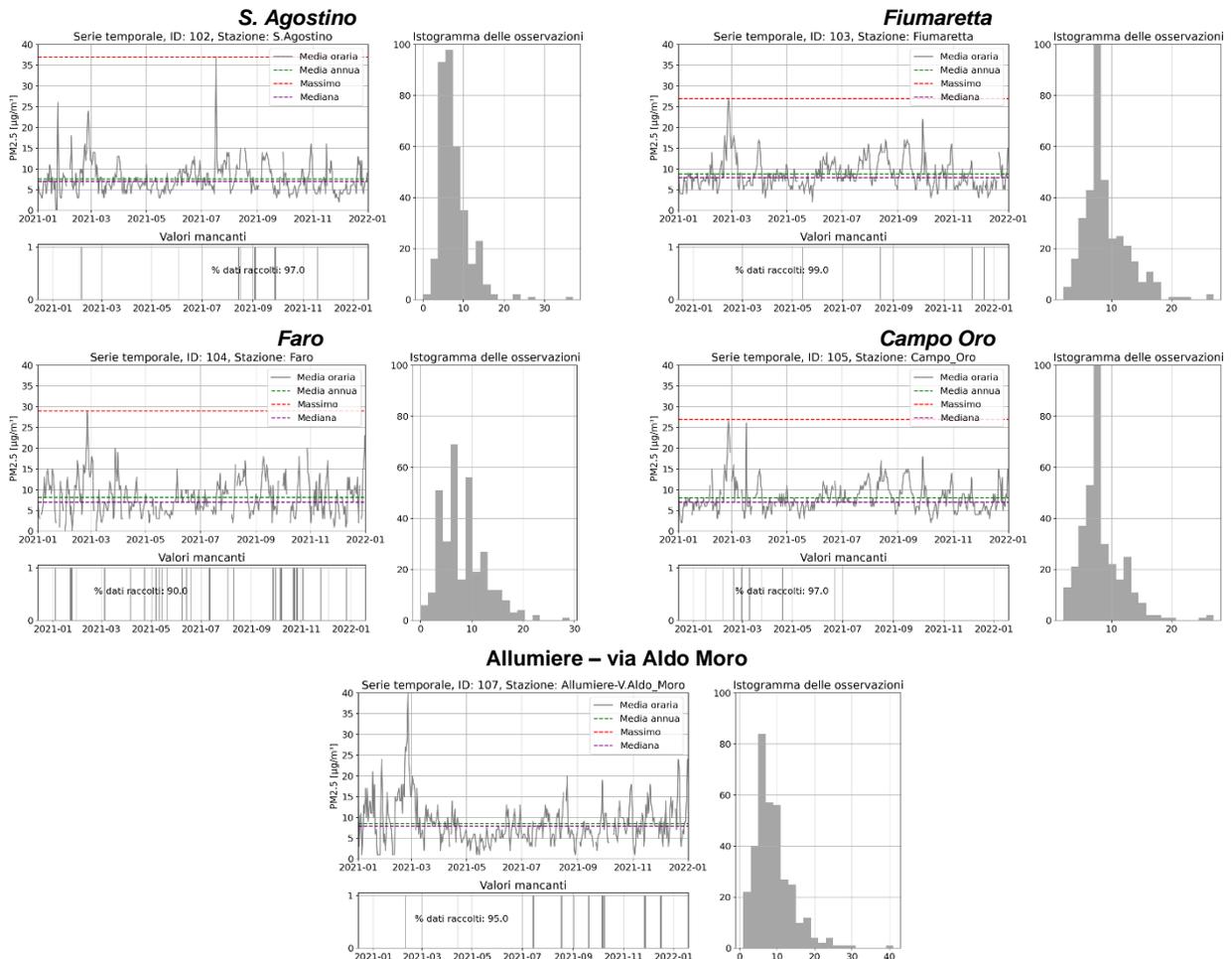


Figura 13. PM_{2.5}, anno 2021: serie temporale delle concentrazioni giornaliere (alto sx); percentuale di dati raccolti (basso sx); istogramma delle osservazioni (dx).

5.3 Biossido di azoto

5.3.1 Sintesi dei dati

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

Tabella 13. Standard di legge relativi all'NO₂ [µg/m³].

Stazione	ID	% Dati Raccolti	Media annua
Aurelia	101	91.2%	9.5
<i>S. Agostino</i>	<i>102</i>	<i>76.8%</i>	<i>5.8</i>
Fiumaretta	103	93.0%	17.1
Faro	104	91.2%	10.2
Campo Oro	105	95.7%	12.3
S. Gordiano	106	93.4%	12.6
Allumiere - via Aldo Moro	107	90.9%	5.2
Tolfa	108	93.7%	5.5
Santa Marinella	109	93.0%	9.7
Monte Romano	111	95.0%	6.4
<i>Allumiere via del Faggeto</i>	<i>14</i>	<i>89.1%</i>	<i>7.8</i>
CV Togliatti	15	94.3%	19.7
CV Porto	60	95.5%	22.2
CV Villa Albani	83	95.3%	22.5
CV Via Morandi	84	90.7%	19.2
CV Via Roma	85	93.4%	37.2

Legenda: I dati relativi alle centraline S. Agostino e Allumiere via del Faggeto sono mostrati in corsivo perché la percentuale di dati raccolti è inferiore a quella richiesta pari al 90%.

Le concentrazioni medie annue di biossido di azoto mostrano valori compresi tra 5.2 e 37.2 µg/m³ dove il livello minimo è registrato ad Allumiere (via Aldo Moro), posta in area rurale, mentre i valori più elevati sono quelli registrati nelle stazioni all'interno del Comune di Civitavecchia (via Roma). 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. 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 tutti 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 è stato superato nel corso del 2021.

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 ($R-O_2^*$) 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^* 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. Tra questo intervallo temporale 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 14) relativamente alle centraline di Allumiere (via Aldo Moro, tipologia: Industriale/rurale) e Civitavecchia (via Togliatti, tipologia: traffico/urbana). Nel periodo invernale, la finestra di stabilità tra il mattino ed il tardo pomeriggio è più ridotta. Il biossido di azoto presenta due picchi di concentrazione al mattino ed al pomeriggio inoltrato. I due picchi al mattino ed al pomeriggio inoltrato sono separati da un tempo 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. Il terzo picco rilevato nelle ore centrali della giornata è attribuibile ad emissioni locali quali il traffico veicolare

I picchi rilevati dalla stazione di Civitavecchia durante le condizioni di stabilità atmosferica serale/notturna non sono attribuibili alle emissioni della Centrale perché i pennacchi da essa emessi restano al di sopra dello strato rimescolato e non arrivano al suolo. È quindi evidente che le concentrazioni osservate, peraltro molto basse, sono dovute essenzialmente ad emissioni locali a livello del suolo quali quelle dovute a traffico veicolare.

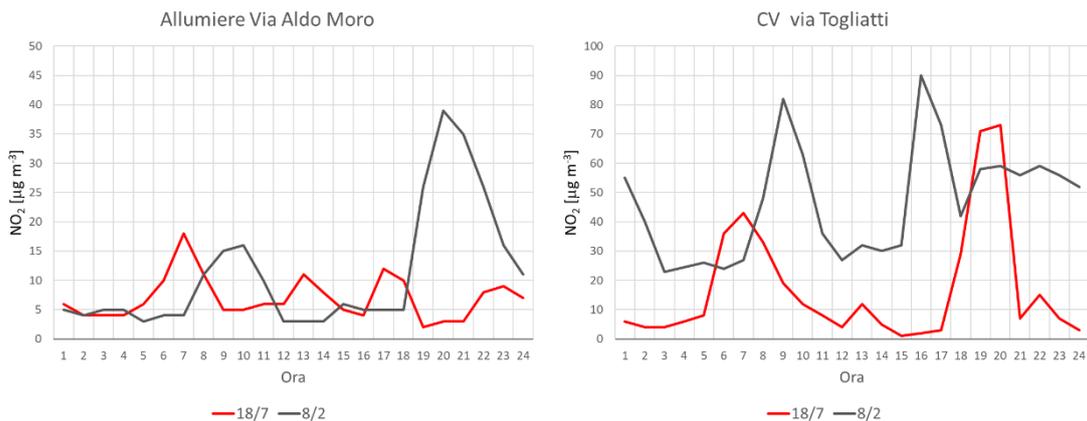
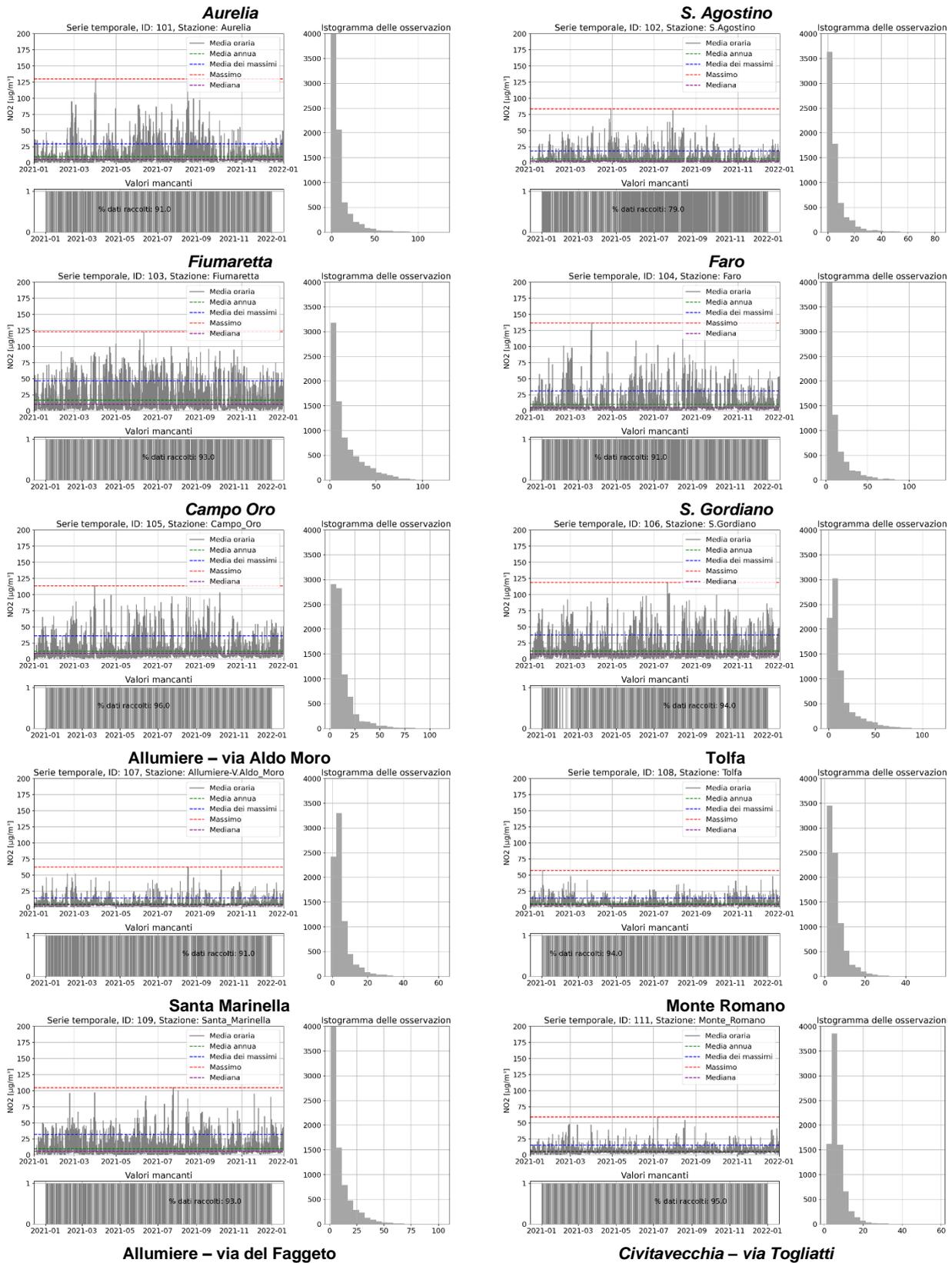


Figura 14. Andamento medio giornaliero di NO_2 [$\mu g/m^3$] in un giorno tipo invernale ed estivo nelle stazioni Allumiere (via Aldo Moro) e Civitavecchia (via Togliatti).

5.3.3 Andamento temporale del biossido di azoto

Nella figura seguente (Figura 15) sono presentate, per i diversi siti di misura, i grafici che riportano le serie temporali delle concentrazioni giornaliere di NO_2 , percentuale di dati disponibili e l'istogramma delle osservazioni. Gli istogrammi evidenziano le differenze tra la rete di traffico-porto

e le stazioni ARPA Ex-ENEL. In particolare, la stazione Civitavecchia-Roma mostra una distribuzione delle concentrazioni di NO₂ spostata verso valori più alti rispetto ad entrambe le reti.



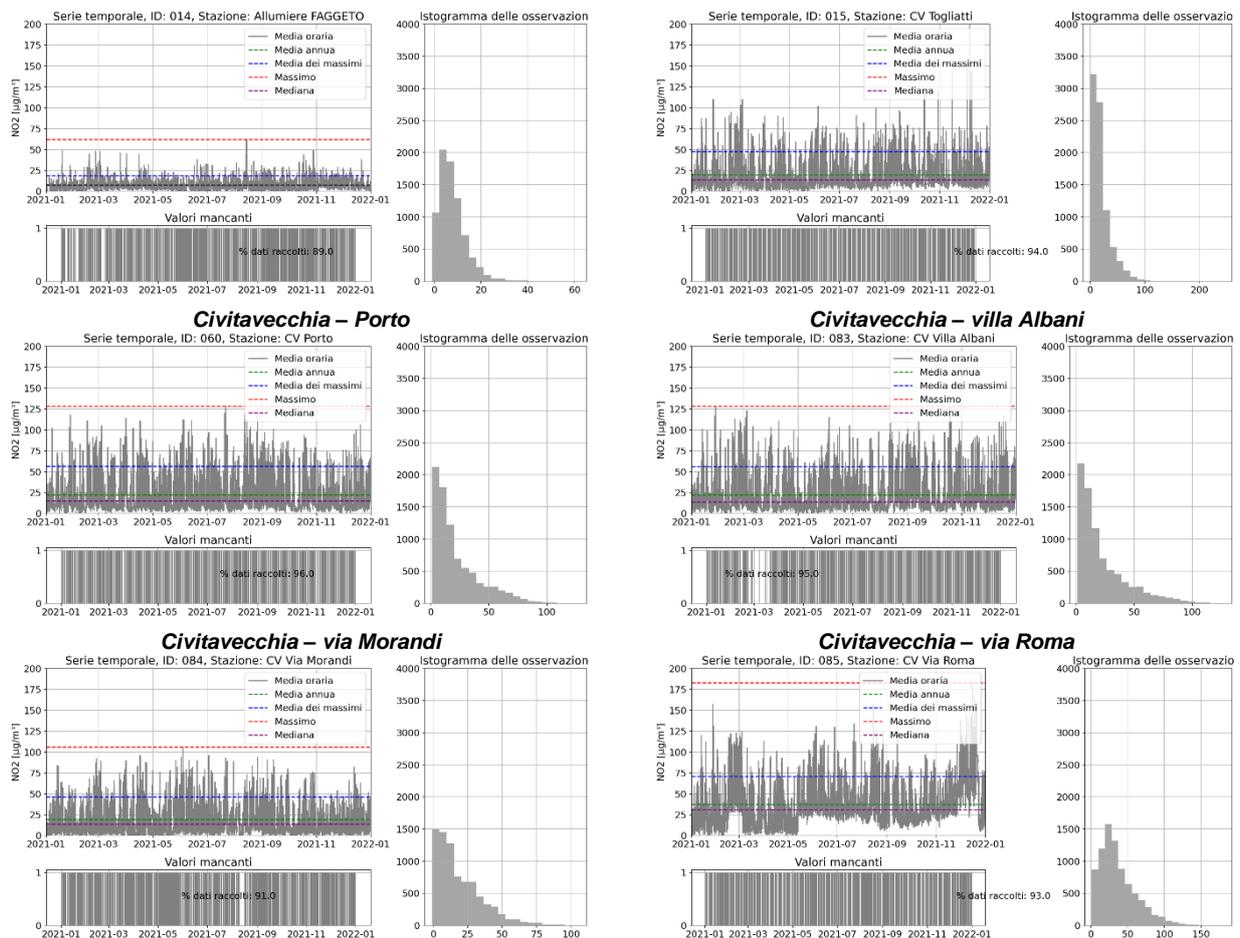


Figura 15. NO₂, anno 2021: serie temporale delle concentrazioni giornaliere (alto sx); percentuale di dati raccolti (basso sx); istogramma delle osservazioni (dx).

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 2021. Tale analisi si basa sul seguente modello di decomposizione:

$$y_t = T_t + S_{t24h} + S_{t168h} + R_t$$

ove y_t è la serie temporale di partenza, T_t , S_{t24h} , S_{t168h} e R_t indicano le componenti di tendenza (trend) rispettivamente annuale, stagionale giornaliera, settimanale e residua.

Nella figura seguente (Figura 16) viene presentata, per la stazione Villa Albani, l'analisi di decomposizione della serie temporale riferita al mese di novembre. Si nota una variazione del trend con concentrazioni in crescita durante le settimane centrali ed in calo sia durante la prima che l'ultima settimana, 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, ricavata dalle re-analisi di clima prodotte dal modello ERA5¹ durante la stessa finestra temporale (Figura 17), si nota che nelle settimane centrali si riscontra un valore più basso e di conseguenza si manifestano a concentrazioni più alte.

Il profilo dell'andamento giornaliero del traffico urbano evidenzia i due tipici picchi di ingresso e uscita da lavoro a cui si aggiunge un terzo picco intorno all'ora di pranzo, mentre la componente settimanale mostra un calo delle concentrazioni durante il fine settimana, con un andamento regolare nei giorni feriali.

¹ 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.

Nella figura seguente (Figura 18) si analizza l'andamento temporale della concentrazione oraria di NO₂ presso la stazione di Allumiere-Via Aldo Moro a carattere rurale. L'andamento della tendenza è simile a quello ricavato per la stazione di CV Villa Albani, indicando che il comportamento di questa componente è dipendente dal comportamento dell'altezza di mescolamento. Meno evidente, invece è la distinzione tra giorni feriali e festivi indicata dalla componente di stagionalità settimanale dovuta alla tipologia della stazione, meno influenzata dal traffico veicolare.

Mediante la decomposizione delle serie temporali è possibile verificare inoltre l'impatto delle attività portuali durante il periodo estivo caratterizzate da alto traffico portuale. L'analisi è stata condotta presso la stazione di CV Porto, posizionata nell'area portuale (Figura 6), durante la finestra 10 agosto - 20 agosto 2021 (Figura 19). L'esame di tale figura evidenzia che le concentrazioni tendono a seguire il traffico portuale, con picchi significativi al mattino presto (tra le 6:00 e le 8:00) e la sera (tra le 18:00 e le 20:00) senza un calo significativo durante il giorno. Questo comportamento è evidente anche durante il fine settimana, segnalato nella figura dalle aree a sfondo blu, e dove i picchi e l'andamento descritto persistono.

Time series decomposition 083 - CV_Villa_Albani NO2 2021

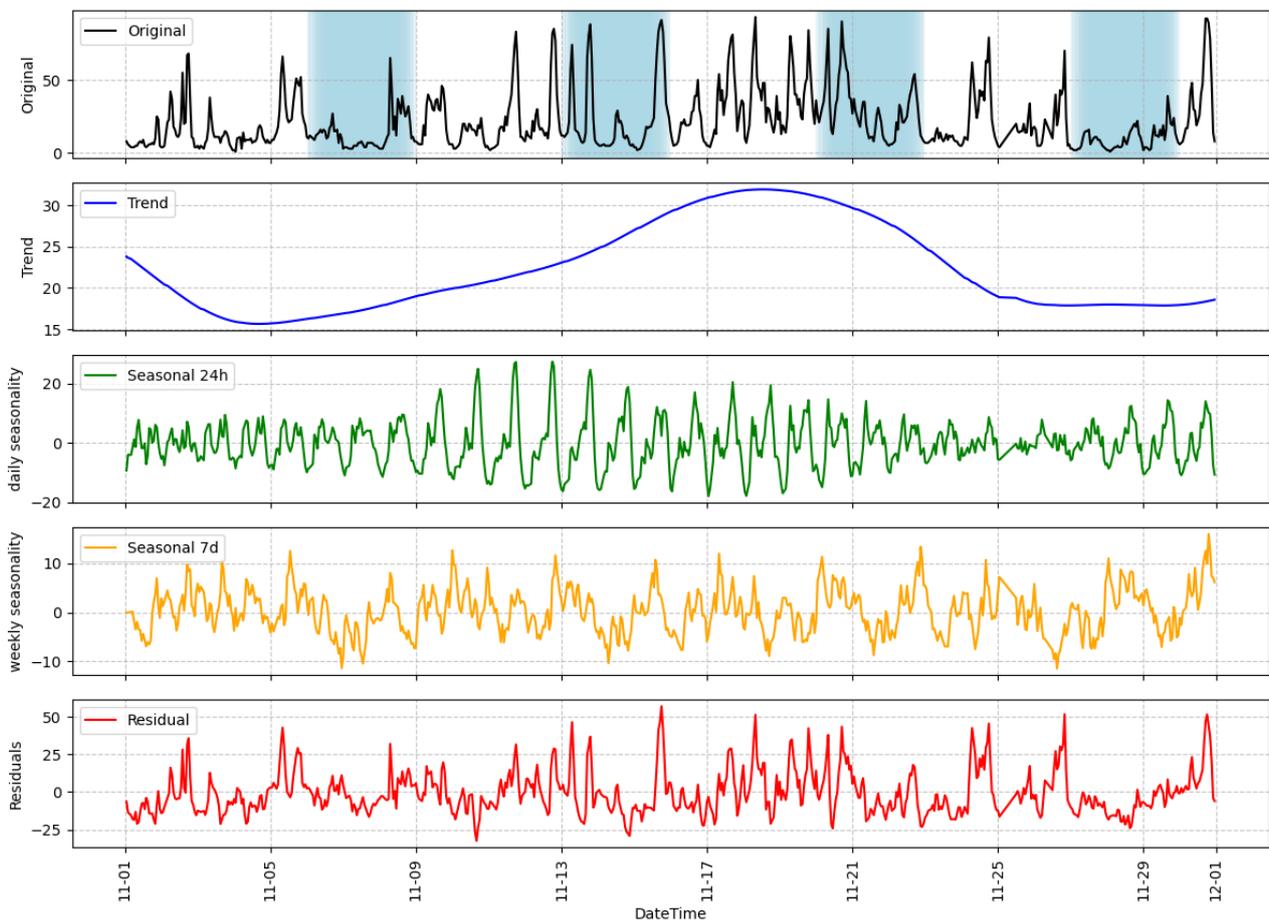


Figura 16. Stazione CV Villa Albani, novembre 2021: decomposizione della serie temporale di NO₂; le aree in blu corrispondono ai fine settimana.

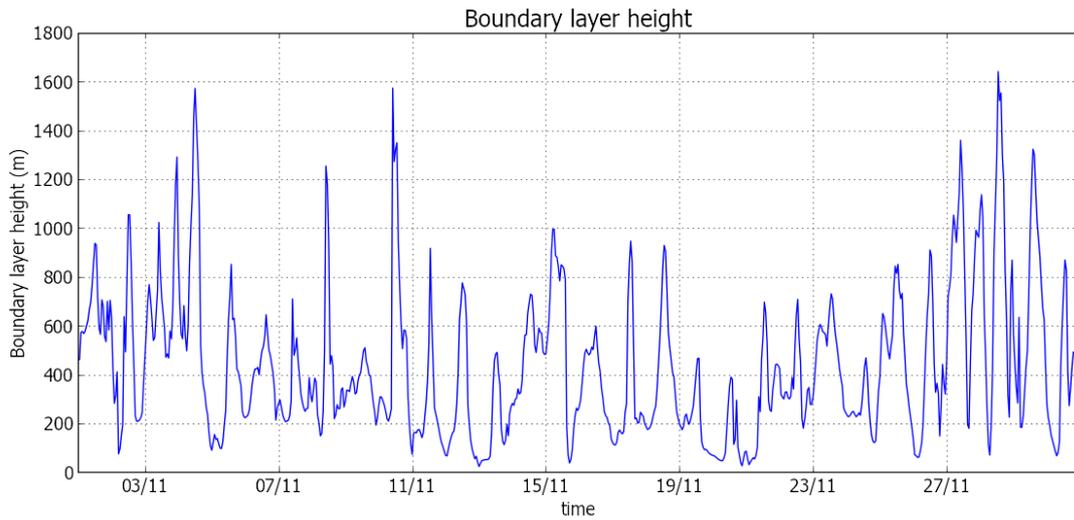


Figura 17. Profilo altezza di rimescolamento (Boundary layer height) estratto dalle re-analisi di ERA5 a risoluzione 0.1 ° X 0.1°, novembre 2021.

Time series decomposition 107 - Allumiere-V.Aldo_Moro NO2 2021

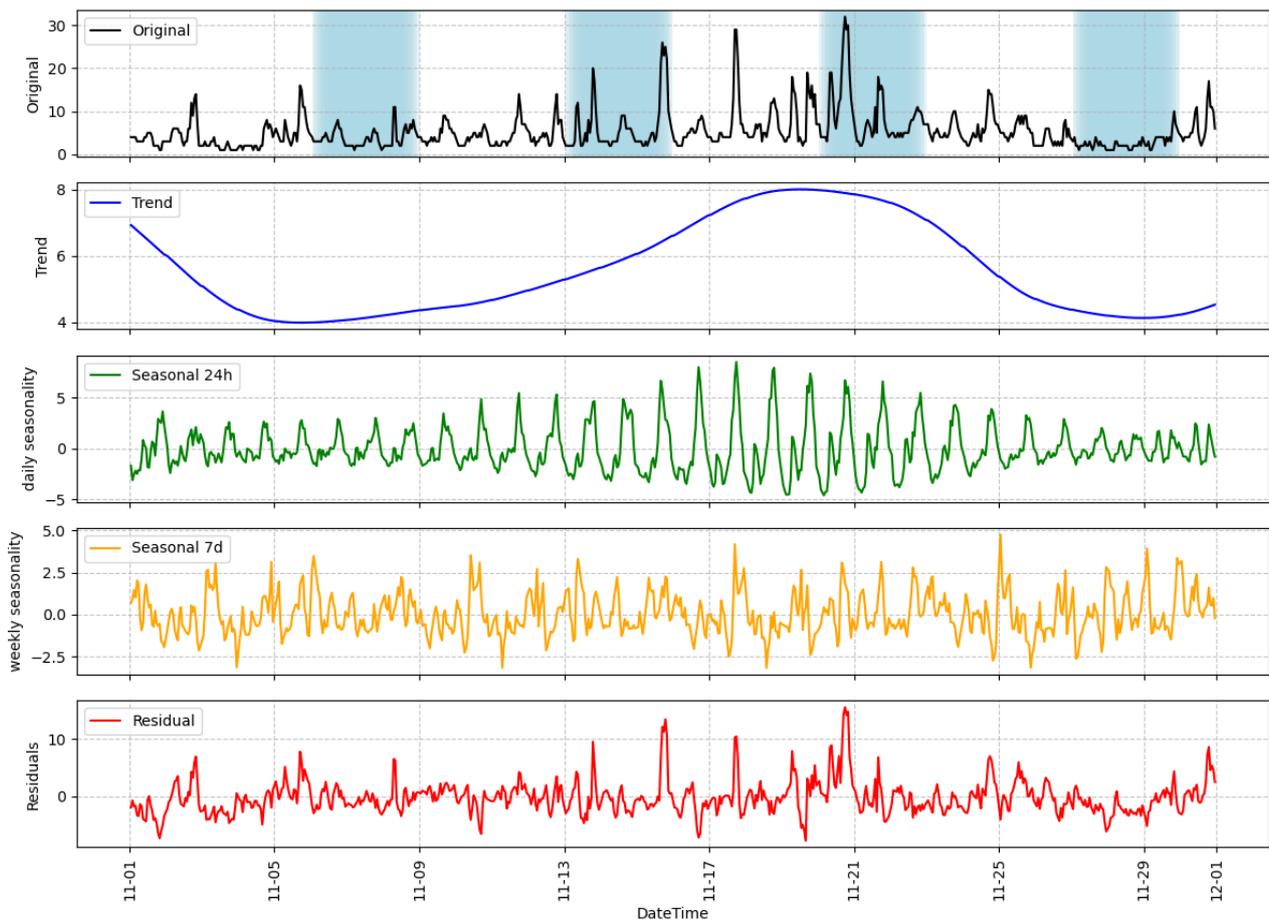


Figura 18. Stazione Allumiere – via Aldo Moro, novembre 2021: decomposizione della serie temporale di NO₂; le aree in blu corrispondono ai fine settimana.

Time series decomposition 060 - CV_Porto NO2 2021

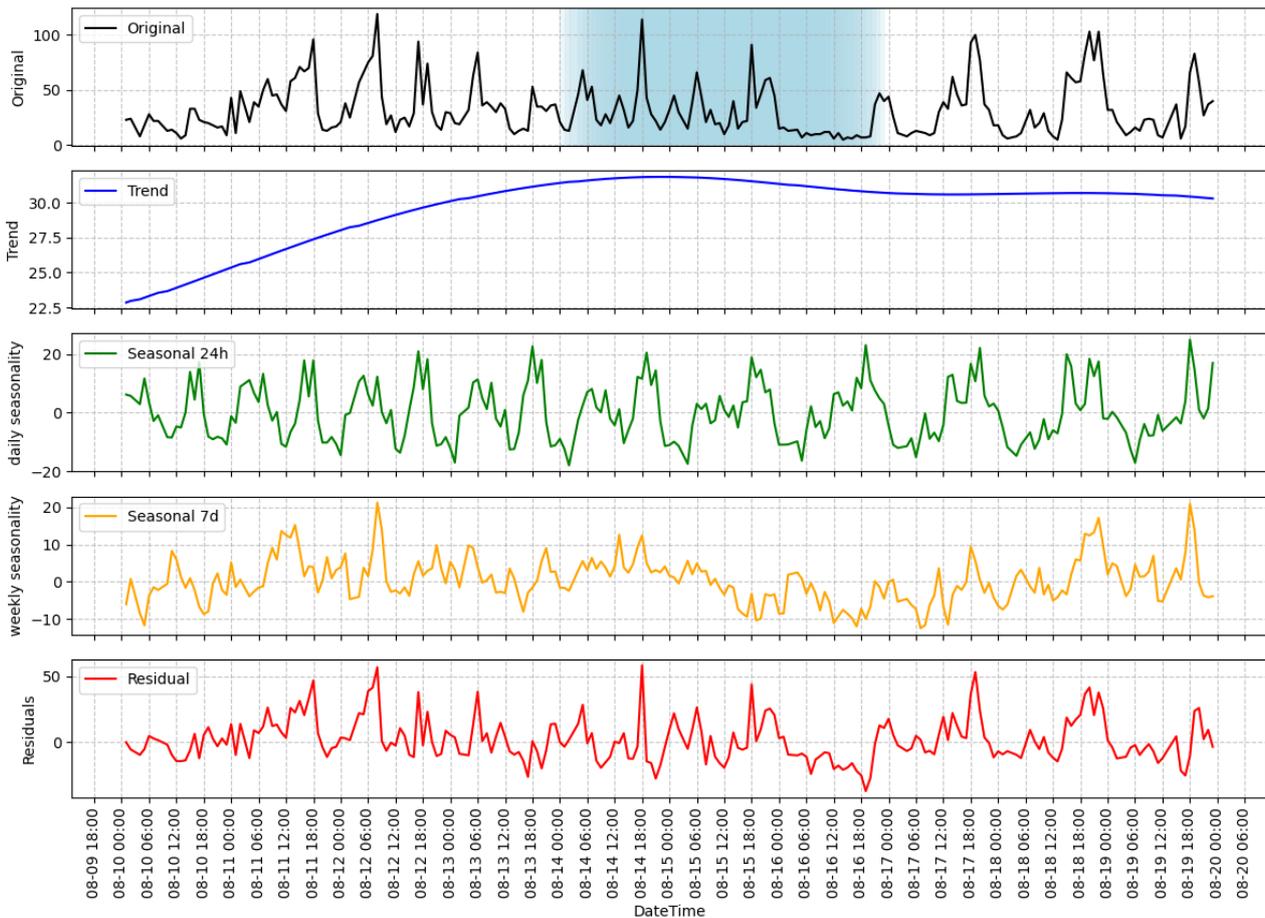


Figura 19 Stazione Civitavecchia - Porto, 10 agosto - 20 agosto 2021: decomposizione della serie temporale di NO₂; le aree in blu corrispondono ai fine settimana.

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 consentono di evidenziare variazioni delle concentrazioni di NO₂ in funzione della direzione del vento ed associare, ad esempio, concentrazioni più elevate a specifiche direzioni di provenienza del vento e conseguentemente a sorgenti poste lungo tali direzioni.

Quest'analisi è stata condotta utilizzando le misure di concentrazione di NO₂ per l'anno 2021, 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 20 mostra una mappa delle stazioni di qualità dell'aria con una rappresentazione della rosa dei venti ottenuta dai dati misurati presso la Centrale nell'anno 2021, 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 trasportano infatti i pennacchi verso il mare. In particolare, la stazione che risulta sottovento

per la maggior parte del tempo rispetto alla Centrale è quella di S. Agostino, sottovento per il 15% del tempo. A seguire, Aurelia e poi Fiumaretta, sottovento rispettivamente per il 9% e per il 3% del tempo.

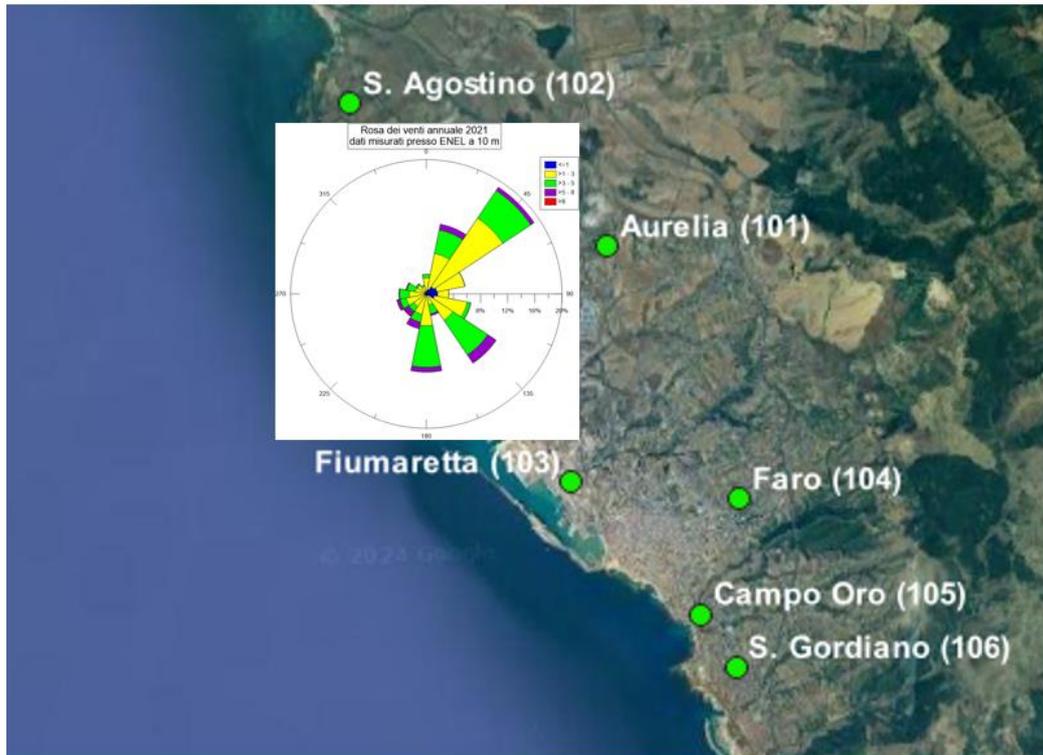


Figura 20. Mappa della rete di monitoraggio della qualità dell'aria, con la rosa dei venti elaborata dai dati raccolti presso la Centrale a 10 m di altezza nel 2021, mostrata in corrispondenza della stessa Centrale.

Di seguito in Figura 21 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 incrementi di concentrazione significativi specifici 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 essere dovuto all'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, per tutte le direzioni, con una percentuale di dati misurati superiori a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ di circa il 21%. In questa stazione emerge quindi l'effetto di sorgenti locali e non risulta possibile individuare un evidente contributo relativo alla Centrale.

In Figura 22 si riportano nel dettaglio le rose di concentrazione di NO_2 per le tre stazioni in prossimità della Centrale, per l'anno 2021.

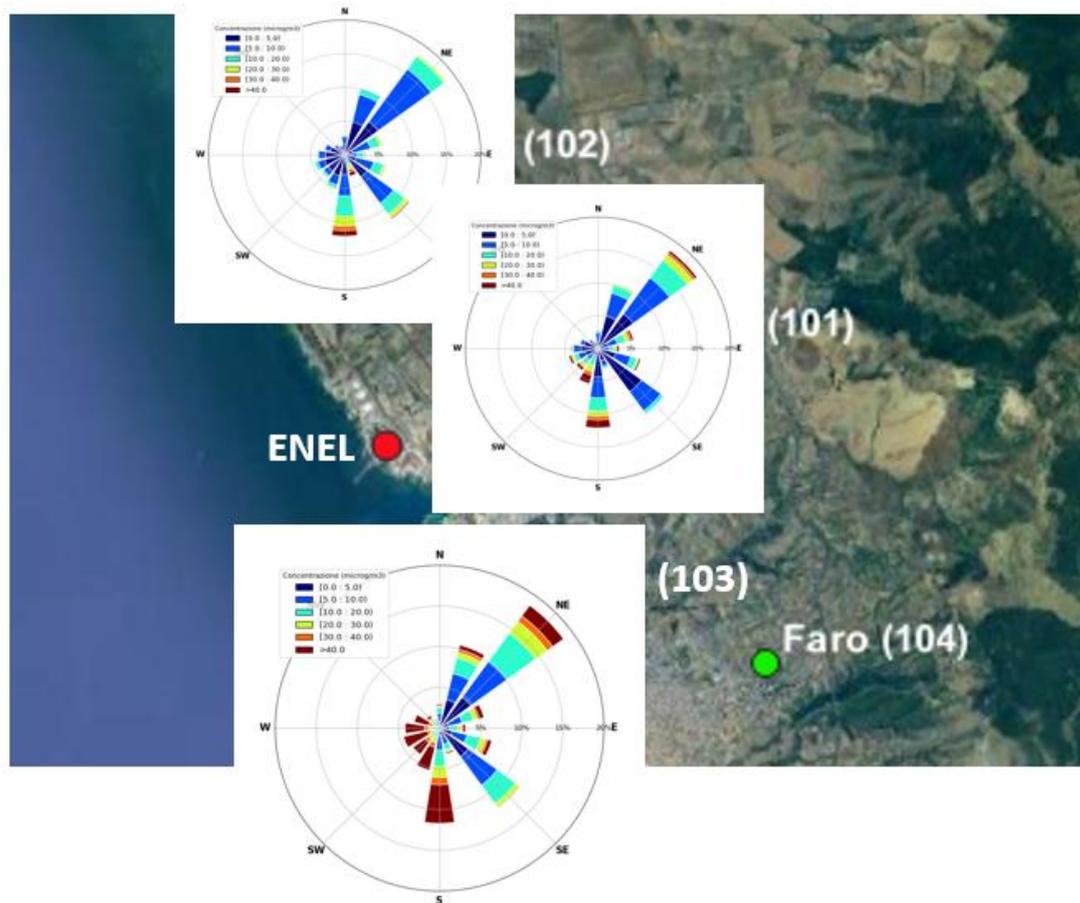


Figura 21. Rose di concentrazione ricavate dai dati di NO₂ raccolti dalle stazioni di Aurelia (101), S. Agostino (102) e Fiumaretta (103) nel 2021 in corrispondenza delle stesse stazioni.

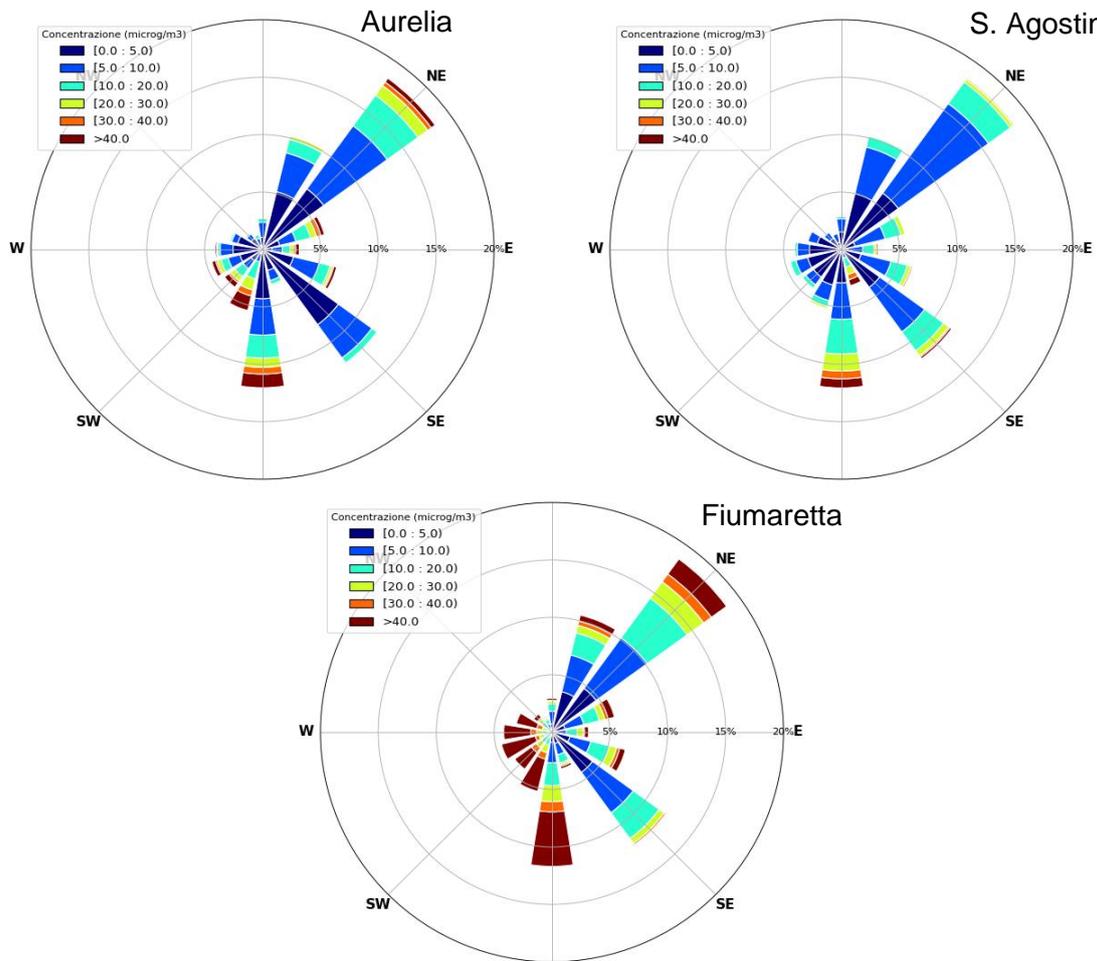


Figura 22. Dettaglio delle rose di concentrazione ricavate dai dati di NO₂ raccolti dalle stazioni di Aurelia, S. Agostino e Fiumaretta nel 2021.

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 Aldo Moro posta nell'area di Allumiere.

Tabella 14. Standard di legge relativi all'ozono.

Stazione	ID	Dati Raccolti %	Media annuale	Superamenti Valore Obiettivo	AOT40
S. Agostino	102	96.3%	64.2	11	5898
Allumiere - Via Aldo Moro	107	97.9%	83.8	27	15740
Santa Marinella	109	99.9%	65.3	1	4166
Allumiere - via del Faggeto	14	97.8%	79.7	11	10271
CV via Togliatti	15	98.9%	59.2	0	909
CV Villa Albani	83	99.3%	62.6	1	4221
CV via Morandi	84	98.0%	51.8	0	1070

Al fine di considerare le complesse reazioni fotochimiche che coinvolgono gli ossidi di azoto e l'ozono (si veda l'Allegato C) viene introdotta un nuovo parametro, detto "O_x" ossidante totale, che è definito 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 O₃ in NO₂.

Nelle figure seguenti si riportano, a titolo di esempio, l'andamento orario delle concentrazioni di ozono, NO₂ ed O_x ad Allumiere - via Aldo Moro (sito rurale); Santa Marinella (sito costiero) e Civitavecchia - via Togliatti (sito urbano) durante un giorno tipo estivo (26/6/2021, Figura 23). L'esame di tale figura evidenzia l'andamento anti-correlato tra le concentrazioni misurate di biossido di azoto e ozono nelle stazioni di Santa Marinella e Civitavecchia - via Togliatti che presentano maggiori livelli di NO₂; in corrispondenza di picchi di NO₂, attribuibili ad emissioni locali quali il traffico veicolare, risultano infatti valori minimi di ozono dovuti all'elevata presenza di monossido di azoto che reagendo con l'ozono dà luogo alla formazione di biossido di azoto ("ozone titration"). Tale effetto non è presente per la stazione rurale di Allumiere: i livelli di NO₂ raggiungono il valore massimo di 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e non risulta evidente una modulazione giornaliera per tale inquinante; conseguentemente i livelli di ozono risultano pressoché costanti e superiori a quelli osservati nelle altre due centraline. I grafici relativi all'ossidante totale (O_x) evidenziano, la crescita di tale parametro durante le ore diurne, ove è maggiormente intensa l'attività fotochimica veicolata dalla radiazione solare. Nelle centraline Santa Marinella e Civitavecchia - via Togliatti, caratterizzate da maggiori emissioni di ossidi di azoto si osservano minori valori per tale parametro durante le ore notturne (effetto "ozone titration" maggiormente evidente dovuto all'assenza di radiazione solare).

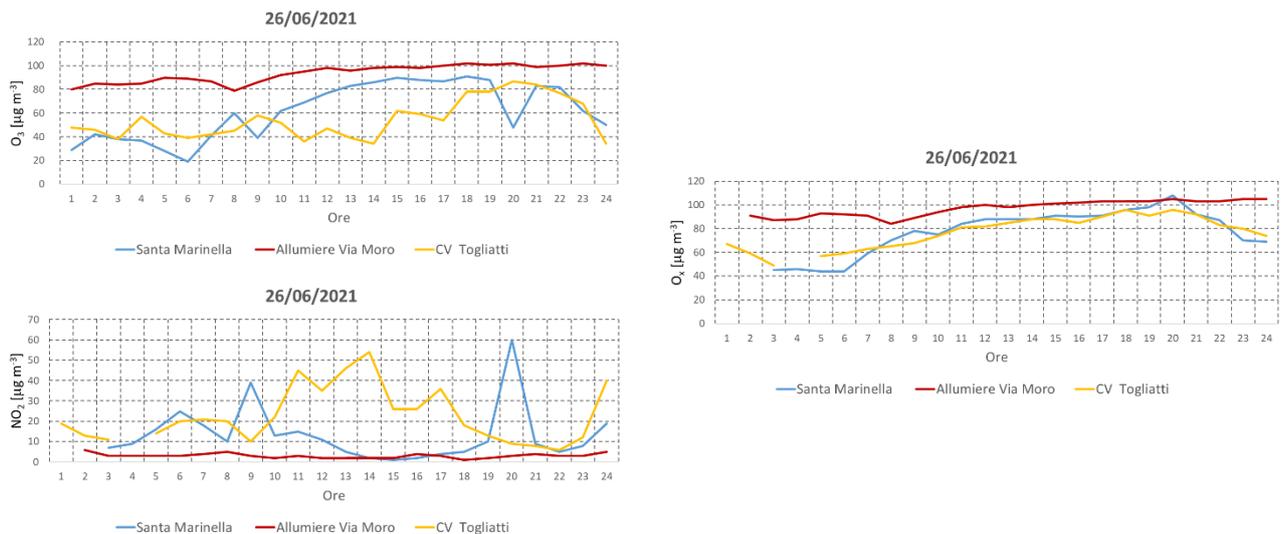


Figura 23. Andamento delle concentrazioni orarie di NO₂, O₃ ed Ox durante in giorno tipo estivo.

5.4.2 Andamento temporale dell'ozono

Nella figura seguente (Figura 24) 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 nelle stazioni costiere (S. Agostino e Santa Marinella) 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.

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 µg/m³) per la vegetazione e culture. Il valore obiettivo previsto dal Dlgs 155 è pari a 18000 m⁻³ h⁻¹ come media su 5 anni.

Nel corso del 2021 non si registrano valori superiori al valore obiettivo per questo parametro.

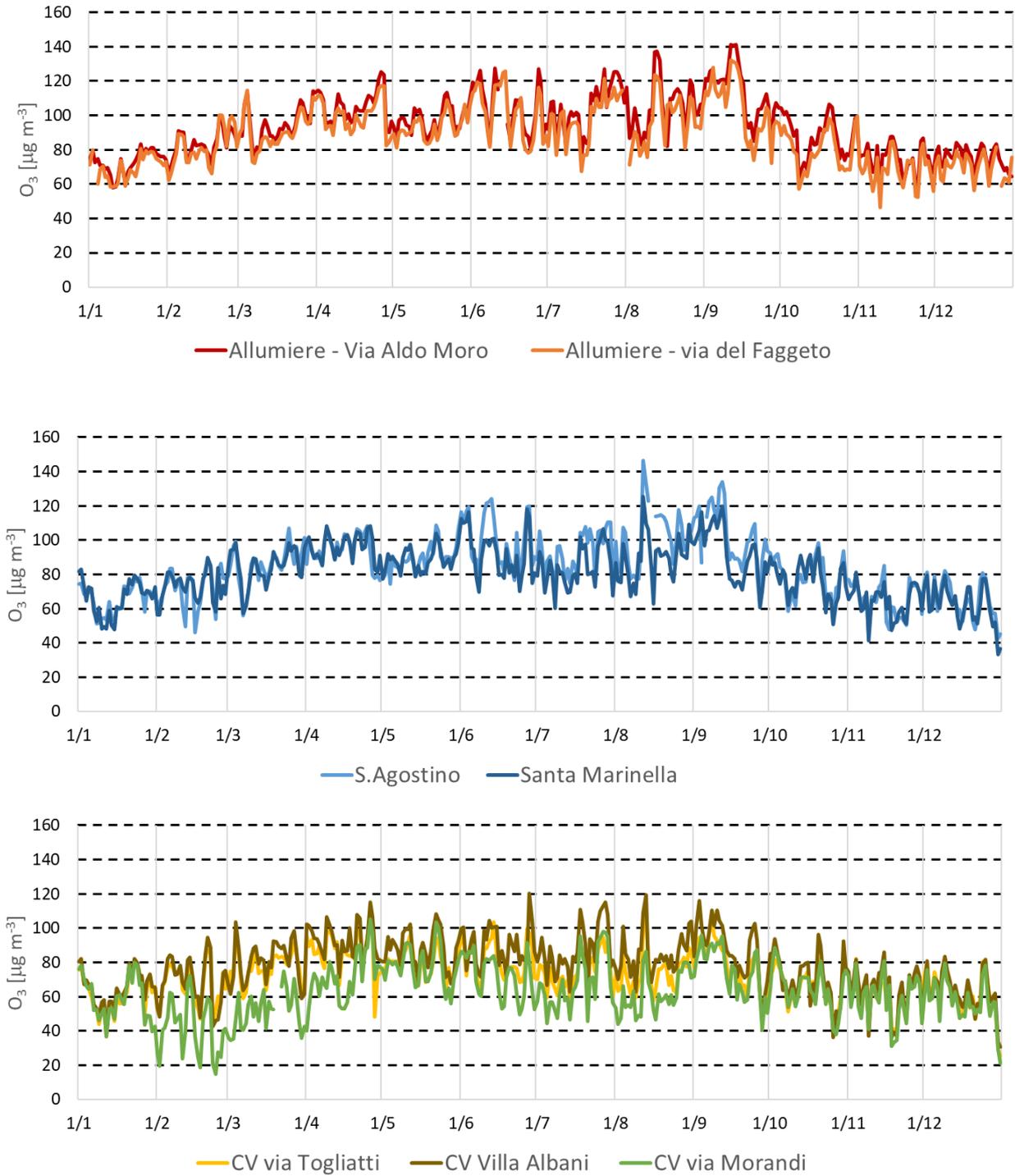


Figura 24. Concentrazione media massima giornaliera di ozono calcolata su 8 ore misurata nelle centraline.

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. Non è inclusa la stazione S. Agostino perché durante il 2021 la percentuale di dati disponibili è risultata pari al 57.3%.

Tabella 15. Standard di legge relativi a SO₂ per il 2021 [µg/m³].

ID	Descrizione	Dati Raccolti %	Media annuale	Media massima oraria
103	Fiumaretta	93.2%	1.6	48.4
104	<i>Faro</i>	88.6%	1.8	14
105	<i>Campo Oro</i>	87.8%	0.7	44.6
107	Allumiere - via Aldo Moro	94.6%	1.7	17

Legenda: I dati relativi alle centraline Faro e Campo Oro sono mostrati in corsivo perché la percentuale di dati raccolti è inferiore a quella richiesta pari al 90%.

Per quanto riguarda questo inquinante, si osserva che i valori medi annuali misurati sono molto vicini al limite di rilevabilità dello strumento, aspetto da tenere in considerazione per valutare l'affidabilità del dato acquisito. Non sono stati osservati superamenti dello standard 125 µg/m³ (valido su base giornaliera) e 350 µg/m³ valido su base oraria. Inoltre, nelle stazioni dove sono state misurate le concentrazioni di questo inquinante (Fiumaretta, Faro, Campo Oro e Allumiere), i valori non hanno mai superato qualche unità di µg/m³ ad eccezione di qualche sporadico evento. A questo proposito, vi è da tenere conto che il sistema di rilevamento di biossido di zolfo è al limite delle sue capacità in termini di concentrazione minima rivelabile. A tali livelli quindi, l'affidabilità delle misure è molto ridotta, nel senso che esse sono affette da incertezze molto elevate. Comunque, poiché i dati mostrano concentrazioni molto al di sotto dei valori limite, la presenza di così basse quantità di biossido di zolfo non costituisce un problema ambientale.

5.5.2 Andamento temporale del biossido di zolfo

L'andamento temporale del biossido di zolfo, presentato in Figura 25, evidenzia concentrazioni spesso ben inferiori a 2 µg/m³ con una frequente mancanza di dati regolari durante tutto l'anno dovuta, probabilmente, alla prossimità del limite di sensibilità della strumentazione. L'esame di tale figura conferma evidenza la sporadicità degli eventi di picco registrati.

Nella figura seguente (Figura 26) 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 successiva Tabella 16 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.

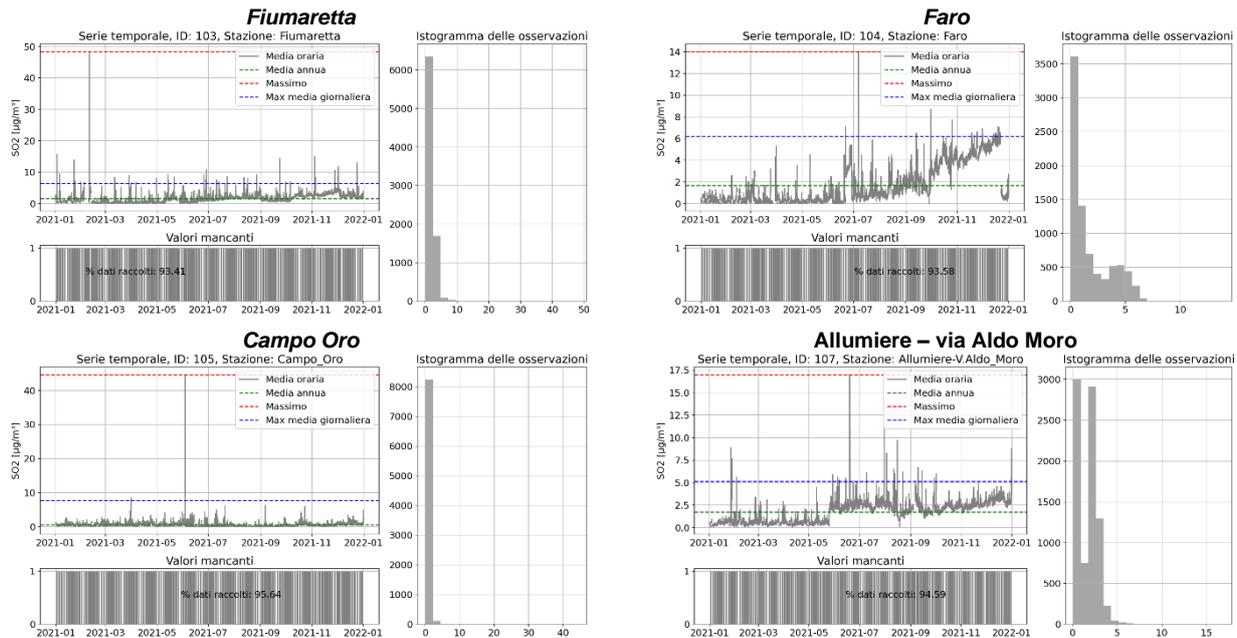


Figura 25. SO₂, anno 2021: serie temporale delle concentrazioni giornaliere (alto sx); percentuale di dati raccolti (basso sx); istogramma delle osservazioni (dx).

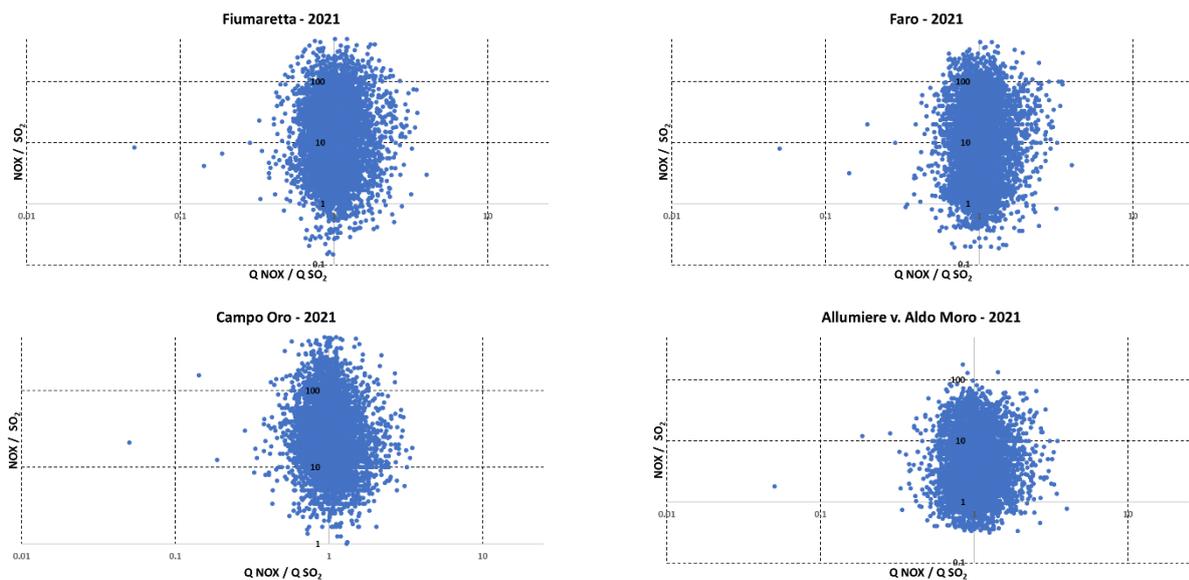


Figura 26. Rapporti NOX/SO₂ misurati nelle diverse centraline in funzione del rapporto delle emissioni NOX/SOX dai 3 gruppi di produzione della Centrale. I rapporti sono rappresentati in scala logaritmica.

Tabella 16. 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	25.1	0.0280	78.2%	1.1
Faro	23.0	0.0321	73.9%	
Campo Oro	40.0	-0.0615	74.8%	
Allumiere v. Aldo Moro	6.6	0.0325	78.1%	

5.6 Cluster Analysis (PM_{10} e NO_2)

L'analisi di clustering è stata utilizzata per raggruppare le stazioni di monitoraggio di PM_{10} ed NO_2 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 27 mostra i cluster identificati per la rete di monitoraggio del PM_{10} . Non emergono differenze particolarmente evidenti tra i due cluster. Si può osservare che il cluster 0 distingue la zona a nord dell'area urbana di Civitavecchia dal resto identificato nel cluster 1. Inoltre, escludendo le analogie tra i due gruppi dovute agli episodi di avvezione sahariana, si nota che il cluster 0 presenta una concentrazione media più bassa rispetto al cluster 1.

La successiva Figura 28 presenta i sei cluster identificati per la rete osservative del biossido di azoto. L'analisi dei dati ha permesso di classificare i cluster in base alla tipologia delle stazioni di monitoraggio della qualità dell'aria. Di seguito vengono riportate le specifiche per ciascun cluster:

- Cluster 0: Questo cluster rappresentano le stazioni di traffico urbano.
- Cluster 1: Identifica le stazioni di fondo urbano, in particolare le stazioni di Aurelia e Faro. Tuttavia, la stazione di Campo Oro, pur essendo una stazione di fondo urbano secondo la classificazione fornita da ARPA Lazio (<https://www.arpalazio.it/ambiente/aria/comprendorio-civitavecchia>) si discosta dal comportamento tipico di questa categoria
- Cluster 2: Comprende la sola stazione di Fiumaretta che registra concentrazioni più alte rispetto al resto della rete presa in esame.
- Cluster 3 e Cluster 4: Questi cluster includono le stazioni di fondo suburbano e di fondo remoto.

Le differenze tra i cluster di PM_{10} e NO_2 risultano particolarmente utili per comprendere la natura dei due inquinanti: mentre il PM_{10} è maggiormente influenzato da episodi stagionali ed eventi naturali, quali polveri sahariane, il biossido di azoto è più influenzato da a fonti di inquinamento locali (es. traffico veicolare).

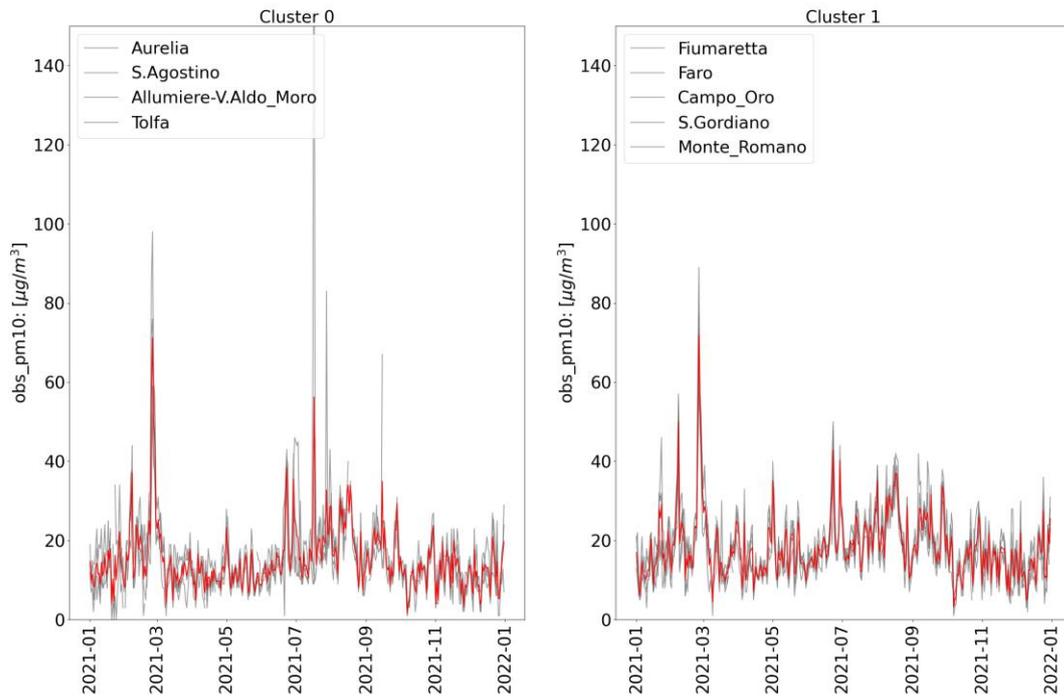


Figura 27. Andamento delle concentrazioni di PM₁₀ per i tre cluster identificati mediante l’algoritmo “K-means”. Ogni pannello mostra le stazioni incluse in ciascun cluster, evidenziando similitudini nei pattern temporali delle concentrazioni.

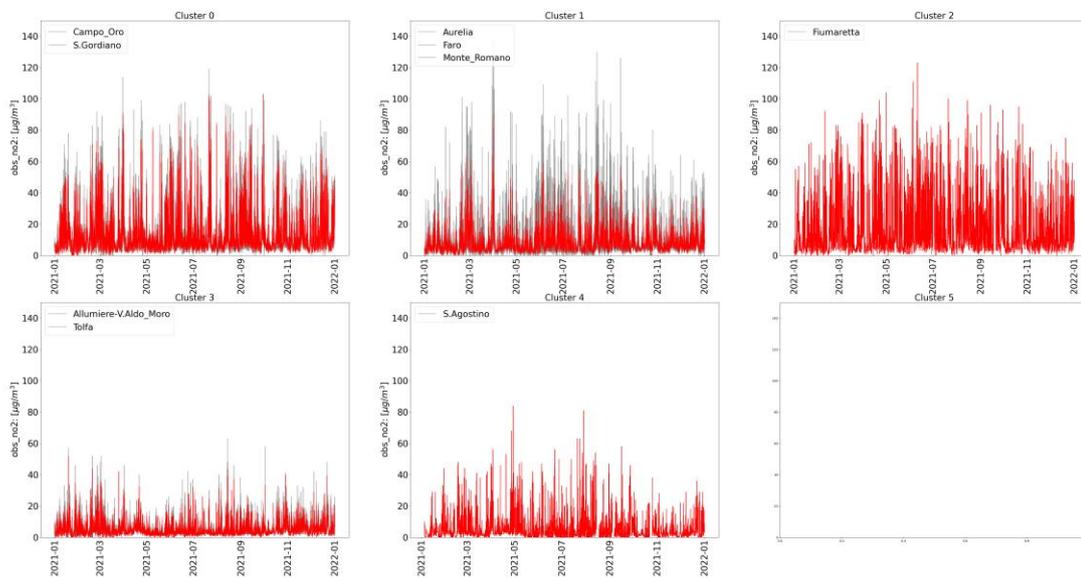


Figura 28. Andamento delle concentrazioni di NO₂ per i sei cluster identificati mediante l’algoritmo “K-means”. Ogni pannello mostra le stazioni incluse in ciascun cluster, evidenziando similitudini nei pattern temporali delle concentrazioni.

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 29.

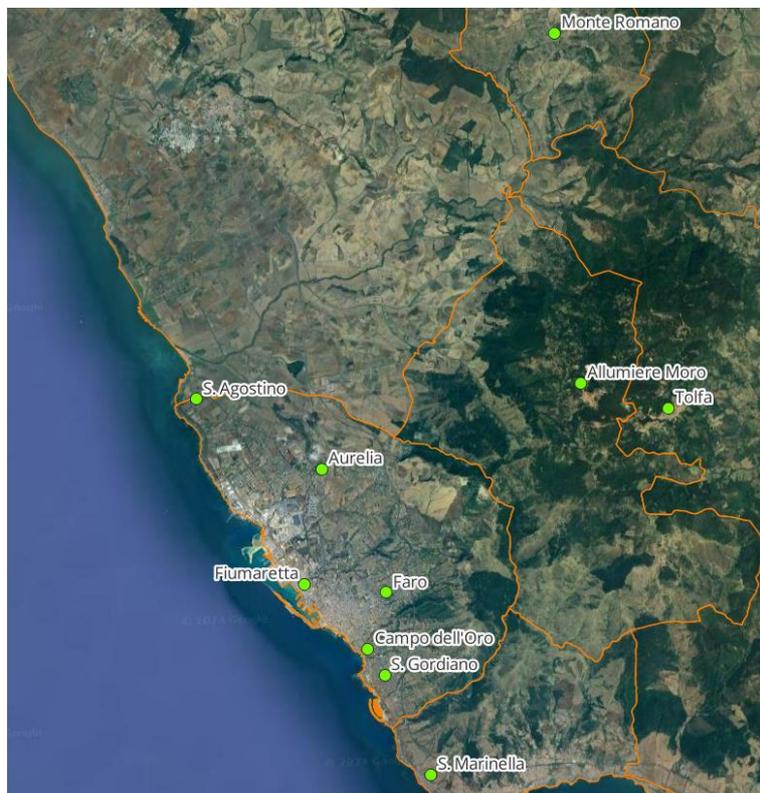


Figura 29. Distribuzione spaziale della rete di monitoraggio attiva nel 2021

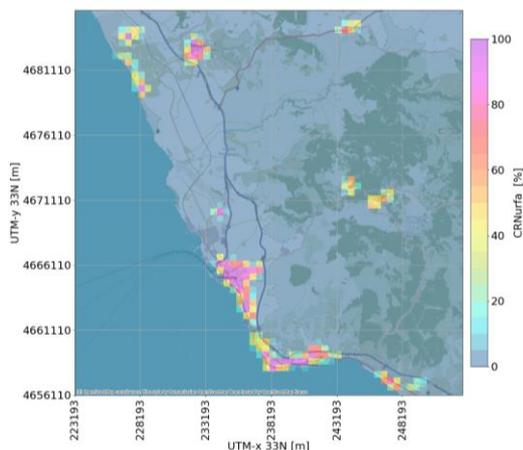
L'algoritmo ML-RF consiste in un insieme di alberi decisionali (da cui "foresta") adatto a risolvere problemi di classificazione (separazione dei dati in classi) e di regressione. Esso è stato sviluppato per risolvere gli errori di *over-fitting* (si verificano quando un modello raggiunge buoni risultati 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

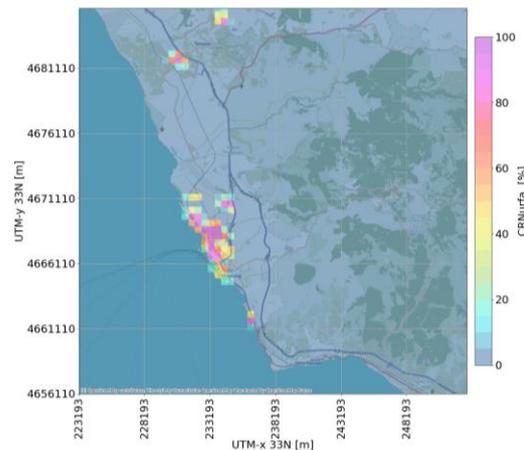
monitoraggio (fase di training) sulla base di un insieme di predittori. La seconda, detta di inferenza o generalizzazione, è volta a stimare le concentrazioni nelle celle della griglia dove non sono disponibili osservazioni.

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 2021, il più recente disponibile al momento della redazione del presente report di qualità dell'aria 2021). 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 30.

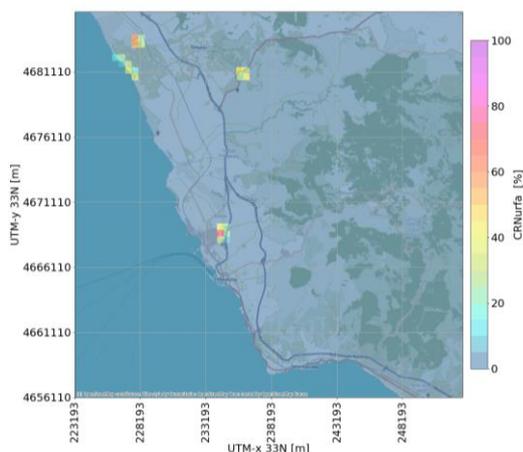
Tessuto urbano



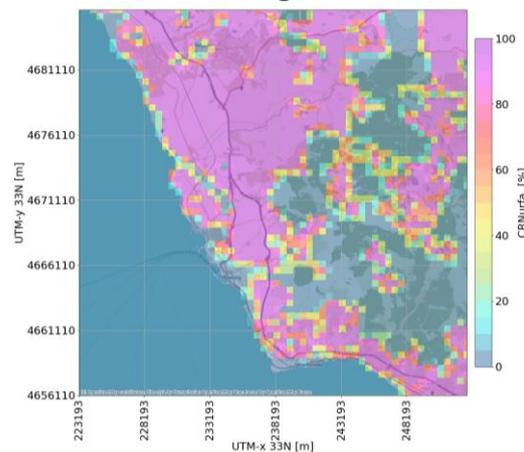
Unità industriali, commerciali e di trasporto



Altre superfici artificiali



Aree agricole



Foreste

Aeroporti

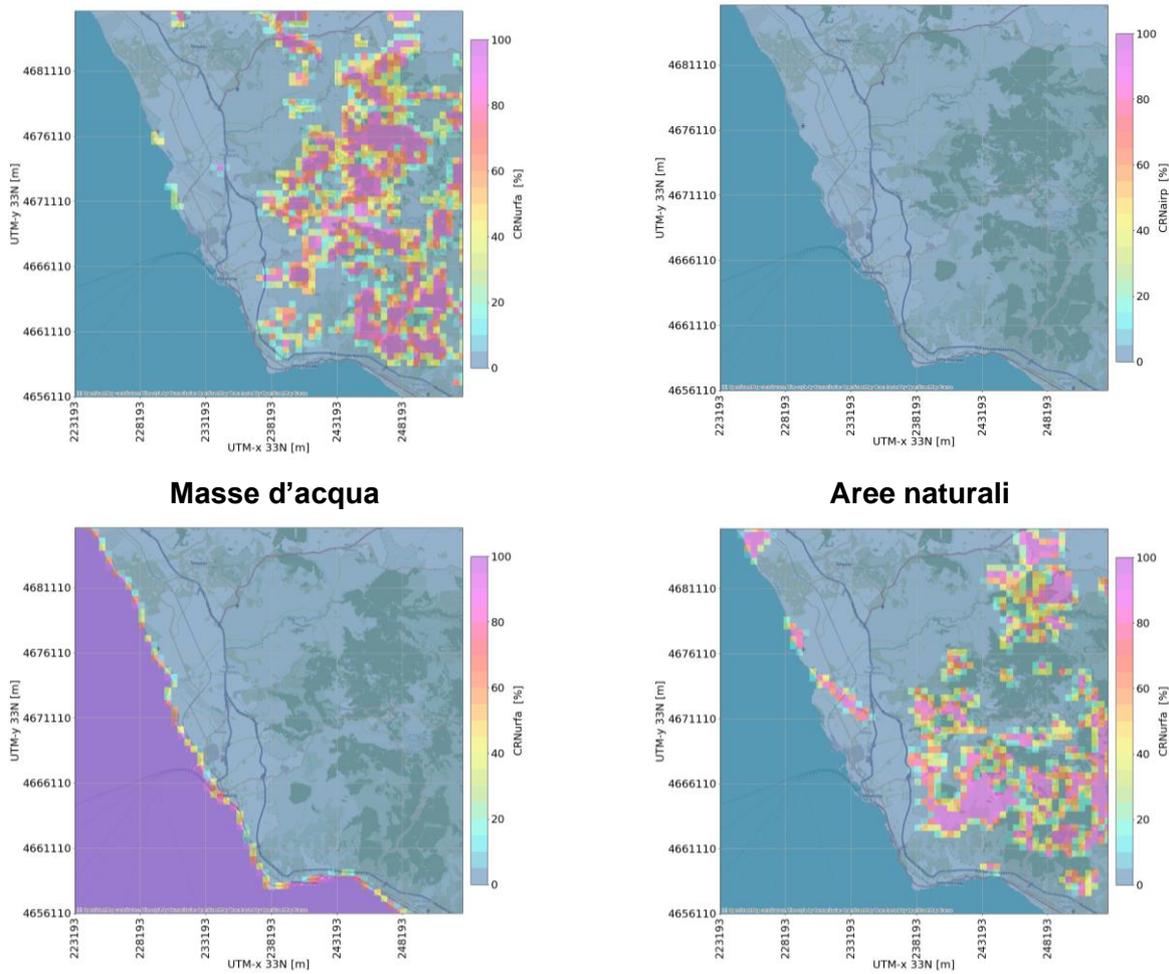


Figura 30. Predittori di copertura del suolo secondo Corine Land Cover 2021. Risoluzione 500m

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 31) 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*).

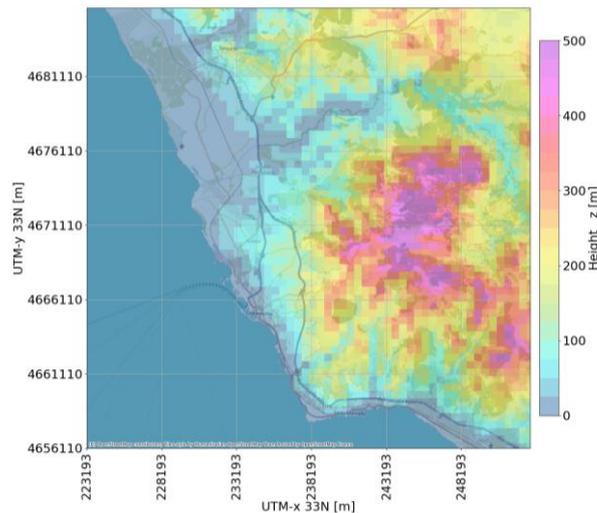


Figura 31. Predittore di elevazione media EU-DEM.

L'algoritmo è stato impiegato per i seguenti inquinanti: PM₁₀ e NO₂ 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 17.

Tabella 17. Informazioni dei modelli di RF per PM₁₀ e NO₂

	Iper-parametri	Predittori
PM₁₀	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
NO₂	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 32 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 le concentrazioni più elevate, identificando le aree urbane di Tarquinia a Nord e Santa Marinella e Santa Severa lungo la costa. L'incertezza del modello non supera mai i 6 µg /m³ con maggiore incertezza nelle aree urbane. Per quanto riguarda il biossido di azoto si riscontrano concentrazioni più elevate a sud e lungo la costa con incertezze maggiori sia nell'area urbana di Civitavecchia che lungo la costa.

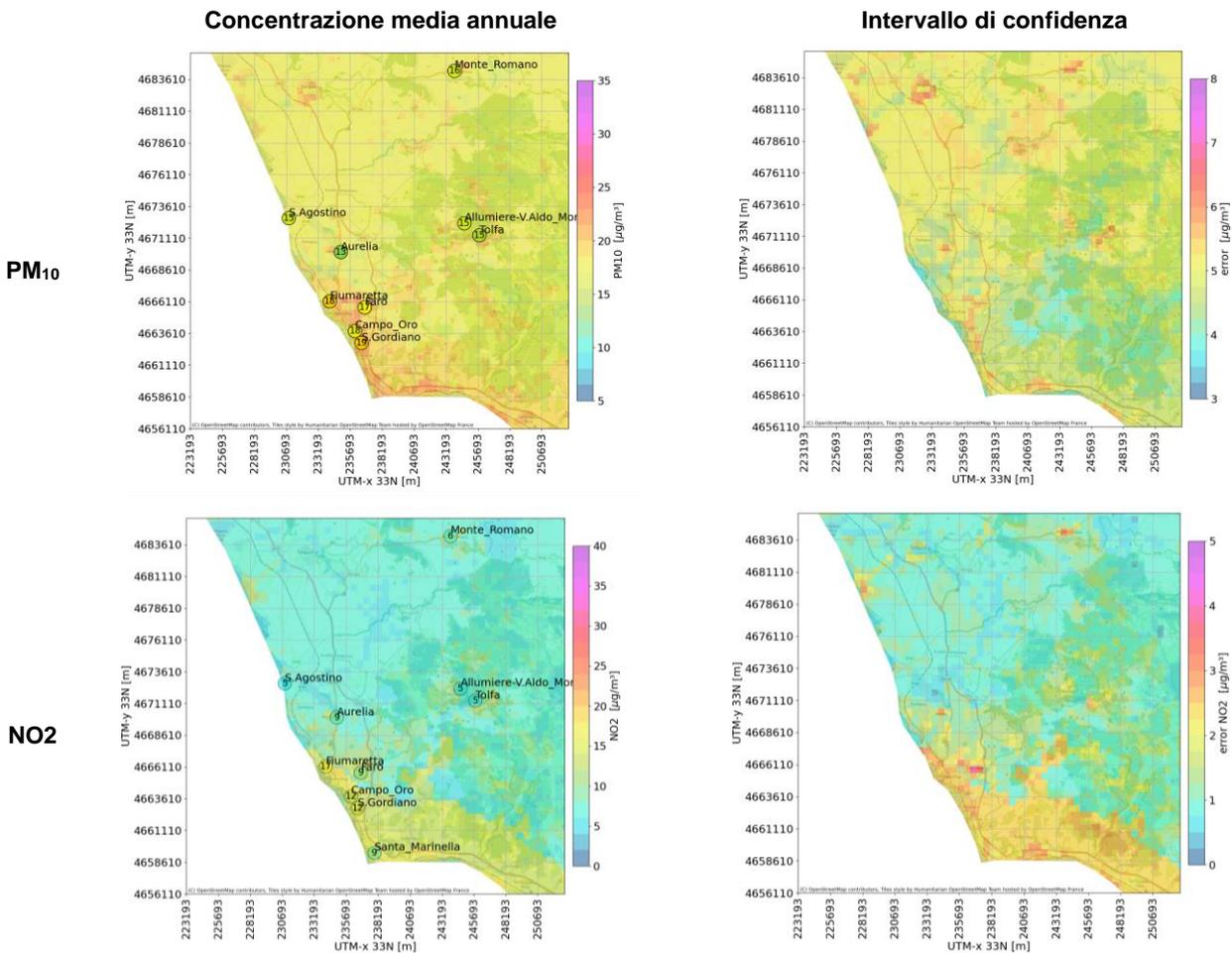


Figura 32. PM₁₀ ed NO₂: mappe di concentrazione media annuale ed intervallo di confidenza.

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 18 sono riportati la media e la Deviazioni Standard di RMSE relativi all'algoritmo ML-RF con la procedura di validazione.

Tabella 18. Media e Deviazioni Standard di RMSE [$\mu\text{g m}^{-3}$] per i Modelli RF

MODELLO		NO ₂	PM ₁₀
RF – validazione	Media	6.4	6.9
	Dev. Std	1.4	2.1

6.2 Analisi della rappresentatività della rete per le successive indagini epidemiologiche

La Figura 33 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-V.Aldo Moro e Tolfa abbiano una simile impronta d'uso del suolo così come Tarquinia e Monte Romano.

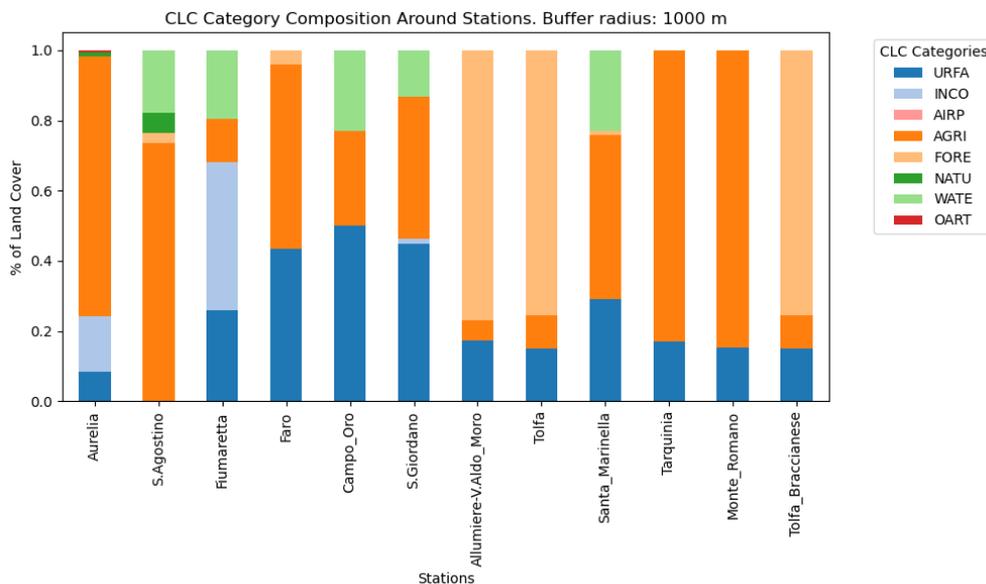


Figura 33. Composizione dell'uso del suolo nell'area di 1 km di raggio intorno a ciascuna stazione.

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 34 e Figura 35. 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.

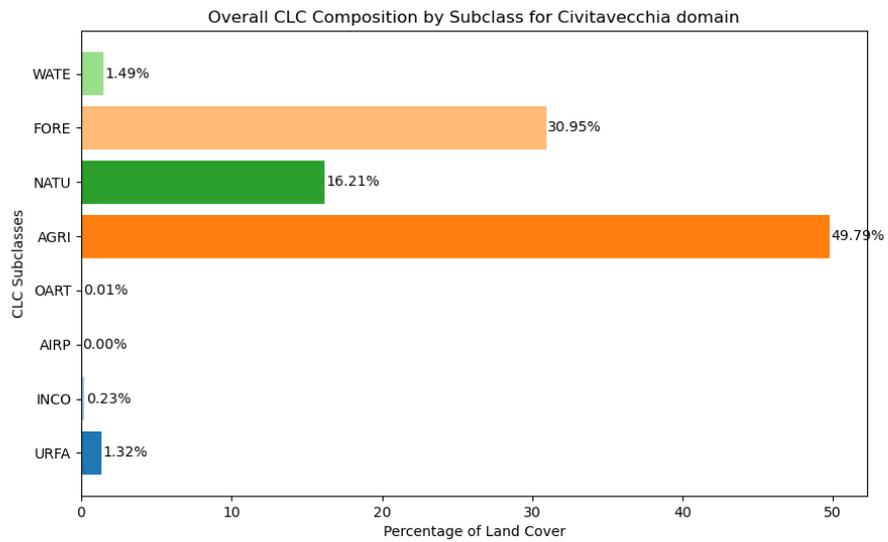


Figura 34. Composizione dell'uso del suolo nel dominio di Civitavecchia.

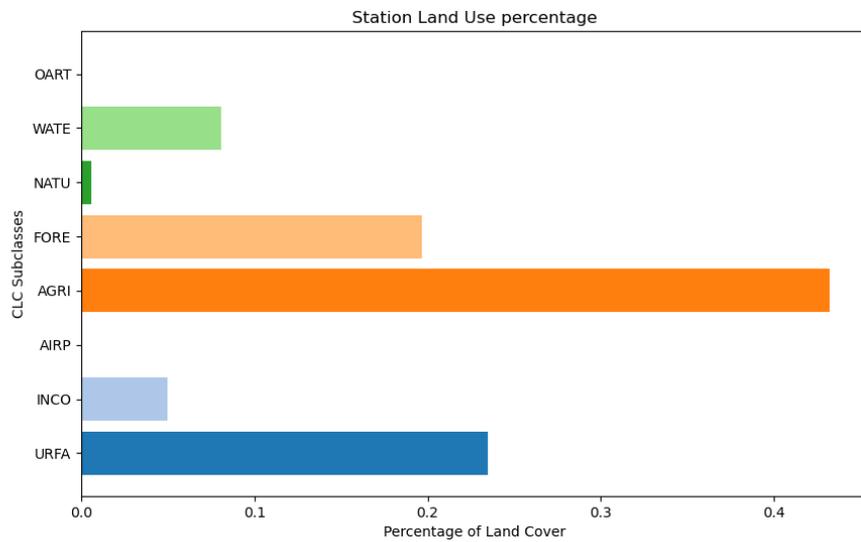


Figura 35. Composizione dell'uso del suolo attorno le stazioni in un raggio di 1 km.

7 Conclusioni

Questo documento riporta i risultati di uno studio finalizzato alla valutazione della qualità dell'aria nell'area circostante la Centrale ENEL Torvaldaliga relativa all'anno 2021, periodo interessato dalla ripresa economica e produttiva a seguito della pandemia COVID-19.

L'area in questione include i Comuni aderenti al Consorzio per la gestione dell'Osservatorio Ambientale. La ricerca è stata condotta utilizzando le misurazioni della concentrazione di biossido di zolfo (SO₂), biossido di azoto (NO₂), ozono (O₃) e particolato (PM10, PM2.5) fornite dagli analizzatori automatici localizzati nelle stazioni di monitoraggio della rete regionale della qualità dell'aria amministrata da ARPA Lazio. Le concentrazioni rilevate sono state quindi messe a confronto con gli standard normativi previsti dal d.lgs. 155/2010, e sono stati esaminati anche in relazione ai dati di emissione della centrale menzionata e alle misure meteorologiche fornite dalla stessa. La ricerca ha tentato di concentrarsi sull'analisi del rapporto tra inquinamento ed emissioni della centrale. L'analisi dei dati provenienti dalla rete di monitoraggio non ha mostrato una correlazione chiara tra i valori medi o di picco degli inquinanti rilevati e l'operato della centrale. Per approfondire l'interpretazione dei dati rilevati, questo rapporto presenta informazioni sulla complessità dei processi chimico-fisici che generano i fenomeni di inquinamento atmosferico, alternando spiegazioni teoriche e grafici esplicativi elaborati in base ai dati locali relativi al 2021, sulla base dei quali si sono elaborate le seguenti considerazioni.

La Centrale ENEL TVN 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. Nel 2021 sono stati consumati circa 2,35 milioni di tonnellate di carbone e la produzione di energia è stata pari a circa 4019 GWh. Questi numeri lascerebbero prevedere un notevole impatto sul territorio che è tuttavia fortemente mitigato sia dai dispositivi antiinquinamento 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). L'altezza effettiva delle emissioni è data dalla somma dell'altezza fisica del camino, pari a 250 metri, e della spinta entalpica dei fumi, data dalla loro temperatura e velocità di efflusso, che determina una altezza di emissione dei fumi a quote anche molto superiori all'altezza del camino. L'effetto combinato dei dispositivi antiinquinamento e dell'altezza fisica del camino. L'effetto combinato dei dispositivi antiinquinamento e della quota delle emissioni determina una elevata diluizione dei fumi e quindi ad un ridotto impatto sulla qualità dell'aria nel territorio circostante.

La situazione meteorologica dell'area è caratterizzata da stabilità atmosferica che si riscontra nelle ore serali e antimeridiane; durante tali ore vi è un disaccoppiamento tra le masse d'aria in quota e quelle al suolo; gli inquinanti emessi al suolo vengono confinati nei bassi strati dell'atmosfera dando luogo al 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 verificato considerando 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 TVN. La rete di rilevamento è gestita 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).

L'insieme dei dati rilevati dalle stazioni di monitoraggio mostra che le concentrazioni degli inquinanti al suolo sono molto contenute. Esse non solo sono conformi ai limiti legislativi, ma nella quasi totalità dei casi sono molto distanti dalle soglie fissate. Tutti gli inquinanti considerati non raggiungono mai i livelli limite e considerati come obiettivo a lungo termine stabiliti dalla legislazione corrente e non raggiungono mai i livelli considerati come obiettivo a lungo termine. La qualità dell'aria nel territorio in esame, ove risiedono circa 100.000 abitanti, non presenta quindi particolari criticità.

L'analisi delle concentrazioni giornaliere di PM_{10} mediante la rappresentazione "heatmap" fornisce utili indicazioni circa la simultaneità di picchi di concentrazione attribuibili ad eventi particolari quali incendi e eventi di trasporto di polveri provenienti dal Sahara. La disponibilità di campi prodotti dal modello di rianalisi europeo CAMS, che includono il contributo delle polveri sahariane ai livelli di PM_{10} , ha consentito di identificare episodi di avvezione di polveri sahariane che hanno dato luogo a picchi di concentrazione per tale inquinante. I livelli di PM_{10} e $PM_{2.5}$ si mantengono comunque ben al di sotto degli standard di qualità dell'aria.

Analoghe conclusioni possono essere tratte per quanto riguarda un altro inquinante importante per la tutela della salute pubblica, ossia il biossido di azoto. Anche questo inquinante non supera mai i limiti imposti e la sua concentrazione si mantiene al di sotto dei limiti stessi che tutelano la salute della popolazione esposta. Nell'area urbana di Civitavecchia si registrano livelli più elevati attribuibili ad emissioni locali, quali il traffico veicolare, che insistono nell'area.

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. Per questo inquinante, la rete di rilevamento ha mostrato superamenti del valore obiettivo ($120 \mu g/m^3$ della media mobile di 8 ore da non superare per più di 25 volte l'anno) nella centralina posta ad Allumiere (via Aldo Moro).

Per quanto riguarda infine il biossido di zolfo, i valori misurati sono risultati molto vicini al limite di rilevabilità dello strumento.

L'analisi di correlazione tra i rapporti NOX/SO_2 misurati nelle diverse centraline ed il rapporto delle emissioni NOX/SOX dai 3 gruppi di produzione della Centrale evidenziano l'assenza di relazione lineare tra le due variabili.

L'analisi dei dati rilevati nell'anno di riferimento 2021 non mostra criticità e si allinea con le realtà ambientali di altri siti della Regione Lazio 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 PM_{10} e NO_2 e relative incertezze su un dominio di dimensioni pari a $30 \times 30 \text{ km}^2$ 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 PM_{10} , 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 PM_{10} siano inferiori, l'incertezza nelle previsioni aumenta, suggerendo una minore precisione del modello in tali aree. Per quanto riguarda il biossido di azoto si riscontrano concentrazioni più elevate a sud e lungo la costa associate, tuttavia, ad una maggiore incertezza.

I risultati prodotti in questo studio possono costituire infine una 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.

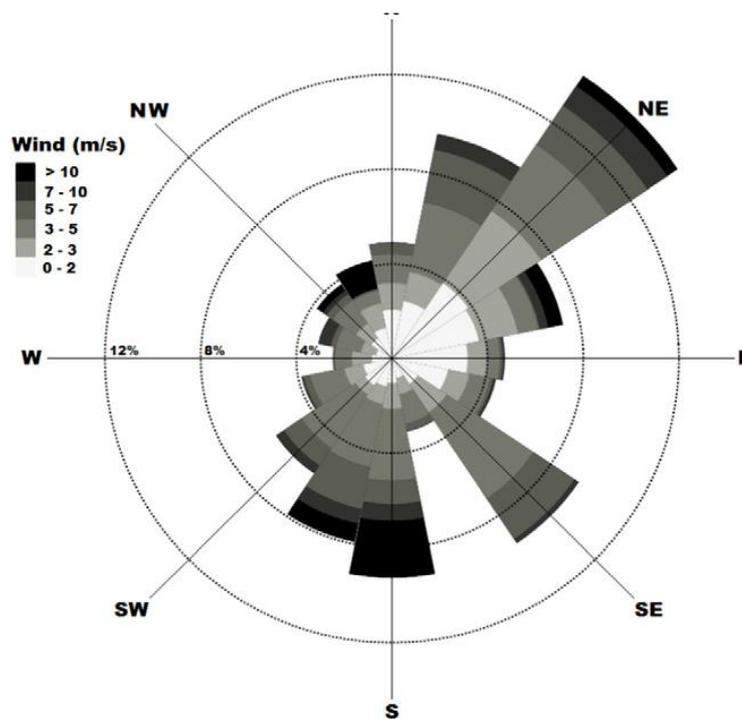


Figura A1. Rosa dei venti relativa alla indagine realizzata dal Consorzio e CNR ISAC

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.

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)² 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 in sezione 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., 2016³ ha valutato l'impatto della Centrale ENEL TVN

² 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,

³ 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 ⁴.

⁴ "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.

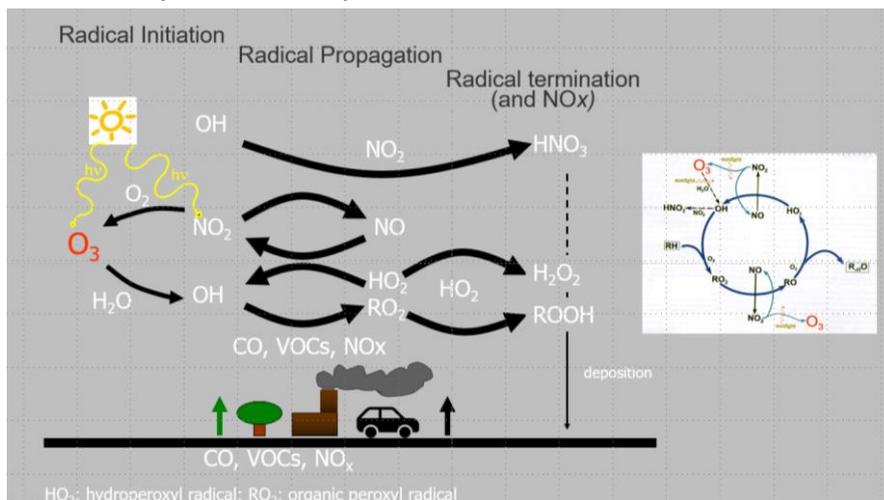


Figura C1. Meccanismo semplificato di specie radicaliche in atmosfera.

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.

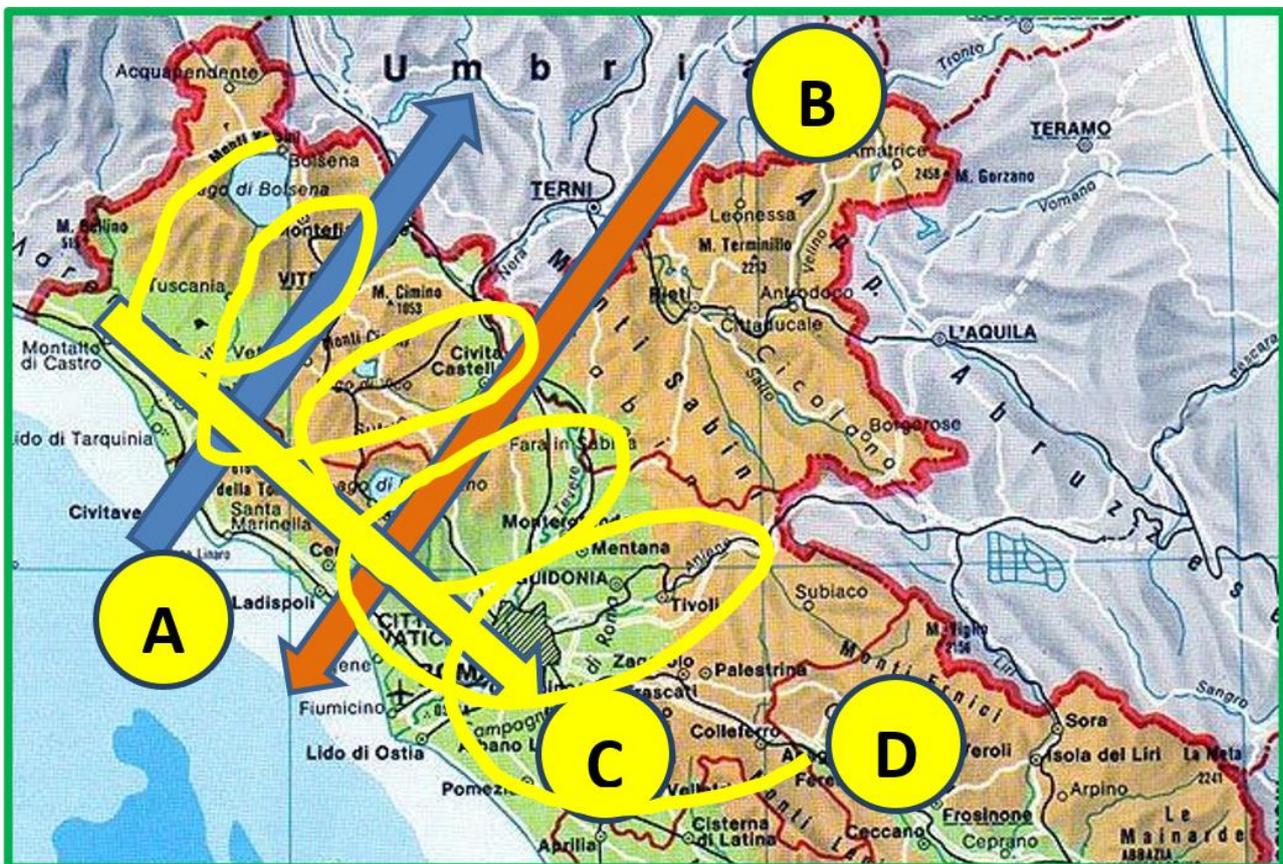


Figura C2. Schema dei fenomeni meteorologici delle brezze

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.

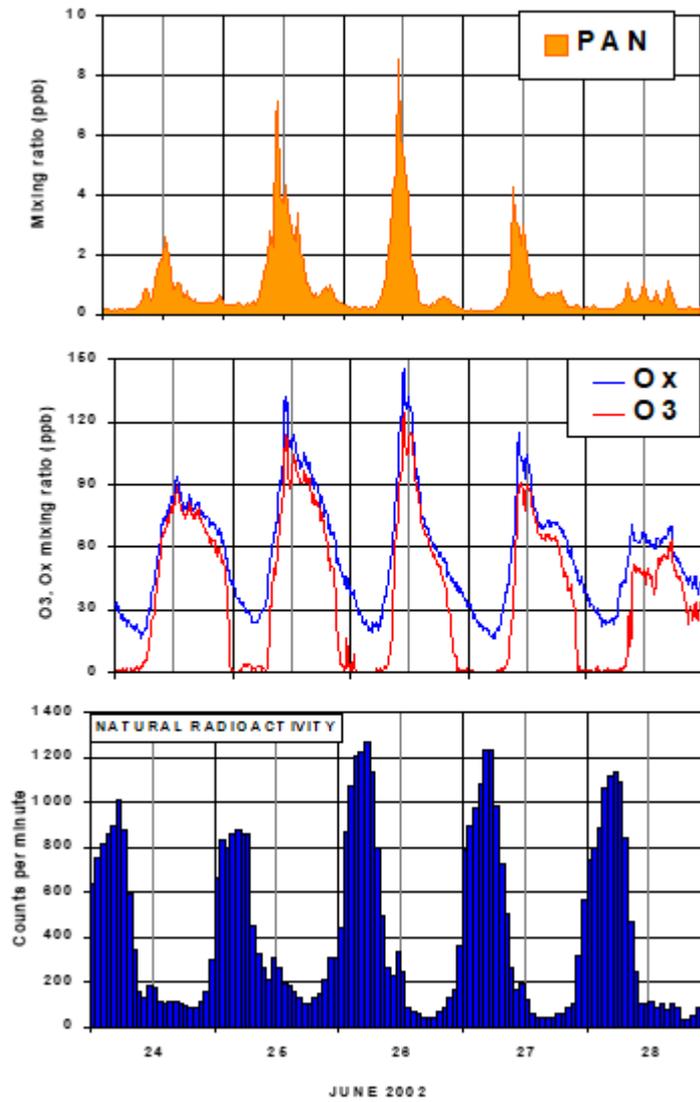


Figura C3. Misure congiunte di ozono e PAN a Montelibretti nel 2002