Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente

ARPA molise
Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale

Monitoraggio della qualità dell'aria e caratterizzazione del PM_{10} nella piana di Venafro.

STUDIO DEI LIVELLI DI INQUINAMENTO ATMOSFERICO E ORIGINE DEL PARTICOLATO

Prefazione

La tutela della qualità dell'aria rappresenta una delle attività più consolidate e strategiche dell'Agenzia, sia per il suo valore ambientale sia per le ricadute dirette sulla salute pubblica. Da oltre vent'anni l'Agenzia svolge un monitoraggio continuo e rigoroso degli inquinanti atmosferici, garantendo misurazioni affidabili attraverso l'impiego di strumentazione certificata e la partecipazione costante a circuiti di interconfronto nazionali sul PM_{10}, indispensabili per assicurare la qualità e la comparabilità dei dati acquisiti.

Il presente studio si inserisce in questo percorso di lunga esperienza, arricchendolo con un approccio integrato che combina il monitoraggio tradizionale della qualità dell'aria con l'applicazione della Positive Matrix Factorization (PMF), una metodologia avanzata per l'analisi delle sorgenti del particolato atmosferico. Tale approfondimento rappresenta l'evoluzione di un primo studio esplorativo condotto in collaborazione con ISPRA, ARPA Emilia Romagna e MASE, che aveva fornito indicazioni preliminari, evidenziando la necessità di un'indagine più ampia e strutturata.

La realizzazione di questa attività è stata resa possibile anche grazie ai finanziamenti della Regione Molise, che hanno consentito l'acquisto di mezzi mobili e di nuova strumentazione di laboratorio, potenziando in modo significativo la capacità operativa dell'Agenzia e permettendo di condurre campagne di misura più articolate e rappresentative del territorio.

Per l'elaborazione dei dati PMF, ARPA Molise si è avvalsa della collaborazione di ARPA Lombardia nell'ambito del Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA), valorizzando le competenze diffuse nella rete e garantendo un approccio metodologico robusto, condiviso e pienamente coerente con gli standard nazionali.

Il monitoraggio e l'analisi descritti in questa relazione non si limitano alla quantificazione delle concentrazioni degli inquinanti, ma mirano a comprendere le dinamiche che ne determinano la presenza in atmosfera, con particolare attenzione al particolato PM_{10} e alle sue componenti. L'individuazione delle principali sorgenti emissive e la valutazione del loro contributo relativo costituiscono un passaggio essenziale per supportare le politiche di gestione della qualità dell'aria, orientare interventi mirati e migliorare l'efficacia delle strategie di mitigazione.

In questo quadro, il lavoro presentato rappresenta un tassello importante nel rafforzamento delle conoscenze sul territorio e nella costruzione di strumenti sempre più efficaci per la tutela dell'ambiente e della salute dei cittadini.

Avv. Alberto Manfredi Selvaggi
Direttore Generale
ARPA Molise

Indice

Prefazione 2
Introduzione generale al documento 10

SEZIONE PRELIMINARE
Quadro operativo dello studio

1. Obiettivo del monitoraggio 12
2. Periodo e siti di campionamento 12
3. Monitoraggio e caratterizzazione del PM_{10} 13
4. Strumentazione utilizzata 13

PARTE I
Inquadramento territoriale e condizioni di contesto

5. Inquadramento territoriale della zona di studio 15
6. Meteorologia 15
6.1. Temperatura 15
6.2. Umidità 17
6.3. Radiazione solare 18
6.4. Velocità e direzione del vento 19
6.4.1. Velocità del vento 19
6.4.2. Rose dei venti 20
6.5. Pressione 23
6.6. Precipitazioni 24
7. Quadro emissivo della piana di Venafro 25
7.1. Disaggregazione comunale 25
7.2. Interpretazione del quadro emissivo 26
7.3. Macrosettori emissivi 26
7.4. Inventario emissivo 27
7.4.1. Emissioni di PM_{10} nella piana di Venafro 27
7.4.2. Emissioni di $NO + NO_2$ nella piana di Venafro 30
7.4.3. Emissioni di benzene nella piana di Venafro 33
7.4.4. Emissioni di $SO_2 + SO_3$ nella piana di Venafro 36
7.4.5. Emissioni di CO nella piana di Venafro 39
7.4.6. Emissioni di NH_3 nella piana di Venafro 42
7.4.7. Emissioni di COVNM nella piana di Venafro 45
7.4.8. Emissioni di CH_4 nella piana di Venafro 48

PARTE II
Monitoraggio della qualità dell'aria

8. Valutazione dei parametri di qualità dell'aria nei siti di campionamento 52
8.1. PM_{10} 52
8.2. NO_2 58
8.3. Ozono 61
8.4. Benzene 65

8.5. SO_2 e CO 69
8.5.1. SO_2 70
8.5.2. CO 71
8.6. Mappe di inquinamento 72
8.6.1. Mappa benzene 73
8.6.2. Mappa NO_2 74
8.6.3. Mappa CO 74
8.7. Conclusioni 75

PARTE III

Individuazione delle sorgenti di PM_{10}

9. Obiettivo dello studio di caratterizzazione del PM_{10} 77
10. Metodologia 77
10.1. Campionamento 77
10.2. Analisi chimica dei campioni 77
10.3. Tecniche di source apportionment 78
11. Risultati della composizione chimica del PM_{10} 78
11.1. Distribuzione delle specie chimiche del PM_{10} 79
11.2. Andamento temporale delle principali specie chimiche 81
11.2.1. Analisi delle specie chimiche nei giorni di dust 90
12. Identificazione delle sorgenti del PM_{10} nella piana di Venafro 93
12.1. Il metodo PMF e l'identificazione delle sorgenti 93
12.1.1. Dataset 94
12.1.2. Ruolo delle specie chimiche nel modello PMF 95
12.2. Identificazione e contributo delle sorgenti 95
12.2.1. Profili dei fattori 95
12.2.2. Contributo delle sorgenti 98
12.2.3. Andamento temporale dei contributi dei fattori 99
12.2.4. Analisi mensile 104
12.2.5. Analisi settimana 108
12.2.6. Valutazione della solidità della soluzione PMF 111
Commento finale 112
12.3. Risultati sito-specifici 112
12.3.1. Pozzilli 113
12.3.2. Sesto Campano 118
12.3.3. Venafro 124
12.3.4. Confronto tra siti 130
13. Bibliografia 133

Indice figure

Figura 1 - siti di monitoraggio 12
Figura 2 - distribuzione territoriale emissioni di PM_{10} 27
Figura 3 - distribuzione comunale emissioni di $NO+NO_2$ 30

Figura 4 - distribuzione comunale emissioni di benzene 33
Figura 5-distribuzione comunale emissioni di SO_2 + SO_3 36
Figura 6 - distribuzione comunale emissioni di CO 39
Figura 7 - distribuzione comunale emissioni di NH_3 42
Figura 8 - distribuzione comunale emissioni di COVNM 45
Figura 9 - distribuzione comunale emissioni di CH_4 48

Indice tabelle

Tabella 1 - statistiche temperatura 16
Tabella 2 - medie mensili temperatura 16
Tabella 3 - statistiche umidità relativa 17
Tabella 4 - statistiche radiazione solare 18
Tabella 5 - statistiche velocità del vento 19
Tabella 6 - statistiche pressione 23
Tabella 7 - statistiche pioggia 24
Tabella 8 - emissioni per Comune di PM_{10} 27
Tabella 9 - emissioni di PM_{10} per Macrosettore per Comune (t/a) 28
Tabella 10 - emissioni per Comune di $NO+NO_2$ 30
Tabella 11 - emissioni di $NO+NO_2$ per Macrosettore per Comune (t/a) 31
Tabella 12 - emissioni per Comune di benzene 33
Tabella 13 - emissioni di benzene per Macrosettore per Comune (t/a) 34
Tabella 14 - emissioni per Comune di SO_2 + SO_3 36
Tabella 15 - emissioni di SO_2 + SO_3 per Macrosettore per Comune (t/a) 37
Tabella 16 - emissioni per Comune di CO 39
Tabella 17 - emissioni di CO per Macrosettore per Comune (t/a) 40
Tabella 18 - emissioni per Comune di NH_3 42
Tabella 19 - emissioni di NH_3 per Macrosettore per Comune (t/a) 43
Tabella 20 - emissioni per Comune di COVNM 45
Tabella 21 - emissioni di COVNM per Macrosettore per Comune (t/a) 46
Tabella 22 - emissioni per Comune di CH_4 48
Tabella 23 - emissioni di CH_4 per Macrosettore per Comune (t/a) 49
Tabella 24 - statistiche PM_{10} 52
Tabella 25 - statistiche NO_2 58
Tabella 26 - statistiche O_3 62
Tabella 27 - statistiche benzene 66
Tabella 28 - statistiche SO_2 70
Tabella 29 - statistiche CO 71
Tabella 30 - contributi in concentrazione dei fattori nella piana 98
Tabella 31 - stima incertezza profili PMF 112
Tabella 32 - contributi in concentrazione dei fattori sito di Pozzilli 113
Tabella 33 - contributi in concentrazione dei fattori sito di Sesto Campano 119
Tabella 34 - contributi in concentrazione dei fattori sito di Venafro 125
Tabella 35 - contributi in concentrazione dei fattori nei tre siti 131

Indice mappe

Mappa 1 - mappa benzene 73
Mappa 2 - mappa NO_2 74
Mappa 3 - mappa CO 74

Indice grafici

Grafico 1 - andamento temporale temperatura – Pozzilli - Sesto Campano 17
Grafico 2 - andamento temporale umidità relativa - Pozzilli - Sesto Campano 18
Grafico 3 - andamento temporale radiazione solare – Pozzilli - Sesto Campano 19
Grafico 4 - rosa dei venti – Pozzilli - Sesto Campano 20
Grafico 5 - rosa dei venti stagionale – Pozzilli - Sesto Campano 21
Grafico 7 - rosa dei venti oraria - Pozzilli 22
Grafico 8 - rosa dei venti oraria Sesto Campano 22
Grafico 9 - andamento temporale pressione - Pozzilli - Sesto Campano 23
Grafico 10 - andamento temporale pioggia - sonica 24
Grafico 11 - emissioni di PM_{10} 27
Grafico 12 - distribuzione % emissioni di PM_{10} per Macrosettore 28
Grafico 13 - emissioni di $NO+NO_2$ 30
Grafico 14 - distribuzione % emissioni di $NO+NO_2$ per Macrosettore 31
Grafico 15 - emissioni di benzene 33
Grafico 16 - distribuzione % emissioni di benzene per Macrosettore 34
Grafico 17 - emissioni di $SO_2 + SO_3$ 36
Grafico 18 - distribuzione % emissioni di $SO_2 + SO_3$ per Macrosettore 37
Grafico 19 - emissioni di CO 39
Grafico 20 - distribuzione % emissioni di CO per Macrosettore 40
Grafico 21 - emissioni di NH_3 42
Grafico 22 - distribuzione % emissioni di NH_3 per Macrosettore 43
Grafico 23 - emissioni di COVNM 45
Grafico 24 - distribuzione % emissioni di COVNM per Macrosettore 46
Grafico 25 - emissioni di CH_4 48
Grafico 26 - distribuzione % emissioni di CH_4 per Macrosettore 49
Grafico 27 - andamento temporale PM_{10} - Pozzilli 53
Grafico 28 - andamento temporale PM_{10} – Sesto Campano 54
Grafico 29 - andamento temporale PM_{10} - Venafro 54
Grafico 30 - confronto andamenti temporali PM_{10} tra siti 55
Grafico 31 - confronto tra siti medie mensili ($\mu g/m^3$) PM_{10} 55
Grafico 32 - confronto tra siti settimana tipo ($\mu g/m^3$) PM_{10} 56
Grafico 33 - eventi dust 57
Grafico 34 - andamento temporale NO_2 - Pozzilli 59
Grafico 35 - andamento temporale NO_2 - Sesto Campano 59
Grafico 36 - andamento temporale NO_2 - Venafro 60
Grafico 37 - confronto massima media oraria giornaliera NO_2 tra siti 60

Grafico 38 - confronto andamenti tipici NO_2 tra siti 61
Grafico 39 - andamento temporale O_3 - Pozzilli 62
Grafico 40 - andamento temporale O_3 - Sesto Campano 63
Grafico 41 - andamento temporale O_3 - Venafro 63
Grafico 42 - confronto andamenti massimi medie orarie giornaliere O_3 tra siti 64
Grafico 43 - confronto andamenti tipici O_3 tra siti 65
Grafico 44 - andamento temporale benzene - Pozzilli 67
Grafico 45 - andamento temporale benzene - Sesto Campano 67
Grafico 46 - andamento temporale benzene - Venafro 68
Grafico 47 - confronto andamenti temporali benzene tra siti 68
Grafico 48 - confronto andamenti tipici benzene tra siti 69
Grafico 49 - confronto andamenti tipici CO tra siti 72
Grafico 50 - boxplot PM_{10} - EC - OC - NO_3^- - SO_4^{2-} 79
Grafico 51 - boxplot K - levoglucosano 80
Grafico 52 - boxplot Fe - Cu - Mn - Pb - Zn 80
Grafico 53 - boxplot IPA 81
Grafico 54 - serie temporale NO_3^- 81
Grafico 55 - serie temporale SO_4^{2-} 82
Grafico 56 -serie temporale NH_4^+ 82
Grafico 57 - serie temporale OC 83
Grafico 58 - serie temporale EC 83
Grafico 59 - serie temporale K 84
Grafico 60 - serie temporale levoglucosano 84
Grafico 61 - serie temporale Cu 84
Grafico 62 - serie temporale Fe 85
Grafico 63 - serie temporale Mn 85
Grafico 64 - serie temporale Pb 85
Grafico 65 - serie temporale Zn 86
Grafico 66 - serie temporale benzo(a)antracene 86
Grafico 67 - serie temporale benzo(a)pirene 87
Grafico 68 - serie temporale benzo(b)fluorantene 87
Grafico 69 - serie temporale benzo-ghi-perilene 87
Grafico 70 - serie temporale benzo(k)fluroantene 88
Grafico 71 - serie temporale crisene 88
Grafico 72 - serie temporale dibenzo(ah)antracene 88
Grafico 73 - serie temporale fluorantene 89
Grafico 74 - serie temporale indeno[1,2,3]cdpirene 89
Grafico 75 - serie temporale perilene 89
Grafico 76 - serie temporale pirene 90
Grafico 77 - andamento temporale PM_{10} ed episodi di dust 90
Grafico 78 - andamento temporale Mn ed episodi di dust 91
Grafico 79 - andamento temporale Fe ed episodi di dust 91
Grafico 80 - andamento temporale Ca ed episodi di dust 91
Grafico 81 - andamento temporale Al ed episodi di dust 92

Grafico 82 - andamento temporale SO_4^{2-} ed episodi di dust 92
Grafico 83 - andamento temporale Mg ed episodi di dust 92
Grafico 84 - andamento temporale K ed episodi di dust 93
Grafico 85 - profilo solfato di ammonio 95
Grafico 86 - profilo nitrato 96
Grafico 87 - profilo crostale 96
Grafico 88 - profilo biomass burning 96
Grafico 89 - profilo traffico 97
Grafico 90 - profilo mix antropogenico 97
Grafico 91 - profilo aerosol marino 97
Grafico 92 - profilo industrial 98
Grafico 93 - contributo percentuale delle sorgenti piana 99
Grafico 94 - andamento temporale solfato di ammonio 100
Grafico 95 - andamento temporale nitrato 101
Grafico 96 - andamento temporale crostale 101
Grafico 97 - andamento temporale biomass burning 102
Grafico 98 - andamento temporale traffico 102
Grafico 99 - andamento temporale mix antropogenico 103
Grafico 100 - andamento temporale aerosol marino 103
Grafico 101 - andamento temporale indutrial 104
Grafico 102 - contributo mensile fattori piana 105
Grafico 103 - contributo percentuale mensile piana 105
Grafico 104 - contributo mensile solfato di ammonio piana 106
Grafico 105 - contributo mensile nitrato piana 106
Grafico 106 - contributo mensile crostale piana 106
Grafico 107 - contributo mensile biomass burning piana 107
Grafico 108 - contributo mensile traffico piana 107
Grafico 109 - contributo mensile mix antopogenico piana 107
Grafico 110 - contributo mensile aerosol marino piana 107
Grafico 111 - contributo mensile industrial piana 108
Grafico 112 - contributo fattori per giorno della settimana piana 108
Grafico 113 - contributo percentuale settimanale piana 109
Grafico 114 - contributo giorno solfato di ammonio piana 109
Grafico 115 - contributo giorno nitrato piana 109
Grafico 116 - contributo giorno crostale piana 110
Grafico 117 - contributo gorno biomass burning piana 110
Grafico 118 - contributo giorno traffico piana 110
Grafico 119 - contributo giorno mix antopogenico piana 110
Grafico 120 - contributo giorno aerosol marino piana 111
Grafico 121 - contributo giorno industrial piana 111
Grafico 122 - contributo percentuale delle sorgenti Pozzilli 114
Grafico 123 - contributo mensile fattori sito Pozzilli 115
Grafico 124 - contributo percentuale mensile Pozzilli 115
Grafico 125 - contributo mensile solfato di ammonio sito Pozzilli 116

Grafico 126 - contributo mensile nitrato sito Pozzilli 116
Grafico 127 - contributo mensile crostale sito Pozzilli 116
Grafico 128 - contributo mensile biomass burning Pozzilli 116
Grafico 129 - contributo mensile traffico sito Pozzilli 117
Grafico 130 - contributo mensile mix antopogenico sito Pozzilli 117
Grafico 131 - contributo mensile aerosol marino sito Pozzilli 117
Grafico 132 - contributo mensile industrial sito Pozzilli 117
Grafico 133 - contributo fattori per giorno della settimana sito di Pozzilli< 118
Grafico 134 - contributo percentuale settimanale Pozzilli 118
Grafico 135 - contributo percentuale delle sorgenti Sesto Campano 119
Grafico 136 - contributo mensile fattori sito Sesto Campano 121
Grafico 137 - contributo percentuale mensile Sesto Campano 121
Grafico 138 - contributo mensile solfato di ammonio sito Sesto Campano 122
Grafico 139 - contributo mensile nitrato sito Sesto Campano 122
Grafico 140 - contributo mensile crostale sito Sesto Campano 122
Grafico 141 - contributo mensile biomass burning Sesto Campano 122
Grafico 142 - contributo mensile traffico sito Sesto Campano 123
Grafico 143 - contributo mensile mix antopogenico sito Sesto Campano 123
Grafico 144 - contributo mensile aerosol marino sito Sesto Campano 123
Grafico 145 - contributo mensile industrial sito Sesto Campano 123
Grafico 146 - contributo fattori per giorno della settimana sito di Sesto Campano< 124
Grafico 147 - contributo percentuale settimanale Sesto Campano 124
Grafico 148 - contributo percentuale delle sorgenti Venafro 125
Grafico 149 - contributo mensile fattori sito Venafro 127
Grafico 150 - contributo percentuale mensile Venafro 127
Grafico 151 - contributo mensile solfato di ammonio sito Venafro 128
Grafico 152 - contributo mensile nitrato sito Venafro 128
Grafico 153 - contributo mensile crostale sito Venafro 128
Grafico 154 - contributo mensile biomass burning Venafro 128
Grafico 155 - contributo mensile traffico sito Venafro 129
Grafico 156 - contributo mensile mix antopogenico sito Venafro 129
Grafico 157 - contributo mensile aerosol marino sito Venafro 129
Grafico 158 - contributo mensile industrial sito Venafro 129
Grafico 159 - contributo fattori per giorno della settimana sito di Venafro 130
Grafico 160 - contributo percentuale settimanale Venafro 130
Grafico 161 - contributi delle sorgenti piana 131
Grafico 162 - contributi delle sorgenti Pozzilli 131
Grafico 163 - contributi delle sorgenti Sesto Campano 131
Grafico 164 - contributi delle sorgenti Venafro 131

INTRODUZIONE GENERALE AL DOCUMENTO

Per analizzare in modo approfondito la qualità dell'aria nella piana di Venafro è stato condotto uno studio dedicato, finalizzato a comprendere in maniera completa l'origine, l'evoluzione e le dinamiche che caratterizzano i principali inquinanti atmosferici. La qualità dell'aria dell'area è, infatti, il risultato dell'interazione tra caratteristiche territoriali, assetto emissivo, condizioni meteorologiche e processi chimico-fisici che influenzano la formazione e la dispersione degli inquinanti.

Per garantire una lettura chiara, coerente e scientificamente fondata di tali fenomeni, il presente documento è articolato in tre parti, ciascuna dedicata a un diverso livello di analisi.

La **Parte I** descrive il contesto territoriale, emissivo e meteorologico dell'area di studio. Questa sezione ha la funzione di *contestualizzare* i risultati del monitoraggio, fornendo gli elementi necessari per comprendere come orografia, uso del suolo, distribuzione delle sorgenti e condizioni atmosferiche influenzino l'evoluzione degli inquinanti. La scelta metodologica adottata è quella di integrare informazioni territoriali, inventariali e meteorologiche in un quadro unitario, così da evitare interpretazioni parziali o decontestualizzate dei dati.

La **Parte II** presenta e analizza i dati di qualità dell'aria rilevati nel periodo 06 maggio 2024 - 11 maggio 2025. L'obiettivo è *descrivere* l'andamento degli inquinanti monitorati, con particolare attenzione al particolato atmosferico PM_{10} e alle specie ad esso associate.

La **Parte III** approfondisce la composizione chimica del PM_{10} e l'individuazione delle principali sorgenti emissive attraverso l'analisi del dataset chimico e l'applicazione del modello Positive Matrix Factorization (PMF). Questa sezione rappresenta il livello più avanzato dell'indagine e ha l'obiettivo di *interpretare* i fenomeni osservati, passando dalla semplice osservazione delle concentrazioni alla individuazione delle sorgenti che hanno influito sulla concentrazione di PM_{10}.

La suddivisione del documento in tre parti risponde quindi a una logica progressiva e coerente: **contestualizzare**, **descrivere**, **interpretare**. Questo approccio consente di costruire un quadro completo e integrato della qualità dell'aria nella piana venafrana, offrendo al lettore una comprensione approfondita dei fenomeni osservati e delle dinamiche emissive che li determinano.

SEZIONE PRELIMINARE

Quadro operativo dello studio

1. Obiettivo del monitoraggio

L'obiettivo principale è quello di quantificare i livelli degli inquinanti più rilevanti, con particolare attenzione al particolato atmosferico PM_{10}, e di analizzare le dinamiche che ne influenzano la presenza in atmosfera. Oltre alla semplice misurazione delle concentrazioni, il monitoraggio è stato finalizzato a comprendere l'origine delle diverse componenti del particolato, individuando le principali sorgenti impattanti e valutandone il contributo relativo. Quest'ultima informazione è essenziale per supportare le politiche di gestione della qualità dell'aria, orientare interventi mirati e migliorare l'efficacia delle strategie di mitigazione.

2. Periodo e siti di campionamento

L'attività di campionamento si è svolta nel periodo 06 maggio 2024 - 11 maggio 2025, selezionato in modo da garantire una rappresentatività adeguata delle condizioni meteorologiche e delle variazioni stagionali che influenzano la dispersione degli inquinanti.

I siti di monitoraggio sono stati individuati sulla base di criteri tecnico-scientifici, considerando la presenza di sorgenti emissive e le caratteristiche del territorio ed in continuità con lo studio effettuato con ISPRA, ARPA Emilia Romagna e MASE. In particolare, sono stati scelti punti di misura in area urbana ed industriale, al fine di ottenere un quadro completo e confrontabile delle diverse situazioni ambientali.

Sono stati indagati tre siti mediante l'utilizzo delle seguenti stazioni di campionamento:

- MM1 - mezzo mobile localizzato nel Comune di Sesto Campano
- MM2 - mezzo mobile localizzato nella zona industriale di Pozzilli-Venafro
- Venafro2 - stazione fissa localizzata nel Comune di Venafro

Figura 1 - siti di monitoraggio

3. Monitoraggio e caratterizzazione del PM_{10}

L'indagine ha riguardato la misura degli inquinanti atmosferici convenzionali e delle concentrazioni di PM_{10}, affiancata dalla caratterizzazione del particolato mediante l'analisi chimica effettuata sui filtri e la successiva applicazione del modello recettore PMF (Positive Matrix Factorization).

La PMF è un modello statistico multivariato ampiamente utilizzato negli studi di qualità dell'aria per identificare e quantificare le sorgenti sulla base della composizione chimica del particolato. Attraverso l'analisi dei traccianti chimici e delle correlazioni tra le diverse specie, il modello consente di scomporre il particolato in fattori interpretabili come contributi di specifiche sorgenti.

L'integrazione tra monitoraggio e analisi PMF permette, quindi, di ottenere una visione più completa del fenomeno, non limitata alla semplice misura delle concentrazioni, ma estesa alla comprensione dei processi che determinano la qualità dell'aria.

4. Strumentazione utilizzata

Per le attività di monitoraggio sono stati impiegati due laboratori mobili (MM1 e MM2) e una stazione fissa (Venafro2). Le postazioni erano equipaggiate con analizzatori per la misura di NO_2, CO, benzene, SO_2 (non presente sulla stazione fissa) e ozono, oltre a sistemi di campionamento del PM_{10} in grado di fornire le concentrazioni giornaliere.

Il particolato è stato raccolto su filtri secondo metodologie conformi alla normativa vigente; tali filtri sono stati successivamente utilizzati per la caratterizzazione chimica del PM_{10}.

La strumentazione impiegata in tutte le postazioni utilizza metodi di riferimento o equivalenti certificati, in conformità ai requisiti tecnici previsti dalla normativa sulla qualità dell'aria.

I laboratori mobili erano, inoltre, dotati ognuno di una stazione meteorologica per la misura in continuo dei principali parametri meteo.

PARTE I

Inquadramento territoriale e condizioni di contesto

5. Inquadramento territoriale della zona di studio

L'area di studio si colloca all'interno della piana di Venafro, un'area pianeggiante che costituisce un naturale corridoio di collegamento tra il Molise, il Lazio e la Campania. La piana è delimitata da rilievi collinari e montuosi che ne definiscono la morfologia e influenzano l'assetto insediativo del territorio. Il corso del Volturno attraversa la parte centrale dell'area, contribuendo a caratterizzarne la struttura geografica.

In questo contesto si inseriscono i tre siti di monitoraggio. Il punto di misura di Pozzilli è localizzato nella zona industriale del Comune, un'area pianeggiante situata nella porzione orientale della piana e servita dalla SS85, principale asse viario dell'area. Il sito si trova in un contesto caratterizzato dalla presenza di insediamenti produttivi e infrastrutture di collegamento.

Il sito di Sesto Campano è collocato nella frazione collinare posta a sud della piana, in una posizione più elevata rispetto al fondovalle. La sua ubicazione su un versante permette di osservare condizioni territoriali differenti rispetto ai siti posti in pianura, con un contesto insediativo più sparso e una minore presenza di infrastrutture di attraversamento.

Il punto di misura di Venafro si trova all'interno del principale centro urbano della piana. L'abitato è attraversato dalla SS85, che costituisce l'asse stradale più rilevante dell'area e collega il Molise con la provincia di Frosinone. Il sito è inserito in un contesto urbano consolidato, caratterizzato dalla presenza di funzioni residenziali, commerciali e di servizio.

Nel loro insieme, i tre siti rappresentano tre situazioni territoriali distinte - industriale, collinare e urbana - che consentono di descrivere in modo articolato le condizioni presenti nella piana di Venafro.

6. Meteorologia

Le condizioni meteorologiche costituiscono un elemento essenziale per l'interpretazione dei livelli di qualità dell'aria, in quanto influenzano i processi di dispersione, accumulo e trasformazione degli inquinanti. In questo capitolo vengono descritti i principali parametri meteorologici rilevati nel periodo di monitoraggio presso le stazioni di Pozzilli e Sesto Campano, per le quali sono disponibili serie complete e affidabili di temperatura, umidità relativa, vento, pressione atmosferica e radiazione solare.

Nel territorio comunale di Sesto Campano è inoltre presente una stazione meteorologica dedicata, denominata Sonica, installata da ARPA Molise nell'ambito delle attività di monitoraggio ambientale. La stazione è operativa a partire da novembre 2024 e fornisce valori di precipitazione affidabili per il periodo compreso tra novembre 2024 e maggio 2025. Le analisi pluviometriche sono, pertanto, riferite esclusivamente a questa stazione e al periodo di disponibilità dei dati.

6.1. Temperatura

Le serie di temperatura di Pozzilli e Sesto Campano presentano una buona copertura (92% e 98% rispettivamente) e non evidenziano anomalie o discontinuità (Tabella 1, Tabella 2 e Grafico 1). L'andamento stagionale è ben definito, con valori più elevati nel periodo estivo e minimi tra dicembre e febbraio. Le statistiche descrittive e le medie mensili mostrano una forte coerenza tra le due stazioni, con differenze limitate e riconducibili alle caratteristiche microclimatiche locali.

	Pozzilli	Sesto Campano
percentuale dati validi (%)	92	98
media temperatura (°C)	16.2	16.5
mediana temperatura (°C)	15.3	15.5

	Pozzilli	Sesto Campano
min temperatura (°C)	-1.5	0.0
max temperatura (°C)	37.0	36.9

Tabella 1 - statistiche temperatura

mese	sito	media mensile (°C)	min mensile (°C)	max mensile (°C)
Maggio-24	Pozzilli	18.2	9.7	27.9
Maggio-24	Sesto Campano	18.4	11.2	27.2
Giugno-24	Pozzilli	22.6	11.4	37.0
Giugno-24	Sesto Campano	22.9	12.0	36.9
Luglio-24	Pozzilli	26.2	16.5	36.6
Luglio-24	Sesto Campano	26.8	16.9	36.4
Agosto-24	Pozzilli	26.3	18.0	37.0
Agosto-24	Sesto Campano	27.1	19.5	36.3
Settembre-24	Pozzilli	20.2	9.6	33.7
Settembre-24	Sesto Campano	20.5	10.8	33.0
Ottobre-24	Pozzilli	17.5	9.3	25.7
Ottobre-24	Sesto Campano	17.7	10.2	25.2
Novembre-24	Pozzilli	11.4	-0.7	20.5
Novembre-24	Sesto Campano	11.9	0.9	19.6
Dicembre-24	Pozzilli	8.4	-1.5	15.1
Dicembre-24	Sesto Campano	8.5	0.0	13.1
Gennaio-25	Pozzilli	8.7	-1.1	17.1
Gennaio-25	Sesto Campano	8.9	1.2	15.5
Febbraio-25	Pozzilli	9.0	1.0	16.8
Febbraio-25	Sesto Campano	9.2	3.2	15.5
Marzo-25	Pozzilli	11.5	0.7	20.9
Marzo-25	Sesto Campano	11.6	2.2	20.8
Aprile-25	Pozzilli	13.6	2.0	25.9
Aprile-25	Sesto Campano	14.3	4.1	24.7
Maggio-25	Pozzilli	16.6	8.1	26.7
Maggio-25	Sesto Campano	16.9	9.5	26.0

Tabella 2 - medie mensili temperatura

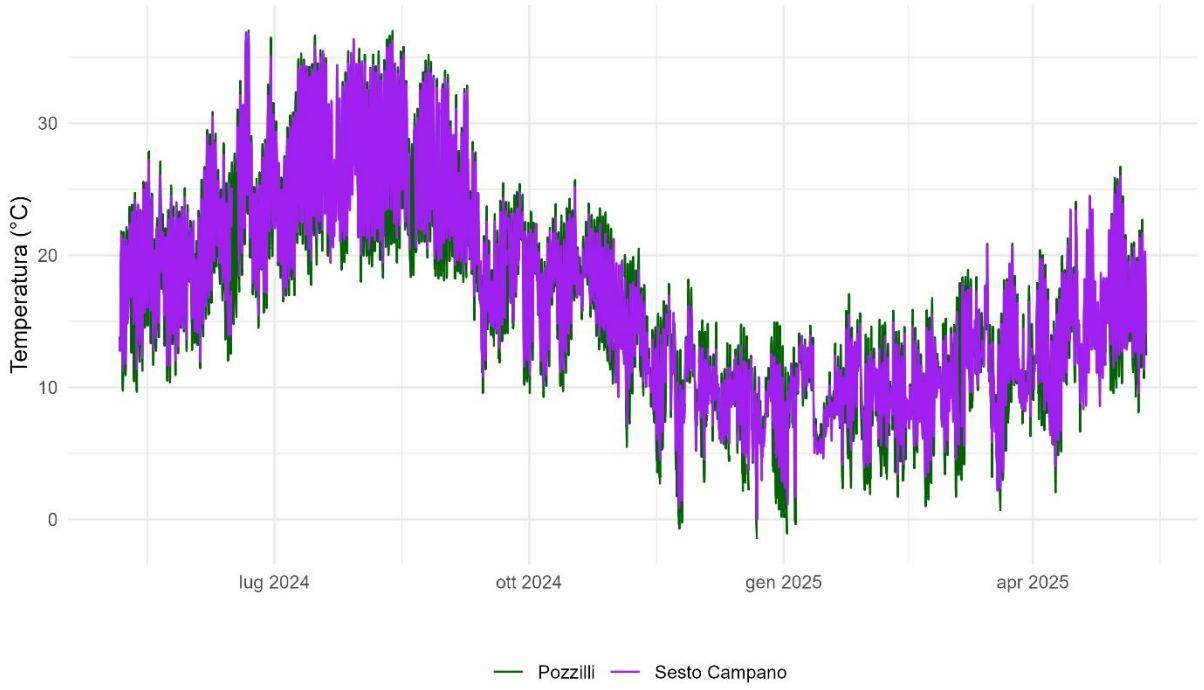


Grafico 1 - andamento temporale temperatura – Pozzilli - Sesto Campano

6.2. Umidità

L'umidità relativa mostra un comportamento regolare e coerente tra le due stazioni, con valori più elevati nei mesi autunnali e invernali e condizioni più secche nel periodo estivo. Le statistiche descrittive (Tabella 3) e l'evoluzione temporale (Grafico 2) confermano la forte similitudine tra i due siti.

	Pozzilli	Sesto Campano
percentuale dati validi (%)	92	98
media UR (%)	71	70
mediana UR (%)	74	72
min UR (%)	21	24
max UR (%)	93	95

Tabella 3 - statistiche umidità relativa

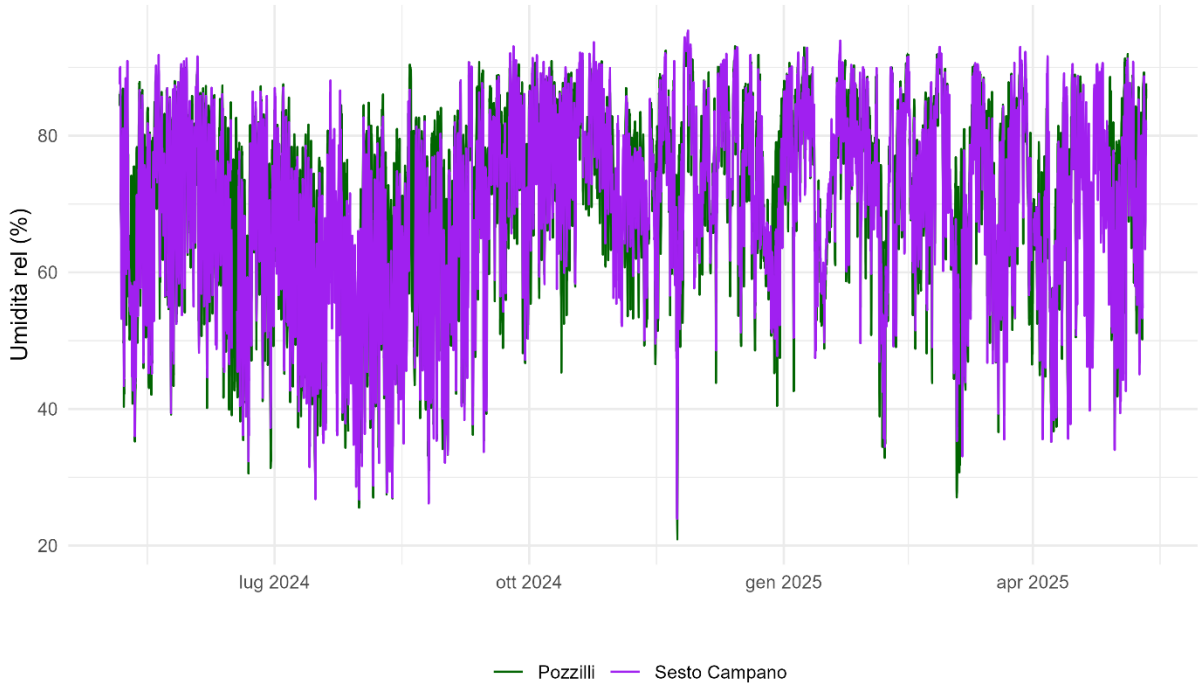


Grafico 2 - andamento temporale umidità relativa - Pozzilli - Sesto Campano

6.3. Radiazione solare

La radiazione solare risulta completa per entrambe le stazioni, con un andamento stagionale ben definito: i valori più elevati si registrano nel semestre caldo, con massimi nei mesi estivi, mentre nel periodo invernale la radiazione si mantiene su livelli molto bassi, le due serie mostrano un'elevata coerenza (Tabella 4 e Grafico 3).

	Pozzilli	Sesto Campano
percentuale dati validi (%)	92	98
media radiazione (W/m²)	168.5	155.3
mediana radiazione (W/m²)	5.7	6.1
max radiazione (W/m²)	1013.8	999.8

Tabella 4 - statistiche radiazione solare

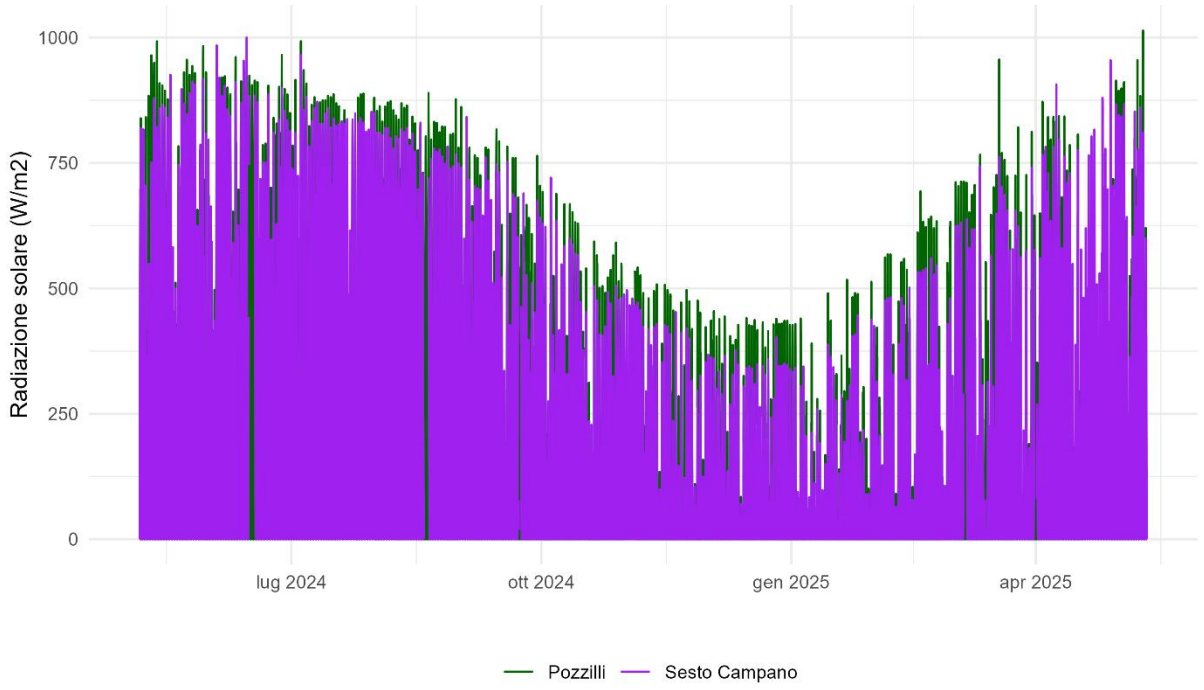


Grafico 3 - andamento temporale radiazione solare – Pozzilli - Sesto Campano

6.4. Velocità e direzione del vento

In questo capitolo vengono analizzati i dati anemometrici rilevati nei siti di Pozzilli e Sesto Campano, con particolare riferimento alla velocità e alla direzione del vento. La descrizione statistica della velocità media e massima è affiancata dalla rappresentazione delle direzioni prevalenti tramite le rose dei venti, utili per caratterizzare i regimi locali di circolazione atmosferica.

6.4.1. Velocità del vento

La Tabella 5 riporta i principali indicatori descrittivi per la velocità del vento.

	Pozzilli	Sesto Campano
percentuale dati validi (%)	93	99
media velocità vento (m/s)	1.82	1.19
mediana velocità vento (m/s)	1.45	0.88
min velocità vento (m/s)	0.00	0.00
max velocità vento (m/s)	10.63	7.06
% vento < 1 m/s	31.40	54.50
% vento < 2 m/s	65.00	80.00

Tabella 5 - statistiche velocità del vento

Le serie di velocità del vento di Pozzilli e Sesto Campano risultano complete e prive di anomalie. Le statistiche descrittive evidenziano una prevalenza di condizioni di vento debole in entrambi i siti, con frequenze particolarmente elevate a Sesto Campano, dove oltre la metà dei valori risulta inferiore a 1 m/s. Pozzilli

presenta invece una ventilazione mediamente più sostenuta e velocità massime più elevate. Questo comportamento differenziato può avere implicazioni dirette sulla dispersione degli inquinanti.

6.4.2. Rose dei venti

La direzione del vento è rappresentata attraverso le rose dei venti, che descrivono la frequenza delle diverse direzioni di provenienza nel periodo analizzato. Questo tipo di rappresentazione consente di individuare i settori prevalenti e di caratterizzare i regimi locali di circolazione atmosferica.

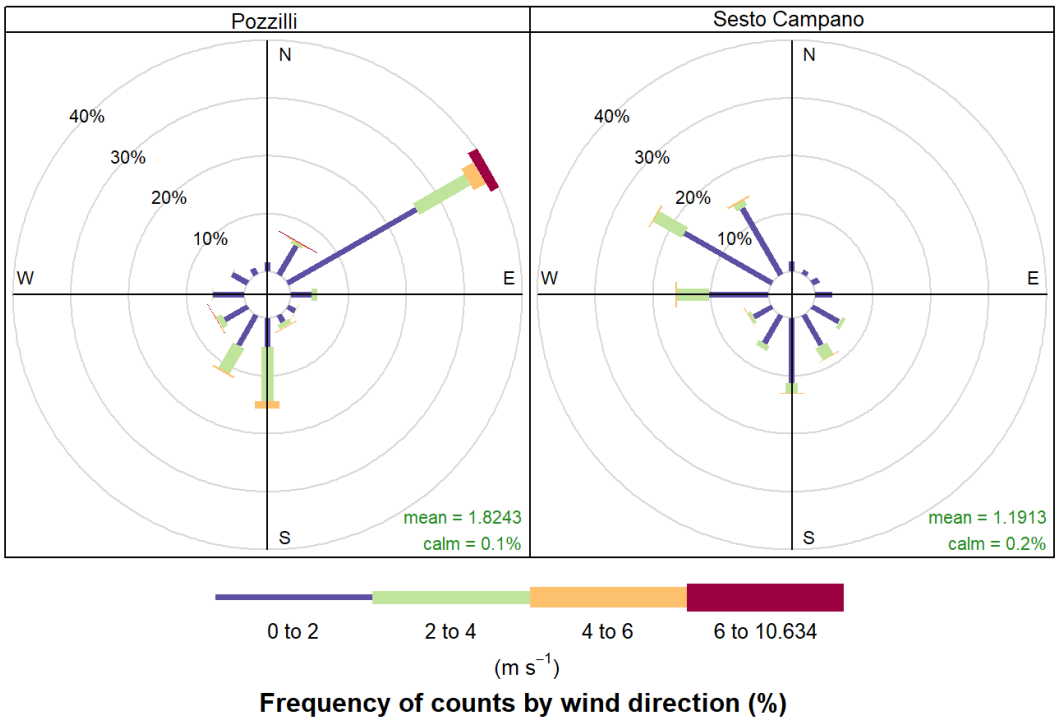


Grafico 4 - rosa dei venti – Pozzilli - Sesto Campano

Le due rose dei venti annuali (Grafico 4) mostrano un comportamento del vento simile nel quadrante di provenienza, ma con differenze legate alla posizione dei due siti lungo la stessa valle. A Pozzilli il vento arriva in modo nettamente prevalente da NNE, con una distribuzione concentrata e velocità mediamente più elevate. Questa configurazione riflette il fatto che il flusso entra da monte e segue l'asse principale della valle, risultando più diretto e definito. A Sesto Campano, situato più a sud e in un tratto più aperto, la provenienza resta settentrionale ma con una maggiore apertura verso NNW, come naturale prosecuzione del flusso che scende lungo il fondovalle e tende a ruotare leggermente verso l'uscita. Le velocità risultano inferiori e la variabilità direzionale più ampia, coerentemente con un contesto meno costretto.

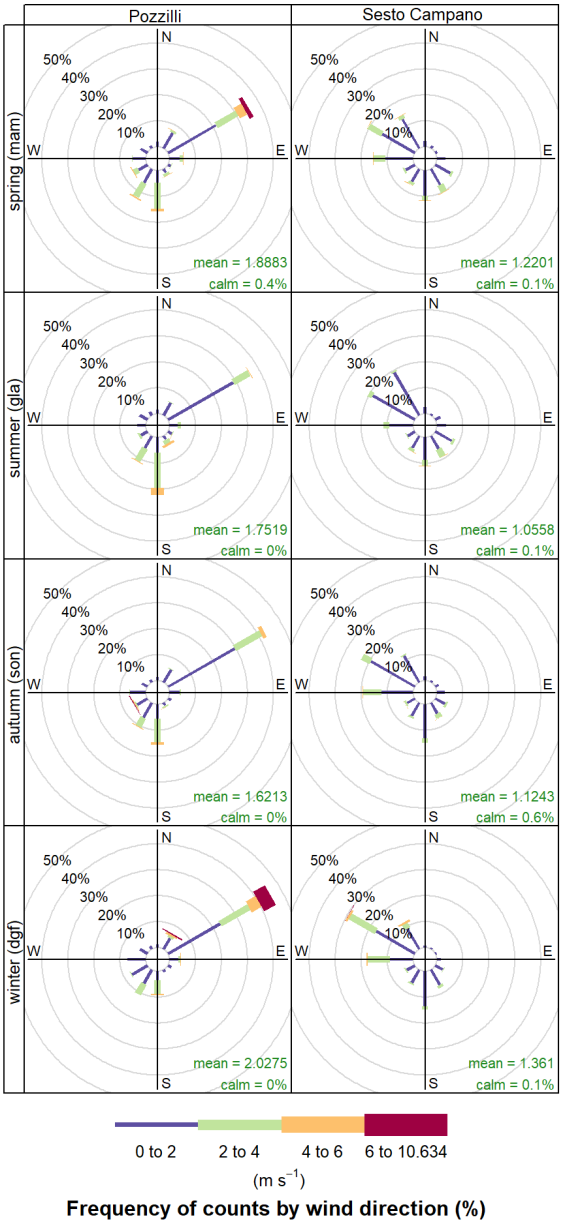


Grafico 5 - rosa dei venti stagionale – Pozzilli - Sesto Campano

Le rose dei venti stagionali (Grafico 5) confermano il quadro già emerso dalle analisi annuali e giorno/notte, senza introdurre variazioni sostanziali. In tutte le stagioni Pozzilli mantiene una prevalenza da NNE, con un flusso più concentrato e velocità mediamente superiori. Sesto Campano mostra la stessa matrice settentrionale, ma con una maggiore apertura verso NNW e intensità più contenute. Le differenze tra i due siti restano quindi stabili nel corso dell'anno, con Pozzilli più ventilato e direzionalmente definito e Sesto Campano più attenuato e variabile.

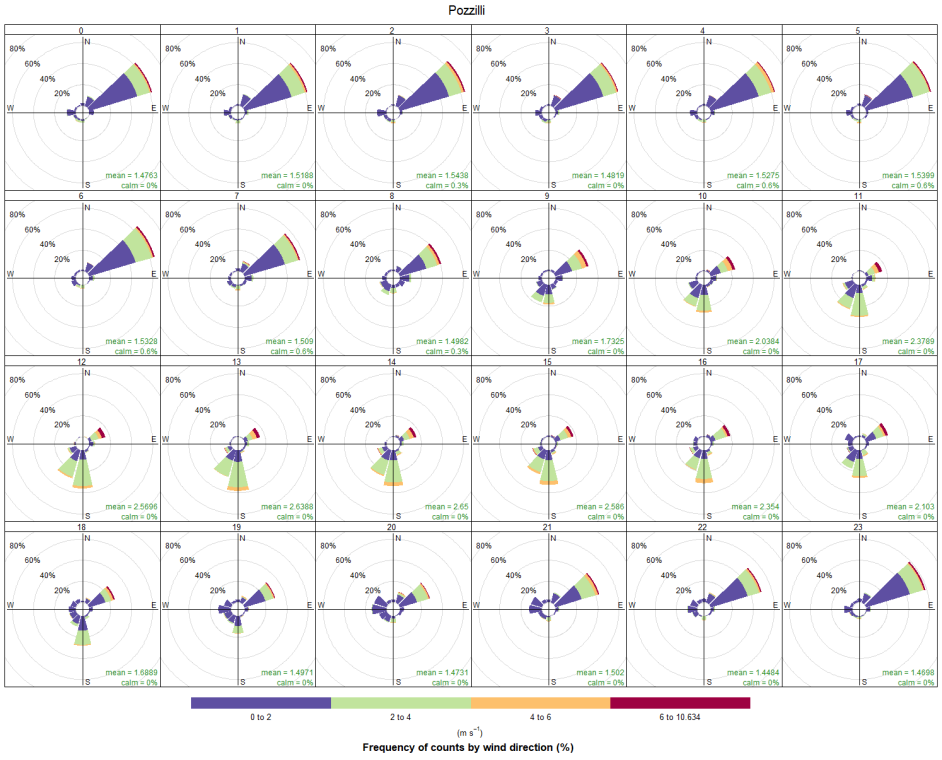


Grafico 6 - rosa dei venti oraria - Pozzilli

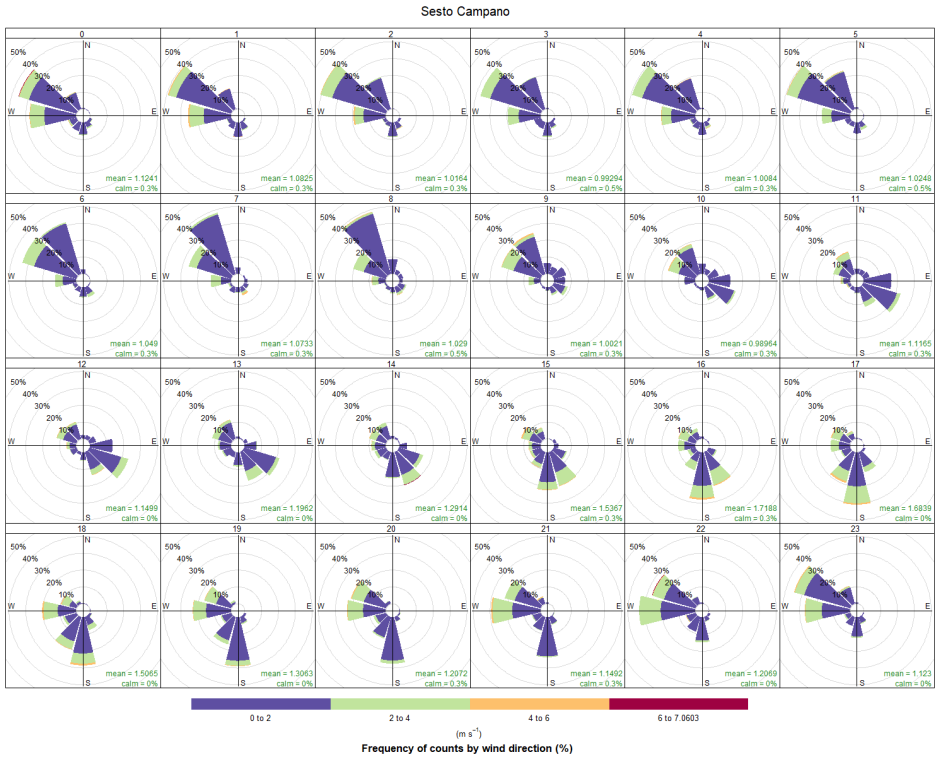


Grafico 7 - rosa dei venti oraria Sesto Campano

L'andamento orario della rosa dei venti di Pozzilli (Grafico 6) mostra un comportamento tipico di un sito inserito in una valle, con una circolazione che segue il ciclo termico giorno/notte e l'orientamento del fondovalle. La direzione prevalente resta quasi sempre nel settore settentrionale, con variazioni sistematiche

lungo le 24 ore che descrivono bene come il flusso entri ed esca dalla valle in funzione della stabilità atmosferica.

L'andamento orario della rosa dei venti di Sesto Campano (Grafico 7) mostra anch'esso un regime coerente con un sito posto lungo una valle, con una prevalenza settentrionale che si mantiene durante la giornata ma con una direzione più aperta e variabile, soprattutto nelle ore notturne, quando la ventilazione si indebolisce e il flusso perde definizione.

Le due rose orarie mostrano, quindi, un comportamento coerente lungo la valle: il vento entra da monte a Pozzilli con direzione più definita e prosegue verso Sesto Campano ruotando leggermente verso sinistra.

6.5. Pressione

La pressione atmosferica mostra un andamento regolare e coerente tra le due stazioni, con valori medi molto simili e differenze limitate riconducibili alle caratteristiche locali dei siti (Tabella 6). Le variazioni temporali (Grafico 8) risultano continue e prive di anomalie, con minimi associati al passaggio di sistemi perturbati e massimi legati a condizioni anticicloniche. I periodi caratterizzati da valori elevati e da una ridotta variabilità giornaliera sono compatibili con condizioni di stabilità atmosferica, che possono favorire la stagnazione degli inquinanti nei bassi strati, in particolare nei mesi invernali e in alcune fasi del periodo primaverile.

	Pozzilli	Sesto Campano
percentuale dati validi (%)	94.00	98.00
media pressione (hPa)	991.90	990.70
mediana pressione (hPa)	991.30	990.00
min pressione (hPa)	968.70	955.70
max pressione (hPa)	1010.80	1009.30

Tabella 6 - statistiche pressione

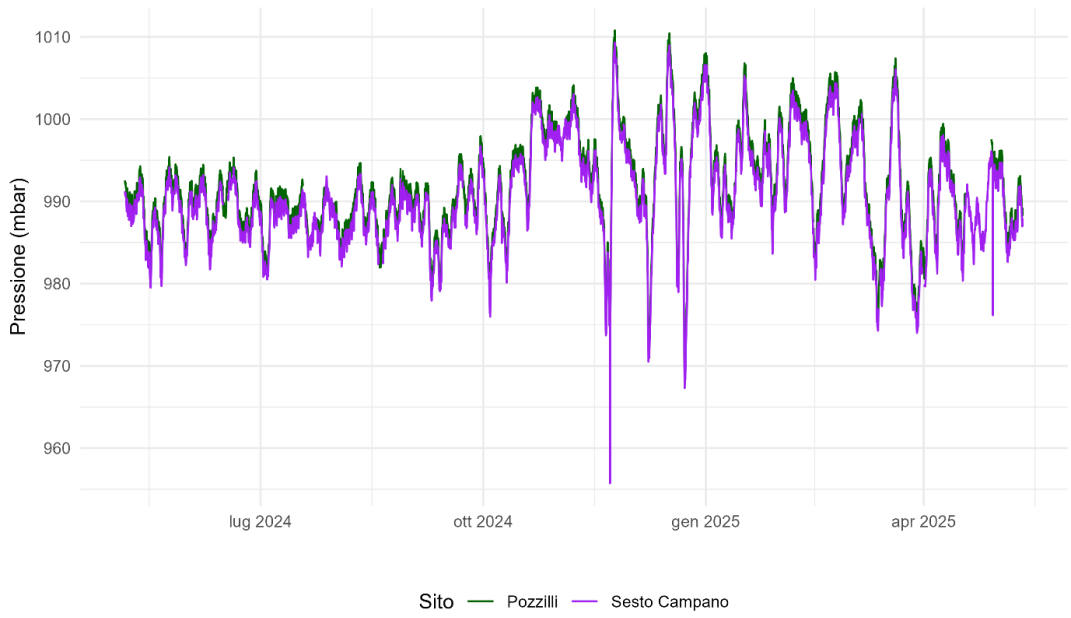


Grafico 8 - andamento temporale pressione - Pozzilli - Sesto Campano

6.6. Precipitazioni

La stazione Sonica dispone di dati di precipitazione affidabili, seppur limitati al periodo compreso tra novembre 2024 e maggio 2025. Le statistiche presentate sono quindi riferite esclusivamente alla stazione Sonica e al periodo di effettiva disponibilità dei dati.

L'analisi dei dati (Tabella 7) evidenzia una cumulata totale pari a circa 490 mm, con 409 ore di pioggia e un'intensità massima oraria di 21.8 mm/h. La mediana pari a zero riflette la prevalenza di ore senza precipitazione, mentre i valori più elevati sono associati al passaggio di sistemi perturbati.

Il Grafico 9 della precipitazione oraria mostra una distribuzione irregolare degli eventi, con picchi intensi e ben distinti che si concentrano soprattutto tra i mesi invernali e primaverili. L'andamento evidenzia episodi brevi ma talvolta intensi, coerenti con la natura convettiva o frontale delle precipitazioni nel periodo considerato. La presenza di lunghi intervalli senza pioggia conferma quanto indicato dalla mediana nulla e dalla forte asimmetria della distribuzione.

La descrizione temporale degli eventi piovosi e dei relativi cumulati risulta utile per contestualizzare i processi di rimozione umida del particolato atmosferico, in particolare nei periodi in cui si osservano riduzioni delle concentrazioni in concomitanza con gli episodi precipitativi.

	sonica
media pioggia (mm/h)	0.106
mediana pioggia (mm/h)	0.000
min pioggia (mm/h)	0
max pioggia (mm/h)	21.8
ore con pioggia	409
cumulata totale (mm)	490

Tabella 7 - statistiche pioggia

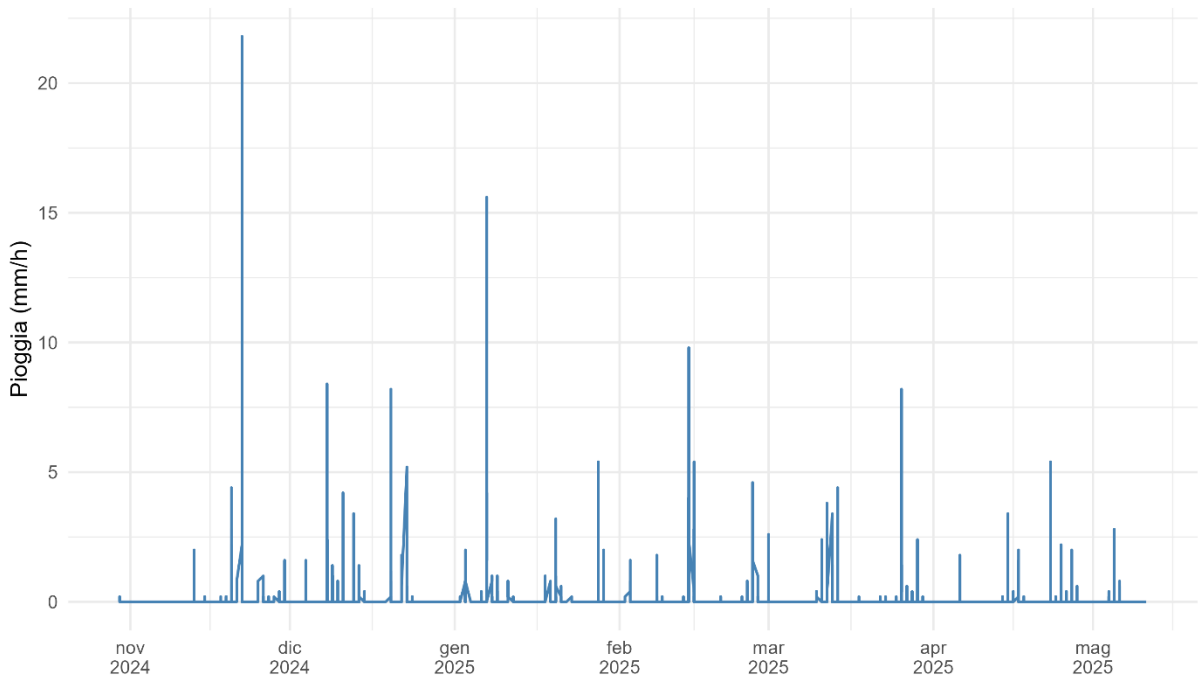


Grafico 9 - andamento temporale pioggia - sonica

7. Quadro emissivo della piana di Venafro

Il presente capitolo descrive il quadro emissivo della piana di Venafro, ottenuto dall'inventario delle emissioni che ARPA Molise utilizza per il sistema previsionale di qualità dell'aria.

Ai fini dell'analisi, la piana di Venafro è stata delimitata includendo i comuni di Venafro, Sesto Campano, Montaquila, Monteroduni e Pozzilli, che rappresentano, quindi, l'area territoriale di riferimento per la descrizione del sistema emissivo.

La base informativa deriva dall'inventario provinciale elaborato da ISPRA e utilizza i totali emissivi più aggiornati disponibili nelle serie storiche dell'inventario nazionale (formato SNAP-Corinair), aggiornate al 2022 al momento dell'elaborazione.

L'aggiornamento dei dati provinciali è stato effettuato applicando ai totali provinciali del 2019 il trend di variazione nazionale calcolato tra il 2019 e il 2022, ottenuto confrontando i totali emissivi nazionali ai due anni al massimo livello di dettaglio disponibile. Successivamente, tali totali provinciali aggiornati sono stati ripartiti sul territorio comunale attraverso un processo di disaggregazione coerente con i criteri adottati da ISPRA. Questa impostazione consente di utilizzare stime emissive aggiornate secondo le metodologie più recenti, preservando al contempo la continuità metodologica nella distribuzione territoriale delle sorgenti.

La stima delle emissioni è stata effettuata mediante una metodologia top-down, un approccio ufficiale e ampiamente consolidato nelle pratiche inventariali nazionali ed europee. Tale metodo rappresenta una delle metodologie standard utilizzabili per la quantificazione delle emissioni, basata sull'impiego di fattori emissivi standardizzati e dati di attività disponibili a scala aggregata. La sua adozione garantisce coerenza con la struttura dell'inventario nazionale e continuità nella ripartizione territoriale, senza introdurre disomogeneità tra le diverse fonti informative.

7.1. Disaggregazione comunale

La disaggregazione delle emissioni a livello comunale è stata realizzata mediante un processo di downscaling, applicando ai totali provinciali aggiornati al 2022 una serie di indicatori territoriali (proxy) rappresentativi della distribuzione spaziale delle attività emissive. Tale procedura segue, per quanto possibile, i criteri metodologici adottati da ISPRA per la ripartizione nazionale e provinciale, garantendo coerenza con l'impostazione dell'inventario ufficiale.

La comunalizzazione richiede un equilibrio tra la rappresentatività degli indicatori e la loro disponibilità a livello comunale. Idealmente, gli indicatori utilizzati dovrebbero coincidere con quelli impiegati per la stima delle emissioni a livello provinciale; tuttavia, tali dati non sempre esistono su scala comunale o non sono disponibili in modo omogeneo per tutti gli anni. Per questo motivo, la procedura ha previsto l'utilizzo di proxy primarie e secondarie:

- proxy primarie, direttamente correlate alle attività emissive
- popolazione (riscaldamento domestico, traffico urbano)
- addetti per settore ATECO (attività industriali)
- lunghezza della rete stradale (trasporti)
- superficie agricola (agricoltura)
- proxy secondarie, utilizzate quando i dati comunali più specifici non erano disponibili, al fine di evitare incongruenze nella distribuzione territoriale

I dati utilizzati sono quelli disponibili nelle banche dati ufficiali al momento dell'elaborazione. Ad esempio, è stato possibile utilizzare la popolazione aggiornata al 2022, mentre per gli addetti dei diversi settori produttivi il dato più recente disponibile coincideva con quello utilizzato nella precedente comunalizzazione;

in tali casi, le emissioni dei settori interessati sono state impiegate come proxy per la ripartizione del dato provinciale.

Questo approccio consente di utilizzare stime emissive aggiornate secondo le metodologie più recenti, mantenendo al tempo stesso una distribuzione territoriale coerente e priva di discontinuità, in linea con le pratiche inventariali consolidate.

7.2. Interpretazione del quadro emissivo

Nel presente capitolo sono riportate esclusivamente le emissioni relative agli inquinanti oggetto della campagna di monitoraggio della qualità dell'aria, comprendendo sia gli inquinanti primari, sia quelli che partecipano ai processi di formazione secondaria, così da garantire coerenza tra il quadro emissivo e le analisi presentate nella Parte II del documento.

È utile ricordare che le emissioni annuali rappresentano la quantità di inquinante rilasciata dalle sorgenti presenti sul territorio, mentre le concentrazioni rilevate dalle stazioni di monitoraggio sono il risultato di processi di dispersione e trasformazione che dipendono da molteplici fattori: condizioni meteorologiche, morfologia locale, distanza e posizione delle sorgenti rispetto ai recettori, presenza di elementi naturali o antropici che influenzano la circolazione dell'aria e configurazione urbana dell'area.

Di conseguenza, la presenza di emissioni significative da parte di una singola sorgente non implica automaticamente un contributo proporzionale ai livelli di concentrazione rilevati nei punti di monitoraggio. Il quadro emissivo deve essere interpretato come una rappresentazione delle potenzialità emissive del territorio, non come una misura diretta dell'impatto sulle concentrazioni.

7.3. Macrosettori emissivi

Nell'ambito della presente analisi sono considerati i macrosettori dal 2 al 10 della classificazione SNAP-Corinair. Il macrosettore 1 non è ricompreso poiché non risultano presenti dati relativi a sorgenti pertinenti nella provincia di Isernia. Il macrosettore 11 non è stato incluso perché, nell'inventario utilizzato come input al modello previsionale, viene comunalizzato con una metodologia diversa da quella applicata ai macrosettori 2-10.

I macrosettori inclusi sono:

- 2 - Combustione non industriale: Riscaldamento civile e uso domestico di combustibili fossili e biomasse.
- 3 - Combustione industriale: Impianti termici e processi energetici associati alle attività produttive.
- 4 - Processi produttivi: Emissioni derivanti da attività industriali non energetiche (processi chimici, metallurgici, manifatturieri).
- 5 - Estrazione e distribuzione combustibili fossili / geotermico: Emissioni legate alla produzione, trasformazione e distribuzione di combustibili.
- 6 - Uso di solventi: Attività artigianali, industriali e civili che impiegano solventi organici.
- 7 - Trasporti stradali: Emissioni generate dalla circolazione dei veicoli su strada.
- 8 - Altre sorgenti mobili: Trasporti non stradali (macchine agricole, mezzi da cantiere, navigazione interna).
- 9 - Trattamento e smaltimento rifiuti: Emissioni derivanti da discariche e impianti di trattamento dei rifiuti.
- 10 – Agricoltura: Emissioni associate alle attività agricole e zootecniche.

7.4. Inventario emissivo

7.4.1. Emissioni di PM_{10} nella piana di Venafro

La distribuzione delle emissioni di PM_{10} nei comuni della piana di Venafro risulta fortemente eterogenea. Il valore più elevato si registra a Sesto Campano (135.41 t/a), che rappresenta da solo oltre la metà delle emissioni complessive dell'area. Seguono Venafro (47.97 t/a) e, con valori nettamente inferiori, Montaquila, Monteroduni e Pozzilli, che presentano livelli emissivi compresi tra 14.37 e 9.53 t/a. Questa configurazione evidenzia la presenza di un unico comune caratterizzato da emissioni molto elevate e di un insieme di territori con contributi più contenuti e omogenei. Il Grafico 10 e la mappa in Figura 2 confermano visivamente questa marcata asimmetria: Sesto Campano emerge come polo emissivo dominante, Venafro si colloca in posizione intermedia, mentre gli altri comuni mostrano contributi molto più bassi e tra loro comparabili.

COMUNE	PM_{10} (t/a)
Montaquila	14.37
Monteroduni	11.31
Pozzilli	9.53
Sesto Campano	135.41
Venafro	47.97

Tabella 8 - emissioni per Comune di PM_{10}

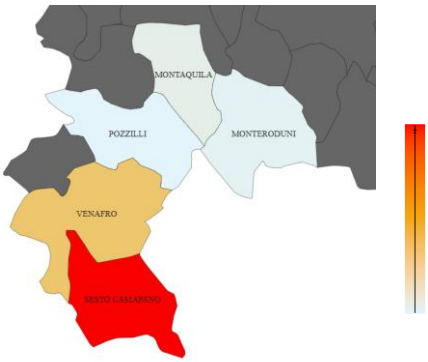


Figura 2 - distribuzione territoriale emissioni di PM_{10}

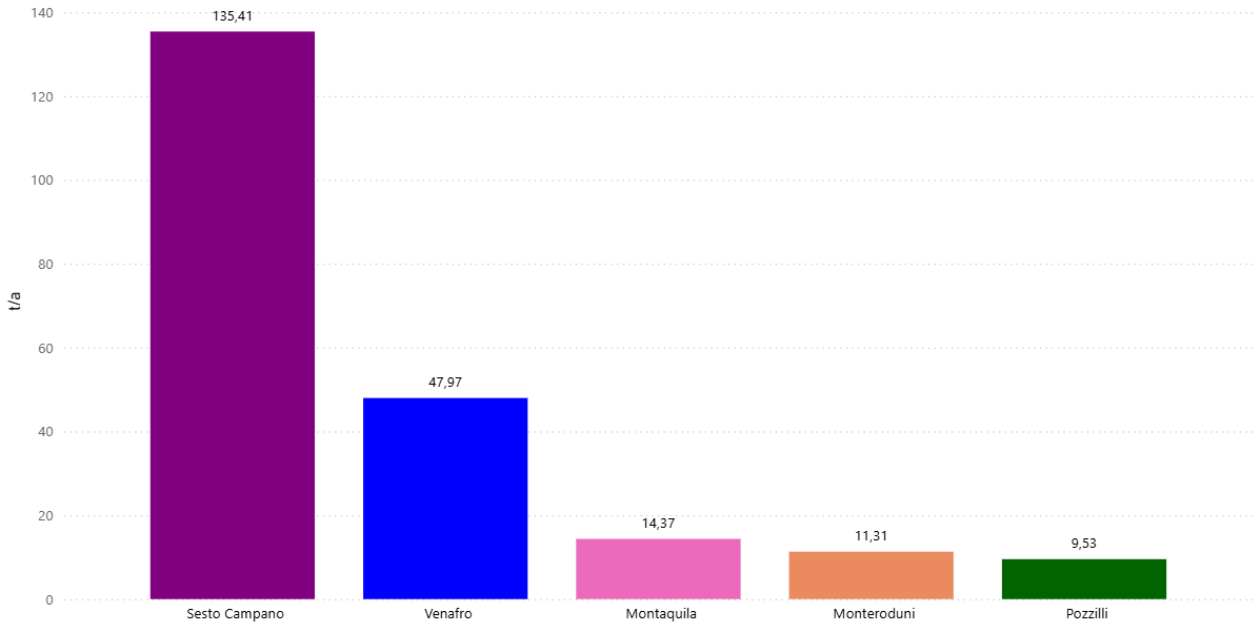


Grafico 10 - emissioni di PM_{10}

La Tabella 9 e il Grafico 11 evidenziano come le emissioni di PM_{10} nella piana di Venafro siano dominate da due categorie principali.

Il macrosettore 4 - Processi produttivi rappresenta il contributo più rilevante, con 124.59 t/a, pari a circa il 57% delle emissioni complessive, ed è concentrato quasi interamente nel comune di Sesto Campano.

Il secondo contributo per importanza è quello del macrosettore 2 - Combustione non industriale con 70.71 t/a, corrispondenti a circa il 32% del totale, e costituisce la principale sorgente nei comuni di Montaquila, Monteroduni, Pozzilli e Venafro, riflettendo le emissioni diffuse legate al riscaldamento civile.

Gli altri macrosettori presentano contributi più contenuti: l'agricoltura incide per 10.60 t/a (circa 5%), mentre la combustione industriale e i trasporti stradali mostrano valori inferiori (rispettivamente 3% e 2%) e distribuiti in modo più omogeneo. Le restanti categorie (solventi, altre sorgenti mobili, rifiuti) hanno un peso marginale.

MACROSETTORE	Montaquila	Monteroduni	Pozzilli	Sesto Campano	Venafro	Totale
2 - Combustione - Non industriale	10.06	9.88	7.97	8.49	34.31	**70.71**
3 - Combustione - Industriale	1.17	0.00	0.00	5.80	0.23	**7.21**
4 - Processi Produttivi	2.22	0.00	0.00	119.30	3.06	**124.59**
5 - Estrazione. distribuzione combustibili fossili / geotermico	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**
6 - Uso di solventi	0.09	0.09	0.07	0.08	0.31	**0.63**
7 - Trasporti Stradali	0.44	0.42	0.63	0.55	2.09	**4.12**
8 - Altre Sorgenti Mobili	0.04	0.04	0.09	0.04	0.15	**0.37**
9 - Trattamento e Smaltimento Rifiuti	0.03	0.04	0.05	0.05	0.19	**0.35**
10 - Agricoltura	0.31	0.84	0.71	1.10	7.64	**10.60**
Totale	**14.37**	**11.31**	**9.53**	**135.41**	**47.97**	**218.58**

Tabella 9 - emissioni di PM_{10} per Macrosettore per Comune (t/a)

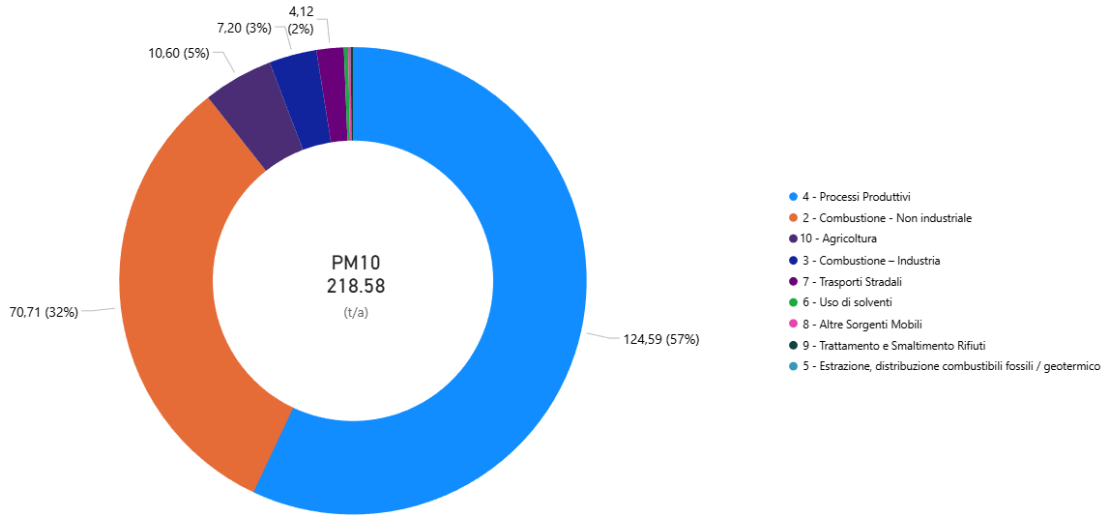


Grafico 11 - distribuzione % emissioni di PM_{10} per Macrosettore

Considerazioni emissioni di PM_{10} nella piana di Venafro

Il quadro emissivo del PM_{10} nella piana di Venafro evidenzia una struttura fortemente sbilanciata, caratterizzata dalla coesistenza di una sorgente puntuale ad alta intensità e di sorgenti diffuse legate agli usi civili. Il comune di Sesto Campano rappresenta il principale polo emissivo dell'area, con un contributo nettamente superiore agli altri territori e dominato dai processi produttivi. Gli altri comuni mostrano livelli più contenuti e un profilo tipico delle aree residenziali, dove prevale la combustione non industriale associata al riscaldamento domestico.

La ripartizione per macrosettori conferma questa dualità: da un lato un contributo industriale concentrato e molto rilevante, dall'altro un insieme di sorgenti civili diffuse distribuite in modo più omogeneo. Ne deriva un sistema emissivo eterogeneo, nel quale attività produttive localizzate e usi civili diffusi concorrono a definire un quadro complesso e territorialmente differenziato.

7.4.2. Emissioni di NO + NO_2 nella piana di Venafro

La distribuzione delle emissioni di NO + NO_2 nei comuni della piana di Venafro (Tabella 10) risulta fortemente eterogenea. Il valore più elevato si registra a Sesto Campano (1046.87 t/a), che rappresenta da solo la quasi totalità delle emissioni complessive dell'area. Seguono Venafro (95.72 t/a) e, con valori nettamente inferiori, Pozzilli, Montaquila e Monteroduni, che presentano livelli emissivi compresi tra 30.54 e 14.19 t/a. Questa configurazione evidenzia la presenza di un unico comune caratterizzato da emissioni molto elevate e di un insieme di territori con contributi più contenuti e omogenei. Il Grafico 12 e la mappa in Figura 3 confermano visivamente questa marcata asimmetria: Sesto Campano emerge come polo emissivo dominante, Venafro si colloca in posizione intermedia, mentre gli altri comuni mostrano contributi molto più bassi e tra loro comparabili.

COMUNE	NO+NO_2 (t/a)
Montaquila	19.33
Monteroduni	14.19
Pozzilli	30.54
Sesto Campano	1046.87
Venafro	95.72

Tabella 10 - emissioni per Comune di NO+NO_2

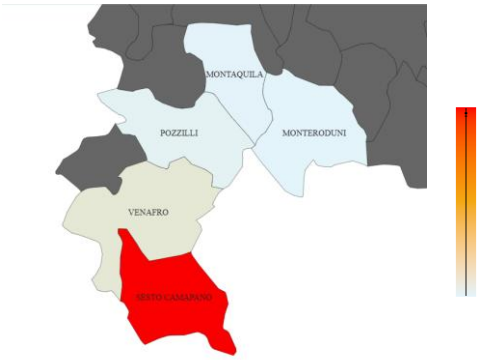


Figura 3 - distribuzione comunale emissioni di NO+NO_2

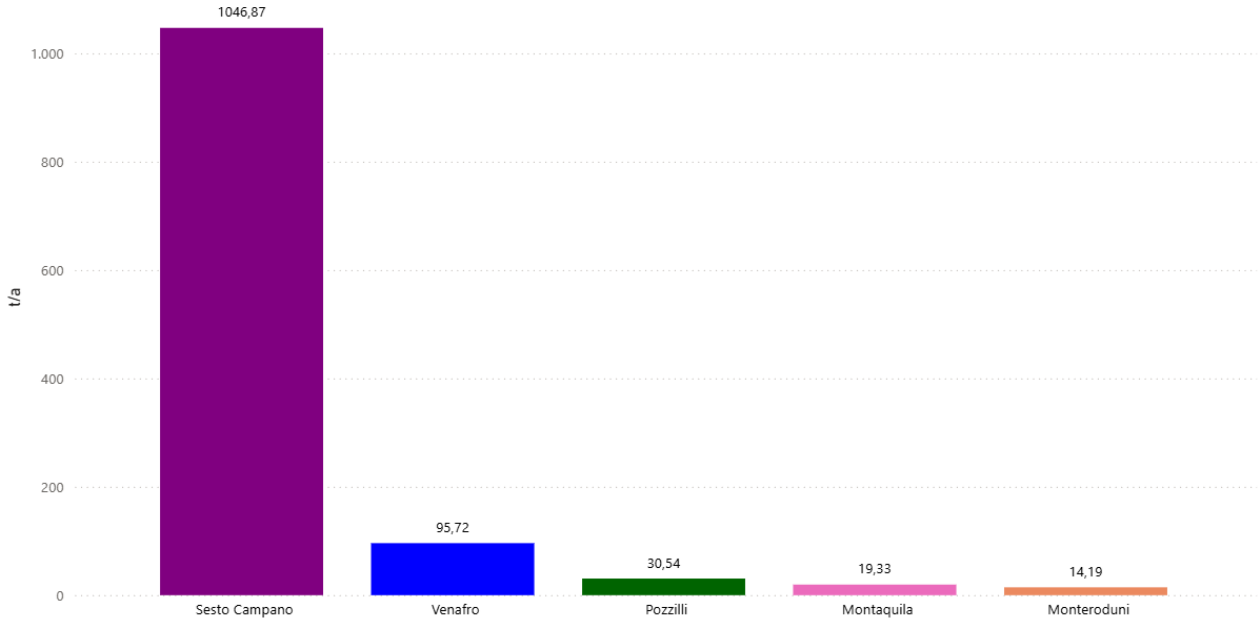


Grafico 12 - emissioni di NO+NO_2

La distribuzione delle emissioni di NO + NO_2 nella piana di Venafro risulta fortemente eterogenea (Tabella 11 e Grafico 13). Il macrosettore 3 - Combustione industriale rappresenta il contributo nettamente predominante, con 1039.42 t/a, pari a oltre l'80% delle emissioni complessive, ed è concentrato quasi esclusivamente nel comune di Sesto Campano, dove il settore industriale costituisce la principale sorgente emissiva. Il macrosettore 2 - Combustione non industriale contribuisce per 72.87 t/a (circa 6%), con valori più elevati nei comuni a maggiore densità residenziale, in particolare Venafro. Seguono i trasporti stradali con 58.52 t/a (circa 5%), distribuiti in modo relativamente omogeneo tra i comuni, e le altre sorgenti mobili con 19.28 t/a. Gli altri macrosettori presentano contributi molto contenuti: l'agricoltura incide per 16.22 t/a, mentre solventi, rifiuti e altre categorie mostrano valori marginali; il macrosettore 4 - Processi produttivi risulta assente per questo inquinante.

MACROSETTORE	Montaquila	Monteroduni	Pozzilli	Sesto Campano	Venafro	Totale
2 - Combustione - Non industriale	7.48	4.77	12.74	4.35	43.53	**72.87**
3 - Combustione - Industriale	2.89	0.00	0.00	1030.46	6.06	**1039.42**
4 - Processi Produttivi	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**
5 - Estrazione. distribuzione combustibili fossili / geotermico	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**
6 - Uso di solventi	0.005	0.005	0.004	0.004	0.016	**0.03**
7 - Trasporti Stradali	5.92	5.65	9.39	7.32	30.24	**58.52**
8 - Altre Sorgenti Mobili	1.87	2.01	5.96	2.28	7.16	**19.28**
9 - Trattamento e Smaltimento Rifiuti	0.02	0.03	0.05	0.04	0.16	**0.30**
10 - Agricoltura	1.13	1.72	2.41	2.41	8.56	**16.22**
Totale	**19.33**	**14.19**	**30.54**	**1046.87**	**95.72**	**1206.64**

Tabella 11 - emissioni di NO+NO_2 per Macrosettore per Comune (t/a)

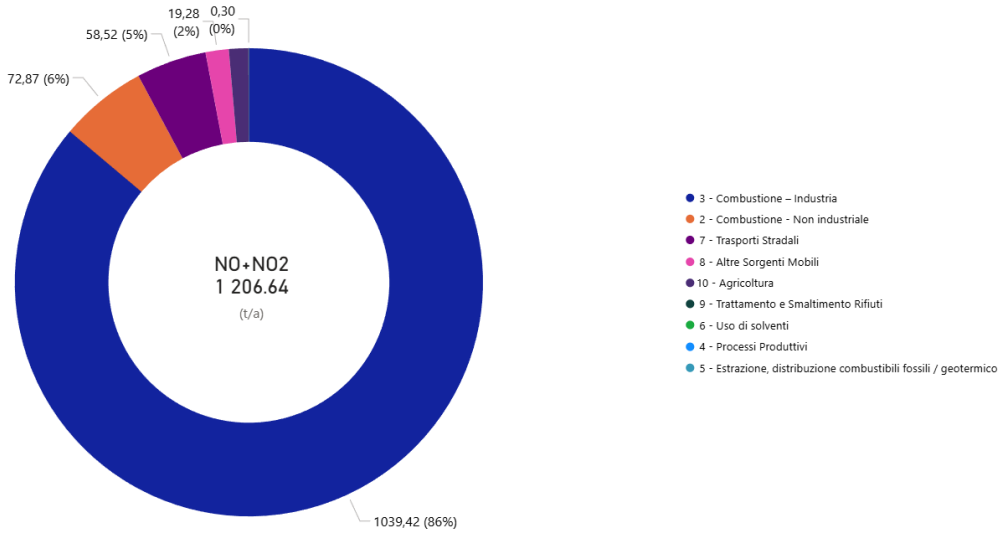


Grafico 13 - distribuzione % emissioni di NO+NO_2 per Macrosettore

Considerazioni emissioni di NO + NO_2 nella piana di Venafro

Il quadro emissivo degli ossidi di azoto nella piana di Venafro mostra una struttura fortemente concentrata, dominata dalla combustione industriale. La distribuzione territoriale evidenzia un ruolo preponderante del comune di Sesto Campano, che presenta valori nettamente superiori agli altri territori e costituisce il principale polo emissivo dell'area. Gli altri comuni mostrano livelli più contenuti, riconducibili principalmente alla combustione non industriale, ai trasporti stradali, all'agricoltura e alle altre sorgenti mobili.

La ripartizione per macrosettori conferma questa configurazione: la combustione industriale rappresenta la quasi totalità delle emissioni complessive, mentre i settori legati agli usi civili e alla mobilità contribuiscono in misura minore e con una distribuzione più omogenea. Il sistema emissivo risulta quindi fortemente polarizzato, con un'unica sorgente industriale dominante e un insieme di contributi secondari diffusi.

7.4.3. Emissioni di benzene nella piana di Venafro

La distribuzione delle emissioni di benzene nei comuni della piana di Venafro (Tabella 12) risulta complessivamente contenuta e caratterizzata da differenze territoriali limitate. Il valore più elevato si registra a Pozzilli (0.56 t/a), seguito da Venafro (0.30 t/a), mentre Montaquila, Monteroduni e Sesto Campano presentano contributi molto bassi, compresi tra 0.04 e 0.06 t/a. Questa configurazione evidenzia un sistema emissivo privo di sorgenti puntuali dominanti e caratterizzato da livelli ridotti e relativamente omogenei sul territorio. Il Grafico 14 e la mappa in Figura 4 confermano visivamente tale quadro: Pozzilli emerge come il comune con il contributo più elevato, Venafro si colloca in posizione intermedia, mentre gli altri territori mostrano valori molto più bassi e tra loro comparabili.

COMUNE	benzene (t/a)
Montaquila	0.06
Monteroduni	0.04
Pozzilli	0.56
Sesto Campano	0.06
Venafro	0.30

Tabella 12 - emissioni per Comune di benzene

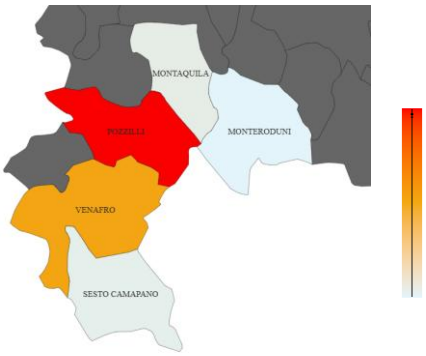


Figura 4 - distribuzione comunale emissioni di benzene

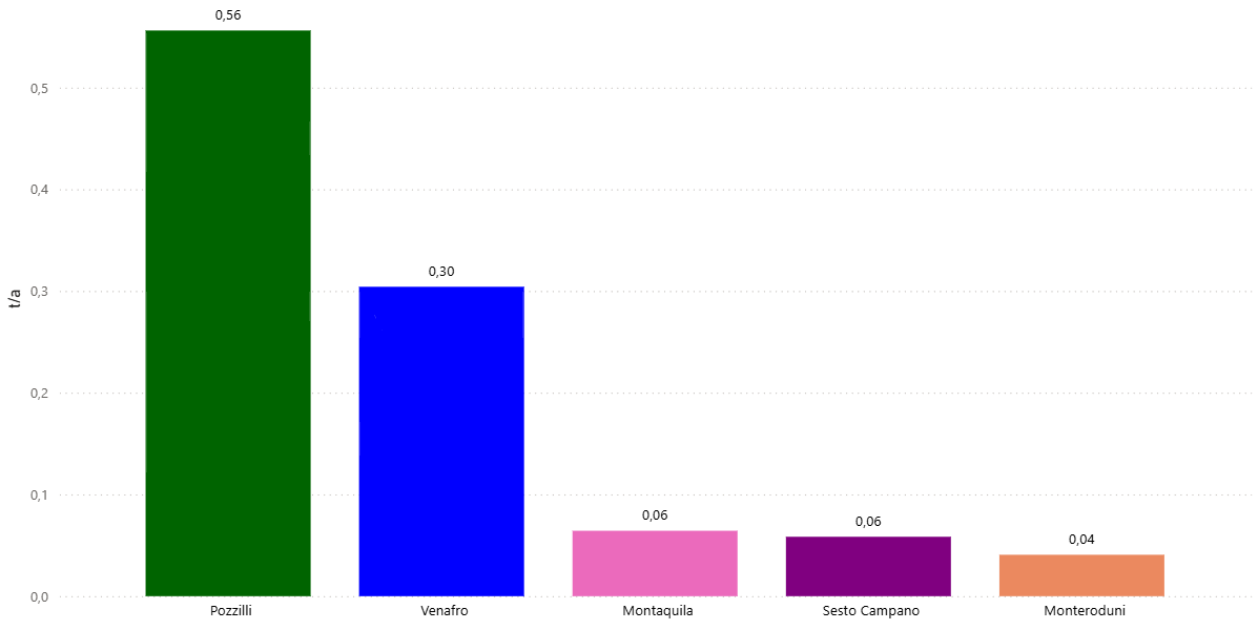


Grafico 14 - emissioni di benzene

La Tabella 13 e il Grafico 15 evidenziano come le emissioni di benzene nella piana di Venafro siano complessivamente contenute e caratterizzate da una distribuzione territoriale relativamente omogenea. Il contributo principale proviene dal macrosettore 6 - Uso di solventi, che con valori pari a 0.60 t/a rappresenta circa il 59% delle emissioni totali, risultando particolarmente rilevante nel comune di Pozzilli e, in misura minore, a Venafro. Il secondo contributo per importanza è quello dei Processi produttivi, che totalizzano 0.32 t/a, pari a circa il 31%, con valori comunque contenuti e distribuiti senza evidenziare sorgenti puntuali dominanti. Seguono le altre sorgenti mobili, che incidono per 0.08 t/a (circa 8%), mentre i trasporti stradali contribuiscono in misura marginale, con 0.02 t/a (circa 2%) e una distribuzione diffusa nei comuni più popolati.

Gli altri macrosettori presentano contributi trascurabili o assenti, inclusi la combustione industriale e non industriale.

MACROSETTORE	Montaquila	Monteroduni	Pozzilli	Sesto Campano	Venafro	Totale
2 - Combustione - Non industriale	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	**0.00**
3 - Combustione - Industriale	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	**0.00**
4 - Processi Produttivi	0.0012	0.0000	0.0000	0.0126	0.0017	**0.02**
5 - Estrazione. distribuzione combustibili fossili / geotermico	0.0004	0.0003	0.0004	0.0004	0.0017	**0.00**
6 - Uso di solventi	0.0258	0.0057	0.4970	0.0027	0.0720	**0.60**
7 - Trasporti Stradali	0.0290	0.0268	0.0322	0.0326	0.1970	**0.32**
8 - Altre Sorgenti Mobili	0.0077	0.0077	0.0265	0.0100	0.0317	**0.08**
9 - Trattamento e Smaltimento Rifiuti	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	**0.00**
10 - Agricoltura	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	**0.00**
Totale	**0.06**	**0.04**	**0.56**	**0.06**	**0.30**	**1.02**

Tabella 13 - emissioni di benzene per Macrosettore per Comune (t/a)

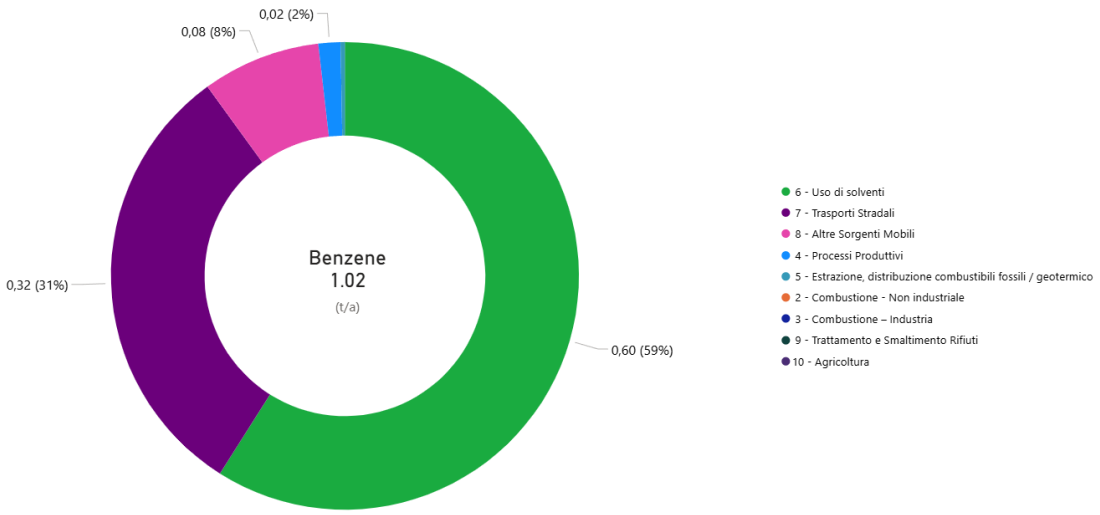


Grafico 15 - distribuzione % emissioni di benzene per Macrosettore

Considerazioni emissioni di benzene nella piana di Venafro

Il quadro emissivo del benzene nella piana di Venafro è caratterizzato da livelli complessivamente contenuti e da una distribuzione territoriale relativamente uniforme. I contributi più elevati si osservano nei comuni di Pozzilli e Venafro, mentre gli altri territori presentano valori molto bassi e tra loro comparabili.

La ripartizione per macrosettori evidenzia la netta prevalenza dell'uso di solventi, che rappresenta la principale sorgente emissiva per questo inquinante. Seguono i processi produttivi, con un contributo più ridotto, mentre la mobilità e le altre sorgenti mobili incidono in misura marginale. Le attività di combustione, sia industriale sia civile, non presentano emissioni rilevanti. Nel complesso, il sistema emissivo del benzene risulta privo di sorgenti ad alta intensità e caratterizzato da livelli distribuiti in modo omogeneo.

7.4.4. Emissioni di SO_2 + SO_3 nella piana di Venafro

La distribuzione delle emissioni di ossidi di zolfo nei comuni della piana di Venafro (Tabella 14) risulta fortemente sbilanciata. Il valore più elevato si registra a Sesto Campano (368.65 t/a), che rappresenta di fatto l'unica sorgente emissiva ad alta intensità dell'area. Gli altri comuni mostrano contributi molto più contenuti e tra loro comparabili: Venafro registra 18.32 t/a, Montaquila 5.59 t/a, Pozzilli 5.32 t/a, mentre Monteroduni presenta il livello più basso, pari a 1.50 t/a. Questa configurazione evidenzia un sistema emissivo dominato da una sorgente puntuale localizzata e da un insieme di territori caratterizzati da valori ridotti e relativamente omogenei. Il Grafico 16 e la mappa in Figura 5 confermano visivamente tale quadro: Sesto Campano emerge come polo emissivo dominante, mentre Venafro, Montaquila, Pozzilli e Monteroduni mostrano contributi molto più bassi e tra loro comparabili.

COMUNE	SO_2 + SO_3 (t/a)
Montaquila	5.59
Monteroduni	1.50
Pozzilli	5.32
Sesto Campano	368.65
Venafro	18.32

Tabella 14 - emissioni per Comune di SO_2 + SO_3

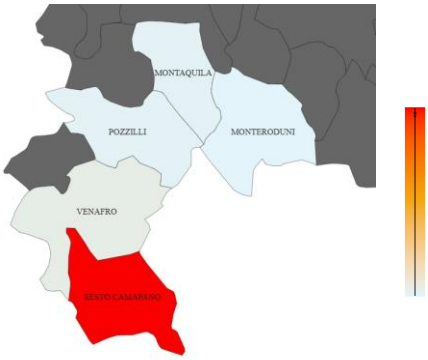


Figura 5-distribuzione comunale emissioni di SO_2 + SO_3

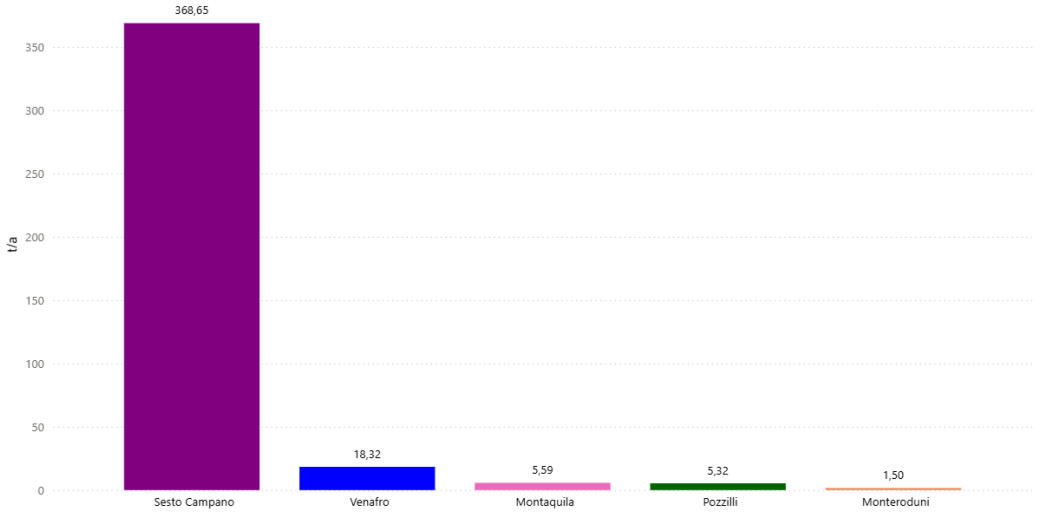


Grafico 16 - emissioni di SO_2 + SO_3

La Tabella 15 e il Grafico 17 evidenziano come le emissioni di ossidi di zolfo nella piana di Venafro siano dominate da un numero molto ristretto di macrosettori. Il contributo più rilevante proviene dal macrosettore 4 - Processi produttivi, che con 283.96 t/a rappresenta circa il 71% delle emissioni complessive ed è concentrato quasi esclusivamente nel comune di Sesto Campano. Il secondo contributo per importanza è quello del macrosettore 3 - Combustione industriale, che totalizza 86.82 t/a, pari a circa il 22%, anch'esso localizzato in larga parte nello stesso comune. La Combustione non industriale contribuisce per 28.41 t/a (circa 7%), con valori più elevati nei comuni a maggiore densità residenziale, in particolare Venafro. I trasporti stradali e Altre sorgenti mobili incidono in misura marginale, mentre gli altri macrosettori presentano contributi trascurabili o nulli.

MACROSETTORE	Montaquila	Monteroduni	Pozzilli	Sesto Campano	Venafro	Totale
2 - Combustione - Non industriale	2.71	1.48	5.29	1.39	17.55	**28.41**
3 - Combustione - Industriale	2.86	0.00	0.00	83.28	0.68	**86.82**
4 - Processi Produttivi	0.00	0.00	0.00	283.96	0.00	**283.96**
5 - Estrazione. distribuzione combustibili fossili / geotermico	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	**0.000**
6 - Uso di solventi	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	**0.006**
7 - Trasporti Stradali	0.009	0.008	0.014	0.011	0.044	**0.086**
8 - Altre Sorgenti Mobili	0.008	0.008	0.015	0.009	0.037	**0.077**
9 - Trattamento e Smaltimento Rifiuti	0.001	0.001	0.002	0.002	0.006	**0.011**
10 - Agricoltura	0.001	0.001	0.002	0.002	0.006	**0.011**
Totale	**5.59**	**1.50**	**5.32**	**368.65**	**18.32**	**399.38**

Tabella 15 - emissioni di SO_2 + SO_3 per Macrosettore per Comune (t/a)

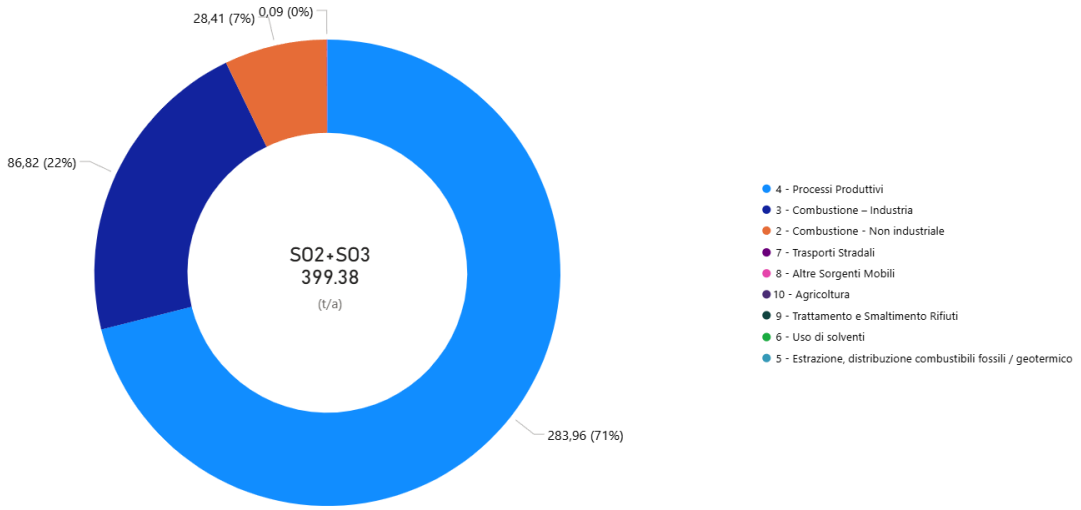


Grafico 17 - distribuzione % emissioni di SO_2 + SO_3 per Macrosettore

Considerazioni emissioni di SO_2 + SO_3 nella piana di Venafro

Il quadro emissivo degli ossidi di zolfo nella piana di Venafro è caratterizzato da una marcata concentrazione territoriale e settoriale. Le emissioni risultano dominate dal comune di Sesto Campano, che presenta valori nettamente superiori rispetto agli altri territori, mentre Montaquila, Pozzilli, Monteroduni e Venafro mostrano livelli molto più contenuti e tra loro comparabili.

La ripartizione per macrosettori conferma il ruolo preponderante delle attività industriali: i comparti combustione industriale e processi produttivi costituiscono la quasi totalità delle emissioni complessive, con un contributo particolarmente elevato concentrato nel territorio di Sesto Campano. La combustione non industriale rappresenta un contributo secondario ma diffuso, mentre i settori legati alla mobilità e le altre categorie emissive assumono un ruolo marginale. Il sistema emissivo degli SO_X risulta quindi fortemente polarizzato e dominato da sorgenti industriali localizzate.

7.4.5. Emissioni di CO nella piana di Venafro

La distribuzione delle emissioni di monossido di carbonio nei comuni della piana di Venafro risulta caratterizzata da valori elevati e diffusi su tutto il territorio (Tabella 16). Il contributo più alto si registra a Sesto Campano (745.34 t/a), seguito da Venafro, che presenta anch'esso un valore molto rilevante (535.79 t/a). Gli altri comuni mostrano livelli più contenuti: Montaquila (146.55 t/a), Monteroduni (142.21 t/a) e Pozzilli (130.98 t/a). Questa configurazione evidenzia un sistema emissivo caratterizzato da contributi consistenti e distribuiti in modo relativamente omogeneo, con una maggiore concentrazione nei comuni più estesi o con attività emissive più intense. Il Grafico 18 conferma visivamente tale quadro: Sesto Campano e Venafro emergono come i territori con i contributi più elevati, mentre Montaquila, Monteroduni e Pozzilli mostrano valori più bassi ma comunque comparabili tra loro.

COMUNE	CO (t/a)
Montaquila	146.55
Monteroduni	142.21
Pozzilli	130.98
Sesto Campano	745.34
Venafro	535.79

Tabella 16 - emissioni per Comune di CO

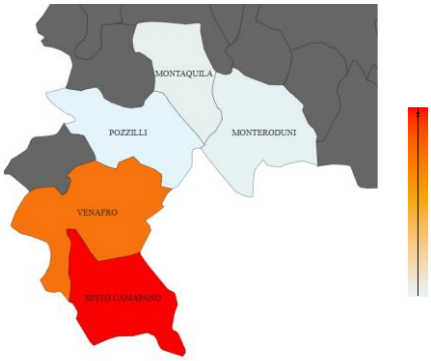


Figura 6 - distribuzione comunale emissioni di CO

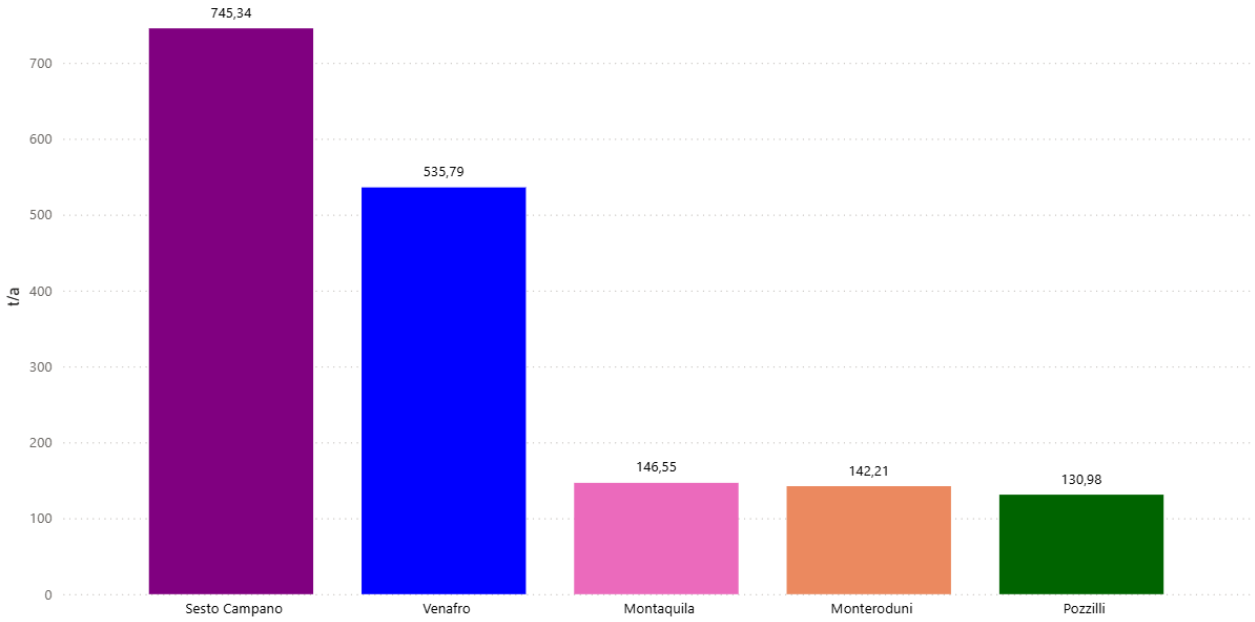


Grafico 18 - emissioni di CO

La Tabella 17 e il Grafico 19 evidenziano come le emissioni di monossido di carbonio nella piana di Venafro siano dominate da due comparti principali. Il macrosettore 2 - Combustione non industriale rappresenta il contributo più consistente, con 942.49 t/a (circa 55% del totale), con una particolare incidenza nel territorio di Venafro. Il secondo contributo per importanza è quello della Combustione industriale, che totalizza 618.80 t/a (circa 36%) ed è concentrata quasi esclusivamente nel comune di Sesto Campano (618.13 t/a).

Seguono i trasporti stradali, con 92.82 t/a (circa 5.5%), che incidono maggiormente nei comuni più urbanizzati e attraversati da assi viari principali, e le altre sorgenti mobili, con 36.79 t/a (circa 2.2%), rilevanti soprattutto a Pozzilli e Venafro. Gli altri macrosettori (uso di solventi, trattamento rifiuti, agricoltura) presentano contributi marginali o trascurabili rispetto al totale; i processi produttivi e l'estrazione/distribuzione di combustibili risultano assenti.

MACROSETTORE	Montaquila	Monteroduni	Pozzilli	Sesto Campano	Venafro	Totale
2 - Combustione - Non industriale	133.29	130.09	107.58	111.83	459.69	**942.49**
3 - Combustione - Industriale	0.56	0.00	0.00	618.13	0.10	**618.80**
4 - Processi Produttivi	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**
5 - Estrazione. distribuzione combustibili fossili / geotermico	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**
6 - Uso di solventi	0.14	0.14	0.11	0.12	0.49	**1.012**
7 - Trasporti Stradali	8.45	7.85	10.50	9.60	56.42	**92.82**
8 - Altre Sorgenti Mobili	3.45	3.18	11.41	4.37	14.38	**36.79**
9 - Trattamento e Smaltimento Rifiuti	0.54	0.79	1.14	1.06	3.90	**7.428**
10 - Agricoltura	0.11	0.16	0.24	0.22	0.81	**1.537**
Totale	**146.55**	**142.21**	**130.98**	**745.34**	**535.79**	**1700.87**

Tabella 17 - emissioni di CO per Macrosettore per Comune (t/a)

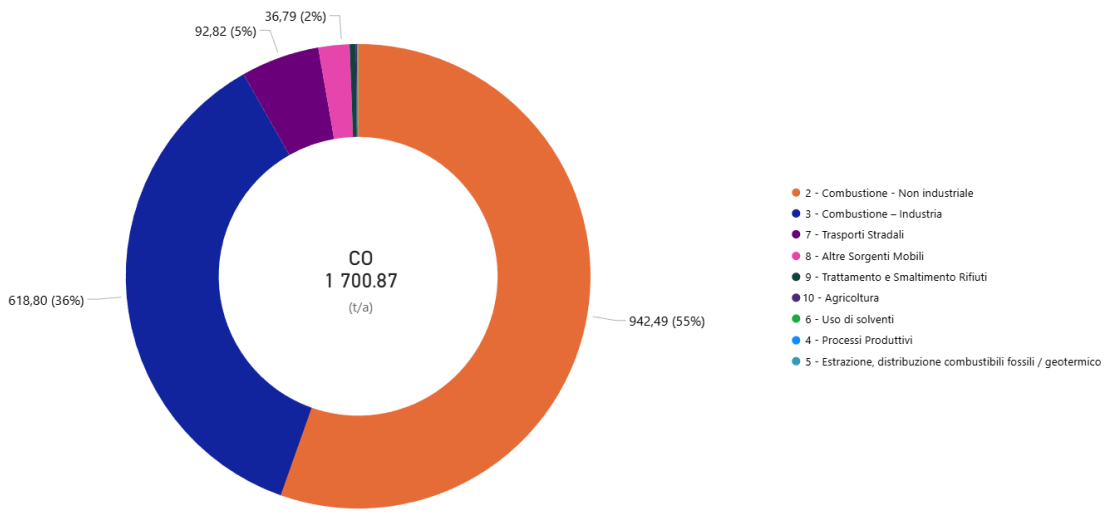


Grafico 19 - distribuzione % emissioni di CO per Macrosettore

Considerazioni emissioni di CO nella piana di Venafro

Il quadro emissivo del monossido di carbonio nella piana di Venafro restituisce l'immagine di un fenomeno ampio e diffuso, con livelli elevati in tutti i comuni e differenze territoriali che, pur presenti, non alterano la natura complessivamente omogenea del sistema. Sesto Campano e Venafro emergono come i territori con i contributi più elevati, mentre Montaquila, Monteroduni e Pozzilli mostrano valori più contenuti ma comunque significativi.

La struttura per macrosettori evidenzia il ruolo dominante della combustione non industriale, che rappresenta la componente più diffusa e trasversale del sistema emissivo, riflettendo il peso delle attività civili e del riscaldamento domestico. Accanto a questa sorgente ampia e capillare si colloca la combustione industriale, che costituisce un contributo rilevante ma fortemente localizzato. La mobilità apporta un contributo più contenuto ma significativo nei comuni maggiormente urbanizzati, mentre le altre categorie emissive assumono un ruolo marginale. Nel complesso, le emissioni di CO delineano un sistema in cui sorgenti civili diffuse, una sorgente industriale puntuale e la mobilità concorrono a definire un profilo articolato.

7.4.6. Emissioni di NH_3 nella piana di Venafro

La lettura dei valori assoluti dell'ammoniaca Tabella 18 mostra un quadro marcatamente polarizzato, in cui due comuni - Venafro e Sesto Campano - assumono un ruolo nettamente predominante rispetto al resto del territorio. Le loro emissioni risultano sensibilmente più elevate e configurano due poli emissivi principali, mentre Pozzilli e Monteroduni si collocano su livelli più contenuti e tra loro relativamente omogenei, mentre Montaquila presenta i valori più bassi. Questa struttura territoriale suggerisce un sistema emissivo non uniforme, in cui alcune specificità insediative o produttive determinano concentrazioni più marcate, mentre il resto dell'area contribuisce in modo più attenuato.

Il Grafico 20 conferma visivamente questa dinamica, evidenziando un doppio vertice emissivo e un gruppo di comuni con contributi più bassi e ravvicinati. L'immagine complessiva (Figura 7) è quella di un territorio in cui l'ammoniaca non presenta una distribuzione diffusa e omogenea, ma tende a concentrarsi in pochi comuni.

COMUNE	NH_3 (t/a)
Montaquila	7.60
Monteroduni	15.08
Pozzilli	18.70
Sesto Campano	79.39
Venafro	86.93

Tabella 18 - emissioni per Comune di NH_3

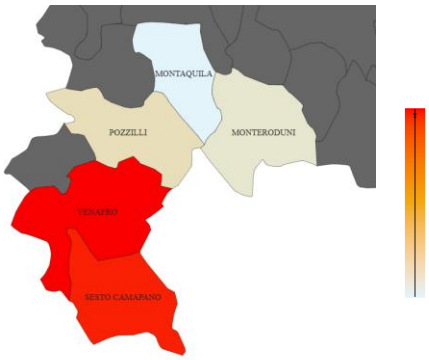


Figura 7 - distribuzione comunale emissioni di NH_3

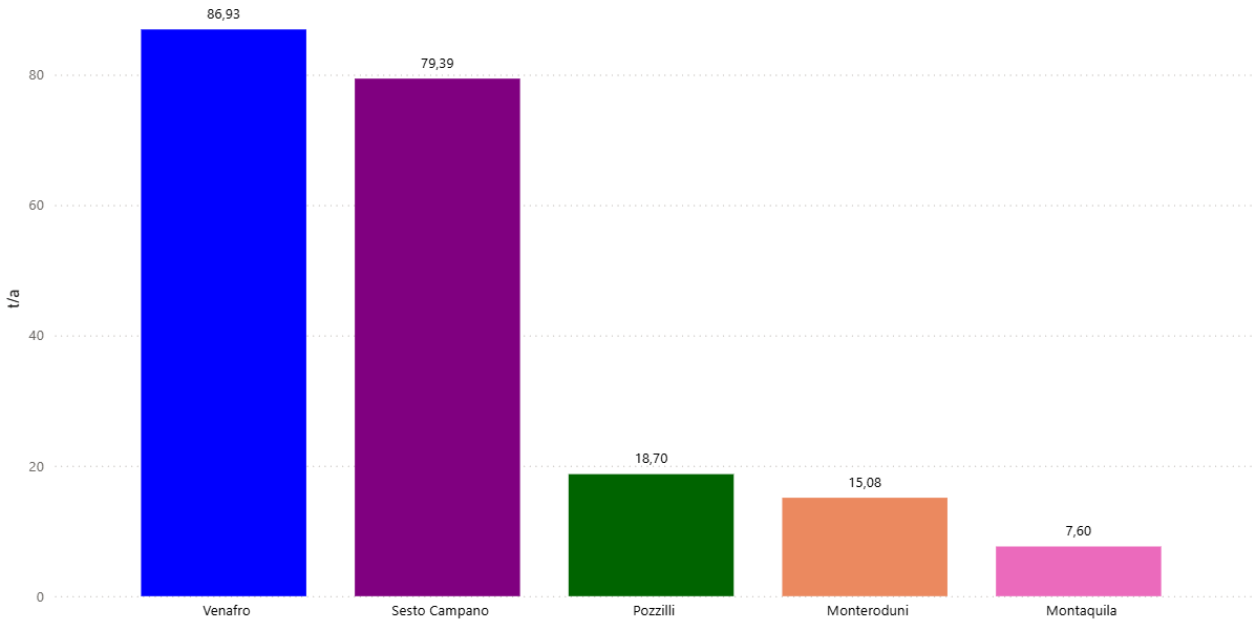


Grafico 20 - emissioni di NH_3

La Tabella 19 e il Grafico 21 evidenziano come le emissioni di ammoniaca nella piana di Venafro siano dominate in modo molto netto da un'unica categoria emissiva. Il macrosettore Agricoltura rappresenta infatti il contributo largamente prevalente, con 164.76 t/a, pari a circa 79% delle emissioni complessive, e costituisce la principale sorgente in tutti i comuni, con particolare intensità nei territori di Venafro e Sesto Campano.

Il secondo contributo per importanza è quello della combustione industriale, che totalizza 40.59 t/a (circa 20% del totale) ed è concentrato quasi esclusivamente nel comune di Sesto Campano, configurandosi come una sorgente puntuale e fortemente localizzata. I trasporti stradali apportano un contributo molto più contenuto, pari a 1.19 t/a (circa 1%), distribuito in modo omogeneo tra i comuni. Le restanti categorie emissive presentano valori molto bassi.

MACROSETTORE	Montaquila	Monteroduni	Pozzilli	Sesto Campano	Venafro	Totale
2 - Combustione - Non industriale	0.14	0.14	0.11	0.12	0.47	**0.97**
3 - Combustione - Industriale	0.00	0.00	0.00	40.59	0.00	**40.59**
4 - Processi Produttivi	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**
5 - Estrazione. distribuzione combustibili fossili / geotermico	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**
6 - Uso di solventi	0.011	0.011	0.008	0.009	0.036	**0.075**
7 - Trasporti Stradali	0.12	0.11	0.23	0.15	0.57	**1.19**
8 - Altre Sorgenti Mobili	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.01**
9 - Trattamento e Smaltimento Rifiuti	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	**0.102**
10 - Agricoltura	7.32	14.81	18.33	38.50	85.79	**164.759**
Totale	**7.60**	**15.08**	**18.70**	**79.39**	**86.93**	**207.70**

Tabella 19 - emissioni di NH_3 per Macrosettore per Comune (t/a)

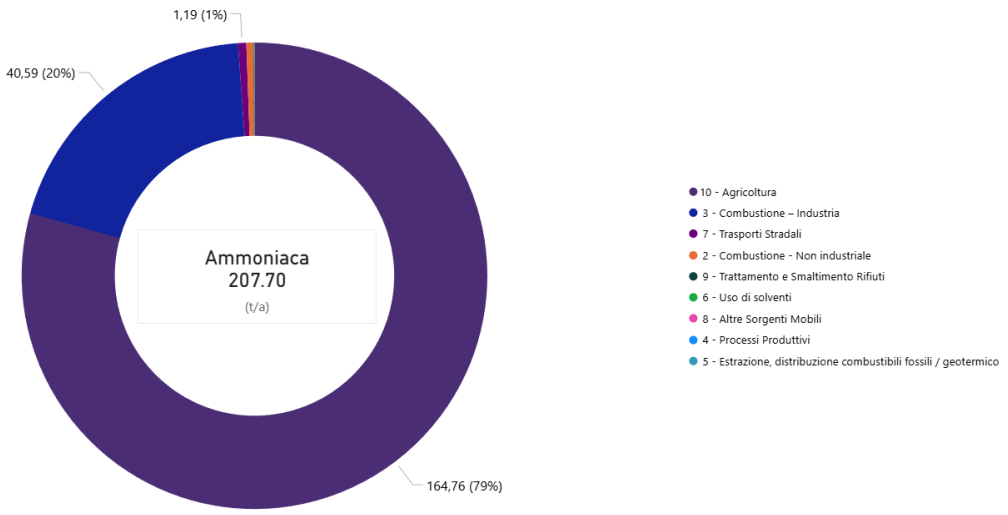


Grafico 21 - distribuzione % emissioni di NH_3 per Macrosettore

Considerazioni emissioni di NH_3 nella piana di Venafro

Il quadro emissivo dell'ammoniaca nella piana di Venafro è dominato dal comparto agricolo, che rappresenta la quasi totalità delle emissioni e costituisce la principale sorgente in tutti i comuni. Venafro e Sesto Campano emergono come i territori a maggiore intensità emissiva, mentre Pozzilli, Monteroduni e Montaquila mostrano livelli più contenuti e tra loro relativamente omogenei.

Gli altri macrosettori assumono un ruolo del tutto marginale: la combustione industriale è rilevabile solo a Sesto Campano, mentre trasporti, combustione civile, solventi e trattamento rifiuti contribuiscono in misura trascurabile. La rappresentazione territoriale conferma questa configurazione, evidenziando pochi poli emissivi e un insieme di comuni con valori più bassi e uniformi. Il sistema emissivo dell'ammoniaca risulta quindi fortemente sbilanciato verso le attività agricole, con contributi secondari molto limitati.

7.4.7. Emissioni di COVNM nella piana di Venafro

La distribuzione delle emissioni di COV non metanici nei comuni della piana di Venafro risulta fortemente eterogenea (Tabella 20). Il valore più elevato si registra nel comune di Venafro (274.65 t/a), che rappresenta la principale sorgente dell'area e concentra da solo una quota molto rilevante delle emissioni complessive.

Contributi significativi emergono anche nei comuni di Pozzilli (112.67 t/a) e Sesto Campano (106.82 t/a), che presentano livelli tra loro comparabili. I comuni di Montaquila (58.78 t/a) e Monteroduni (43.39 t/a) mostrano invece valori più bassi, delineando un quadro in cui pochi comuni assumono un ruolo emissivo predominante, mentre il resto dell'area contribuisce in misura più ridotta e relativamente omogenea.

Il Grafico 22 e la mappa in Figura 8 confermano visivamente questa configurazione, evidenziando la forte concentrazione delle emissioni a Venafro e, in misura minore, a Pozzilli e Sesto Campano. Montaquila e Monteroduni si collocano invece su livelli più bassi e tra loro simili, rafforzando l'immagine di un sistema emissivo polarizzato.

COMUNE	COVNM (t/a)
Montaquila	58.78
Monteroduni	43.39
Pozzilli	112.67
Sesto Campano	106.82
Venafro	274.65

Tabella 20 - emissioni per Comune di COVNM

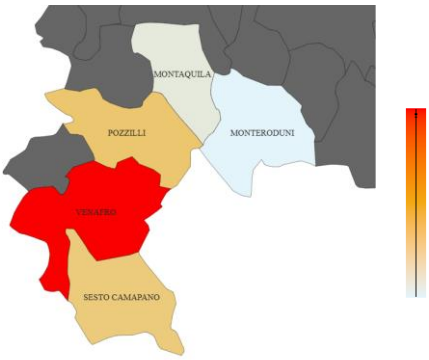


Figura 8 - distribuzione comunale emissioni di COVNM

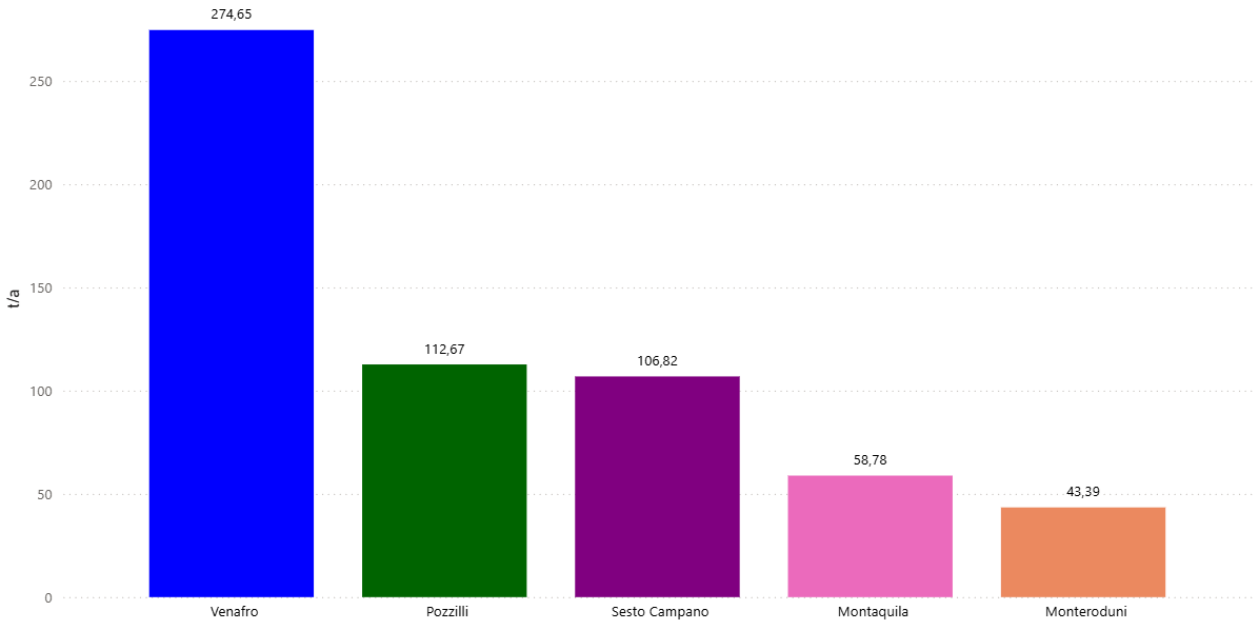


Grafico 22 - emissioni di COVNM

La Tabella 21 e il Grafico 23 evidenziano come le emissioni di COV non metanici nella piana di Venafro presentino una struttura articolata, con più macrosettori che contribuiscono in modo significativo al totale. Il macrosettore Combustione non industriale rappresenta il contributo principale, con 258.84 t/a, pari a circa 43% delle emissioni complessive, ed è particolarmente rilevante nel comune di Venafro, con contributi significativi anche a Pozzilli e Montaquila. Il secondo comparto per incidenza è l'uso di solventi, che totalizza 142.04 t/a (circa 24%), con valori elevati soprattutto nei comuni di Venafro e Pozzilli. Segue il macrosettore Agricoltura, che contribuisce con 85.09 t/a (circa 14%), con incidenze più marcate nei comuni di Venafro e Sesto Campano. I processi produttivi apportano 52.56 t/a (circa 9%), con un peso particolarmente rilevante a Sesto Campano. I trasporti stradali incidono per 24.23 t/a (circa 4%), con valori distribuiti in modo relativamente omogeneo tra i comuni, mentre la combustione industriale contribuisce con 23.85 t/a (circa 4%), concentrandosi quasi esclusivamente nel territorio di Sesto Campano. Le restanti categorie emissive - estrazione e distribuzione combustibili (4.59 t/a, circa 1%), altre sorgenti mobili (4.44 t/a, circa 1%) e trattamento e smaltimento rifiuti (0.66 t/a, incidenza trascurabile) - mostrano contributi più ridotti.

MACROSETTORE	Montaquila	Monteroduni	Pozzilli	Sesto Campano	Venafro	Totale
2 - Combustione - Non industriale	29.02	21.51	41.44	19.16	147.72	**258.84**
3 - Combustione - Industriale	0.12	0.00	0.00	23.58	0.14	**23.85**
4 - Processi Produttivi	4.20	3.20	2.75	34.79	7.62	**52.56**
5 - Estrazione. distribuzione combustibili fossili / geotermico	0.54	0.50	0.53	0.53	2.49	**4.59**
6 - Uso di solventi	18.35	7.74	53.48	5.72	56.75	**142.04**
7 - Trasporti Stradali	2.31	2.15	2.56	2.66	14.55	**24.23**
8 - Altre Sorgenti Mobili	0.41	0.41	1.36	0.53	1.72	**4.44**
9 - Trattamento e Smaltimento Rifiuti	0.06	0.07	0.09	0.09	0.35	**0.66**
10 - Agricoltura	3.77	7.80	10.46	19.76	43.30	**85.09**
Totale	**58.78**	**43.39**	**112.67**	**106.82**	**274.65**	**596.31**

Tabella 21 - emissioni di COVNM per Macrosettore per Comune (t/a)

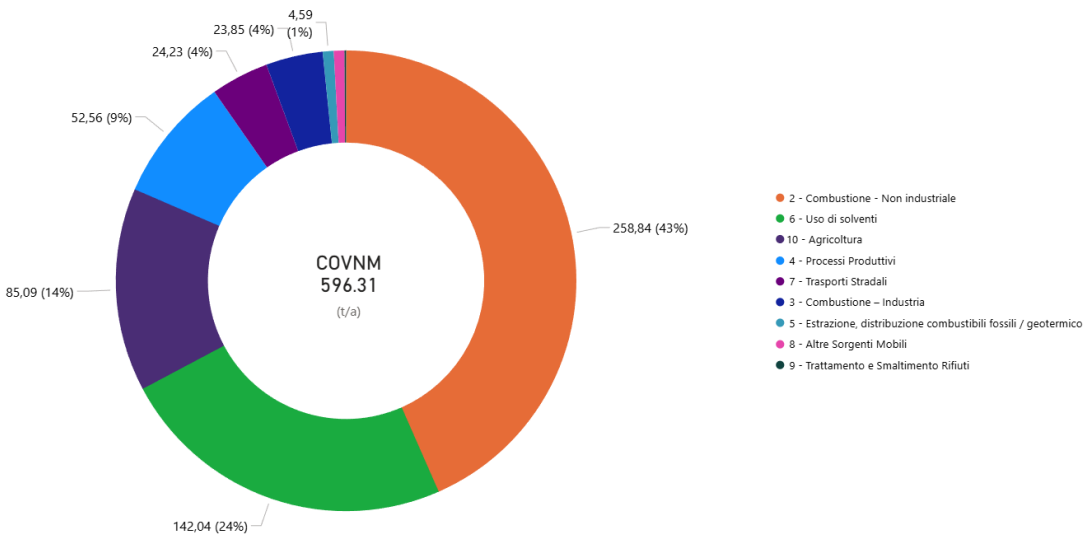


Grafico 23 - distribuzione % emissioni di COVNM per Macrosettore

Considerazioni emissioni di COVNM nella piana di Venafro

Il quadro emissivo dei COV non metanici nella piana di Venafro risulta articolato e policentrico, con più macrosettori che contribuiscono in modo significativo alle emissioni complessive. La combustione non industriale rappresenta la principale sorgente dell'area, con valori particolarmente elevati nel comune di Venafro e contributi rilevanti anche a Pozzilli e Montaquila. Un ruolo altrettanto importante è svolto dall'uso di solventi, che riflette la presenza di attività artigianali, produttive e di servizio distribuite sul territorio.

Ulteriori contributi significativi provengono dall'agricoltura e dai processi produttivi, con incidenze più marcate nei comuni di Sesto Campano e Venafro. La combustione industriale è presente quasi esclusivamente nel territorio di Sesto Campano, mentre i trasporti stradali incidono in misura più contenuta e relativamente uniforme. Le restanti categorie emissive assumono un ruolo marginale. Nel complesso, il sistema emissivo dei COVNM risulta diversificato, con più sorgenti rilevanti e differenze territoriali riconducibili alla diversa intensità delle attività civili e produttive.

7.4.8. Emissioni di CH_4 nella piana di Venafro

La distribuzione territoriale delle emissioni di metano nella piana di Venafro (Tabella 22) evidenzia una marcata polarizzazione, con due Comuni che concentrano la quota principale del totale. Venafro rappresenta la sorgente più rilevante, con 254.03 t/a, seguito da Sesto Campano, che registra 166.03 t/a e costituisce il secondo polo emissivo dell'area. Pozzilli (76.38 t/a) e Monteroduni (57.83 t/a) mostrano contributi intermedi, mentre Montaquila presenta il livello più contenuto (36.10 t/a), delineando un quadro in cui la maggior parte delle emissioni si concentra in pochi territori.

Il Grafico 24 e la mappa di Figura 9 confermano visivamente questa configurazione, mettendo in evidenza la distanza tra i due comuni a maggiore intensità emissiva e il resto dell'area. Pozzilli e Monteroduni si collocano su valori più moderati, mentre Montaquila si distingue per un contributo sensibilmente inferiore.

COMUNE	CH_4 (t/a)
Montaquila	36.10
Monteroduni	57.83
Pozzilli	76.38
Sesto Campano	166.03
Venafro	254.03

Tabella 22 - emissioni per Comune di CH_4

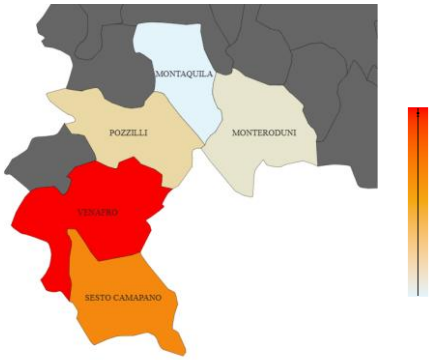


Figura 9 - distribuzione comunale emissioni di CH_4

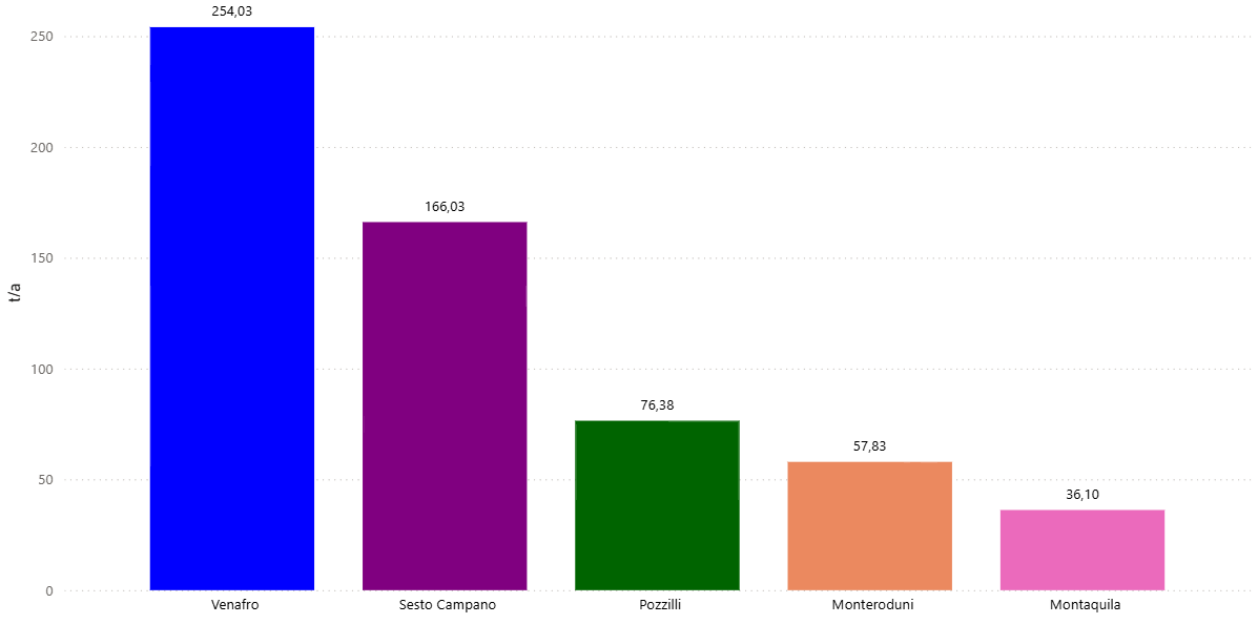


Grafico 24 - emissioni di CH_4

La Tabella 23 e il Grafico 25 mostrano che le emissioni di metano nella piana di Venafro sono dominate in modo molto netto da un'unica categoria emissiva. Il macrosettore Agricoltura rappresenta infatti il contributo largamente prevalente, con 454.85 t/a, pari a circa 77% delle emissioni complessive, e costituisce la principale sorgente in tutti i comuni, con valori particolarmente elevati nei territori di Venafro e Sesto Campano.

Il secondo contributo per importanza è quello della combustione non industriale, che totalizza 68.48 t/a (circa 12%), con valori distribuiti in modo relativamente omogeneo tra i comuni e con un'incidenza maggiore a Venafro. Seguono l'estrazione e distribuzione di combustibili fossili, con 24.26 t/a (circa 4%), e il comparto trattamento e smaltimento rifiuti, che contribuisce con 21.62 t/a (circa 4%) e mostra valori più elevati a Venafro. La combustione industriale apporta un contributo più contenuto, pari a 18.99 t/a (circa 2%), concentrato quasi esclusivamente nel territorio di Sesto Campano. I trasporti stradali incidono in misura marginale, con 1.86 t/a (circa 0.3%), mentre le altre sorgenti mobili presentano valori ridotti.

MACROSETTORE	Montaquila	Monteroduni	Pozzilli	Sesto Campano	Venafro	Totale
2 - Combustione - Non industriale	9.53	9.17	8.05	7.89	33.83	**68.48**
3 - Combustione - Industriale	0.07	0.00	0.00	18.90	0.02	**18.99**
4 - Processi Produttivi	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**
5 - Estrazione. distribuzione combustibili fossili / geotermico	2.87	2.64	2.78	2.79	13.18	**24.26**
6 - Uso di solventi	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**
7 - Trasporti Stradali	0.16	0.15	0.19	0.18	1.19	**1.86**
8 - Altre Sorgenti Mobili	0.028	0.026	0.103	0.036	0.112	**0.31**
9 - Trattamento e Smaltimento Rifiuti	2.54	2.36	2.49	2.50	11.74	**21.62**
10 - Agricoltura	20.90	43.49	62.77	133.73	193.96	**454.85**
Totale	**36.10**	**57.83**	**76.38**	**166.03**	**254.03**	**590.38**

Tabella 23 - emissioni di CH_4 per Macrosettore per Comune (t/a)

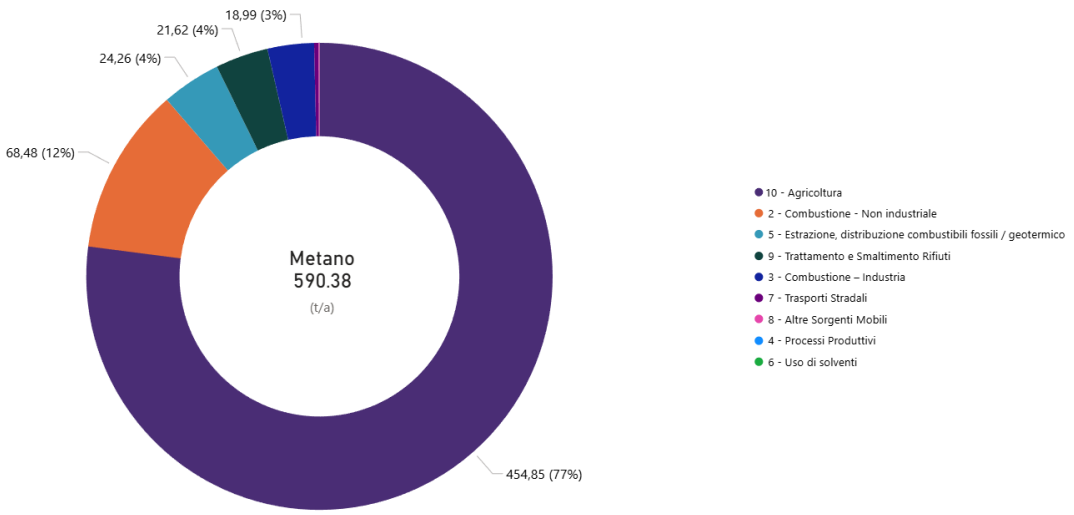


Grafico 25 - distribuzione % emissioni di CH_4 per Macrosettore

Considerazioni emissioni di CH_4 nella piana di Venafro

Il quadro emissivo del metano nella piana di Venafro è dominato in modo molto netto dal comparto agricolo, che rappresenta la principale sorgente in tutti i comuni. I valori più elevati si registrano nei territori di Venafro e Sesto Campano, che emergono come i due poli emissivi principali dell'area, mentre Pozzilli e Monteroduni mostrano contributi intermedi e Montaquila si colloca su livelli più contenuti.

Accanto al settore agricolo, un contributo secondario proviene dalla combustione non industriale, presente in tutti i comuni e riconducibile agli usi civili. Ulteriori apporti, più contenuti, derivano dall'estrazione e distribuzione dei combustibili fossili e dal trattamento e smaltimento dei rifiuti, con incidenze più marcate nei comuni di Venafro e Sesto Campano. La combustione industriale risulta circoscritta quasi esclusivamente al territorio di Sesto Campano, mentre i trasporti stradali e le altre sorgenti mobili assumono un ruolo marginale. Nel complesso, il sistema emissivo del metano risulta fortemente sbilanciato verso il settore agricolo, con contributi secondari limitati.

PARTE II

Monitoraggio della qualità dell'aria

8. Valutazione dei parametri di qualità dell'aria nei siti di campionamento

All'interno delle attività svolte, il monitoraggio degli inquinanti atmosferici classici costituisce il primo livello di analisi necessario per descrivere lo stato della qualità dell'aria nei siti selezionati.

Questa attività rappresenta la base su cui si innestano le successive valutazioni, comprese quelle più avanzate dedicate alla caratterizzazione del particolato.

La misurazione sistematica di sostanze come PM_{10}, NO_2, CO, O_3, SO_2 e benzene permette, infatti, di ottenere un quadro delle condizioni ambientali e di individuare eventuali criticità legate alle pressioni emissive presenti sul territorio. I dati raccolti nel periodo di campionamento costituiscono un elemento centrale per l'analisi delle dinamiche stagionali, consentendo una valutazione approfondita dell'evoluzione temporale delle concentrazioni. Tali dati non sono tuttavia utilizzabili per la verifica dei valori limite normativi, poiché il monitoraggio copre un periodo maggio 2024 - maggio 2025 che non coincide con l'anno solare previsto dalla normativa.

Accanto a tali misure, sono stati, inoltre, analizzati ulteriori parametri del particolato - quali componenti chimiche e traccianti utili a descriverne la composizione - indispensabili per la successiva applicazione del modello Positive Matrix Factorization e che saranno illustrati nella Parte III del documento.

8.1. PM_{10}

Il particolato atmosferico con diametro aerodinamico inferiore a 10 µm (PM_{10}) costituisce una delle principali frazioni del particolato sospeso ed è formato da una miscela eterogenea di componenti di origine sia primaria, sia secondaria. Le concentrazioni di PM_{10} sono influenzate da molteplici fattori, tra cui la variabilità delle sorgenti emissive, i processi di formazione in atmosfera e le condizioni meteorologiche che ne regolano il trasporto e la rimozione. La normativa nazionale sulla qualità dell'aria stabilisce un valore limite giornaliero (50 µg/m^3), soggetto a un numero massimo di superamenti per anno solare (35), e un valore limite annuale, 40 µg/m^3, calcolato come media delle concentrazioni giornaliere.

In questo capitolo vengono presentati i livelli di PM_{10} misurati nel periodo di monitoraggio, con particolare attenzione all'evoluzione temporale delle concentrazioni e alle differenze tra le diverse postazioni di misura.

Risultati monitoraggio PM_{10}

Il confronto tra le tre postazioni (Tabella 24) evidenzia differenze significative nei livelli di PM_{10}, sia in termini di concentrazioni medie, sia di frequenza dei superamenti del valore limite giornaliero. Pozzilli e Sesto Campano mostrano valori medi contenuti e un numero ridotto di superamenti, mentre Venafro presenta concentrazioni più elevate, un numero significativamente maggiore di superamenti giornalieri e i valori massimi più alti registrati nel periodo.

	Pozzilli	Sesto Campano	Venafro
giorni di campionamento	371	371	371
giorni con dati validi	333	348	350
percentuale giorni validi (%)	90	94	94
numero giorni superamenti	7	9	41
percentuale superamenti (%)	2	3	12
media PM_{10} periodo (µg/m^3)	19	23	29
massimo PM_{10} misurato (µg/m^3)	100	118	129

Tabella 24 - statistiche PM_{10}

Il periodo di monitoraggio è stato identico per tutte le postazioni (371 giorni), con percentuali di dati validi elevate: 90% a Pozzilli e 94% a Sesto Campano e Venafro. I superamenti del valore limite giornaliero risultano invece molto differenti: 7 a Pozzilli (2%), 9 a Sesto Campano (3%) e 41 a Venafro (12%), con percentuali calcolate rispetto ai giorni con dati validi di campionamento.
Anche le concentrazioni medie seguono lo stesso andamento (19 µg/m^3 a Pozzilli, 23 µg/m^3 a Sesto Campano e 29 µg/m^3 a Venafro), così come i valori massimi giornalieri (100, 118 e 129 µg/m^3 rispettivamente). Nel complesso, Pozzilli e Sesto Campano presentano livelli relativamente simili, mentre Venafro evidenzia concentrazioni più elevate, una frequenza di superamenti sensibilmente superiore e i valori massimi più alti registrati nel periodo.

Il Grafico 26, il Grafico 27 e il Grafico 28 mostrano l'andamento delle medie giornaliere rispettivamente a Pozzilli, Sesto Campano e Venafro.

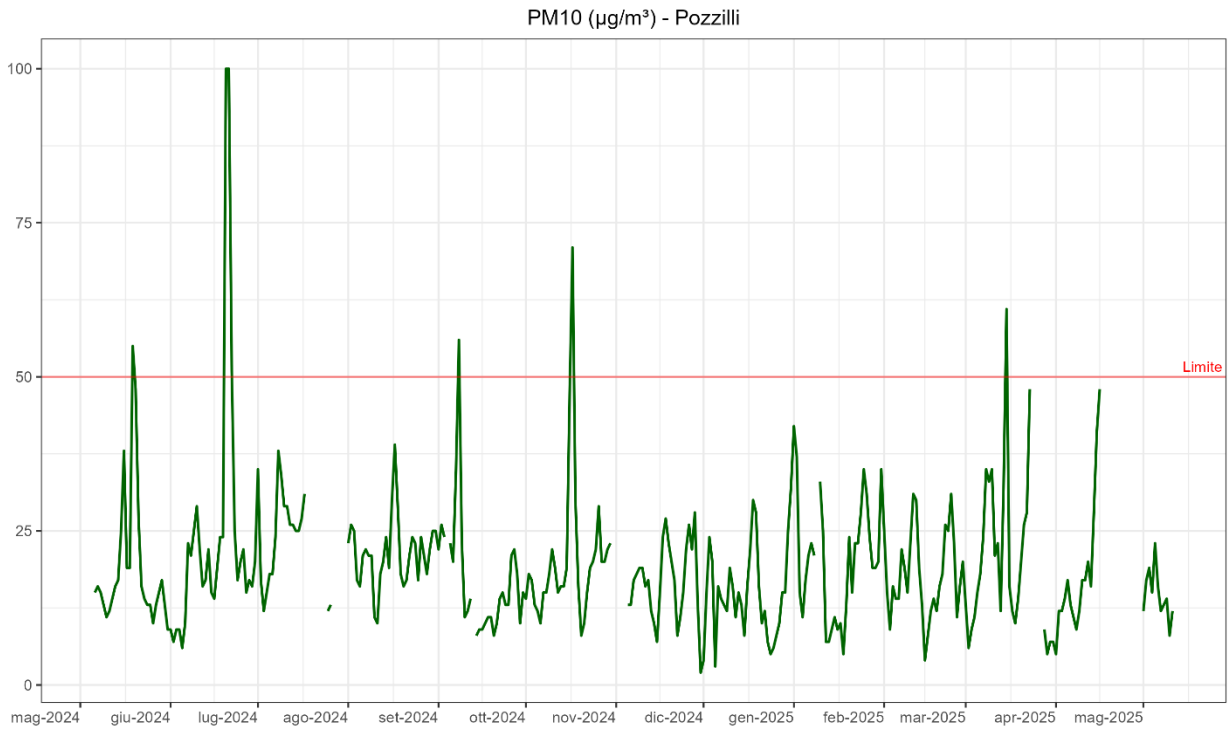


Grafico 26 - andamento temporale PM_{10} - Pozzilli

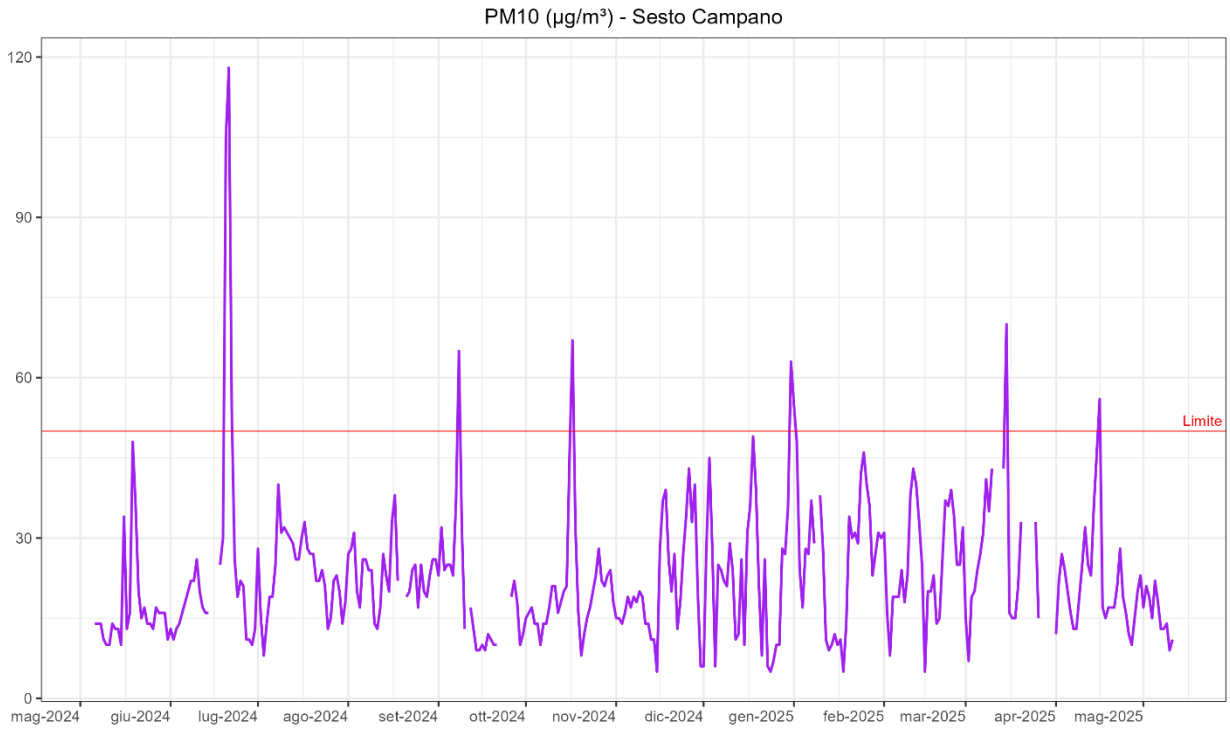


Grafico 27 - andamento temporale PM_{10} – Sesto Campano

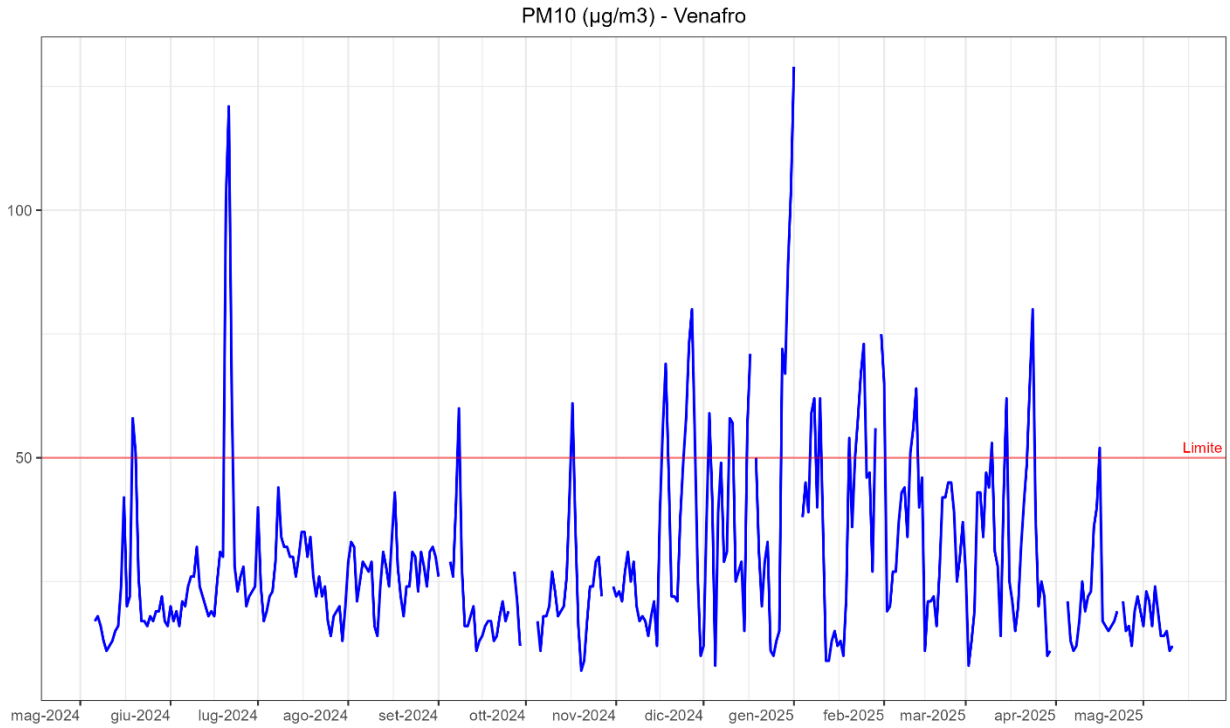


Grafico 28 - andamento temporale PM_{10} - Venafro

Il Grafico 29 mostra l'andamento giornaliero delle concentrazioni di PM_{10} nel periodo maggio 2024 - maggio 2025 per le tre postazioni di monitoraggio. Si osservano fluttuazioni stagionali con valori più elevati durante i mesi invernali (dicembre-febbraio), in particolare a Venafro, dove si registrano numerosi picchi superiori al valore limite giornaliero di 50 µg/m³. Gli andamenti di Pozzilli e Sesto Campano risultano più contenuti e meno soggetti a superamenti, confermando quanto già evidenziato dai dati aggregati. La linea rossa orizzontale consente di visualizzare immediatamente gli episodi di superamento, che risultano significativamente più frequenti e intensi nella postazione di Venafro.

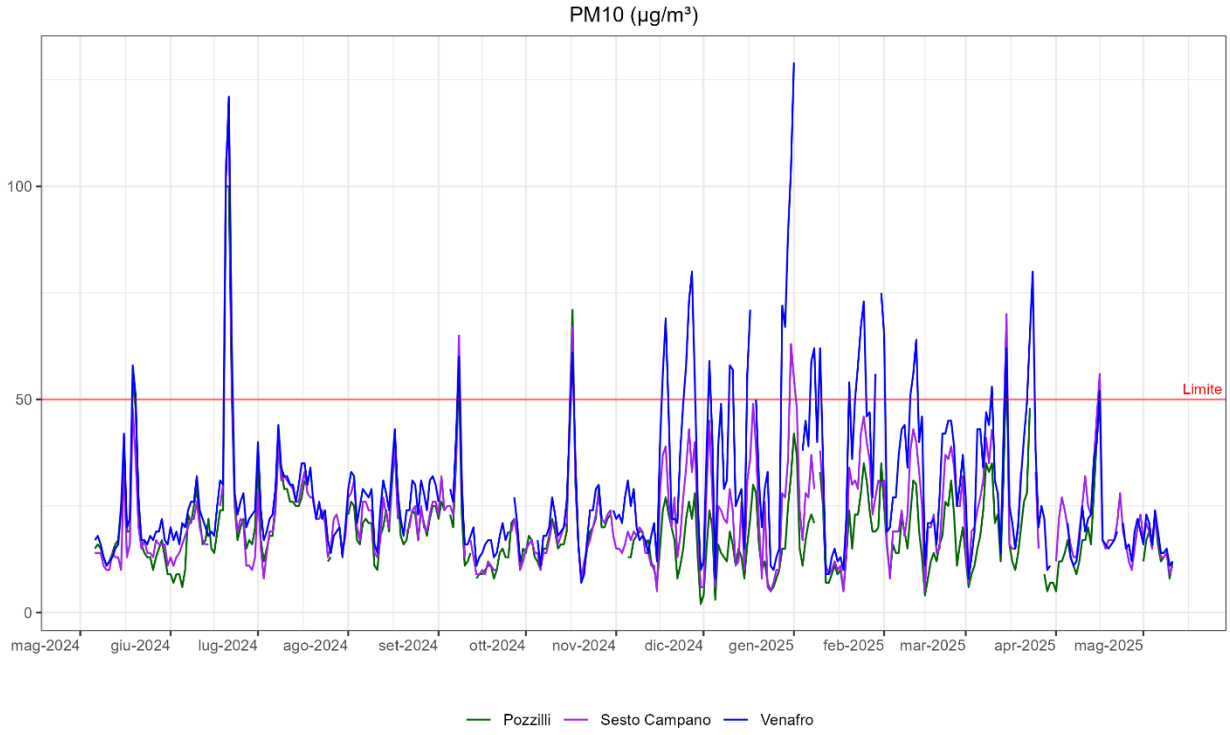


Grafico 29 - confronto andamenti temporali PM_{10} tra siti

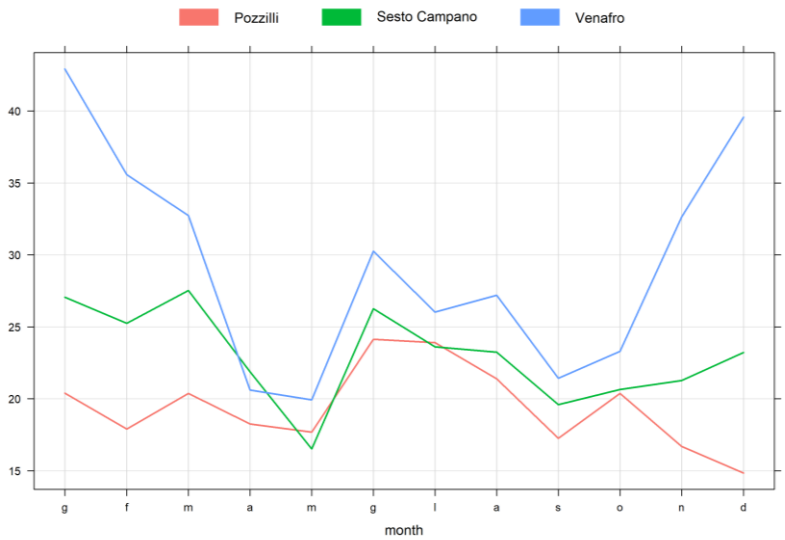


Grafico 30 - confronto tra siti medie mensili (µg/m³) PM_{10}

Il Grafico 30 mostra l'andamento mensile dei livelli di PM_{10} nelle tre postazioni di monitoraggio.

Venafro si distingue nettamente per le concentrazioni più elevate, con picchi evidenti nei mesi invernali, in particolare a gennaio e dicembre.

Sesto Campano mantiene un profilo più stabile, con variazioni contenute nel corso dell'anno.

Pozzilli presenta anch'esso un profilo abbastanza stabile con valori generalmente più bassi ed una leggera tendenza alla diminuzione verso fine anno. Nel complesso, il confronto mensile conferma quanto emerso nei paragrafi precedenti.

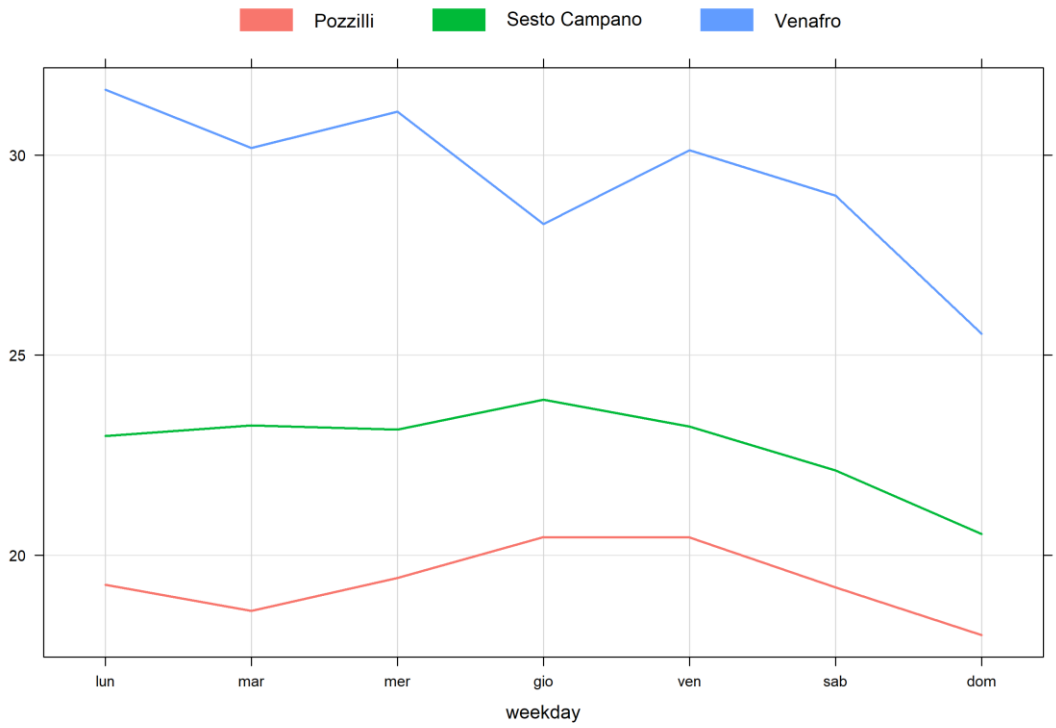


Grafico 31 - confronto tra siti settimana tipo (µg/m^3) PM_{10}

Il Grafico 31 mostra come variano i livelli di PM_{10} nelle tre postazioni di monitoraggio durante la settimana. Venafro si conferma la stazione con le concentrazioni più elevate, con valori elevati nei primi giorni della settimana e una graduale diminuzione verso il weekend. Sesto Campano presenta un andamento più stabile, con una tendenza al calo a partire dal venerdì. Pozzilli registra i valori più bassi, con una leggera fluttuazione a metà settimana e una tendenza al calo tra sabato e domenica. Nel complesso, il grafico suggerisce una certa variabilità settimanale, più marcata a Venafro, mentre le altre due postazioni mostrano un profilo più regolare.

Eventi di trasporto di polveri desertiche

Gli eventi di trasporto di polveri desertiche (dust events) rappresentano una delle principali sorgenti naturali di particolato atmosferico nel bacino del Mediterraneo. Durante tali episodi, masse d'aria provenienti dal Nord Africa trasportano particelle minerali in sospensione che possono determinare incrementi significativi delle concentrazioni di PM_{10} anche in aree lontane dalle sorgenti emissive locali.

L'analisi dell'influenza di questi fenomeni è essenziale per una corretta interpretazione dei dati di qualità dell'aria, poiché i contributi naturali possono generare superamenti del valore limite giornaliero indipendenti dalle emissioni antropiche.

Nel presente lavoro, i giorni di evento dust utilizzati per l'analisi sono quelli certificati da ISPRA, disponibili esclusivamente per l'anno 2024. Tali informazioni costituiscono il riferimento ufficiale nazionale per la valutazione del contributo naturale al particolato atmosferico.

Poiché gli episodi sono forniti solo per il 2024, l'evidenziazione grafica riguarda unicamente questo periodo. Per migliorare la leggibilità e rappresentare in modo più realistico la durata effettiva degli episodi, nel grafico gli intervalli di evento dust sono stati rappresentati tramite bande verticali grigie, estese al giorno precedente e al giorno successivo rispetto alla data ufficiale dell'episodio certificato.

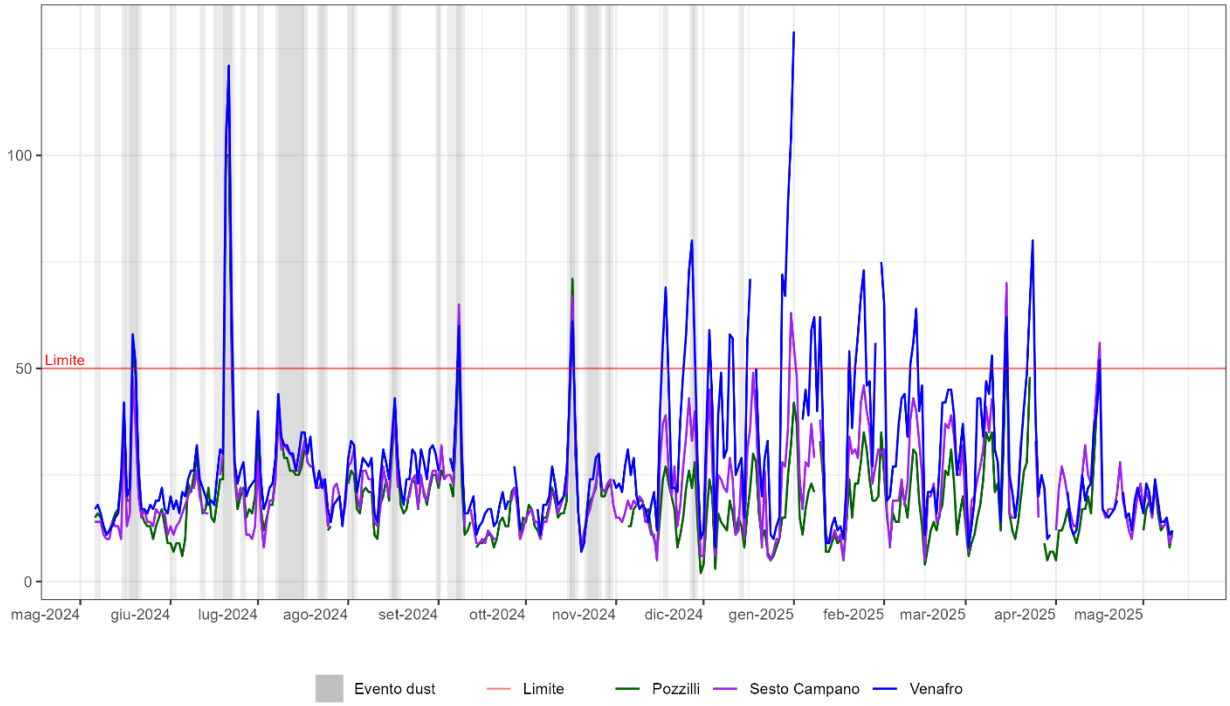


Grafico 32 - eventi dust

Il Grafico 32 mostra l'andamento giornaliero delle concentrazioni di PM_{10} nelle stazioni di Pozzilli, Sesto Campano, Venafro con gli episodi di dust.

Si osserva che alcuni incrementi delle concentrazioni, in particolare durante i mesi estivi del 2024, coincidono con gli episodi di trasporto di polveri desertiche. In questi periodi il contributo naturale può diventare determinante nel definire i valori osservati, arrivando talvolta a causare il superamento del valore limite giornaliero di 50 $\mu g/m^3$.

Durante l'estate 2024 si osserva un comportamento particolarmente rilevante. In questo periodo dell'anno, le concentrazioni di PM_{10} tendono fisiologicamente a mantenersi su livelli più bassi rispetto ai mesi invernali, grazie a condizioni meteorologiche più favorevoli alla dispersione degli inquinanti e all'assenza delle emissioni da riscaldamento domestico. Nonostante ciò, il grafico mostra alcuni superamenti del valore limite giornaliero proprio in corrispondenza degli episodi di trasporto di polveri desertiche certificati da ISPRA. Questo andamento, anomalo rispetto alla stagionalità tipica del PM_{10}, conferma il ruolo decisivo del contributo naturale nell'innalzamento temporaneo delle concentrazioni durante tali eventi.

8.2. NO_2

Il biossido di azoto (NO_2) è un inquinante atmosferico di primaria rilevanza, prodotto da processi di combustione e coinvolto in numerosi meccanismi di trasformazione chimica in atmosfera. Le sue concentrazioni presentano una variabilità temporale legata sia all'intensità delle sorgenti sia alle condizioni meteorologiche che ne influenzano la formazione e la distribuzione. La normativa nazionale sulla qualità dell'aria stabilisce valori limite per la protezione della salute umana, prevedendo un limite orario di 200 µg/m^3, da non superare più di 18 volte in un anno, ed un limite annuale di 40 µg/m^3.

In questo capitolo vengono presentati i livelli di NO_2 misurati nel periodo di monitoraggio, con particolare attenzione all'evoluzione temporale delle concentrazioni e alle differenze tra le diverse postazioni di misura.

Risultati monitoraggio NO_2

La Tabella 25 riassume gli indicatori principali delle concentrazioni di NO_2 nelle tre postazioni di monitoraggio. La percentuale di dati validi risulta elevata in tutte le stazioni, con valori compresi tra l'84% di Pozzilli e il 96% di Venafro. In nessuna delle tre postazioni si registrano superamenti del valore limite orario di 200 µg/m^3 (Grafico 33 - Grafico 35). La media del periodo evidenzia differenze nette tra i siti: Pozzilli presenta valori molto contenuti (4 µg/m^3), Sesto Campano si colloca su livelli intermedi (10 µg/m^3) e Venafro mostra le concentrazioni più elevate (20 µg/m^3). Anche i valori massimi confermano questo gradiente territoriale, con un massimo di 34 µg/m^3 a Pozzilli, 94 µg/m^3 a Sesto Campano e 91 µg/m^3 a Venafro.
I percentili[1] 95° e 98° mostrano la stessa distribuzione: Pozzilli mantiene valori bassi (10 e 13 µg/m^3), Sesto Campano presenta livelli intermedi (26 e 32 µg/m^3) e Venafro raggiunge i valori più alti (46 e 56 µg/m^3). Nel complesso, la tabella evidenzia un quadro coerente, con differenze marcate e stabili tra le tre postazioni.

	Pozzilli	Sesto Campano	Venafro
percentuale dati validi (%)	84	93	96
superamenti orari (>200 µg/m^3)	0	0	0
media NO_2 periodo (µg/m^3)	4	10	20
massimo NO_2 misurato (µg/m^3)	34	94	91
percentile 95° (µg/m^3)	10	26	46
percentile 98° (µg/m^3)	13	32	56

Tabella 25 - statistiche NO_2

[1] I percentili rappresentano valori statistici che descrivono la distribuzione delle concentrazioni misurate. Il 95° percentile indica il valore al di sotto del quale si colloca il 95% delle osservazioni, mentre il 98° percentile rappresenta il valore superato solo dal 2% dei dati. Questi indicatori consentono di valutare la presenza di valori elevati occasionali e di caratterizzare la parte alta della distribuzione, integrando le informazioni fornite dalla media e dai valori massimi.

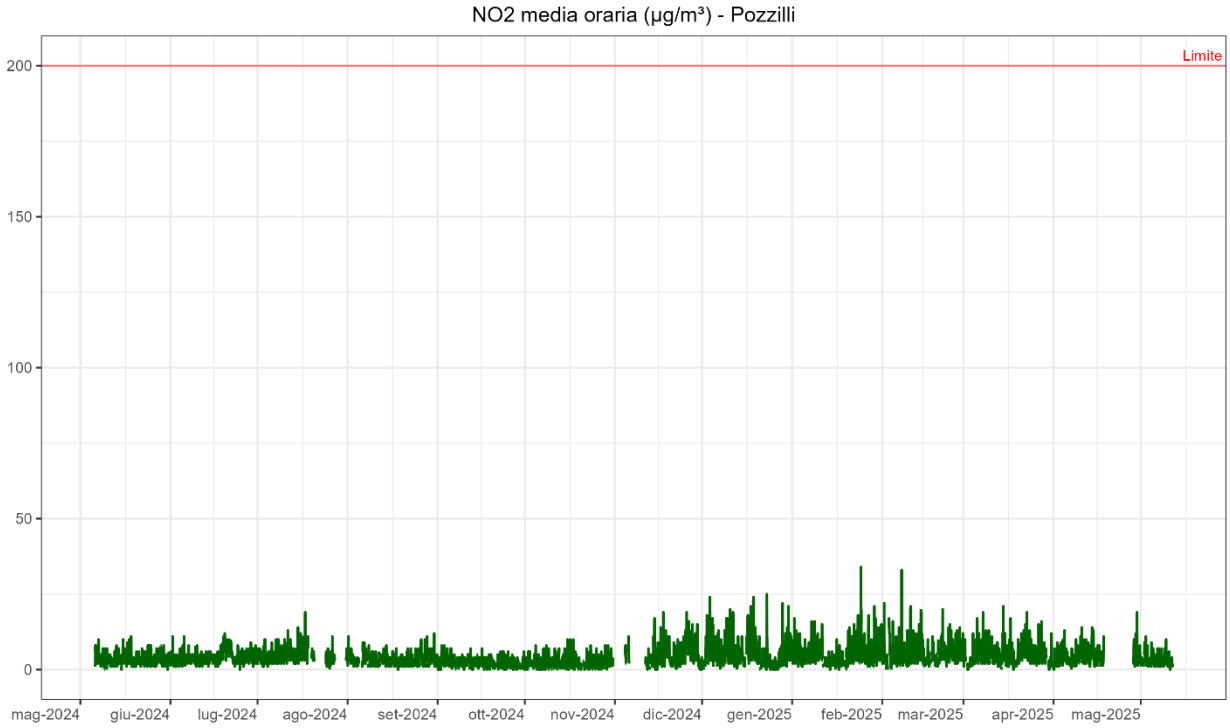


Grafico 33 - andamento temporale NO_2 - Pozzilli

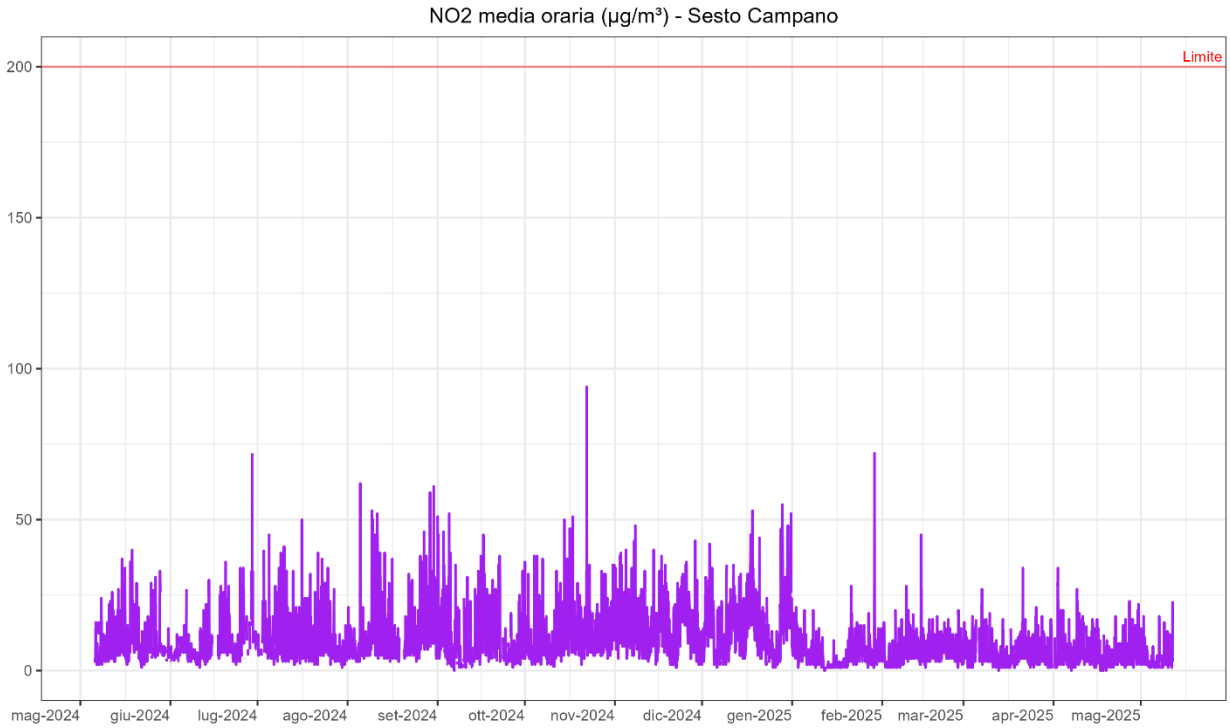


Grafico 34 - andamento temporale NO_2 - Sesto Campano

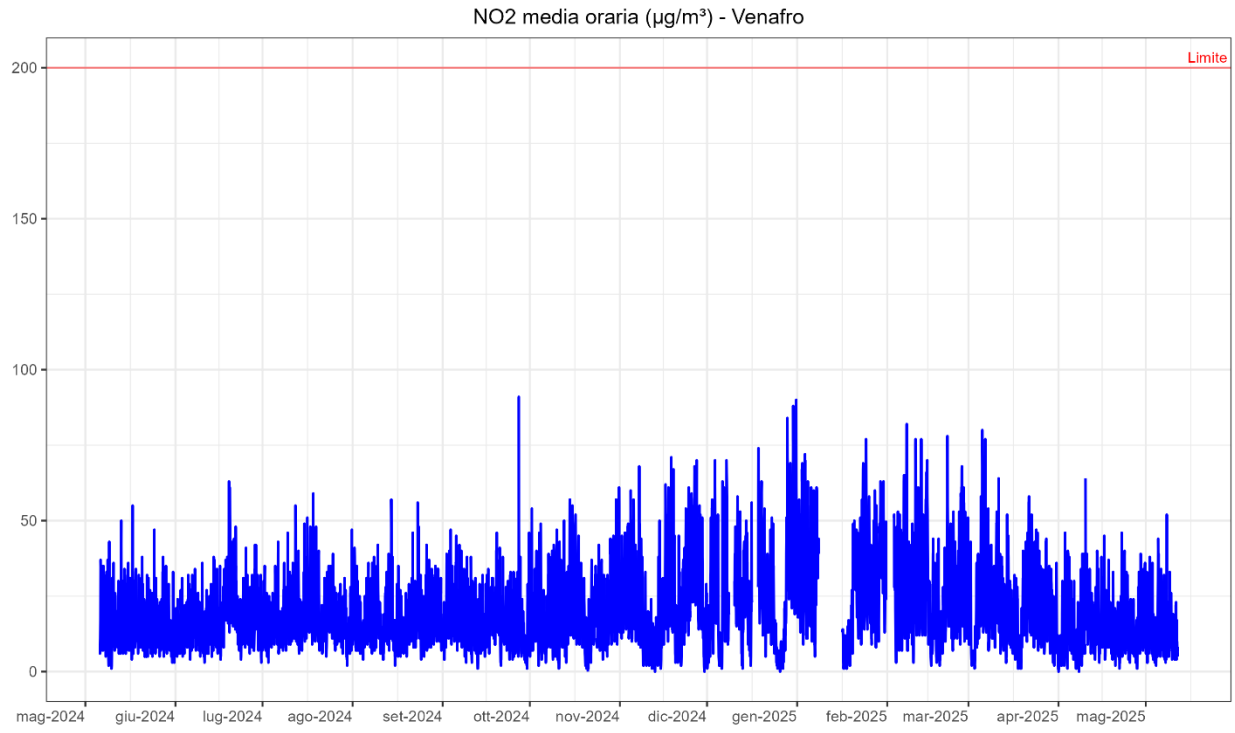


Grafico 35 - andamento temporale NO_2 - Venafro

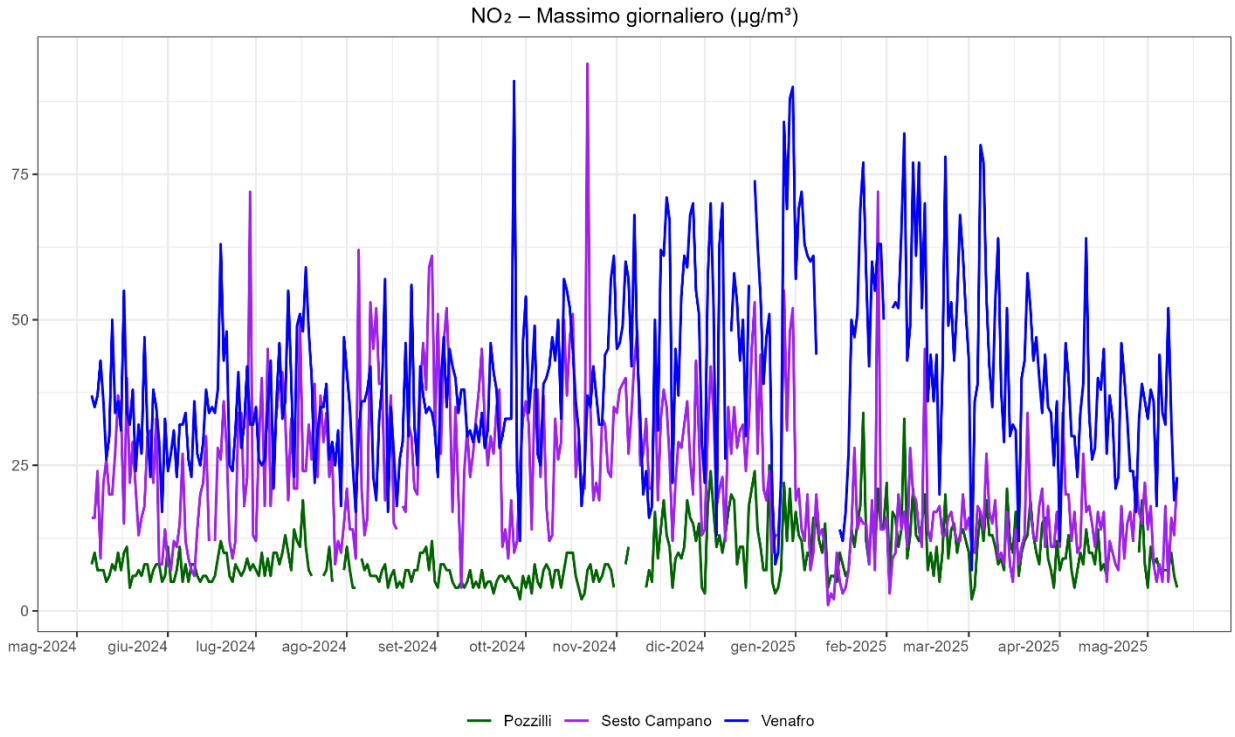


Grafico 36 - confronto massima media oraria giornaliera NO_2 tra siti

Il Grafico 36 mostra l'andamento delle medie massime giornaliere delle concentrazioni di NO_2 nel periodo di monitoraggio. Venafro è la postazione con i valori più elevati, mantenendo livelli superiori rispetto a Pozzilli e Sesto Campano per l'intera durata del monitoraggio. Le concentrazioni presentano una certa variabilità

stagionale, con fluttuazioni più marcate nei mesi invernali. Sesto Campano mostra un profilo intermedio, mentre Pozzilli registra i valori più contenuti e stabili.

Nel complesso, il grafico evidenzia un gradiente territoriale netto e una dinamica temporale coerente con quanto osservato nella tabella dei dati aggregati.

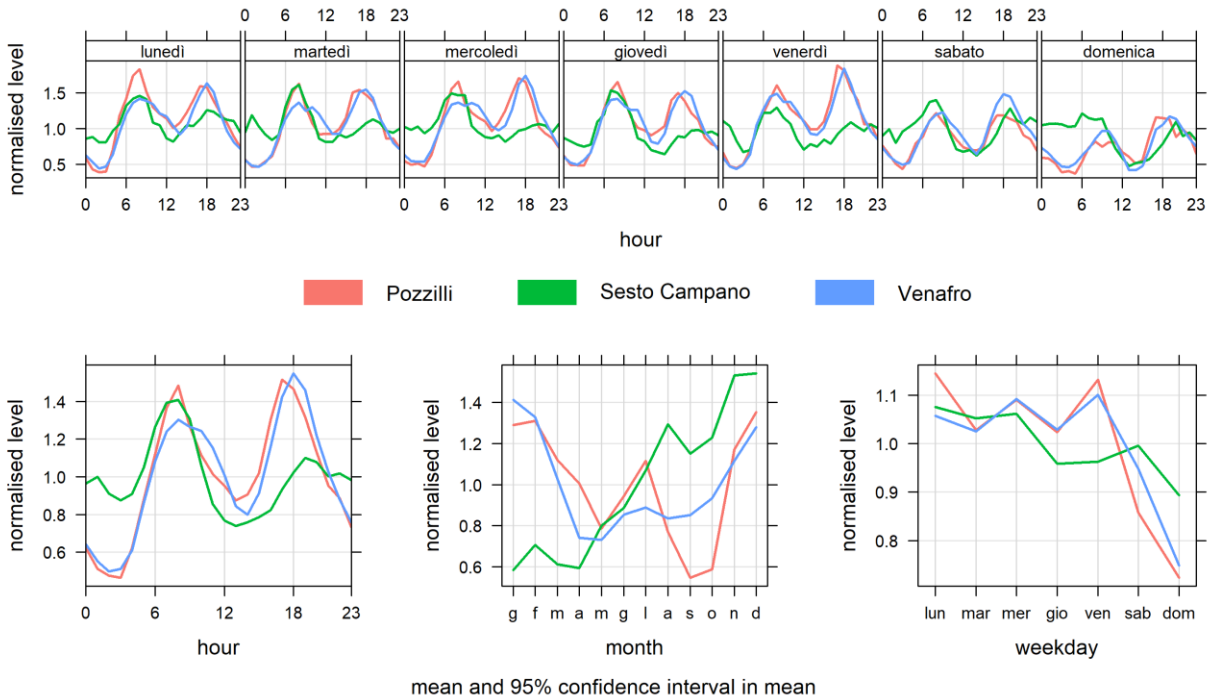


Grafico 37 - confronto andamenti tipici NO_2 tra siti

Il Grafico 37 mostra l'andamento normalizzato delle concentrazioni di NO_2 nelle tre postazioni di monitoraggio, analizzato su diverse scale temporali. Il profilo orario evidenzia una dinamica simile per tutte le stazioni, con valori più elevati nelle prime ore del mattino e nel tardo pomeriggio, coerenti con le fasce di maggiore traffico veicolare. Si osserva tuttavia che a Sesto Campano il picco serale tende a verificarsi leggermente più tardi rispetto a Venafro e Pozzilli, comportamento che si ripresenta anche nei giorni feriali.

L'analisi per giorno della settimana mostra una leggera flessione nei fine settimana, più marcata a Venafro, mentre il grafico mensile evidenzia una stagionalità ben definita, con concentrazioni più alte nei mesi invernali e più basse in estate.

Nel complesso, i grafici confermano il gradiente territoriale già osservato: Venafro presenta livelli sistematicamente più elevati, Sesto Campano si colloca su valori intermedi e Pozzilli mostra le concentrazioni più contenute. Questo stesso schema si ritrova nei profili orari, settimanali e mensili, indicando che le differenze tra le tre postazioni si mantengono lungo tutte le scale temporali analizzate.

8.3. Ozono

L'ozono troposferico (O_3) è un inquinante secondario che si forma in atmosfera attraverso reazioni fotochimiche che coinvolgono ossidi di azoto (NO_X) e composti organici volatili (COV) in presenza di radiazione solare. A differenza degli inquinanti primari, l'O_3 non viene emesso direttamente da sorgenti antropiche e presenta una dinamica giornaliera caratteristica, con un incremento nelle ore centrali della giornata, un massimo nel pomeriggio e una diminuzione nelle ore serali e notturne.

Dal punto di vista normativo, la legislazione vigente prevede un valore obiettivo per la protezione della salute umana, definito come la massima media mobile su 8 ore giornaliera da non superare più 18 volte nell'anno civile, come media su 3 anni.

Risultati monitoraggio O_3

La Tabella 26 mostra il quadro delle concentrazioni di ozono nelle tre postazioni di monitoraggio. La disponibilità di dati è molto elevata in tutte le stazioni, con valori compresi tra l'89% di Pozzilli e il 98% di Sesto Campano. Il numero di superamenti giornalieri della media mobile su 8 ore evidenzia differenze marcate: Sesto Campano registra il numero più elevato di superamenti (47), seguito da Pozzilli (15), mentre a Venafro non si osservano superamenti del valore obiettivo.

Le medie del periodo confermano questo gradiente, con valori più elevati a Sesto Campano (58 µg/m³) e Pozzilli (51 µg/m³), mentre Venafro presenta livelli più contenuti (35 µg/m³). Anche i valori massimi e i percentili 95° e 98° seguono la stessa distribuzione, indicando che gli episodi di concentrazioni più elevate si verificano prevalentemente nelle prime due stazioni. Nel complesso, la tabella evidenzia differenze tra i siti, che saranno ulteriormente approfondite attraverso l'analisi dei grafici orari, settimanali e mensili.

	Pozzilli	Sesto Campano	Venafro
percentuale dati validi (%)	89	98	95
superamenti media mobile 8h (>120 µg/m³)	15	47	0
media O3 periodo (µg/m³)	51	58	35
massimo O3 misurato (µg/m³)	169	203	114
percentile 95° (µg/m³)	108	117	78
percentile 98° (µg/m³)	121	131	86

Tabella 26 - statistiche O_3

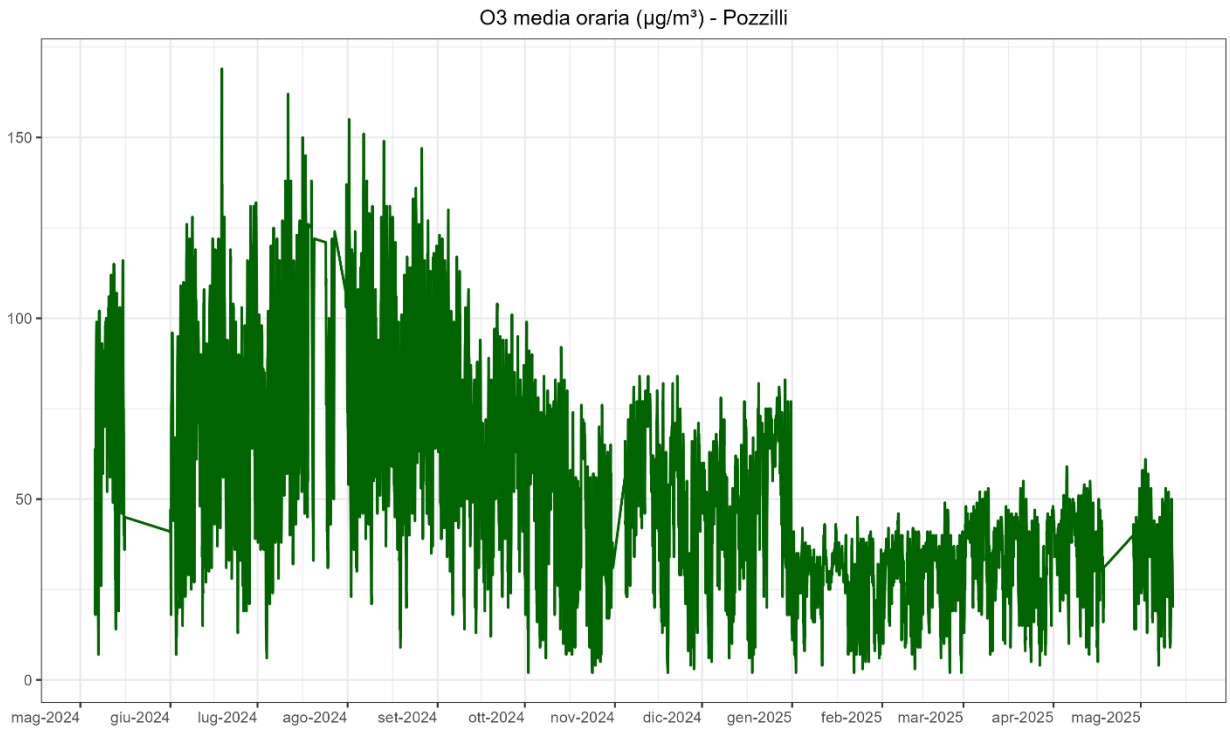


Grafico 38 - andamento temporale O_3 - Pozzilli

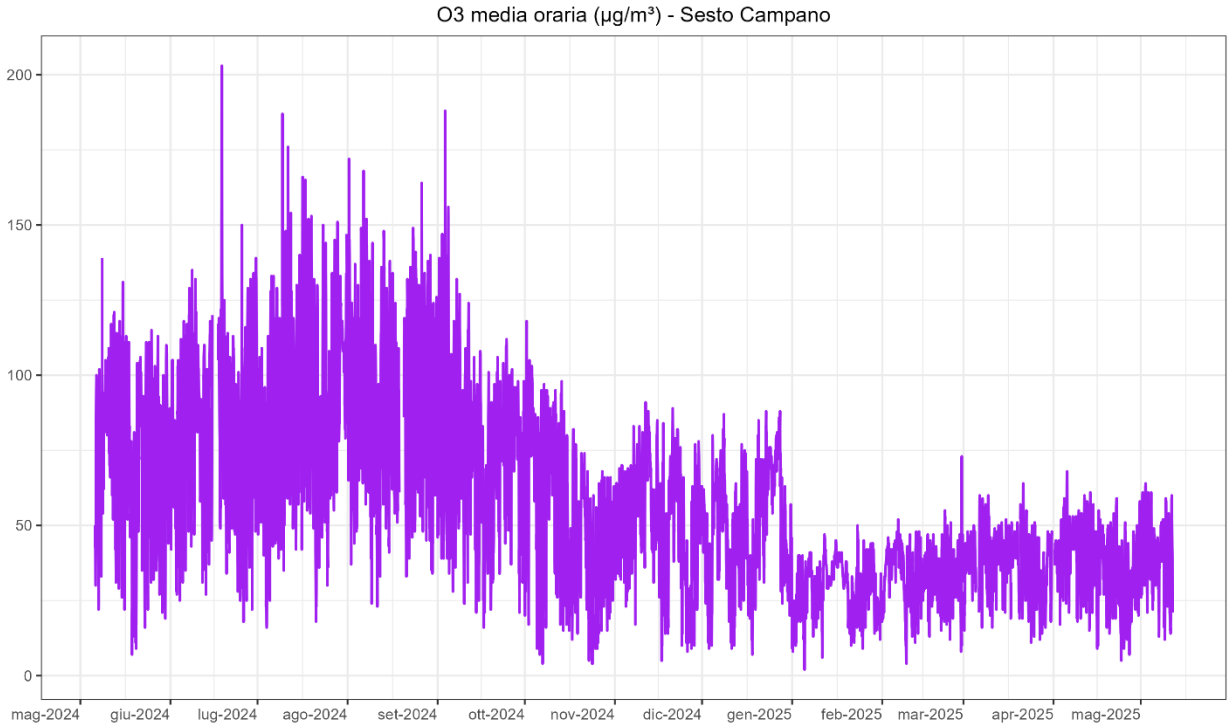


Grafico 39 - andamento temporale O_3 - Sesto Campano

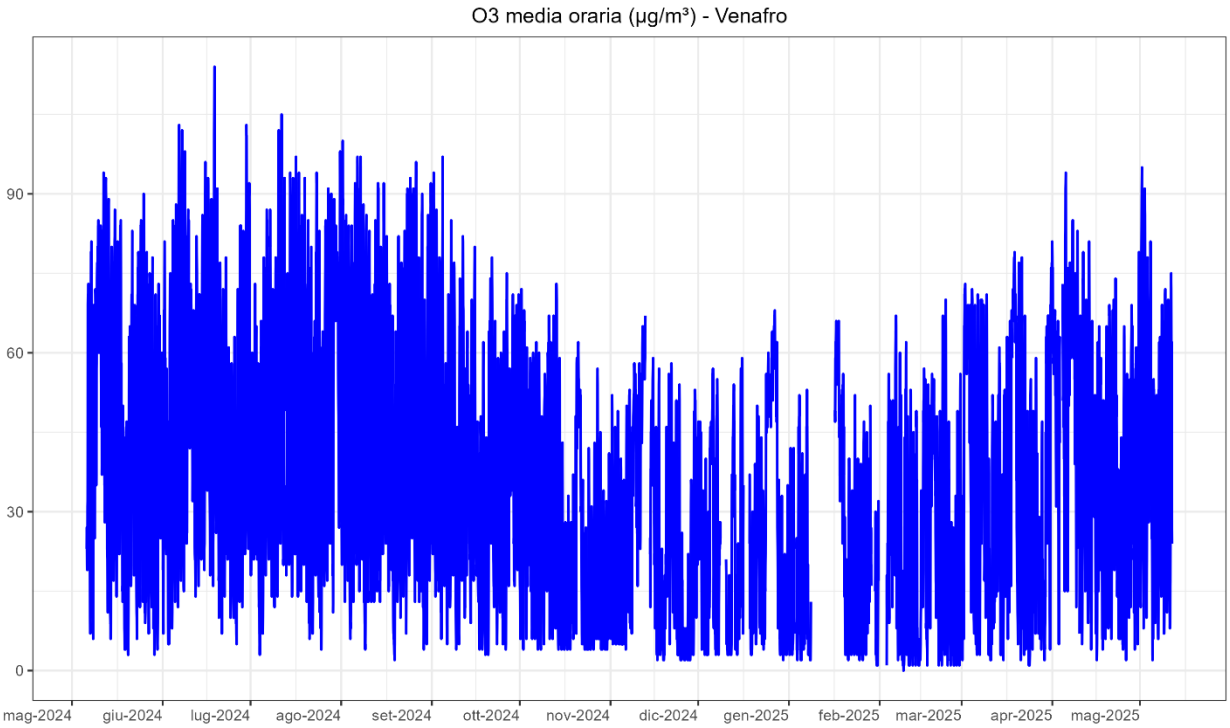


Grafico 40 - andamento temporale O_3 - Venafro

Il Grafico 41 illustra l'andamento temporale del massimo giornaliero delle concentrazioni di ozono nel periodo di monitoraggio per le tre stazioni (Pozzilli, Sesto Campano, Venafro). L'evoluzione stagionale è pienamente coerente con la dinamica fotochimica dell'O_3.

Le concentrazioni più elevate si registrano tra giugno e settembre 2024, quando l'intensa radiazione solare, le temperature più alte e condizioni atmosferiche più stabili favoriscono la formazione dell'ozono troposferico. Nel periodo ottobre 2024 - febbraio 2025 i livelli diminuiscono in modo marcato, riflettendo la ridotta efficienza dei processi fotochimici durante la stagione fredda.

Tra i siti monitorati, Pozzilli presenta valori mediamente più elevati nei mesi estivi, mentre Sesto Campano e Venafro mostrano andamenti molto simili tra loro.

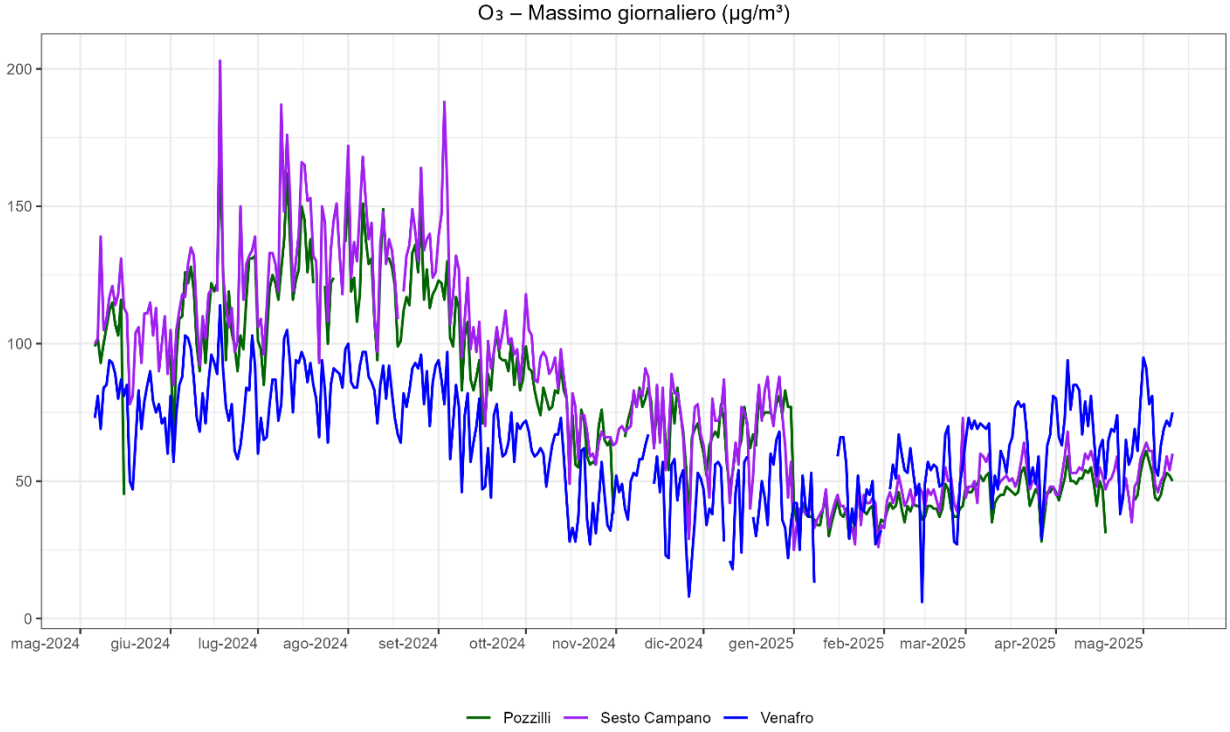


Grafico 41 - confronto andamenti massimi medie orarie giornaliere O_3 tra siti

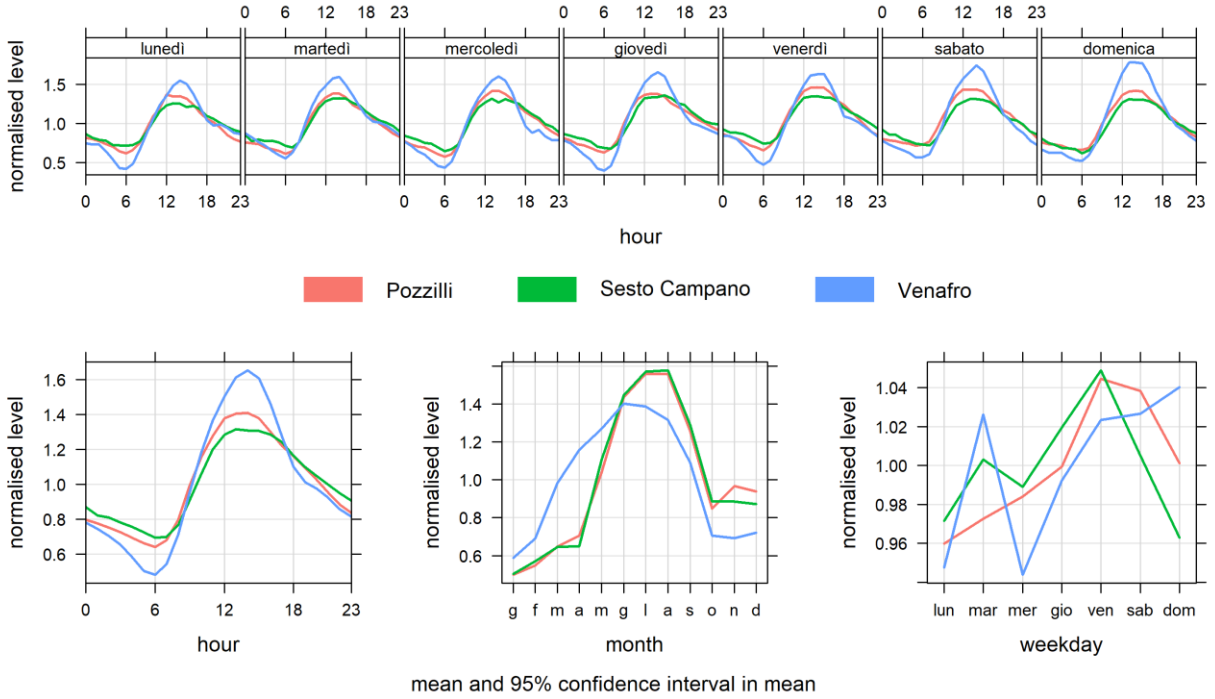


Grafico 42 - confronto andamenti tipici O_3 tra siti

Il Grafico 42 mostra l'andamento normalizzato delle concentrazioni di O_3 nelle tre postazioni di monitoraggio, analizzato su diverse scale temporali. Il profilo orario evidenzia una dinamica molto regolare e sostanzialmente sovrapponibile tra i tre siti: i valori risultano minimi nelle ore notturne e nelle prime ore del mattino, crescono progressivamente nel corso della giornata e raggiungono il massimo nel primo pomeriggio, in corrispondenza delle condizioni di maggiore irraggiamento solare. Questo schema si ripete in modo analogo in tutti i giorni della settimana, senza differenze significative tra feriali e festivi, a conferma del ruolo dominante dei processi fotochimici rispetto alle variazioni giornaliere delle emissioni.

Il profilo mensile mostra una stagionalità ben definita, con livelli più elevati nei mesi estivi e più bassi nel periodo invernale. Tale andamento riflette l'efficienza dei processi di formazione dell'ozono, che dipendono fortemente dalla radiazione solare, dalla temperatura e dalla stabilità atmosferica. Le tre stazioni presentano un comportamento molto simile lungo l'intero ciclo annuale, con differenze contenute.

Nel complesso, i grafici confermano che la struttura temporale dell'O_3 è pressoché identica nei tre siti: il ciclo diurno, settimanale e stagionale mostra la stessa forma e la stessa evoluzione, indicando che le differenze tra le postazioni riguardano principalmente i livelli assoluti e non la dinamica del fenomeno. Questo comportamento è pienamente coerente con quanto atteso per aree rurali e suburbane, dove l'ozono presenta una variabilità fortemente guidata dai fattori meteorologici e fotochimici.

8.4. Benzene

Il benzene è un inquinante di origine prevalentemente antropica, associato alle emissioni da traffico veicolare e ad alcune attività industriali e ai processi di combustione. Nel contesto territoriale analizzato, i livelli osservati risultano generalmente contenuti e caratterizzati da una variabilità temporale limitata.

Risultati monitoraggio benzene

La Tabella 27 riassuntiva mostra valori medi annui e mensili ampiamente inferiori al valore limite annuale di 5 µg/m^3 previsto dalla normativa vigente. Le differenze tra le postazioni di monitoraggio sono modeste e non indicano particolari criticità locali. L'assenza di picchi significativi e la stabilità dei valori nel corso dell'anno confermano un quadro emissivo relativamente costante e privo di contributi anomali.

Nel complesso, i livelli di benzene risultano pienamente coerenti con il contesto territoriale e non evidenziano superamenti né situazioni di potenziale rischio rispetto ai limiti normativi.

	Pozzilli	Sesto Campano	Venafro
percentuale dati validi (%)	80	84	95
media benzene. periodo (µg/m^3)	0.09	0.85	0.63
massimo benzene misurato periodo (µg/m^3)	0.72	31.62	13.81
percentile 95 periodo (µg/m^3)	0.25	2.60	2.11
percentile 98 periodo (µg/m^3)	0.34	4.71	3.93

Tabella 27 - statistiche benzene

Le concentrazioni di benzene registrate nelle tre stazioni mostrano livelli generalmente contenuti, con differenze marcate tra i siti dovute sia alle caratteristiche emissive locali sia alla diversa intensità del traffico.

La percentuale di dati validi è buona in tutte le stazioni (80-95%), garantendo una rappresentatività adeguata delle serie temporali.

Le medie del periodo risultano molto basse a Pozzilli (0.09 µg/m^3) e più elevate a Sesto Campano (0.85 µg/m^3) e Venafro (0.63 µg/m^3), ma comunque ampiamente inferiori al valore limite annuale di 5 µg/m^3.

I massimi orari mostrano differenze significative: Pozzilli: 0.72 µg/m^3, Sesto Campano: 31.62 µg/m^3, Venafro: 13.81 µg/m^3.

I valori più elevati di Sesto Campano e Venafro sono tipici di episodi puntuali, spesso legati a condizioni locali. I percentili 95° e 98° confermano la presenza di una distribuzione più ampia a Sesto Campano e Venafro, con valori che rimangono comunque molto inferiori ai livelli critici: 95° percentile: 0.25 - 2.60 µg/m^3 - 98° percentile: 0.34 - 4.71 µg/m^3

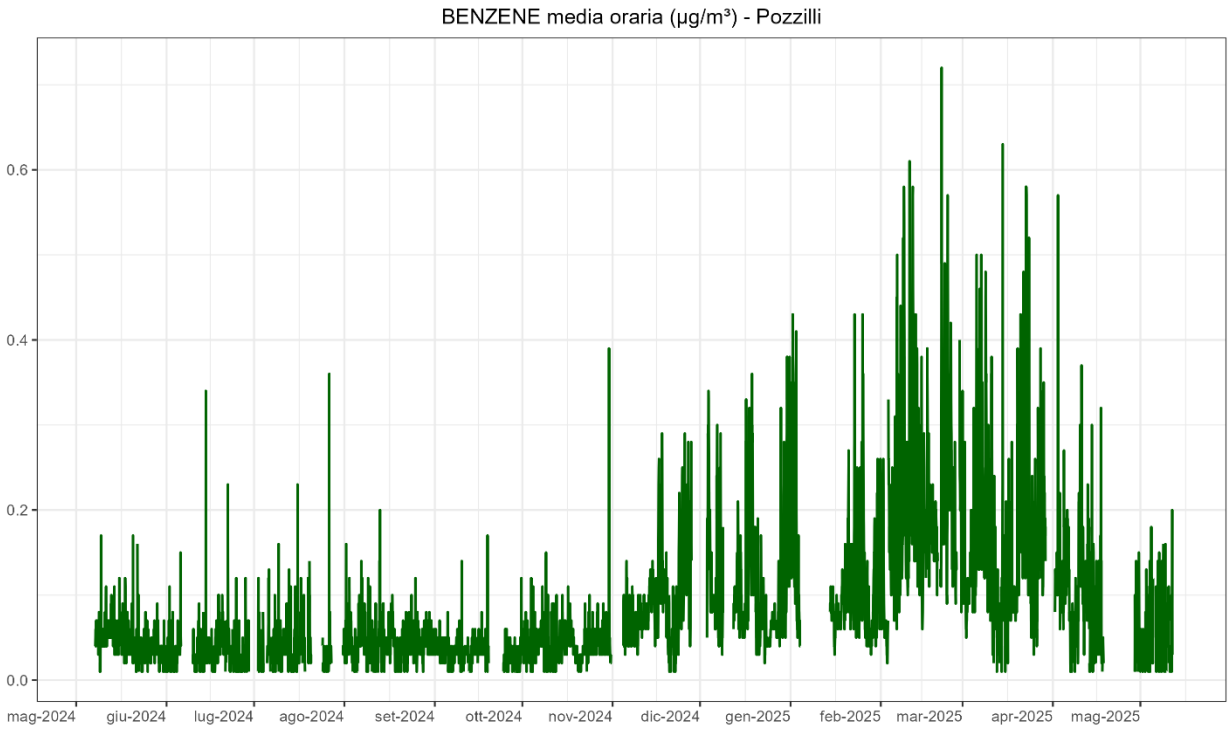


Grafico 43 - andamento temporale benzene - Pozzilli

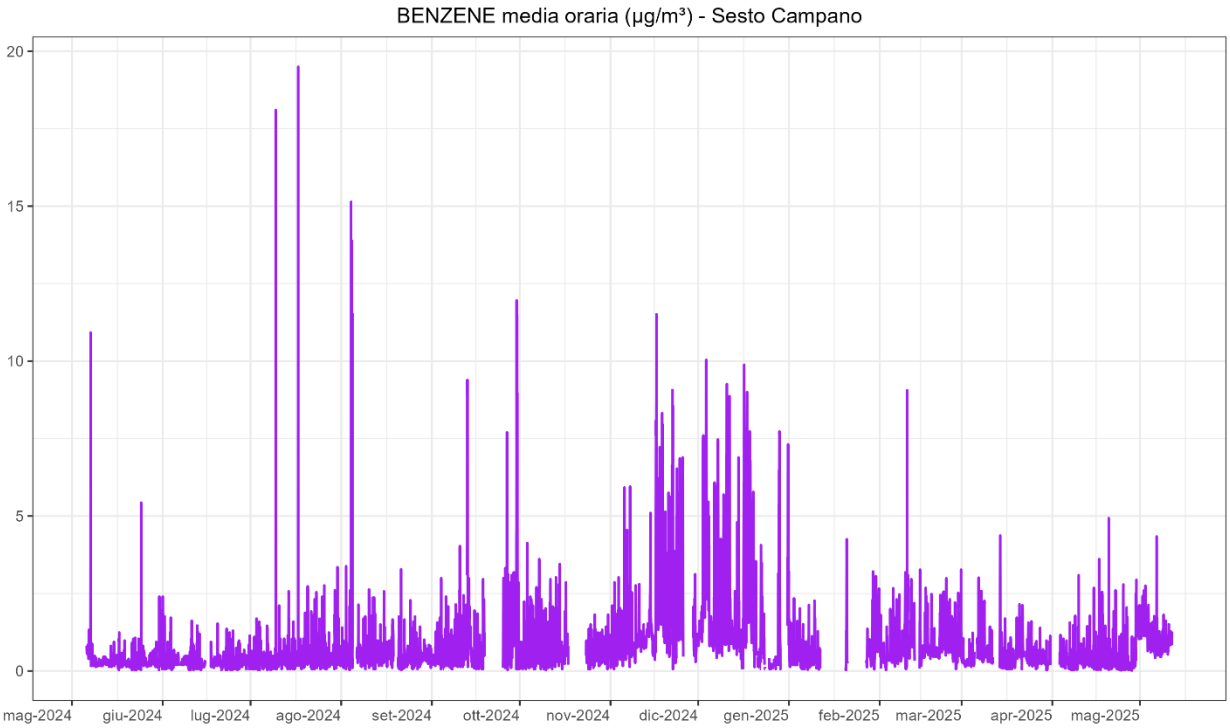


Grafico 44 - andamento temporale benzene - Sesto Campano

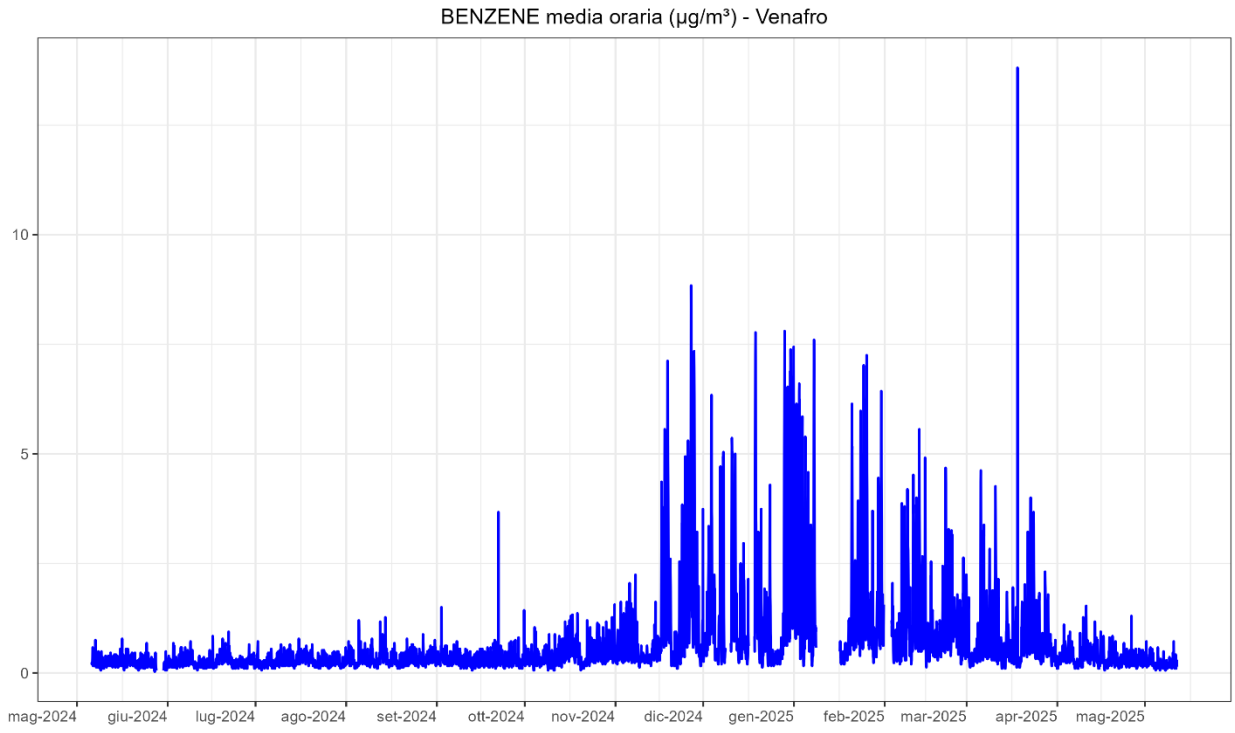


Grafico 45 - andamento temporale benzene - Venafro

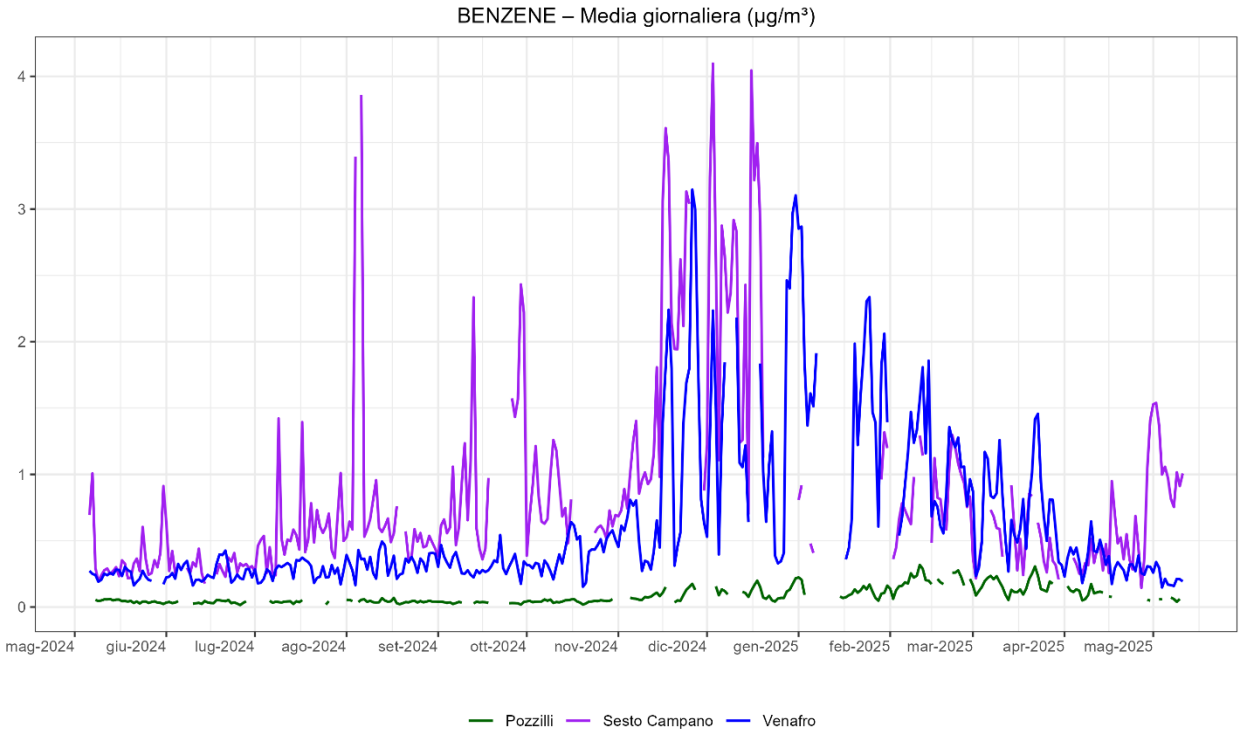


Grafico 46 - confronto andamenti temporali benzene tra siti

L'andamento temporale riportato nei grafici del benzene (Grafico 43 - Grafico 46) mostra tre comportamenti nettamente distinti, che riflettono la diversa natura emissiva delle aree monitorate.

Pozzilli presenta un profilo estremamente stabile e quasi piatto per l'intero periodo. Le concentrazioni rimangono costantemente molto basse, senza variazioni stagionali significative. Questo indica un contesto emissivo limitato e un contributo minimo da sorgenti locali.

Sesto Campano e Venafro mostrano invece un andamento più marcato nei mesi invernali. In entrambe le stazioni si osserva un incremento evidente delle concentrazioni durante la stagione fredda, un comportamento tipico degli inquinanti organici volatili in presenza di condizioni meteorologiche sfavorevoli alla dispersione e di possibili sorgenti specifiche legate alla combustione.

Gli episodi estivi più intensi, presenti soprattutto a Sesto Campano, appaiono come eventi isolati e localizzati, non rappresentativi dell'andamento stagionale complessivo. Il quadro generale rimane dominato dalla componente invernale, che caratterizza in modo più strutturale il comportamento del benzene nelle due stazioni.

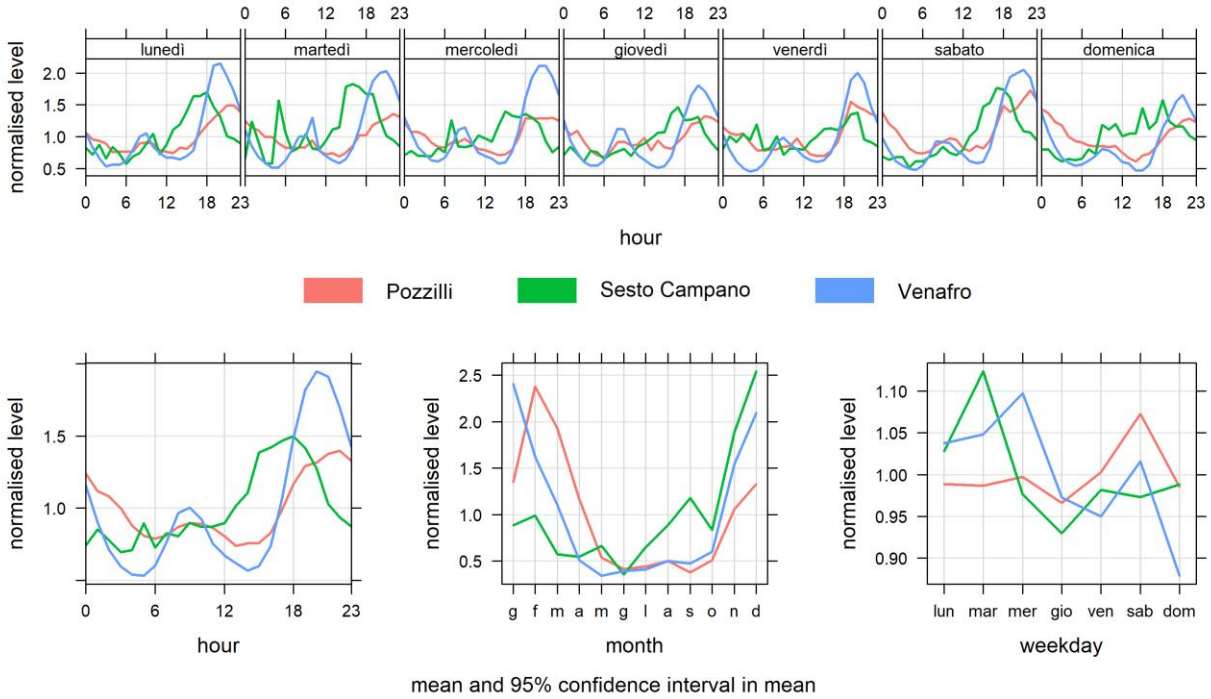


Grafico 47 - confronto andamenti tipici benzene tra siti

I profili normalizzati (Grafico 47) mostrano differenze nette tra le tre stazioni. Pozzilli presenta un andamento stabile e poco variabile, indicativo di un contributo emissivo locale molto limitato. Sesto Campano e Venafro mostrano invece una variabilità più marcata, con un incremento evidente nei mesi invernali e un ciclo giornaliero più strutturato. Si osserva inoltre uno sfasamento dei picchi tra i siti: i massimi non si verificano simultaneamente, ma seguono tempistiche diverse. Questo comportamento suggerisce che le tre aree rispondono a regimi emissivi non omogenei e a condizioni micro-meteorologiche differenti (ventilazione, orografia, inversioni), che modulano in modo diverso l'accumulo e la dispersione degli inquinanti. Lo sfasamento conferma quindi la presenza di dinamiche locali specifiche e non sincronizzate tra le stazioni.

8.5. SO_2 e CO

In questo capitolo vengono analizzati anidride solforosa (SO_2) e monossido di carbonio (CO), due inquinanti che, nel contesto territoriale considerato, presentano livelli contenuti e una variabilità temporale

limitata. Per questo motivo, l'analisi si concentra principalmente sui valori riassuntivi annuali e stagionali, riportati nelle tabelle, che risultano sufficienti a descrivere in modo completo il loro comportamento nel periodo di monitoraggio.

A differenza, infatti, degli inquinanti primari maggiormente variabili (PM_{10}, NO_2) o di quelli a forte dinamica fotochimica (O_3), SO_2 e CO mostrano pattern più stabili.

8.5.1. SO_2

L'anidride solforosa è un inquinante tipicamente associato alla combustione di combustibili contenenti zolfo, in particolare nel settore industriale e termoelettrico. Negli ultimi decenni, grazie alla progressiva riduzione del contenuto di zolfo nei combustibili e all'evoluzione tecnologica degli impianti, le concentrazioni di SO_2 nelle aree urbane e periurbane italiane risultano generalmente molto basse.

Risultati monitoraggio SO_2

I valori riportati nella Tabella 28 confermano questa tendenza: le concentrazioni medie e i valori massimi registrati sono ampiamente inferiori ai limiti previsti dalla normativa, senza evidenza di episodi acuti o incrementi stagionali rilevanti. Le differenze tra le stazioni sono contenute e non suggeriscono la presenza di sorgenti locali significative.

Il quadro complessivo indica livelli di SO_2 molto bassi e pienamente compatibili con un contesto territoriale caratterizzato da emissioni ridotte e da un limitato contributo delle sorgenti tradizionalmente associate a questo inquinante.

	Pozzilli	Sesto Campano
percentuale dati validi (%)	94	93
Media SO_2 periodo (µg/m^3)	1.9	1.6
Massimo SO_2 misurato (µg/m^3)	9.8	19.3
percentile 95 (µg/m^3)	2.7	3.2
percentile 98 (µg/m^3)	2.8	3.5
percentile 99.18 (µg/m^3)	2.9	3.9
percentile 99.73 (µg/m^3)	3.1	4.7

Tabella 28 - statistiche SO_2

Le concentrazioni di biossido di zolfo (SO_2) registrate presso le stazioni di Pozzilli e Sesto Campano risultano molto basse per tutto il periodo analizzato, con valori ampiamente inferiori ai limiti previsti dalla normativa europea. Le medie si attestano rispettivamente su 1.9 µg/m^3 e 1.6 µg/m^3, confermando un livello di fondo estremamente contenuto. Anche i valori massimi (9.8 µg/m^3 a Pozzilli e 19.3 µg/m^3 a Sesto Campano) rimangono di diversi ordini di grandezza al di sotto dei limiti normativi (350 µg/m^3 orario e 125 µg/m^3 giornaliero).

I percentili statistici (95° e 98°) mostrano una distribuzione molto stabile, con valori compresi tra 2.7-3.5 µg/m^3, segno dell'assenza di episodi acuti o variazioni significative.

I percentili normativi calcolati[2] (99.18° per il limite giornaliero e 99.73° per il limite orario) confermano ulteriormente questo quadro: anche gli estremi della distribuzione rimangono molto bassi, con valori massimi attesi nell'ordine di 3-5 µg/m^3, quindi ampiamente inferiori ai livelli di riferimento della normativa.

La percentuale di dati validi è elevata in entrambe le stazioni (94% a Pozzilli e 93% a Sesto Campano), garantendo una buona rappresentatività statistica delle serie.

8.5.2. CO

Il monossido di carbonio, inquinante primario prodotto soprattutto dalla combustione incompleta, ha visto negli ultimi anni una significativa riduzione delle sue concentrazioni grazie ai progressi tecnologici.

Risultati monitoraggio CO

I valori riportati nella Tabella 29 mostrano livelli ampiamente inferiori ai limiti normativi, con concentrazioni stabili e prive di variazioni stagionali rilevanti. Non emergono differenze significative tra le postazioni di monitoraggio, né sono presenti episodi di incremento che possano suggerire criticità locali.

Nel complesso, il comportamento del CO non evidenzia elementi di particolare attenzione.

	Pozzilli	Sesto Campano	Venafro
percentuale dati validi (%)	79	80	96
media CO periodo (mg/m^3)	0.69	0.20	1.04
massimo CO orario (mg/m^3)	3.37	2.47	2.58
massimo media mobile 8h (mg/m^3)	2.14	1.12	2.25
percentile 95 (mg/m^3)	1.22	0.60	1.38
percentile 98 (mg/m^3)	1.64	0.72	1.64

Tabella 29 - statistiche CO

Le concentrazioni di monossido di carbonio (CO) registrate nelle tre stazioni mostrano livelli generalmente bassi e ampiamente inferiori al valore limite previsto dalla normativa (10 mg/m^3 come massimo giornaliero della media mobile sulle 8 ore).

La percentuale di dati validi è buona in tutte le stazioni, con valori compresi tra il 79% e il 96%, garantendo una rappresentatività adeguata delle serie temporali.

Le medie del periodo risultano molto contenute: 0.69 mg/m^3 a Pozzilli, 0.20 mg/m^3 a Sesto Campano, 1.04 mg/m^3 a Venafro. I massimi orari (2.47-3.37 mg/m^3) rimangono ampiamente al di sotto dei livelli critici e non evidenziano episodi acuti.

L'indicatore normativo principale, ovvero il massimo giornaliero della media mobile sulle 8 ore, mostra valori compresi tra 1.12 e 2.25 mg/m^3, quindi molto lontani dal limite di 10 mg/m^3. Questo conferma l'assenza di condizioni potenzialmente critiche.

[2] I percentili 99.18° e 99.73° rappresentano gli equivalenti statistici dei limiti normativi previsti dalla normativa per il biossido di zolfo (SO_2), stabilisce per il valore limite giornaliero di 125 µg/m³ non deve essere superato per più di 3 volte l'anno: ciò corrisponde al 99.18° percentile della distribuzione delle concentrazioni giornaliere. Analogamente, il valore limite orario di 350 µg/m³ non deve essere superato per più di 24 volte l'anno, corrispondenti al 99.73° percentile della distribuzione oraria. Il calcolo di tali percentili consente di verificare la presenza di eventuali episodi estremi e di valutare la conformità ai limiti di legge anche in assenza di superamenti effettivi.

I percentili 95° e 98° (0.60-1.64 mg/m^3) descrivono una distribuzione stabile, con valori che rimangono bassi anche nelle code della distribuzione, segno di un comportamento regolare e privo di anomalie.

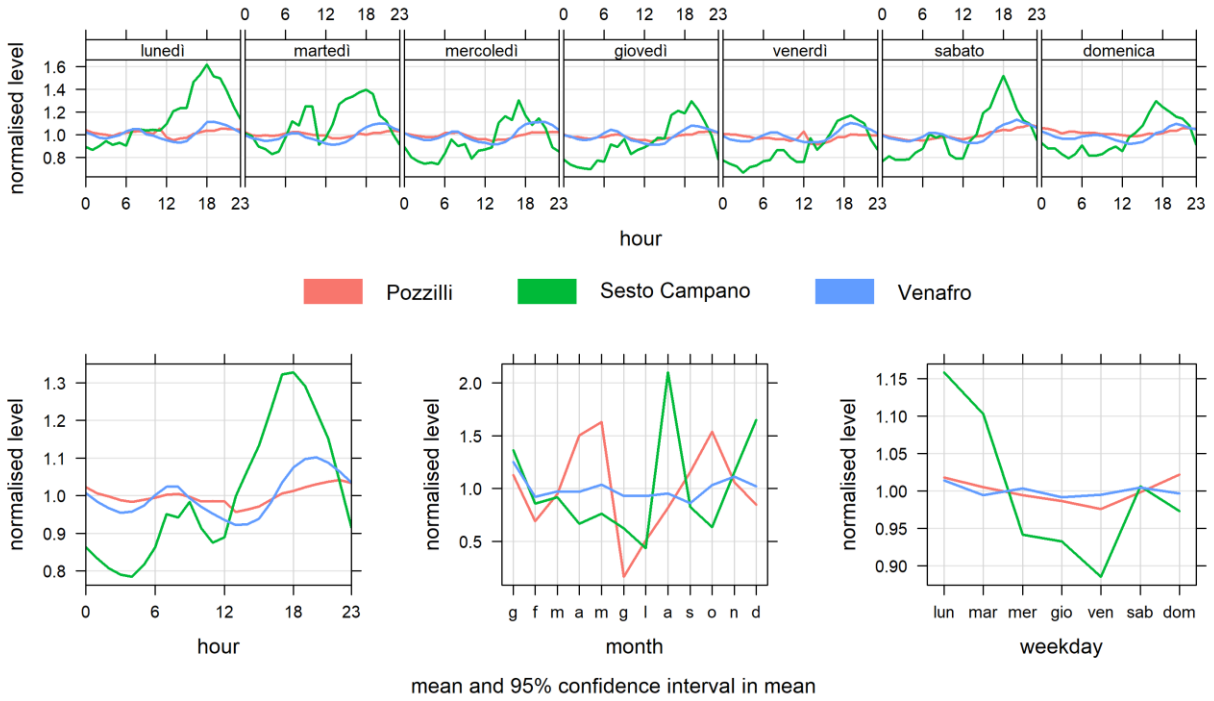


Grafico 48 - confronto andamenti tipici CO tra siti

Gli andamenti temporali del CO (Grafico 48) mostrano comportamenti diversi tra le tre stazioni. Pozzilli mantiene livelli molto regolari, con variazioni contenute nell'arco della giornata. Sesto Campano e Venafro presentano invece cicli giornalieri più marcati, con aumenti nelle ore mattutine e serali e una stagionalità più evidente nei mesi freddi. Si nota anche uno sfasamento dei picchi tra i siti: i massimi non compaiono nello stesso momento, segno che ciascuna stazione risponde a dinamiche locali proprie. Questo riflette sia la diversa intensità delle sorgenti presenti nelle tre aree, sia le condizioni micro-meteorologiche che modulano in modo differenziato l'accumulo e la dispersione del CO.

8.6. Mappe di inquinamento

Le analisi direzionali degli inquinanti atmosferici costituiscono uno strumento utile per interpretare l'influenza delle sorgenti emissive locali e delle condizioni anemologiche sui livelli di qualità dell'aria registrati presso i siti di monitoraggio. Le mappe riportate di seguito sono state elaborate a partire dai dati orari disponibili per gli inquinanti gassosi (NO_2, CO e Benzene) e rappresentano i settori di provenienza delle masse d'aria associate alle concentrazioni più elevate.

Tali elaborazioni richiedono una risoluzione temporale sufficientemente fine per garantire un numero adeguato di accoppiamenti vento-concentrazione e una rappresentazione statisticamente robusta dei settori angolari. Per questo motivo non è stata prodotta una mappa direzionale del PM_{10}, disponibile esclusivamente su base giornaliera: la risoluzione temporale non consente un'analisi metodologicamente coerente con quella degli altri inquinanti né una caratterizzazione affidabile della componente direzionale.

Le mappe presentate riguardano esclusivamente i comuni di Pozzilli e Sesto Campano, poiché per Venafro non sono disponibili dati meteorologici necessari alla loro elaborazione, e costituiscono rappresentazioni a

valenza locale che, pur non descrivendo un vero campo spaziale dell'inquinante, offrono indicazioni utili sulla provenienza delle masse d'aria associate ai livelli più elevati registrati nei due siti di monitoraggio.

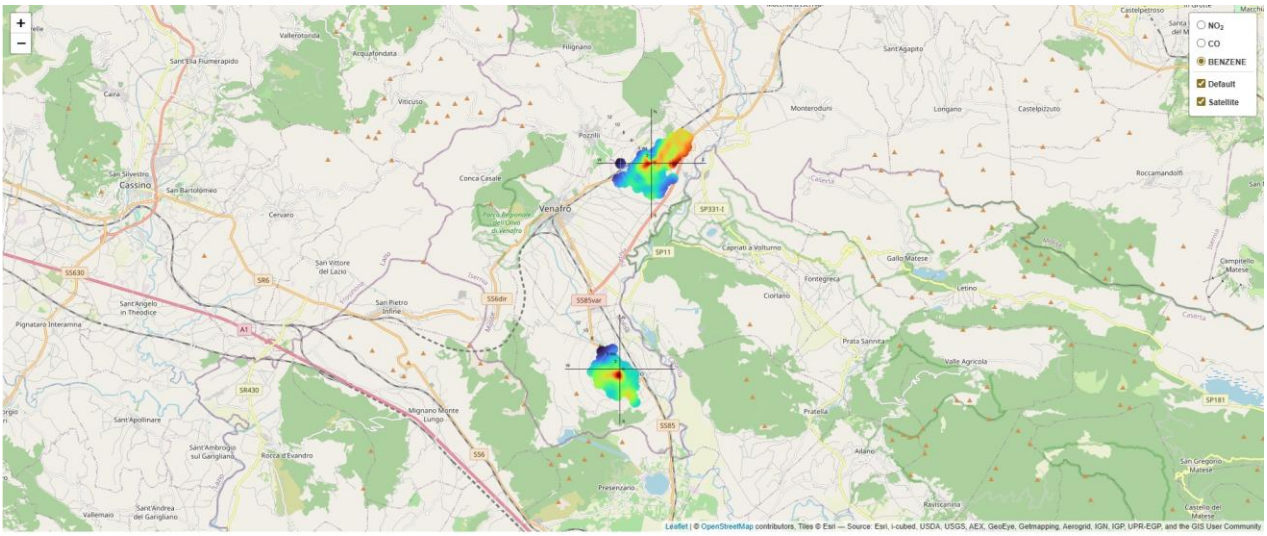
Le mappe sono state ottenute mediante elaborazioni polarizzate che associano le concentrazioni degli inquinanti alle direzioni di provenienza del vento, utilizzando esclusivamente i dati orari registrati presso ciascun sito.

Per ogni inquinante e per ciascuna stazione:

- la stazione è posta al centro della rappresentazione
- i settori angolari indicano la direzione da cui proviene la massa d'aria
- l'intensità cromatica rappresenta il livello medio dell'inquinante associato a quella direzione
- la mappa ha valenza strettamente locale e non può essere interpretata come una distribuzione spaziale dell'inquinante sul territorio
- la risoluzione oraria consente di cogliere variazioni di breve periodo e di evidenziare pattern legati ai cicli giornalieri delle emissioni e della ventilazione

Queste rappresentazioni permettono di individuare i settori direzionali maggiormente associati ai livelli più elevati, fornendo indicazioni utili per collegare le concentrazioni osservate alle possibili sorgenti emissive.

8.6.1. Mappa benzene

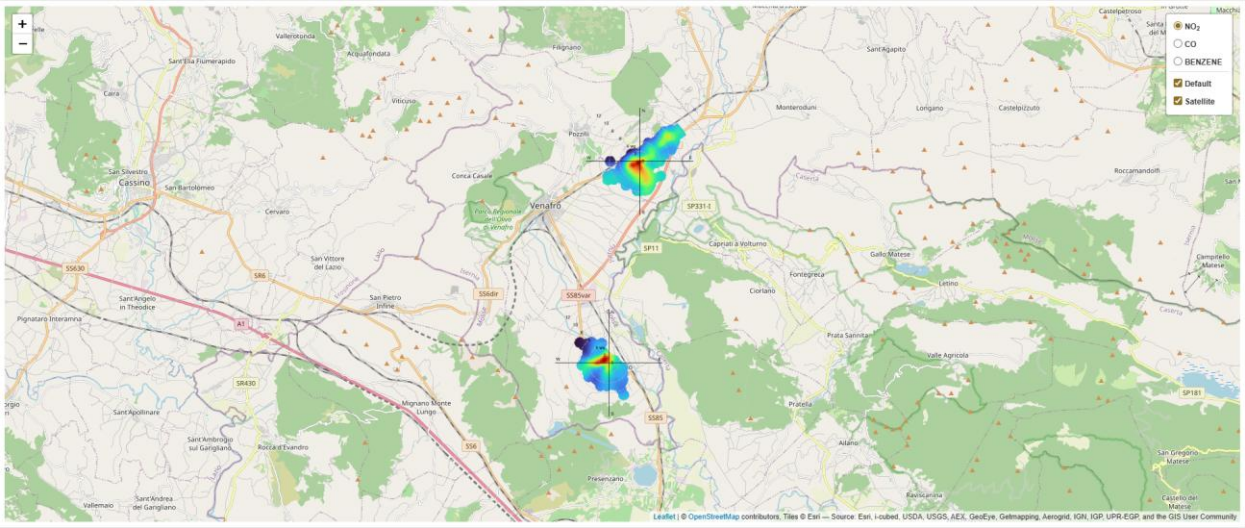


Mappa 1 - mappa benzene

Nella Mappa 1 del benzene, per Pozzilli, emerge un settore prevalente di provenienza compreso tra nord e nord-est, associato alle concentrazioni più elevate. Tale direzione coincide con l'area industriale e con la viabilità principale, suggerendo un contributo locale specifico.

Per Sesto Campano, il pattern è più attenuato e privo di un settore dominante, coerente con l'assenza di sorgenti significative nelle immediate vicinanze e con un contributo di fondo più uniforme.

8.6.2. Mappa NO_2

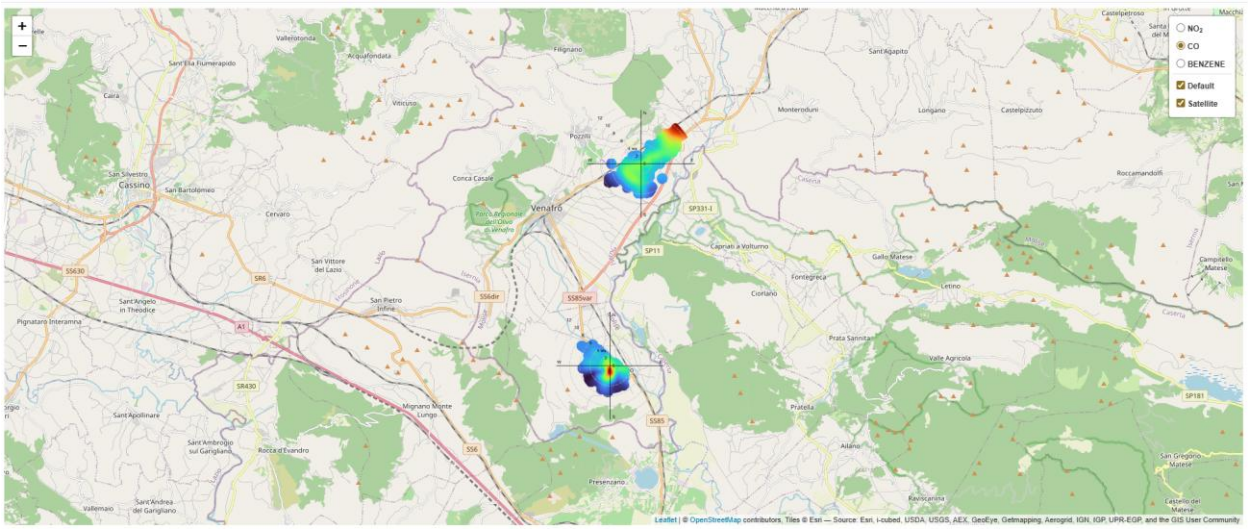


Mappa 2 - mappa NO_2

Nella Mappa 2 degli ossidi di azoto, per Pozzilli, il settore di provenienza più marcato è sud–sud-est, con un'intensità elevata e un'ampiezza significativa. Questo indica un contributo combinato di sorgenti lineari (traffico sulla SS85 e assi viari limitrofi) e attività produttive.

Per Sesto Campano, il segnale è più debole e leggermente orientato verso est–sud-est, riflettendo un contesto emissivo locale meno intenso e una maggiore influenza delle condizioni di fondo.

8.6.3. Mappa CO



Mappa 3 - mappa CO

La Mappa 3 del CO, mostra per Pozzilli, anche per il CO il settore prevalente è N-NE, ma con una distribuzione più diffusa, coerente con la natura più ubiquitaria delle sorgenti di combustione; mentre per Sesto Campano, la distribuzione è più omogenea, con un lieve incremento verso sud-est, senza un settore dominante marcato.

8.7. Conclusioni

L'analisi integrata dei dati raccolti nelle tre postazioni di monitoraggio restituisce un quadro articolato, nel quale gli inquinanti mostrano comportamenti distinti. Le differenze tra i siti risultano stabili e ricorrenti, delineando un sistema che non può essere considerato omogeneo, ma composto da micro-contesti con proprie specificità nei processi di emissione e dispersione.

Per PM_{10} ed NO_2 emerge un gradiente territoriale chiaro: Pozzilli presenta i livelli più bassi, Sesto Campano si colloca su valori intermedi e Venafro mostra concentrazioni più elevate, una maggiore variabilità e, nel caso del PM_{10}, un numero sensibilmente superiore di superamenti del valore limite giornaliero. Questo comportamento si mantiene lungo tutto il periodo analizzato e riflette differenze strutturali tra le tre aree, riconducibili sia alla distribuzione delle sorgenti sia alle condizioni locali di dispersione.

Gli inquinanti di origine prevalentemente combustiva, come benzene e CO, mostrano livelli generalmente bassi e ampiamente inferiori ai limiti normativi. Le differenze osservate tra le stazioni sono attribuibili alla diversa intensità delle sorgenti locali e alle condizioni micro-meteorologiche che modulano l'accumulo degli inquinanti nei bassi strati. Anche il biossido di zolfo si mantiene su valori molto contenuti, senza evidenza di contributi emissivi rilevanti.

L'ozono segue, invece, dinamiche governate dai processi fotochimici e dalla meteorologia. Le tre stazioni presentano profili giornalieri e stagionali molto simili, con differenze limitate ai livelli assoluti. I valori più elevati si registrano a Sesto Campano e Pozzilli, mentre Venafro presenta livelli più contenuti, un risultato coerente con la natura dell'inquinante e con il contesto territoriale.

Un elemento di particolare interesse riguarda gli sfasamenti serali osservati nei profili di NO_2, benzene e CO. I picchi non si presentano nello stesso momento nelle tre stazioni, ma mostrano differenze sia nella fase sia nell'intensità. Questo comportamento suggerisce che le sorgenti di combustione attive nelle tre aree non seguono gli stessi ritmi temporali: il contributo del traffico, delle micro-attività e del riscaldamento domestico varia, infatti, in modo diverso nei tre contesti, generando massimi non simultanei. La variabilità micro-meteorologica locale - in particolare la stabilità atmosferica serale, la ventilazione residua e la formazione di inversioni termiche - può ulteriormente modulare l'accumulo degli inquinanti, contribuendo a differenziare la tempistica dei picchi.

Un elemento che rafforza questa interpretazione è il comportamento osservato nel fine settimana: quando il traffico e molte attività riducono la loro intensità o modificano i propri orari, gli sfasamenti risultano meno evidenti. In queste condizioni, rimangono attive soprattutto le sorgenti più stabili, come il riscaldamento domestico, e i profili delle stazioni tendono ad allinearsi maggiormente. Nel complesso, la mancata sincronizzazione dei picchi nei giorni feriali e la loro attenuazione nel weekend indicano che ciascun sito risponde a un proprio equilibrio locale tra emissioni e dispersione. Gli sfasamenti rappresentano quindi un segnale della non omogeneità del bacino emissivo e della presenza di micro-contesti atmosferici distinti, nei quali le dinamiche di accumulo e rimozione seguono regimi specifici.

Nel complesso, i risultati mostrano che la qualità dell'aria nella piana di Venafro è influenzata da una combinazione di fattori locali e meteorologici che agiscono in modo differenziato nei tre siti. Gli inquinanti primari riflettono soprattutto le sorgenti locali e la micro-meteorologia, mentre quelli secondari rispondono ai processi atmosferici su scala più ampia. Non emergono criticità per benzene, CO e SO_2, mentre PM_{10} e NO_2 evidenziano differenze territoriali più marcate, con Venafro caratterizzata da livelli più elevati e da una maggiore variabilità. L'insieme delle evidenze conferma che il territorio non si comporta come un sistema unico, ma come un insieme di micro-contesti nei quali le dinamiche emissive e di dispersione interagiscono in modo specifico, generando risposte temporali e livelli di concentrazione differenziati.

PARTE III

Individuazione delle sorgenti di PM_{10}

9. Obiettivo dello studio di caratterizzazione del PM_{10}

Lo studio di caratterizzazione del PM_{10} nella piana di Venafro nasce con il duplice scopo di fornire risposte alle richieste di informazioni da parte di Enti istituzionali, associazioni ambientaliste e comuni cittadini, circa l'origine dell'inquinamento atmosferico e di fornire un rigoroso supporto tecnico-scientifico per una migliore definizione di politiche ambientali volte miglioramento della qualità aria

Per raggiungere questi obiettivi è stato necessario eseguire uno studio sito-specifico che ha indagato sulle fonti emissive di particolato, attraverso la caratterizzazione del particolato.

Durante lo studio d'indagine sono stati raccolti 2060 campioni di particolato sui quali è stata effettuata l'analisi della composizione chimica con la determinazione di composti quali IPA, metalli, zuccheri, ioni, oltre la determinazione della componente organica ed elementare del carbonio, per un totale di 38770 analisi.

Al termine della fase di raccolta dei campioni e di analisi di laboratorio, si è passati alla fase di valutazione ed interpretazione dei dati, mediante la Positive Matrix Factorization (PMF), con il software EPA- PMF 5.0.

Il periodo di campionamento ha avuto inizio il 06 maggio 2024 e si è concluso in data 11 maggio 2025 e sono state indagati n. 3 siti di monitoraggio mediante l'utilizzo di n. 3 stazioni di campionamento, MM1 - mezzo mobile localizzato nel Comune di Sesto Campano, MM2 - mezzo mobile localizzato nel Comune di Pozzilli, Venafro2 - stazione fissa localizzata nel Comune di Venafro (Figura 1).

10. Metodologia

10.1. Campionamento

I campioni sono stati raccolti con gli strumenti installati nella stazione fissa e sui mezzi mobili, tramite i campionatori/analizzatori SWAM 5a Dual Channel Monitor, caratterizzati da un sistema di campionamento automatico sequenziale di materiale particellare su mezzi filtranti, che opera con due linee di prelievo indipendenti, progettato e realizzato come fondamentale supporto per studi volti a caratterizzare lo stato della qualità dell'aria in relazione all'inquinamento da materiale particellare PM_X.

La disponibilità dei campioni accumulati su membrane filtranti ne permette la caratterizzazione chimica.

10.2. Analisi chimica dei campioni

Per l'analisi dei quattro metalli normati è stata utilizza la metodica UNI EN 14902:2005; per i metalli analizzati e non riportati nella norma è stato sviluppato, invece, dai nostri laboratori un metodo interno (MI-C0050) prendendo come riferimento la norma stessa e verificando la sua possibile estensione ad altri metalli. Per il calcolo del limite di rilevabilità (LOD), del limite di quantificazione (LOQ) e dell'incertezza, così come per i controlli qualità previsti nel caso di sviluppo interno di un metodo di analisi, conformemente alla norma UNI 17025, si è presa come riferimento la norma UNI EN 14902:2005 per tutti i metalli.

Per la determinazione degli IPA (Idrocarburi Policiclici Aromatici), ioni e zuccheri, sono stati utilizzati metodi cromatografici, in particolare: gas cromatografia relativamente agli IPA, cromatografia ionica per ioni e zuccheri. Per la determinazione degli IPA è stata adottata la metodica UNI EN 15549:2008 per la misurazione del benzo(a)pirene e il DM 05/05/2015 ALL.II per i restanti IPA.

Per l'analisi degli ioni sono stati adottati due metodi interni MI-C0047 e MI-C0048, rispettivamente per i cationi e per gli anioni. Tali metodi si incentrano su una applicazione della UNI EN 16913:2017, riferita al $PM_{2.5}$ e applicata al particolato PM_{10}. Per gli zuccheri è stato sviluppato il metodo interno MIC0049.

Per l'analisi del carbonio organico e del carbonio elementare, è stato sviluppato il metodo interno MI-C0043, basato sulla norma UNI EN 16909:2017.

Le determinazioni analitiche effettuate sui campioni filtranti consentono non solo di descrivere in dettaglio la composizione chimica del particolato, ma anche di costruire il dataset necessario per l'applicazione delle tecniche di source apportionment. A tal fine, si riportano nei capitoli seguenti le principali specie chimiche quantificate e utilizzate nella successiva elaborazione.

Le analisi svolte hanno così permesso di ottenere, per ciascun campione, la concentrazione della massa di PM_{10} e di un ampio numero di componenti inorganici e organici. Tra questi rientrano metalli (Al, Sb, As, Cd, Ca, Co, Cr, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Tl, V, Zn), ioni inorganici (NH_4^+, Cl^-, NO_3^-, SO_4^{2-}), carbonio organico (OC) e carbonio elementare (EC), oltre a marcatori specifici della combustione di biomassa quali levoglucosano, mannosano e galattosano. Sono stati inoltre determinati diversi IPA, utilizzati per la caratterizzazione complessiva del particolato, sebbene, come sarà illustrato più avanti, non siano stati inclusi nella successiva elaborazione PMF a causa delle loro caratteristiche chimico-fisiche.

La disponibilità congiunta di queste specie consente di descrivere, quindi, in modo dettagliato la composizione del particolato e rappresenta la base informativa necessaria per l'applicazione delle tecniche di source apportionment. La selezione delle specie incluse nel dataset PMF risponde ai criteri comunemente adottati negli studi di caratterizzazione del particolato atmosferico: rappresentatività delle principali sorgenti emissive, stabilità chimica sufficiente per l'impiego in modelli recettori e completezza delle serie temporali. L'insieme delle concentrazioni così ottenute costituisce quindi l'input utilizzato nella fase successiva di elaborazione mediante il metodo PMF.

10.3. Tecniche di source apportionment

Al termine della raccolta ed analisi dei campioni, si è passati alla fase di interpretazione ed analisi dei dati raccolti, mediante il metodo PMF.

Questa tecnica presenta il vantaggio di non richiedere a priori alcun dato sulle sorgenti o sui relativi profili di emissione e quindi consente lo studio delle sorgenti del particolato a partire dalle caratteristiche chimico-fisiche del particolato. Gli studi di source apportionment richiedono, quindi, un'attività sperimentale intensa e necessitano di tempi tecnici di esecuzione dell'ordine di molti mesi (nel nostro caso di 1 anno). A conclusione dell'indagine, tuttavia, l'applicazione di metodi di analisi multivariata consente di individuare e quantificare le sorgenti di particolato aerodisperso che contribuiscono all'inquinamento al sito recettore, incluse quelle riconducibili ad attività industriali, quelle di origine naturale ed infine, i contributi derivanti da attività antropogeniche legate ad attività civili. Questo tipo di studio consente quindi di circostanziare le sorgenti che sono all'origine dell'inquinamento da PM_{10}.

11. Risultati della composizione chimica del PM_{10}

In questo capitolo vengono presentati i risultati della caratterizzazione chimica del PM_{10} effettuata nei siti della piana venafrana. L'analisi delle principali componenti inorganiche e organiche del particolato consente di descrivere in modo dettagliato la sua composizione e di evidenziare eventuali differenze spaziali e stagionali.

Le concentrazioni misurate per ciascuna specie costituiscono un elemento chiave per interpretare i processi emissivi che influenzano la qualità dell'aria e rappresentano la base informativa necessaria per le successive analisi di source apportionment, consentendo di contestualizzare in modo robusto il contributo delle diverse tipologie di emissioni alla qualità dell'aria nella piana venafrana.

11.1. Distribuzione delle specie chimiche del PM_{10}

Al fine di rappresentare in modo efficace la distribuzione dei dati e consentire un confronto immediato tra i siti e tra le diverse specie chimiche, sono stati realizzati dei boxplot[3]. Le specie sono state organizzate in gruppi omogenei per facilitare la lettura, rendendo più immediato il confronto tra inquinanti con ordini di grandezza simili.

Le specie a maggiore concentrazione del PM_{10} (Grafico 49) risultano essere NO_3^-, SO_4^{2-}, NH_4^+, OC ed EC. La variabilità più alta è quella dell'OC, mentre NO_3^- , EC, SO_4^{2-} e NH_4^+mostrano distribuzioni più compatte, con l'SO_4^{2-} e l'NH_4^+che si distinguono per essere le specie più stabili. Inoltre, si notano chiare differenze tra i siti (con Venafro sempre più alto) per OC ed EC.

Le specie riconducibili alla biomassa (Grafico 50), Levoglucosano e K, mostrano una variabilità nelle concentrazioni, ma i valori risultano complessivamente confrontabili tra i siti.

I metalli Fe, Cu, Mn, Pb, Zn (Grafico 51), mostrano concentrazioni molto più basse, come atteso per componenti in traccia; si evidenziano differenze tra siti, suggerendo possibili contributi locali specifici.

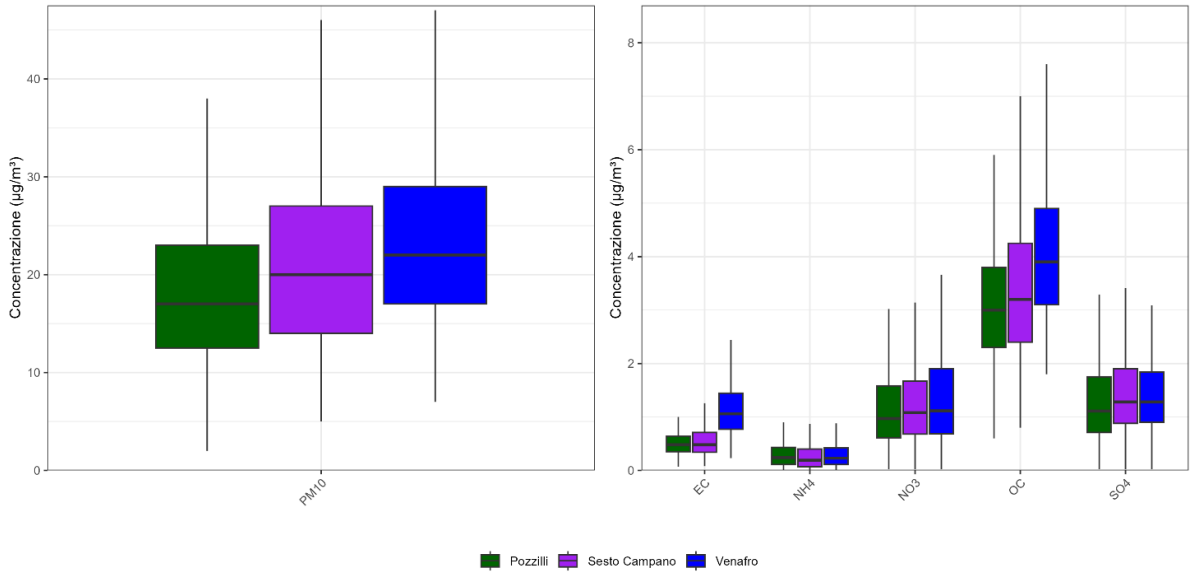


Grafico 49 - boxplot PM_{10} - EC - OC - NO_3^- - SO_4^{2-}

[3] Nei grafici presentati gli outliers non sono visualizzati. La scelta è stata effettuata esclusivamente per migliorare la leggibilità delle distribuzioni: la presenza di valori estremi avrebbe ampliato in modo eccessivo la scala dell'asse y, comprimendo i boxplot e rendendo difficile il confronto tra i siti e tra le diverse specie chimiche. Gli outliers non sono stati rimossi né modificati nei dataset originali; sono stati semplicemente esclusi dalla rappresentazione grafica per garantire una migliore visibilità delle tendenze centrali.

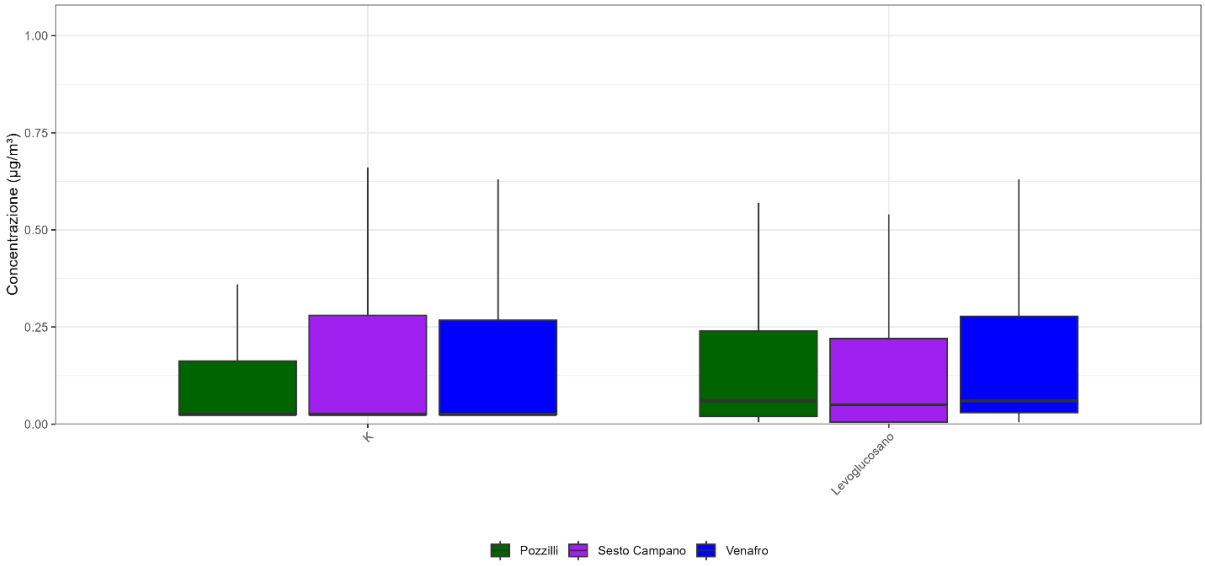


Grafico 50 - boxplot K - levoglucosano

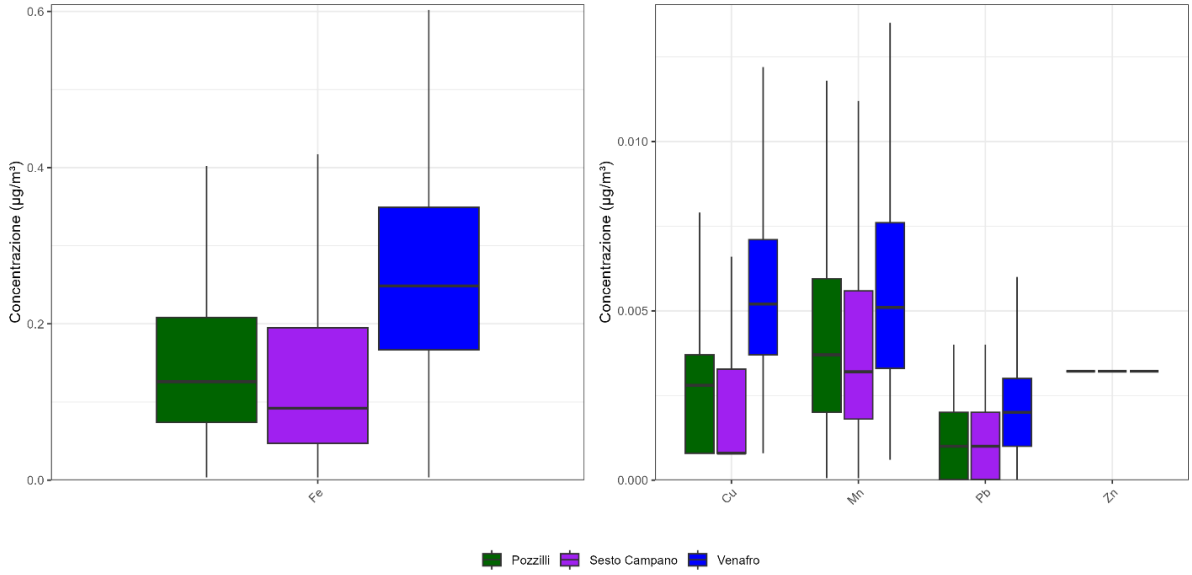


Grafico 51 - boxplot Fe - Cu - Mn - Pb - Zn

Gli IPA, Grafico 52, mostrano concentrazioni con una variabilità relativamente ampia. Le specie più abbondanti risultano essere Fluorantene, Pirene, Benzo[b]fluorantene e Indeno[1,2,3-cd]pirene, mentre composti come Dibenzo[ah]antracene e Perilene mostrano valori più bassi e prossimi al limite di quantificazione.

Le differenze tra i siti sono presenti, ma non marcate: Venafro tende a mostrare valori leggermente più elevati per alcune specie, mentre Pozzilli e Sesto Campano presentano livelli più comparabili.

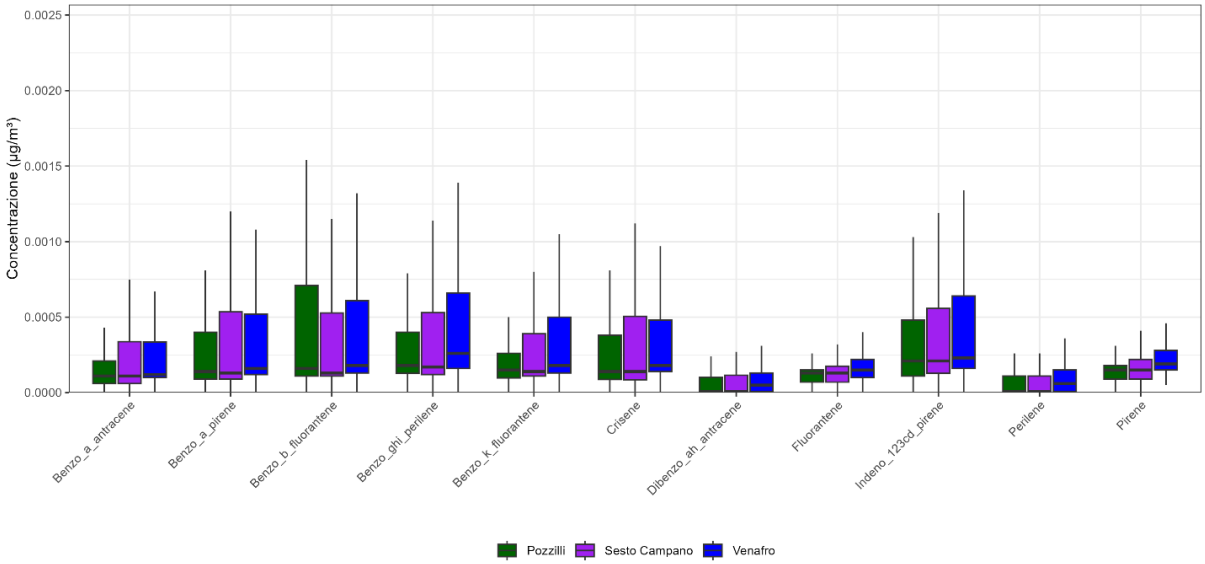


Grafico 52 - boxplot IPA

11.2. Andamento temporale delle principali specie chimiche

Dopo aver analizzato la distribuzione complessiva delle specie selezionate, è utile esaminarne anche l'evoluzione temporale. Le serie storiche permettono, infatti, di individuare pattern stagionali, episodi emissivi e differenze tra i siti che non emergono dai soli indicatori statistici. Osservare come le principali componenti del PM_{10} variano nel corso dell'anno consente di riconoscere eventuali anomalie e di distinguere le specie caratterizzate da una forte stagionalità, come i nitrati o i traccianti della biomassa, da quelle più stabili nel tempo, rendendo queste informazioni fondamentali per interpretare le sorgenti.

Gli ioni secondari, NO_3^-, SO_4^{2-}, NH_4^+ (Grafico 53 - Grafico 55) presentano un andamento coerente tra i tre siti, con incrementi significativi durante la stagione fredda per i nitrati, la cui formazione è favorita da basse temperature e condizioni atmosferiche stabili.

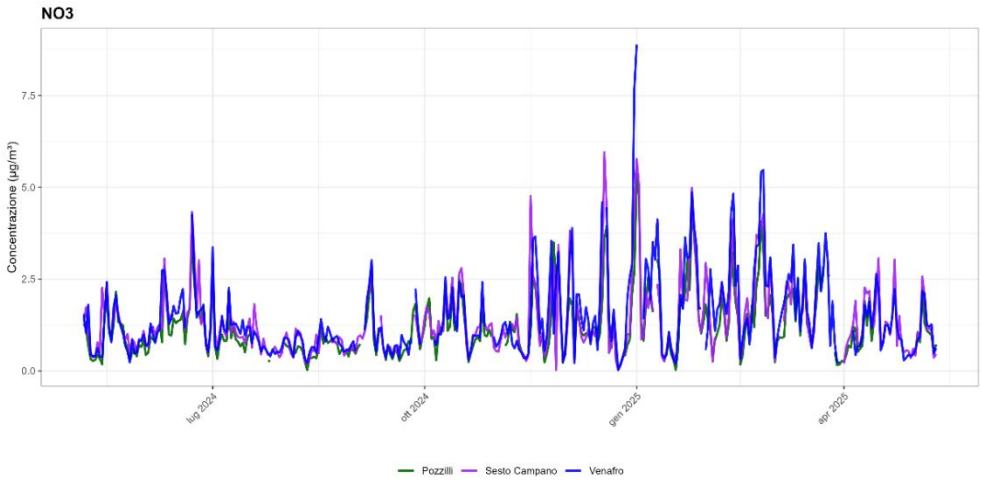


Grafico 53 - serie temporale NO_3^-

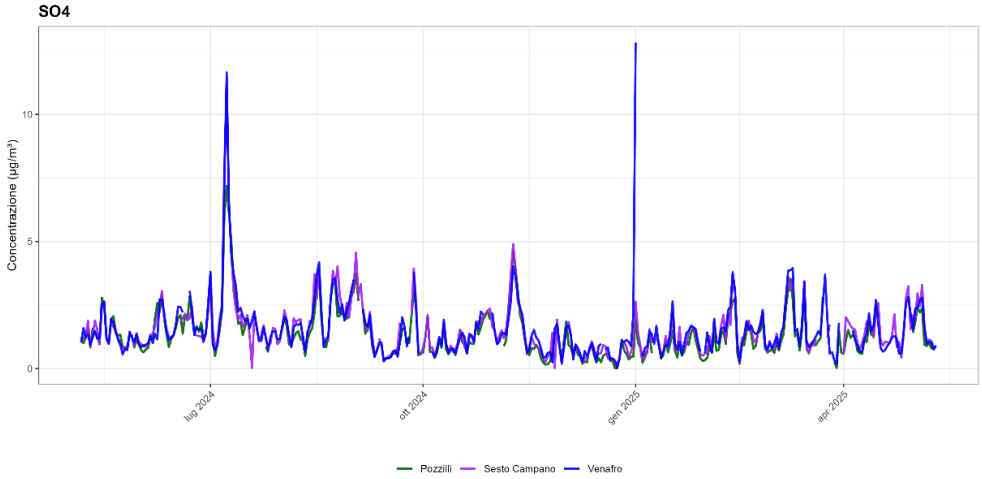


Grafico 54 - serie temporale SO_4^{2-}

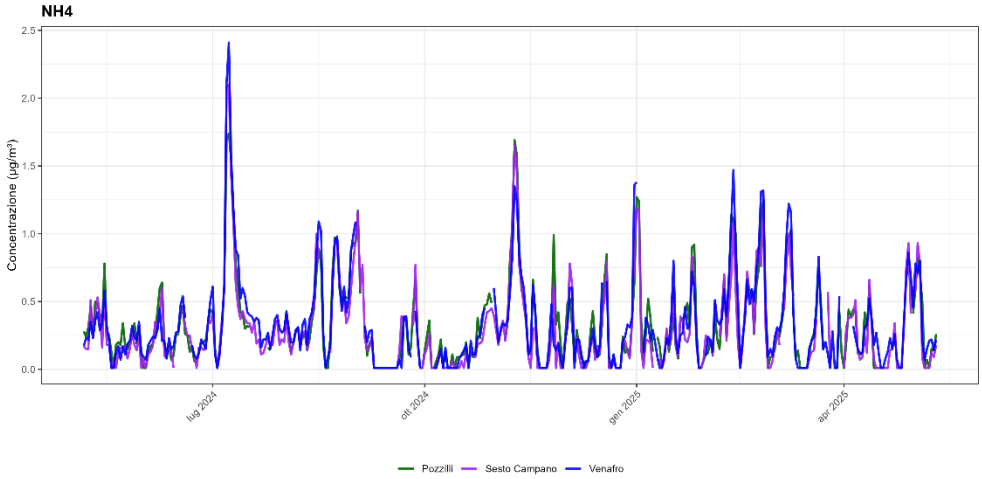


Grafico 55 -serie temporale NH_4^+

Le componenti carboniose, OC ed EC, (Grafico 56 - Grafico 57) evidenziano un aumento delle concentrazioni nei mesi più freddi, con un tipico andamento a campana centrato sul mese di gennaio. OC, come atteso, mostra valori più elevati rispetto a EC. Per l'OC i valori più altri sono presenti a Venafro e quelli più bassi a Pozzilli, mentre per l'EC, i valori sono paragonabili tra Sesto Campano e Pozzilli, con Venafro che mostra anche per questa specie i valori più alti.

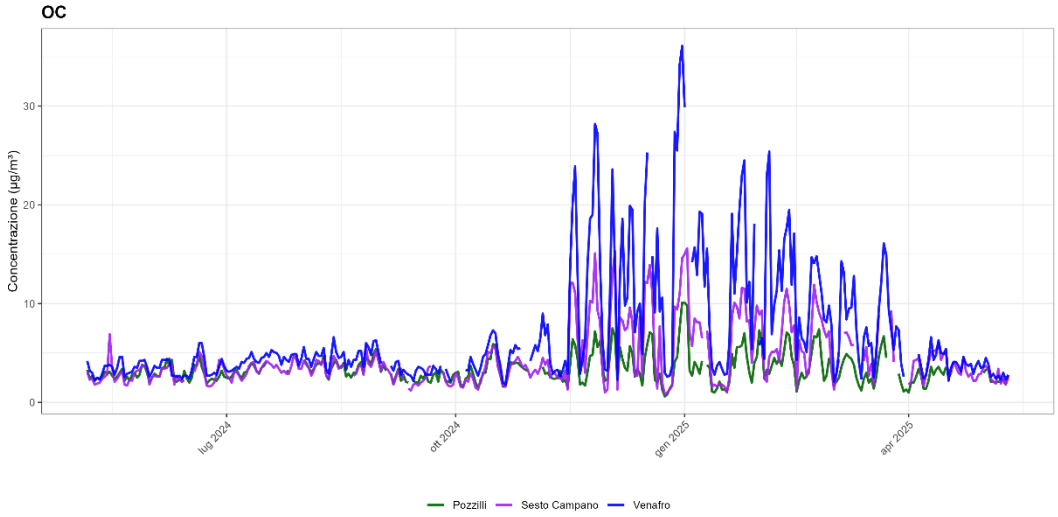


Grafico 56 - serie temporale OC

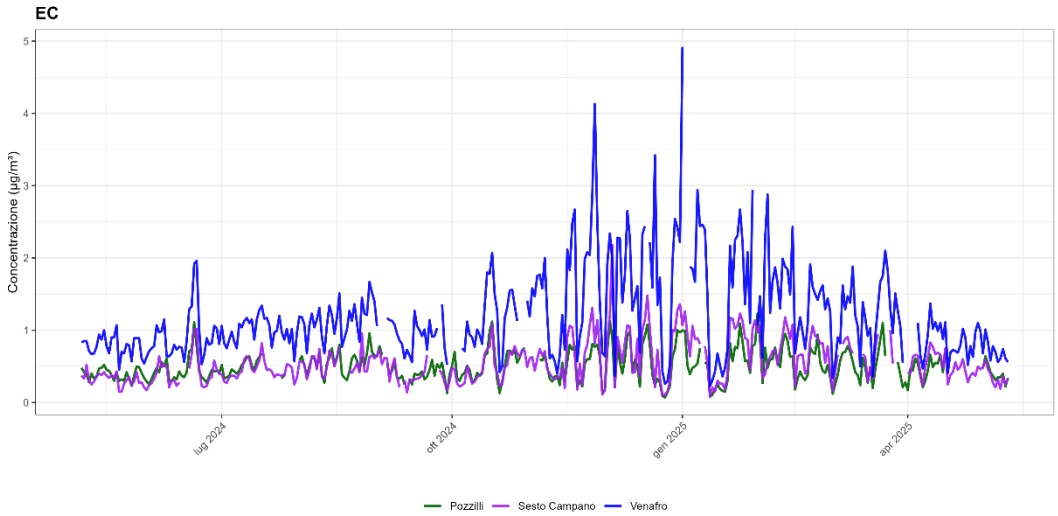


Grafico 57 - serie temporale EC

I traccianti della combustione di biomassa, levoglucosano e K (Grafico 58 - Grafico 59) presentano un andamento fortemente stagionale, con incrementi marcati durante l'inverno e valori molto più bassi nel resto dell'anno. Le concentrazioni maggiori osservate nei mesi freddi sono coerenti con l'utilizzo del riscaldamento domestico a legna, che rappresenta la principale sorgente di queste specie. Nel mese di giugno si osserva un picco significativo del levoglucosano, in un contesto stagionale povero di contributi da biomassa, suggerendo un episodio emissivo locale isolato. Sono presenti anche in questo caso livelli concentrazione diversi tra i vari siti, con Venafro che si conferma, anche per i traccianti della biomassa, il sito con i valori maggiori.

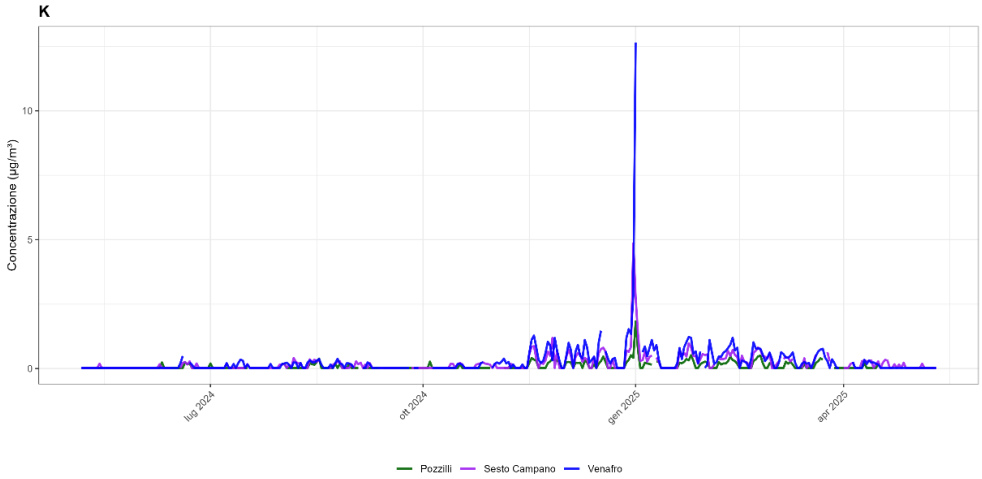


Grafico 58 - serie temporale K

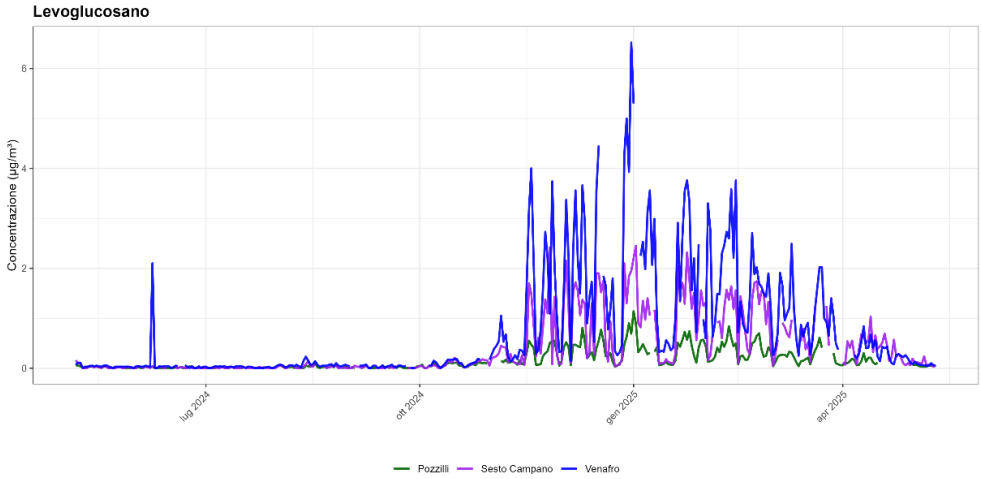


Grafico 59 - serie temporale levoglucosano

I metalli Cu, Mn, Fe, Pb e Zn (Grafico 60 - Grafico 64) mostrano un andamento più irregolare e meno legato alla stagionalità. Il ferro presenta i picchi più evidenti, mentre il Mn mostra oscillazioni più contenute. Le differenze tra i siti sono più marcate per il ferro.

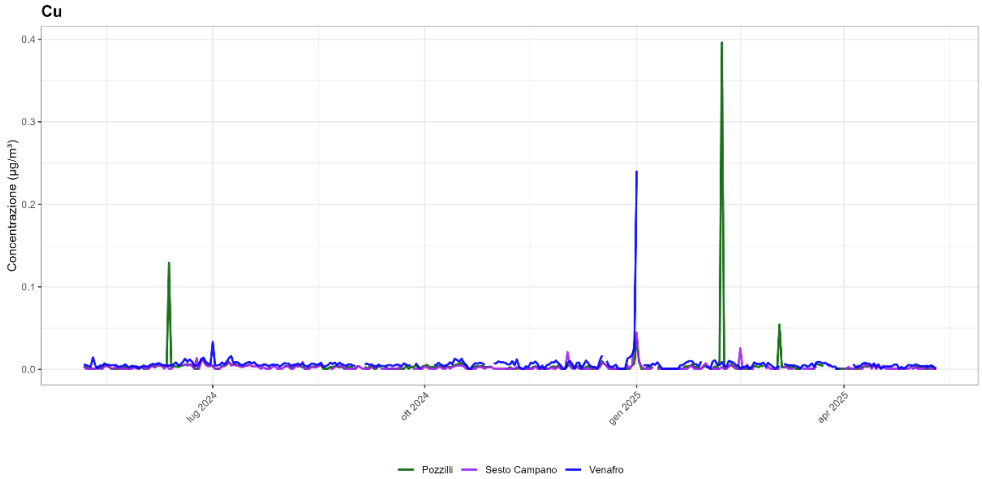


Grafico 60 - serie temporale Cu

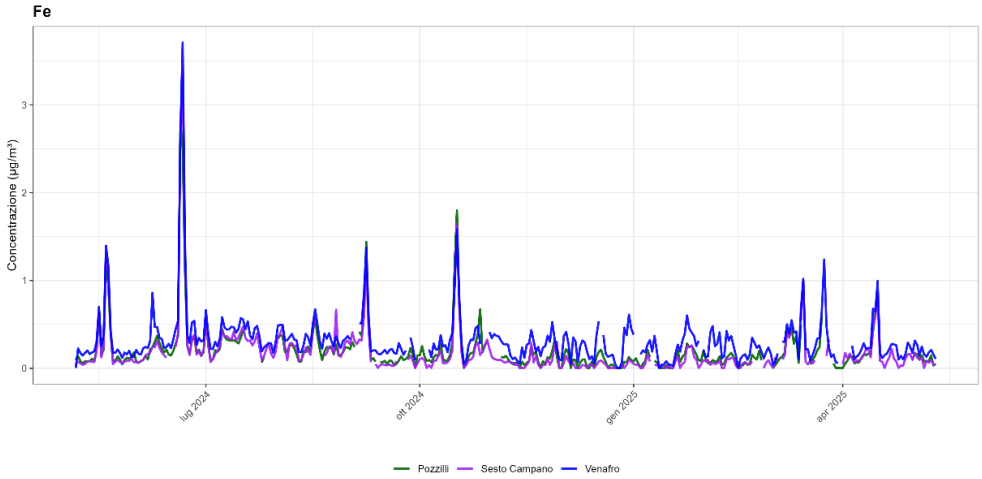


Grafico 61 - serie temporale Fe

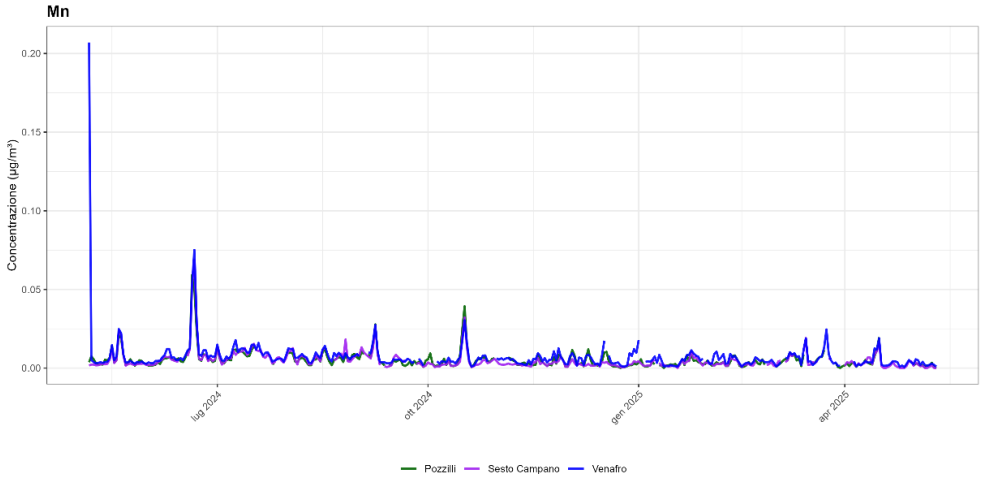


Grafico 62 - serie temporale Mn

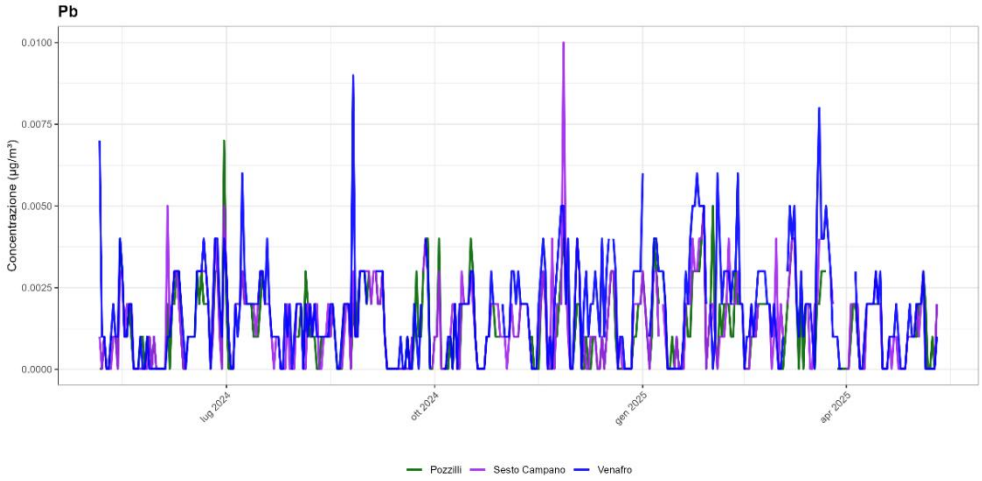


Grafico 63 - serie temporale Pb

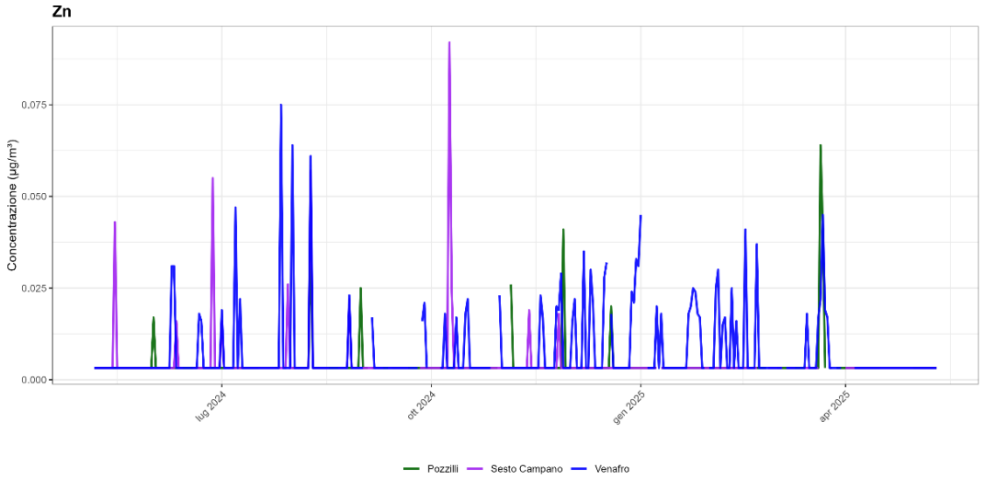


Grafico 64 - serie temporale Zn

Nel complesso, le serie temporali confermano una composizione del PM_{10} caratterizzata da una forte componente stagionale per nitrati, carbonio organico e traccianti della biomassa, mentre i metalli mostrano un comportamento più episodico e meno regolare. Le differenze tra i siti sono presenti, con Venafro che tende a mostrare i valori più elevati per diverse specie.

Le serie temporali degli IPA (Grafico 65 - Grafico 75) evidenziano una chiara stagionalità invernale, con incrementi significativi nei mesi più freddi e valori molto bassi nel periodo estivo. Questo comportamento è tipico degli IPA, la cui formazione e persistenza in atmosfera in forma particolata sono favorite da basse temperature e condizioni di stagnazione. I picchi più marcati si osservano tra dicembre e febbraio, con un massimo particolarmente evidente a gennaio. Le tre stazioni mostrano un andamento coerente, con Venafro che tende a registrare i valori più elevati per diverse specie, mentre Pozzilli e Sesto Campano presentano livelli simili. La presenza simultanea di picchi in più specie e in più siti suggerisce un contributo emissivo diffuso, riconducibile principalmente alla combustione domestica di biomassa. Le specie più pesanti (Benzo[a]pirene, Benzo[b]fluorantene, Indeno[1,2,3-cd]pirene) mostrano incrementi particolarmente pronunciati nei mesi invernali. Questi risultati sono coerenti con quanto osservato per i traccianti della biomassa (levoglucosano e K) e con l'andamento delle componenti carboniose, rafforzando l'interpretazione delle sorgenti emissive che verrà approfondita nel capitolo dedicato alla source apportionment.

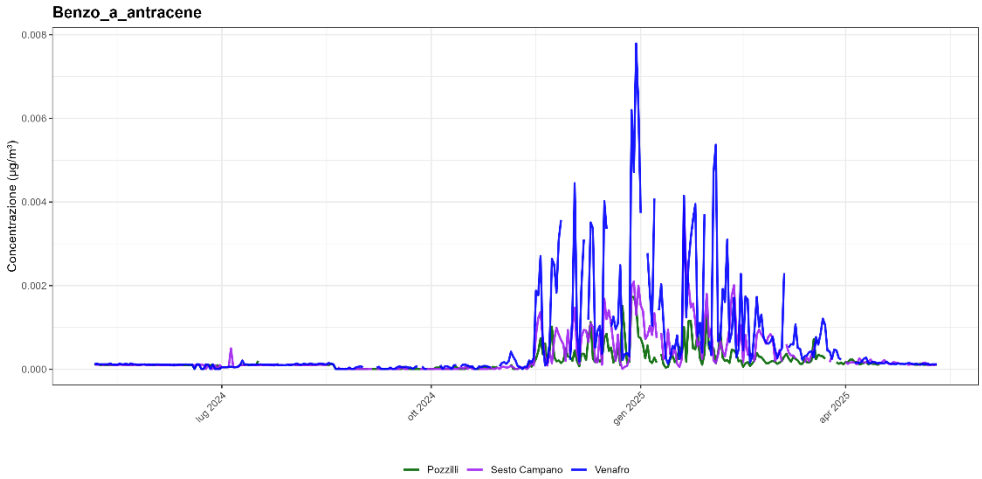


Grafico 65 - serie temporale benzo(a)antracene

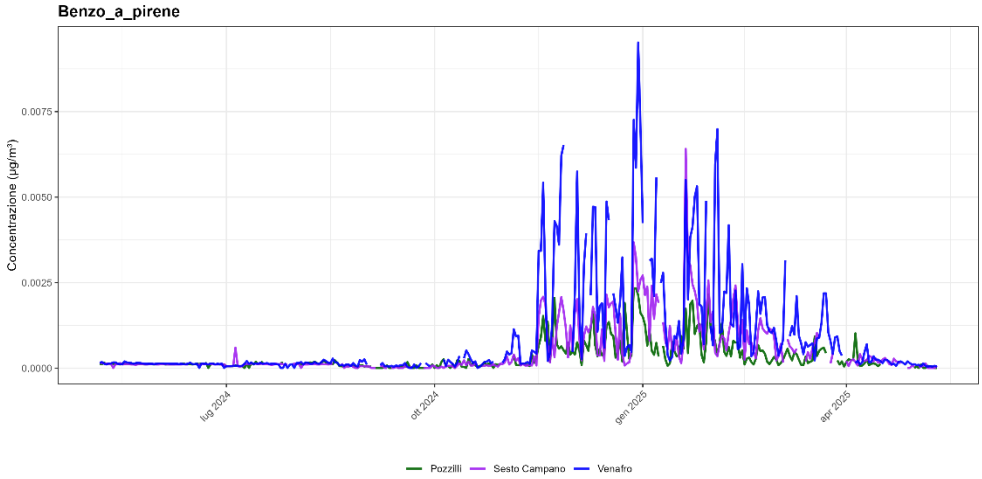


Grafico 66 - serie temporale benzo(a)pirene

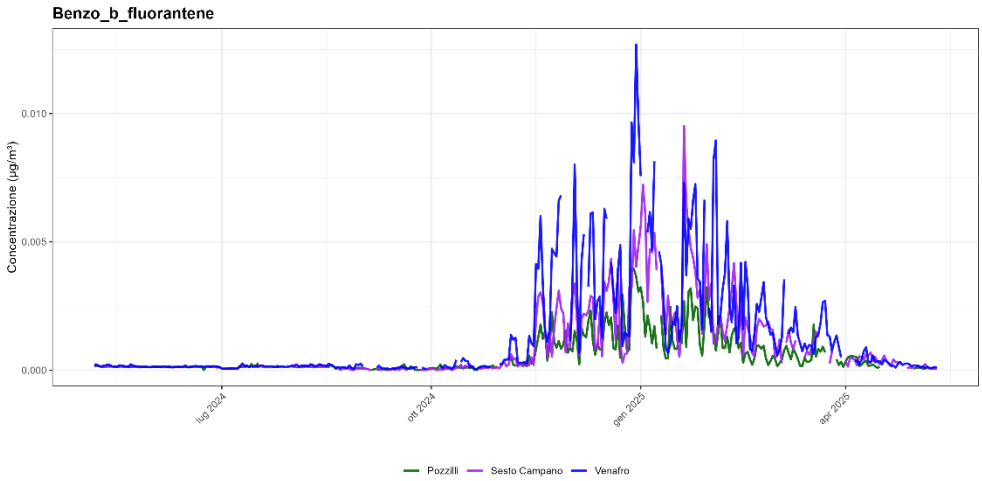


Grafico 67 - serie temporale benzo(b)fluorantene

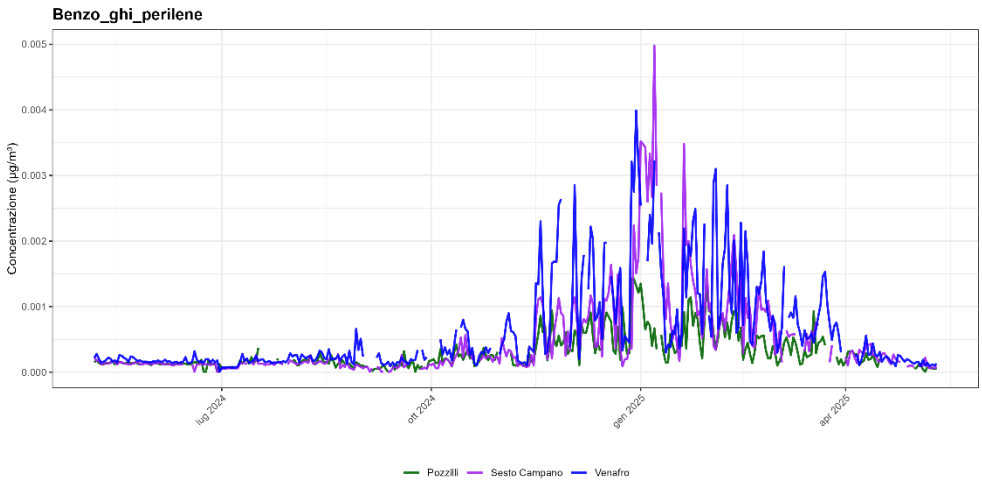


Grafico 68 - serie temporale benzo-ghi-perilene

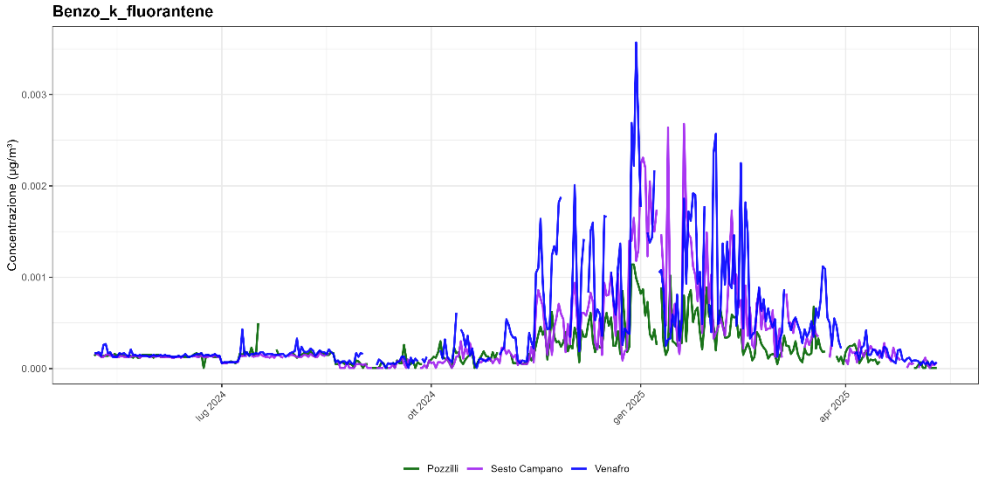


Grafico 69 - serie temporale benzo(k)fluroantene

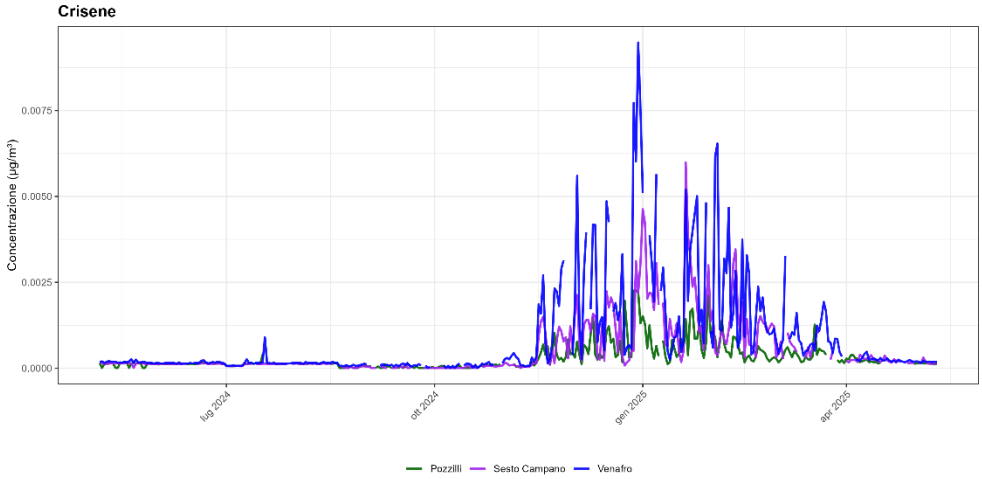


Grafico 70 - serie temporale crisene

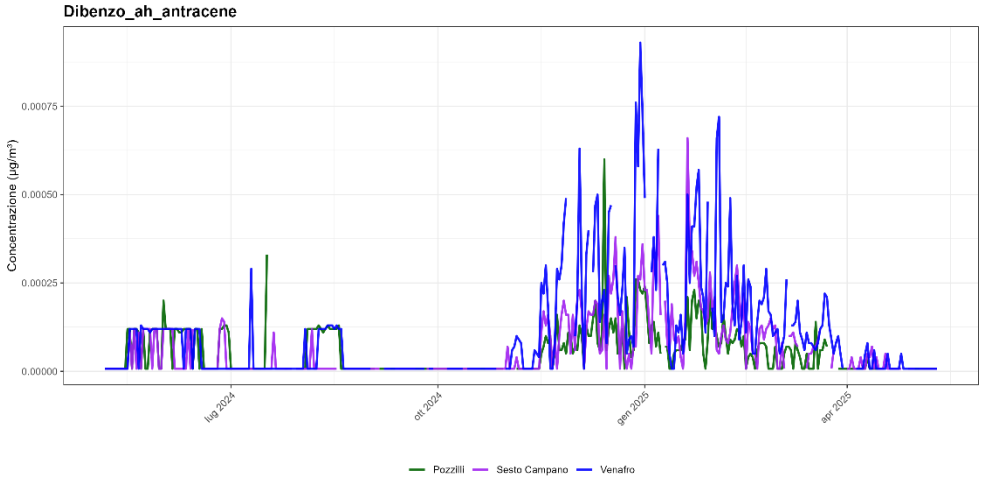


Grafico 71 - serie temporale dibenzo(ah)antracene

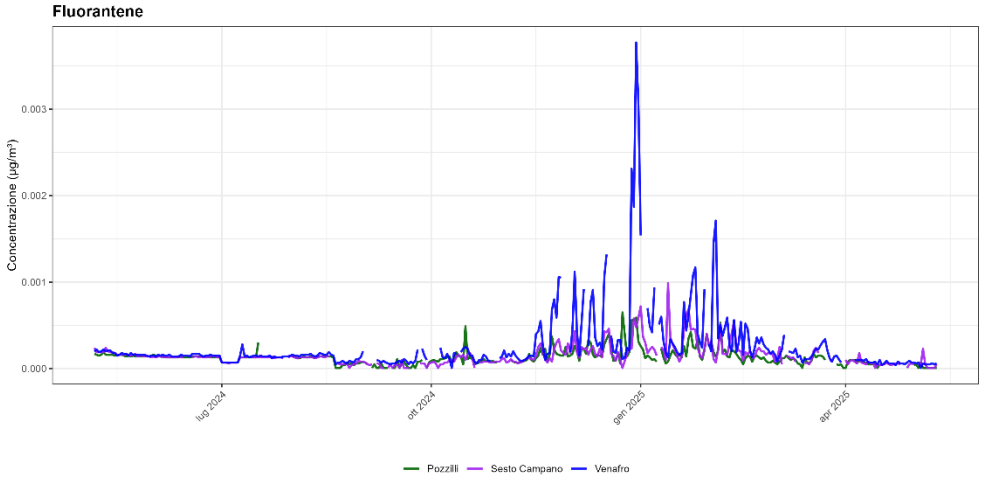


Grafico 72 - serie temporale fluorantene

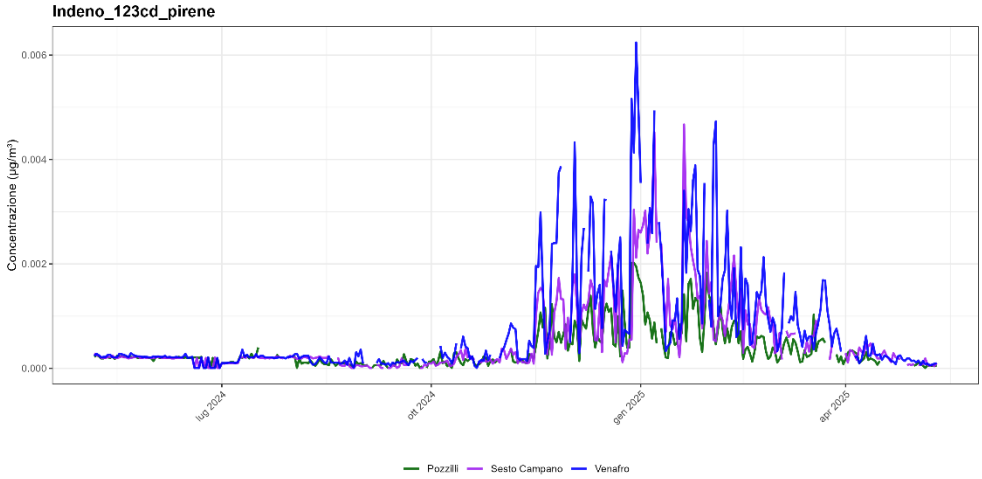


Grafico 73 - serie temporale indeno[1,2,3]cdpirene

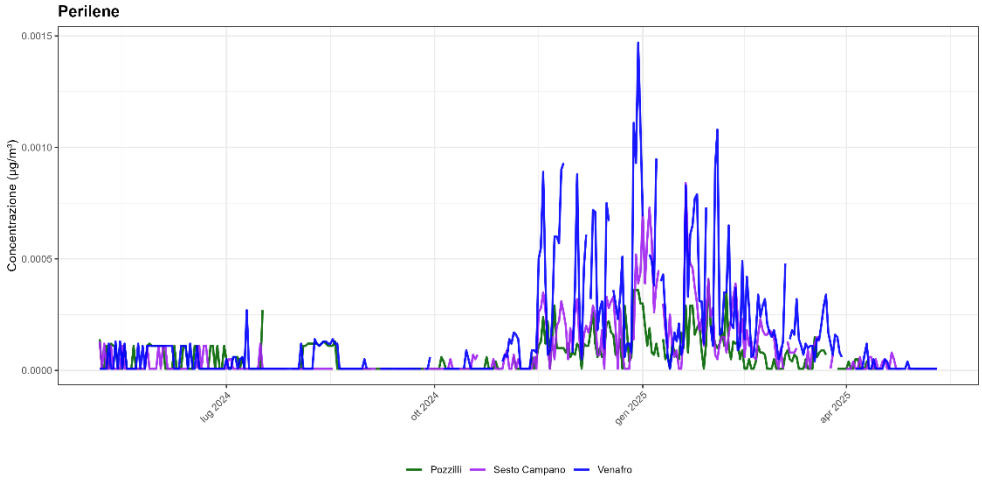


Grafico 74 - serie temporale perilene

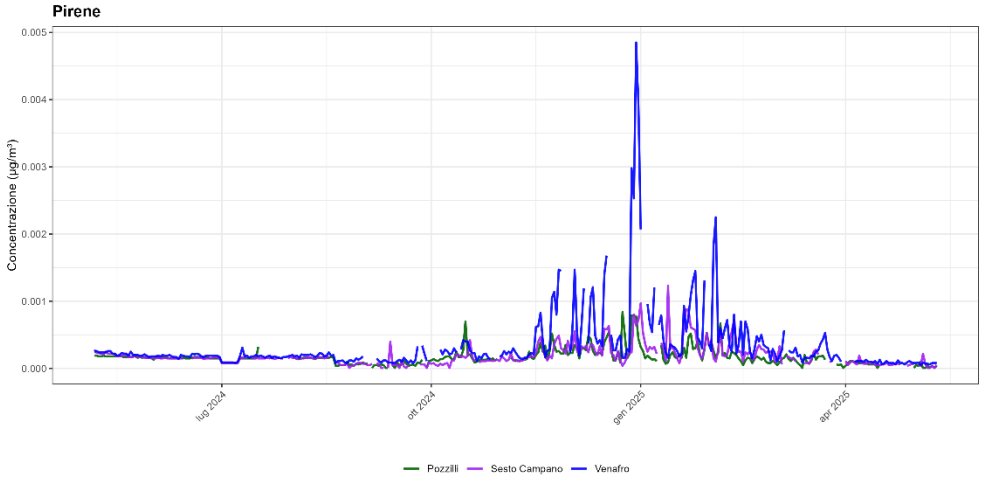


Grafico 75 - serie temporale pirene

11.2.1. Analisi delle specie chimiche nei giorni di dust

Oltre ai pattern stagionali descritti, si osserva che in corrispondenza degli episodi di trasporto di polveri desertiche identificati da ISPRA per il 2024 (cap. 8.1) alcune specie mostrano incrementi marcati. In particolare, gli elementi tipicamente associati alla componente minerale del particolato presentano valori più elevati nei giorni interessati dal dust. Questo comportamento è coerente con la natura del fenomeno e contribuisce a spiegare alcuni picchi osservati nelle serie temporali, soprattutto nei mesi estivi, quando tali specie mostrano normalmente concentrazioni più contenute. Nei grafici seguenti (Grafico 76 - Grafico 83) sono riportate esclusivamente le specie che mostrano un incremento evidente in corrispondenza degli episodi di trasporto di polveri desertiche per il 2024 (bande verticali).

Le specie minerali (Al, Ca, Fe, Mn, Mg) presentano aumenti netti e sincronizzati con gli episodi di dust, confermando la natura prevalentemente crostale del particolato trasportato. Anche il potassio (K) mostra incrementi in alcuni eventi, coerenti con la sua origine in parte minerale. I solfati (SO_4^{2-}) mostrano in alcuni episodi valori leggermente più elevati rispetto ai giorni circostanti, un comportamento compatibile con la possibile presenza di particelle desertiche che possono presentare un certo arricchimento in solfati durante il trasporto a lunga distanza.

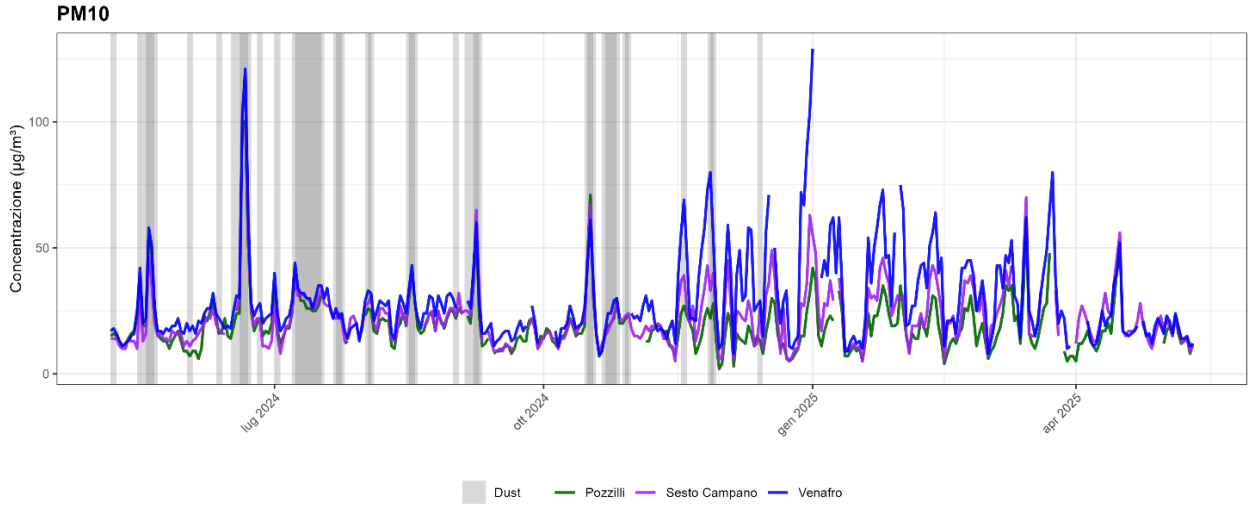


Grafico 76 - andamento temporale PM_{10} ed episodi di dust

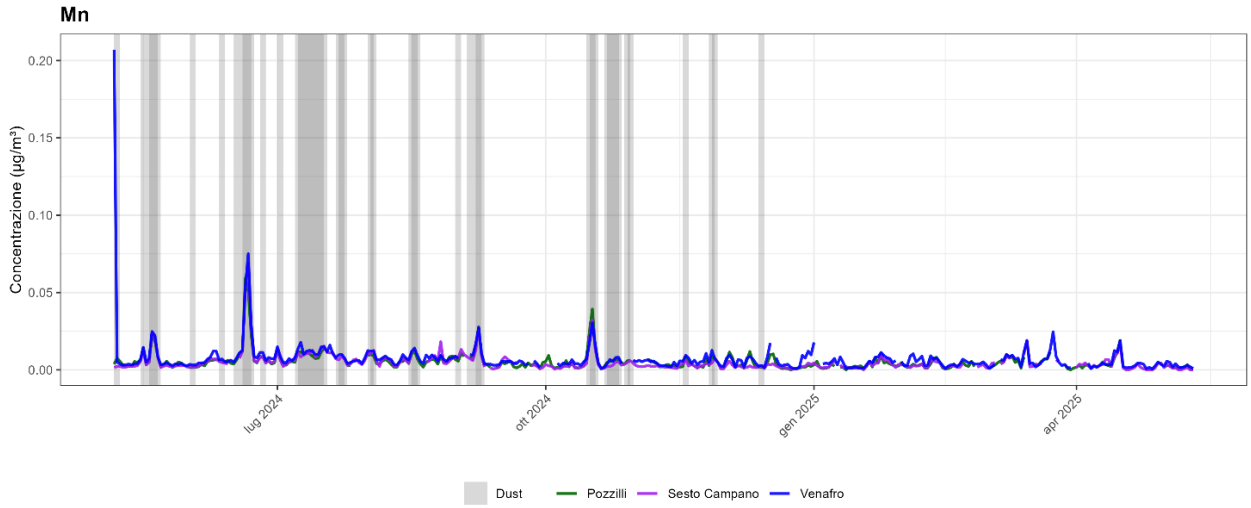


Grafico 77 - andamento temporale Mn ed episodi di dust

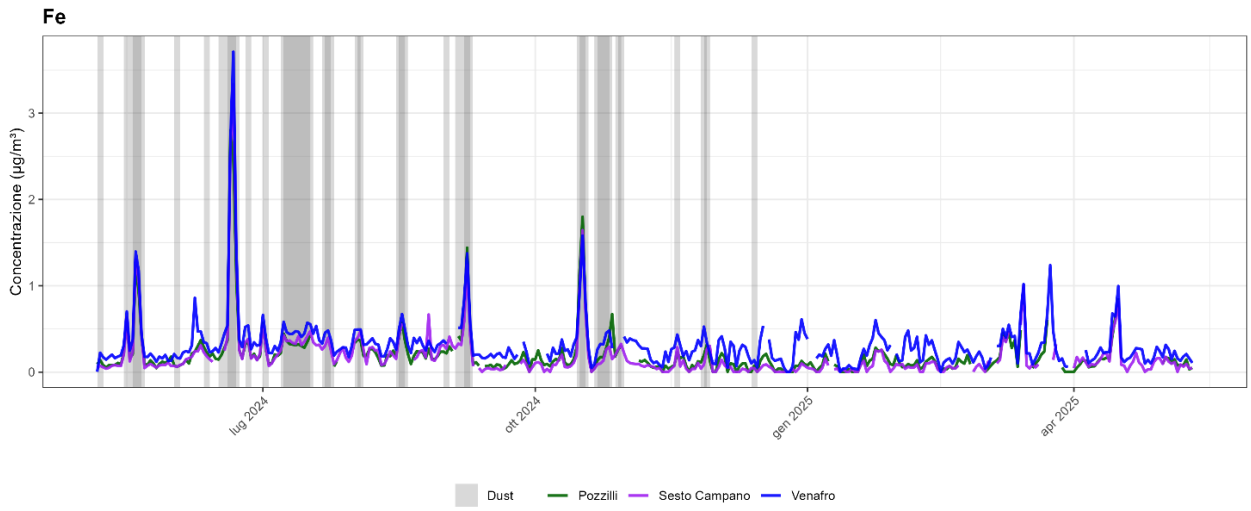


Grafico 78 - andamento temporale Fe ed episodi di dust

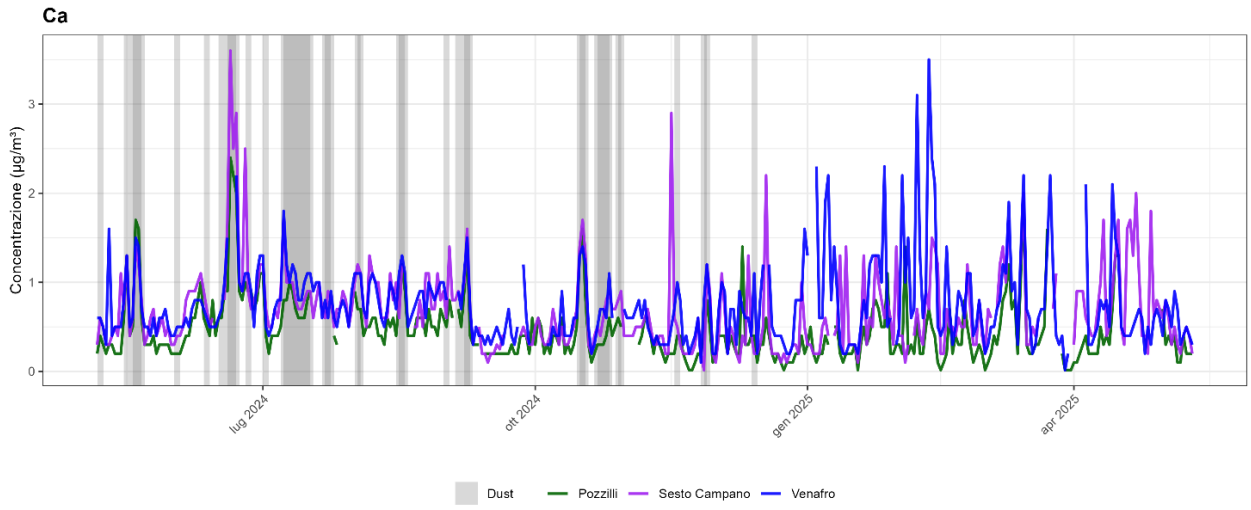


Grafico 79 - andamento temporale Ca ed episodi di dust

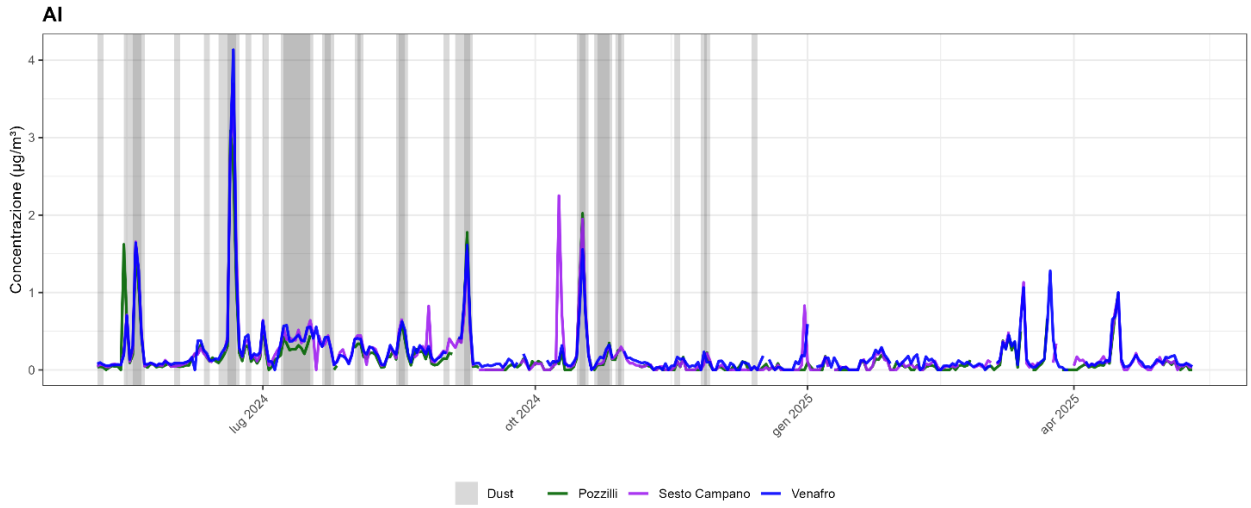


Grafico 80 - andamento temporale Al ed episodi di dust

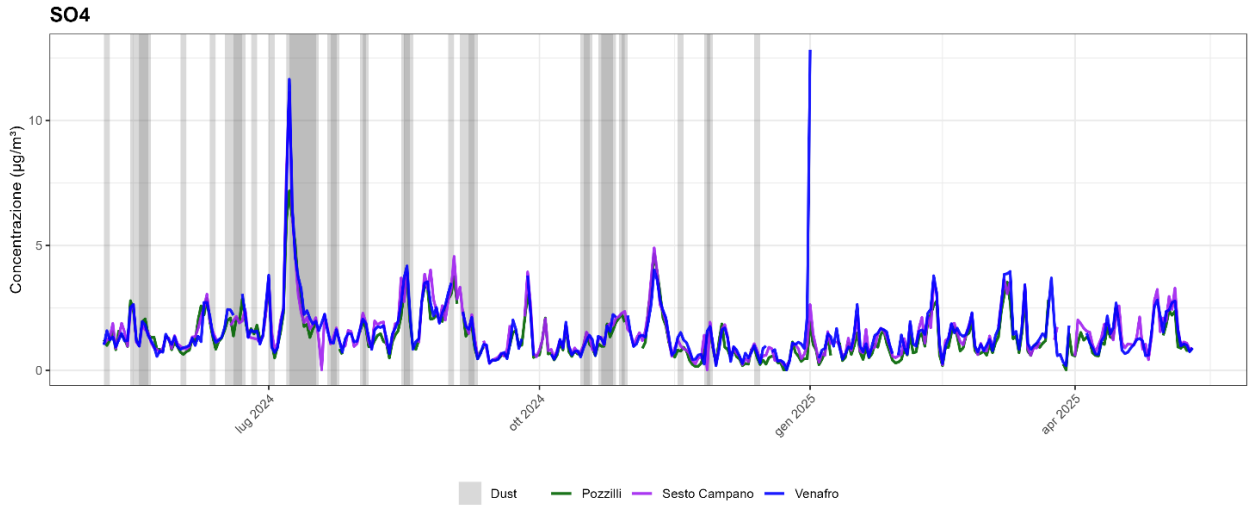


Grafico 81 - andamento temporale SO_4^{2-} ed episodi di dust

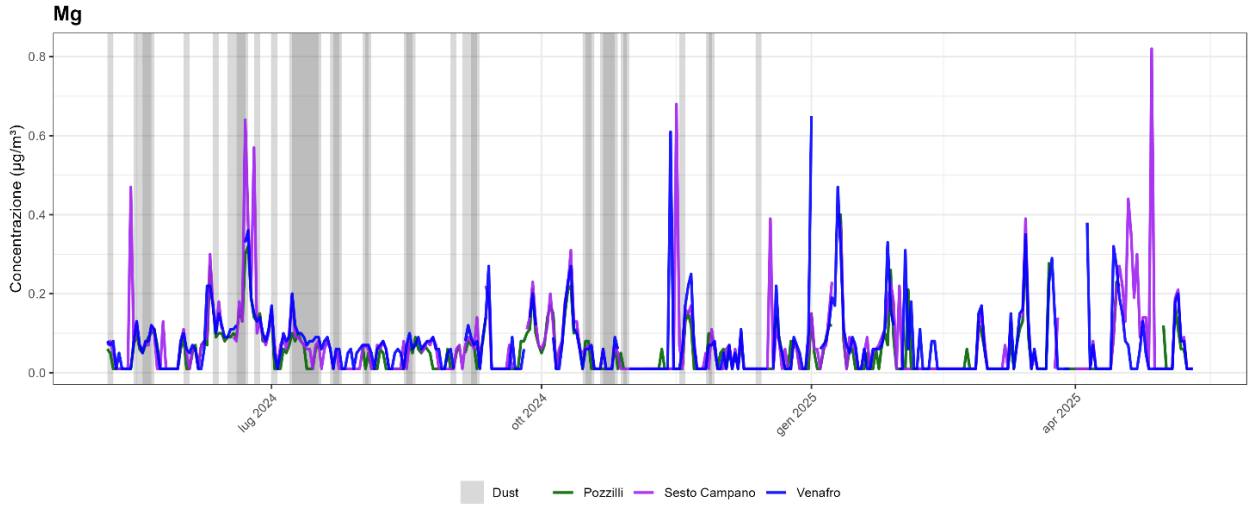


Grafico 82 - andamento temporale Mg ed episodi di dust

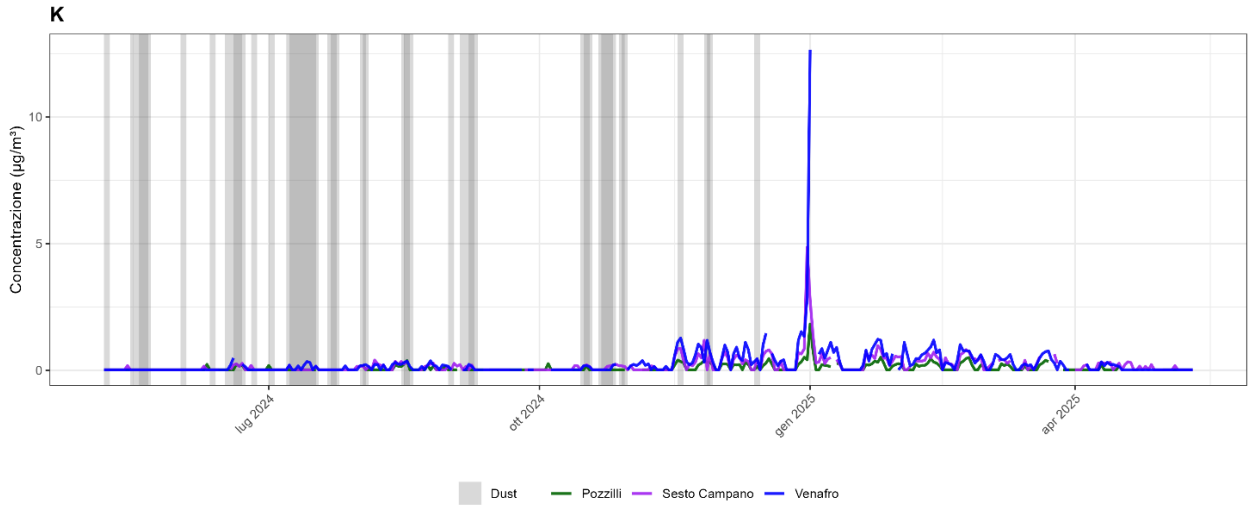


Grafico 83 - andamento temporale K ed episodi di dust

Considerazioni conclusive

L'analisi della composizione chimica del PM_{10} nei tre siti della piana venafrana evidenzia un quadro complessivamente coerente tra le diverse componenti e tra i diversi periodi dell'anno. Le specie secondarie inorganiche (NO_3^-, SO_4^{2-}, NH_4^+) e le componenti carboniose (OC ed EC) rappresentano la frazione più consistente del particolato, con una marcata stagionalità invernale che riflette le condizioni atmosferiche favorevoli all'accumulo e ai processi di formazione secondaria. I traccianti della biomassa (levoglucosano e K) mostrano incrementi significativi nei mesi freddi, indicando un contributo rilevante della combustione domestica, mentre i metalli che tipicamente presentano un contributo in massa inferiore, mostrano un comportamento più episodico, con differenze tra siti riconducibili a contributi locali specifici.

Gli IPA mostrano anch'essi una chiara stagionalità invernale e un andamento coerente con i traccianti della biomassa, suggerendo un ruolo predominante delle combustioni residenziali nei mesi più freddi.

12. Identificazione delle sorgenti del PM_{10} nella piana di Venafro

L'analisi della composizione chimica del PM_{10} fornisce informazioni essenziali sulle principali componenti del particolato e sulle loro dinamiche temporali e spaziali. Tuttavia, per comprendere in modo quantitativo il contributo delle diverse sorgenti emissive è necessario ricorrere a tecniche di source apportionment. In questo capitolo vengono presentati i risultati ottenuti mediante l'applicazione del modello Positive Matrix Factorization, uno strumento ampiamente utilizzato a livello internazionale per la scomposizione del particolato in fattori riconducibili a specifiche tipologie di sorgenti.

L'obiettivo dell'analisi è identificare i profili di sorgenti presenti nell'area di studio, quantificarne il contributo alla massa del PM_{10} e valutarne la variabilità stagionale e spaziale. I risultati della PMF, integrati con le evidenze emerse dalla caratterizzazione chimica, consentono di delineare un quadro più completo e robusto dei processi che influenzano la qualità dell'aria nella piana venafrana.

12.1. Il metodo PMF e l'identificazione delle sorgenti

Il metodo PMF è una tecnica statistica avanzata utilizzata per analizzare grandi insiemi di dati ambientali, come le concentrazioni di inquinanti atmosferici. Dal punto di vista matematico, la PMF scompone una matrice di dati complessi in due componenti fondamentali: i profili delle sorgenti, che descrivono quali specie

caratterizzano ciascun tipo di sorgente, e i contributi temporali, che indicano quanto ciascuna sorgente ha influito nei diversi periodi di osservazione. Questa scomposizione permette di trasformare un insieme di misure aggregate in una rappresentazione più leggibile dell'origine degli inquinanti.

La struttura dei fattori individuati dal modello – l'impronta dei profili e l'andamento dei contributi - deriva direttamente dall'elaborazione statistica dei dati. Il software PMF5, mette inoltre a disposizione strumenti diagnostici che consentono di valutare la stabilità dei risultati e la loro coerenza interna, fornendo un quadro oggettivo entro cui collocare l'interpretazione.

L'operatore interviene in una fase successiva, con un ruolo che non modifica i risultati prodotti dal modello, ma li interpreta alla luce delle conoscenze disponibili sul territorio, della letteratura e della plausibilità chimica delle specie considerate. L'interpretazione rimane comunque vincolata ai profili stimati, senza introdurre sorgenti non supportate dai dati né attribuire significati incompatibili con la struttura dei fattori. In questo modo, la fase interpretativa contribuisce a collegare i profili individuati dal modello a possibili sorgenti reali, mantenendo coerenza con le informazioni statistiche e chimiche disponibili.

L'identificazione delle sorgenti è quindi il risultato di un processo integrato: la PMF fornisce una base quantitativa robusta, mentre l'interpretazione esperta permette di attribuire ai fattori un significato fisico plausibile. Il metodo mantiene così un equilibrio tra la componente modellistica, che determina la struttura dei risultati, e la componente interpretativa, che ne consente una lettura ambientale coerente e applicabile.

La PMF, quindi, consente di individuare le sorgenti attive sul recettore e di quantificarne il contributo permettendo, quindi, di comprendere le cause che determinano la qualità dell'aria, offrendo una base conoscitiva solida per la definizione di interventi mirati e di politiche efficaci a tutela dell'ambiente e della salute collettiva.

Come illustrato in precedenza, nel corso del monitoraggio sono state incluse anche analisi relative agli IPA, tuttavia, questi dati non sono stati utilizzati nella procedura di PMF a causa delle loro caratteristiche chimico-fisiche. Gli IPA presentano, infatti, una forte variabilità stagionale e un'elevata reattività atmosferica, che porta a una loro rapida degradazione; di conseguenza, le loro concentrazioni risultano molto sensibili alle condizioni meteorologiche e alla reattività chimica. Questi comportamenti rendono difficile associare in modo stabile le concentrazioni misurate alle sorgenti originarie. Per questo motivo, includere gli IPA avrebbe potuto introdurre incertezze e distorsioni nell'analisi. Il metodo PMF, infatti, funziona meglio quando applicato a specie chimiche più stabili e rappresentative, come metalli, ioni e carbonio elementare/organico. La decisione di escludere gli IPA è quindi coerente con la prassi scientifica e rafforza la credibilità dei risultati ottenuti.

12.1.1. Dataset

Nel presente studio la procedura PMF è stata applicata considerando congiuntamente i dati provenienti dai tre siti di monitoraggio, Pozzilli, Sesto Campano e Venafro, tutti localizzati all'interno della piana venafrana. Questa scelta metodologica è stata motivata dal fatto che i tre siti condividono le medesime condizioni meteoclimatiche e sono influenzati da un insieme di sorgenti emissive sostanzialmente comuni.

L'integrazione dei dataset ha permesso di aumentare significativamente il numero di campioni disponibili, migliorando la stabilità statistica del modello e la definizione dei profili sorgente.

La PMF, infatti, fornisce risultati più robusti quando applicata a insiemi di dati ampi e rappresentativi: un numero maggiore di osservazioni riduce l'incertezza, limita gli effetti del rumore statistico e consente al modello di distinguere in modo più netto i diversi fattori emissivi. Le elaborazioni condotte sui singoli siti, pur restituendo indicazioni utili, mostravano profili meno definiti e una maggiore variabilità, dovuta proprio alla minore quantità di dati disponibili per ciascun sito.

L'analisi integrata sulla piana ha quindi permesso di ottenere profili più chiari, coerenti e interpretabili, rafforzando l'affidabilità complessiva dell'identificazione delle sorgenti. È importante sottolineare che, pur essendo stata eseguita su un dataset combinato, la PMF fornisce comunque i contributi specifici per ciascun sito, consentendo di valutare le differenze locali e di interpretare in modo dettagliato il comportamento delle sorgenti nelle diverse aree della piana.

12.1.2. Ruolo delle specie chimiche nel modello PMF

Le specie chimiche incluse nel dataset di input svolgono un ruolo fondamentale nell'identificazione dei profili sorgente, poiché ciascun composto fornisce informazioni specifiche sui processi emissivi e sulle trasformazioni atmosferiche che caratterizzano il particolato. I metalli quali Al, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Ni, V e altri elementi in traccia rappresentano indicatori utili per distinguere contributi di origine meccanica, crostale, industriale o legati all'usura di materiali. Gli ioni inorganici (NO_3^-, SO_4^{2-}, NH_4^+, Cl^-) permettono di descrivere la componente secondaria del particolato.

Il carbonio organico (OC) e il carbonio elementare (EC) costituiscono i traccianti delle sorgenti di combustione, sia di natura civile (riscaldamento) sia legate al traffico veicolare. I composti zuccherini quali levoglucosano, mannosano e galattosano rappresentano traccianti specifici della combustione di biomassa, mentre la massa totale di PM_{10} fornisce il riferimento quantitativo necessario per la ricostruzione dei contributi di sorgente.

Nel loro insieme, queste specie consentono al modello PMF di distinguere tra contributi di sorgente con caratteristiche chimiche differenti, fornendo una base informativa adeguata alla definizione dei profili sorgente e dei relativi andamenti temporali. La selezione delle specie utilizzate risponde ai criteri comunemente adottati negli studi di source apportionment, privilegiando composti stabili, rappresentativi e dotati di un chiaro valore tracciante.

12.2. Identificazione e contributo delle sorgenti

12.2.1. Profili dei fattori

L'analisi PMF ha consentito di identificare i fattori di sorgente e di quantificarne il contributo. Di seguito sono presentati i profili dei fattori individuati e la loro interpretazione.

Fattore - solfato di ammonio

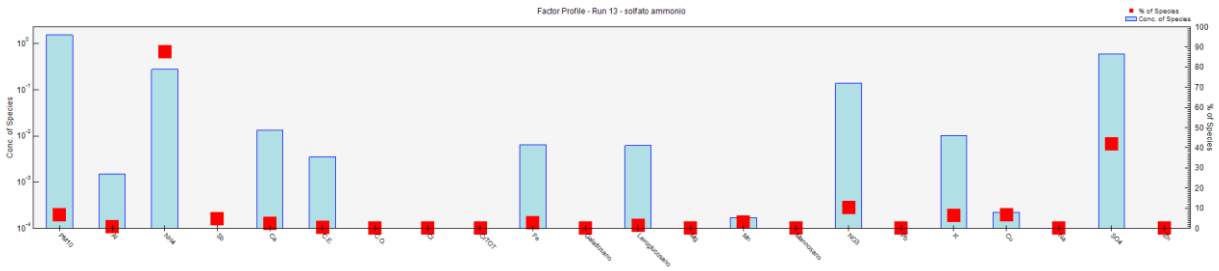


Grafico 84 - profilo solfato di ammonio

In questo fattore i marker principali sono SO_4^{2-} ed NH_4^+. Il profilo è caratterizzato da una dominanza netta di solfato e ammonio, tipica della formazione secondaria derivante dall'ossidazione della SO_2 e dalla successiva neutralizzazione da parte dell'ammoniaca. La composizione è coerente con un aerosol secondario regionale, prodotto da processi di trasformazione in atmosfera e trasporto su scala medio-lunga distanza.

Fattore - nitrato

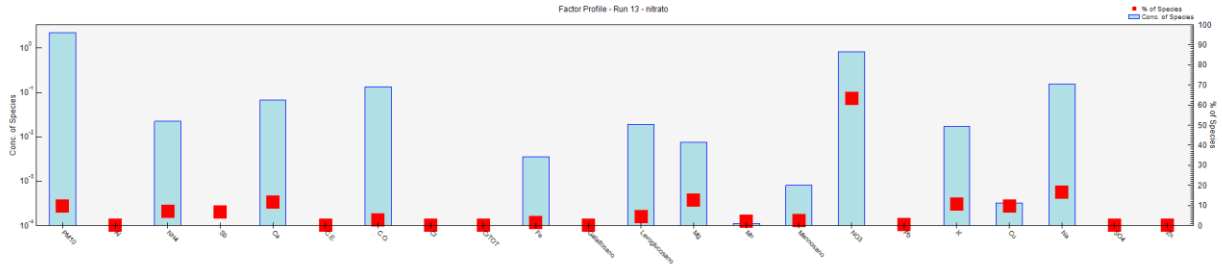


Grafico 85 - profilo nitrato

In questo fattore i marker principali sono: NO_3^-, Na, Mg, K. Il profilo è dominato dal nitrato, con contributi di sodio e magnesio che indicano la presenza di componenti inorganiche associate a particolato non combustivo.

Fattore - crostale

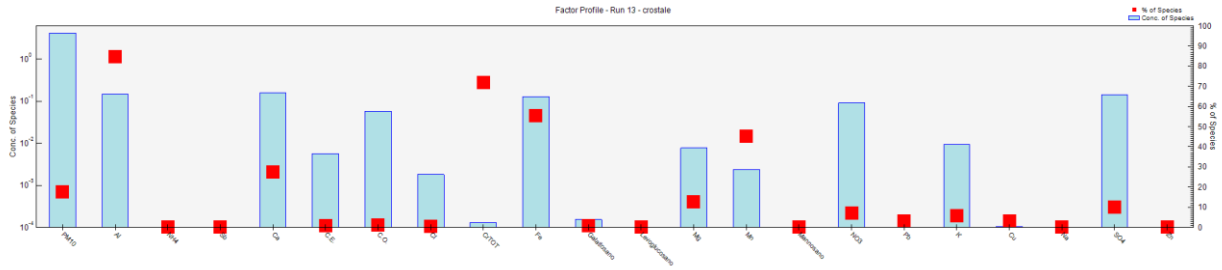


Grafico 86 - profilo crostale

In questo fattore i marker principali sono Al, Fe, Ca, Mg e Mn, elementi tipici del materiale minerale. Il profilo è chiaramente dominato da componenti terrigene, con la presenza di tracce di Cr che risultano comunque compatibili con polveri di origine litogenica. Nel complesso, la composizione riflette la risospensione di polveri del suolo e di materiale minerale, associata a traffico su superfici non asfaltate, vento e attività meccaniche.

Fattore - biomass burning

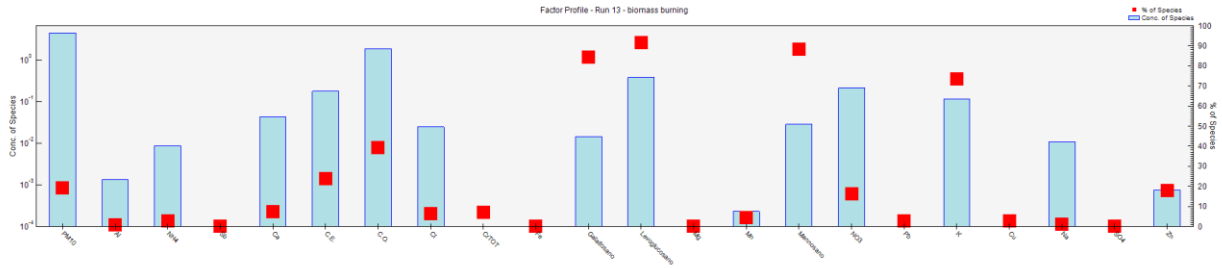


Grafico 87 - profilo biomass burning

In questo fattore i marker principali sono levoglucosano, mannosano, galattosano, K e OC. Il profilo è dominato dagli anidrozuccheri, marker altamente specifici della combustione di materiale lignocellulosico, accompagnati da un contributo significativo di potassio. La composizione è tipica delle emissioni generate dalla combustione di biomassa legnosa a scala domestica, che rappresentano la sorgente più coerente con questo insieme di specie chimiche.

Fattore - traffico

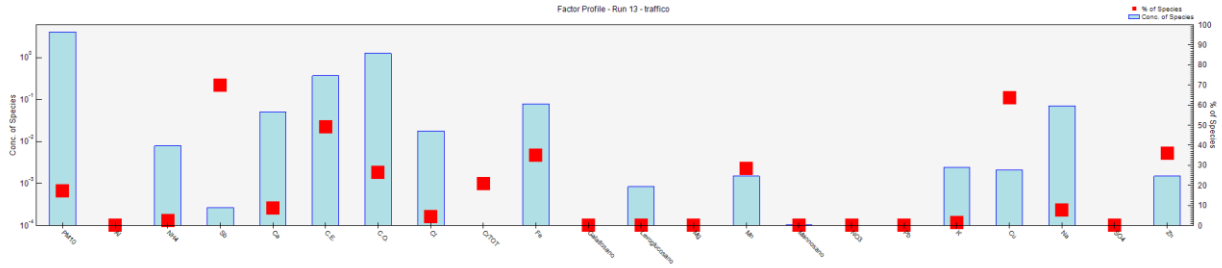


Grafico 88 - profilo traffico

In questo fattore i marker principali sono Sb, Cu, Zn, EC, OC e Fe. Il profilo mostra una presenza significativa di antimonio, rame e zinco, elementi che rappresentano marker diagnostici dell'usura dei freni e dei componenti meccanici dei veicoli. Accanto a questi, la presenza di EC indica un contributo legato ai processi di combustione. Nel complesso, la composizione è coerente con emissioni da traffico veicolare, che combinano sia la componente di usura meccanica sia quella derivante dalla combustione.

Fattore - mix antropogenico

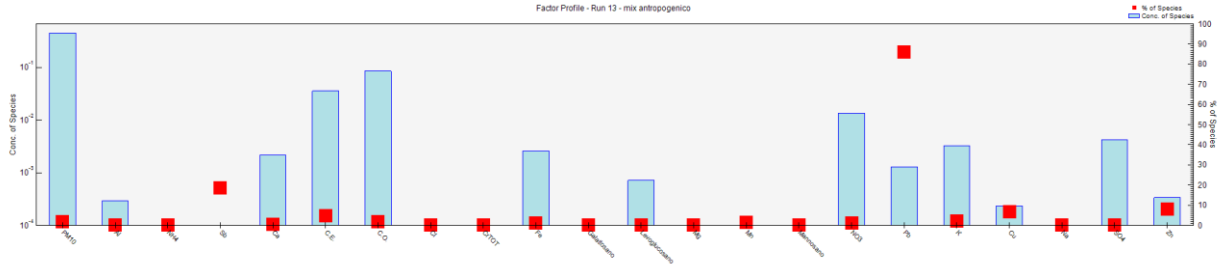


Grafico 89 - profilo mix antropogenico

In questo fattore il marker principale è il Pb. Il profilo mostra una combinazione di metalli e componenti carboniose che non evidenzia una firma chimica specifica. La presenza contemporanea di specie inorganiche e carboniose suggerisce contributi antropogenici eterogenei, senza una sorgente dominante chiaramente identificabile. Nel complesso, la composizione è coerente con un mix di sorgenti antropogeniche diffuse, non riconducibili a un'unica tipologia di sorgente.

Fattore - aerosol marino

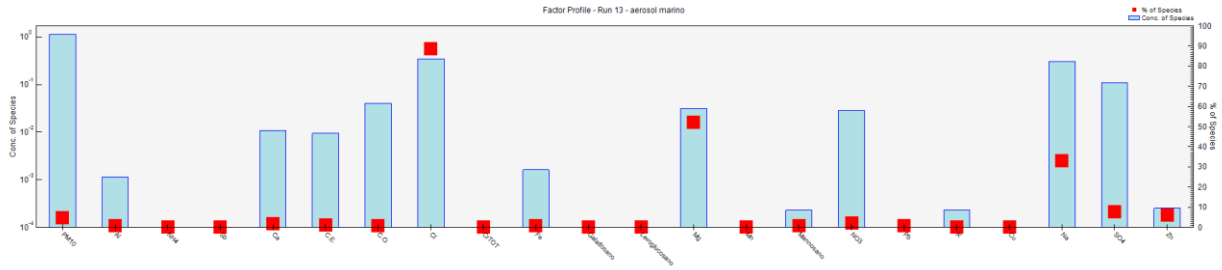


Grafico 90 - profilo aerosol marino

In questo fattore i marker principali sono Cl^-, Na, Mg ed SO_4^{2-} Il profilo è dominato dal cloro, accompagnato da concentrazioni elevate di sodio e magnesio, una combinazione che rappresenta la firma tipica del sale marino. La presenza di solfato indica una componente parzialmente trasformata, compatibile con processi di invecchiamento dell'aerosol durante il trasporto atmosferico. Nel complesso, la composizione è caratteristica di aerosol marino, sia nella sua forma primaria sia in quella modificata da reazioni in atmosfera.

Fattore - industrial

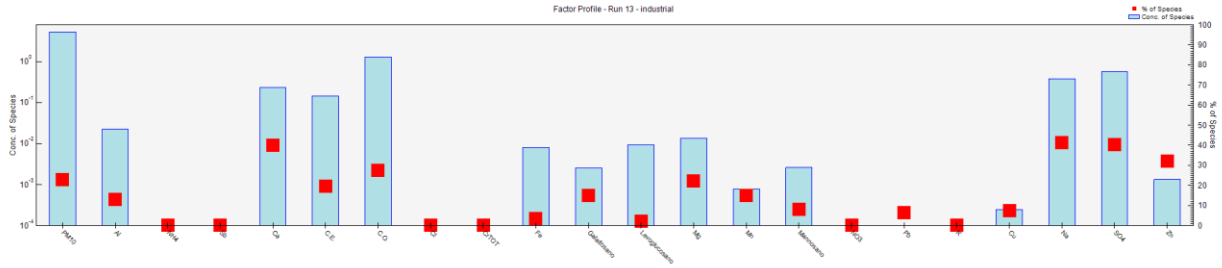


Grafico 91 - profilo industrial

Il profilo è caratterizzato da elevate concentrazioni di Ca, SO_4^{2-}, Na, Mg, Al e Fe, che definiscono una matrice minerale associata a processi industriali ad alta temperatura. Le alte percentuali di sodio e solfato suggeriscono la presenza di cicli termici complessi, mentre la componente Zn, OC ed EC indica contributi legati alla combustione e all'impiego di combustibili convenzionali o alternativi. L'assenza di marker urbani e naturali (Sb, K, Cl^-, NO_3^-) esclude sorgenti veicolari, biomassa o aerosol marino. Nel complesso, la composizione è coerente con emissioni industriali articolate, tipiche di impianti che trattano materiali minerali ad alta temperatura, senza consentire un'attribuzione specifica a una singola sorgente.

12.2.2. Contributo delle sorgenti

La Tabella 30 riporta le concentrazioni associate ai diversi fattori individuati dal modello PMF, espresse in µg/m^3. Questi valori rappresentano l'intensità media del contributo di ciascun fattore al particolato e consentono di delineare il peso relativo delle principali sorgenti che compongono il PM_{10} nel periodo analizzato. Nel complesso, il modello evidenzia un'elevata capacità di riprodurre la concentrazione totale di particolato osservata: il PM_{10} ricostruito risulta pari a 23.65 µg/m^3, un valore praticamente coincidente con quello misurato, pari a 23.67 µg/m^3, ottenuto come media delle concentrazioni rilevate nei tre siti di monitoraggio. Lo scostamento minimo tra le due stime conferma la coerenza della soluzione individuata e la buona rappresentatività dei fattori estratti, indicando che la scomposizione proposta dal modello descrive in modo efficace la composizione del particolato nel periodo considerato.

solfato ammonio	nitrato	crostale	biomass burning	traffico	mix antropogenico	aerosol marino	industrial
1.5 µg/m^3	2.3 µg/m^3	4.3 µg/m^3	4.5 µg/m^3	4.0 µg/m^3	0.5 µg/m^3	1.2 µg/m^3	5.3 µg/m^3

Tabella 30 - contributi in concentrazione dei fattori nella piana

I contributi più elevati sono associati ai fattori industrial, biomass burning, crostale e traffico, mentre risultano più contenuti quelli legati al nitrato, mix antropogenico e all'aerosol marino.

- Industrial (5.3 µg/m^3) - È il contributo più elevato della tabella, indicando una presenza significativa di sorgenti industriali nell'area. Un valore di questa entità suggerisce un ruolo strutturale di attività produttive o impianti emissivi nella composizione del PM_{10}.
- Biomass burning (4.5 µg/m^3) - Contributo molto rilevante, compatibile con combustioni residenziali, con uso di legna per riscaldamento domestico. La sua entità lo colloca tra i fattori principali.
- Crostale (4.3 µg/m^3) - Indica un apporto importante di materiale di origine naturale o meccanica (risospensione, suolo, polveri stradali). Un contributo così alto è tipico di periodi secchi o aree con traffico pesante e superfici non asfaltate.
- Traffico (4.0 µg/m^3) - Contributo consistente, in linea con la presenza di emissioni veicolari e risospensione da traffico. Il contributo è comparabile a quella del crostale e del biomass burning.

- Nitrato (2.3 µg/m^3) - Valore intermedio, compatibile con processi secondari legati alle emissioni di NO_X e alla formazione di particolato secondario in condizioni atmosferiche favorevoli.
- Solfato ammonio (1.5 µg/m^3) - Contributo più contenuto, tipico della componente secondaria del particolato derivante da trasformazioni di SO_2 e ammoniaca.
- Aerosol marino (1.2 µg/m^3) - Presenza modesta, indicativa di un trasporto regionale di masse d'aria marine.
- Mix antropogenico (0.5 µg/m^3) - È il contributo più basso, probabilmente rappresenta un fattore residuale o un insieme di sorgenti minori non dominanti.

La composizione suggerisce, quindi, un quadro in cui sorgenti antropogeniche e naturali contribuiscono entrambe in modo significativo, con una prevalenza dei fattori industriali e da combustione. La presenza consistente del crostale indica un ruolo importante della risospensione, mentre i fattori secondari (nitrato e solfato) mostrano un contributo non trascurabile, ma meno dominante.

Per fornire una visione sintetica del peso relativo delle sorgenti individuate, il Grafico 92 riporta il contributo percentuale dei fattori identificati. Il grafico consente di valutare in modo immediato la ripartizione delle sorgenti rispetto al particolato campionato.

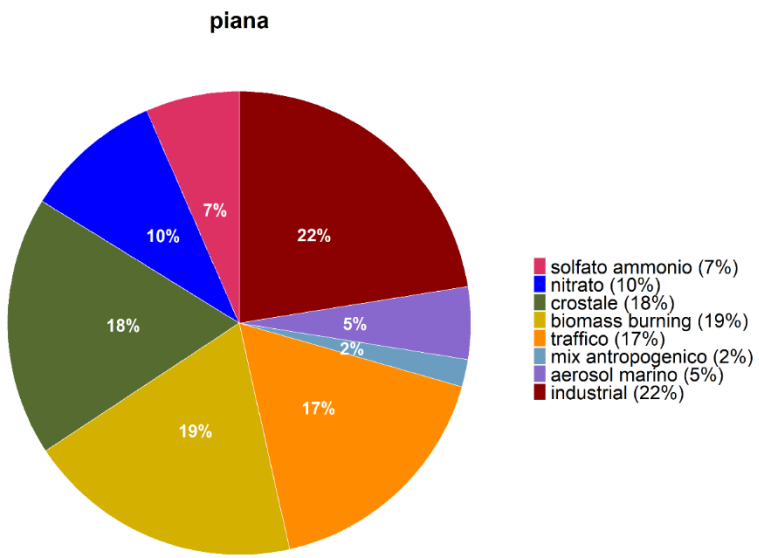


Grafico 92 - contributo percentuale delle sorgenti piana

L'analisi evidenzia che il contributo maggiore è associato al fattore industriale, che rappresenta il 22% del totale. Seguono il biomass burning (19%), il fattore crostale (18%) e il traffico (17%), che insieme costituiscono una frazione rilevante (76%) del PM_{10}.

Il nitrato contribuisce per il 10%, mentre il solfato di ammonio rappresenta il 7% del particolato. Quote più contenute sono attribuite all'aerosol marino (5%) e al mix antropogenico (2%).

12.2.3. Andamento temporale dei contributi dei fattori

Per completare l'interpretazione dei fattori individuati, è stato analizzato anche il loro andamento temporale. L'evoluzione dei contributi nel tempo consente di evidenziare eventuali variazioni stagionali, episodi emissivi specifici o comportamenti ricorrenti associati alle diverse sorgenti. L'osservazione delle serie

temporali permette, inoltre, di verificare la coerenza dei profili identificati e di supportare l'interpretazione delle sorgenti proposte.

L'analisi degli andamenti temporali mostra che la maggior parte dei fattori presenta un comportamento relativamente costante nel corso del periodo di monitoraggio. Fa chiaramente eccezione il fattore associato al biomass burning, che evidenzia un marcato incremento nei mesi invernali (Grafico 96), coerente con l'aumento delle combustioni domestiche per il riscaldamento. Il fattore crostale (Grafico 95), invece, presenta un aumento nei mesi estivi.

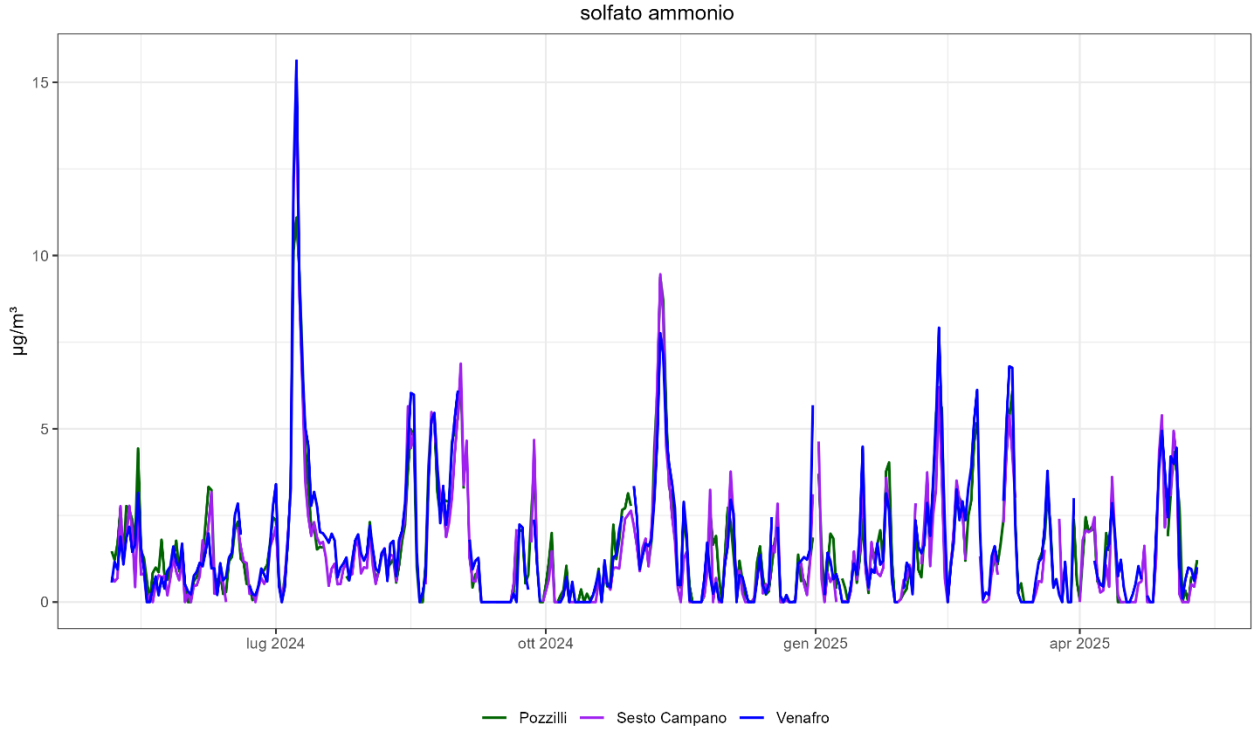


Grafico 93 - andamento temporale solfato di ammonio

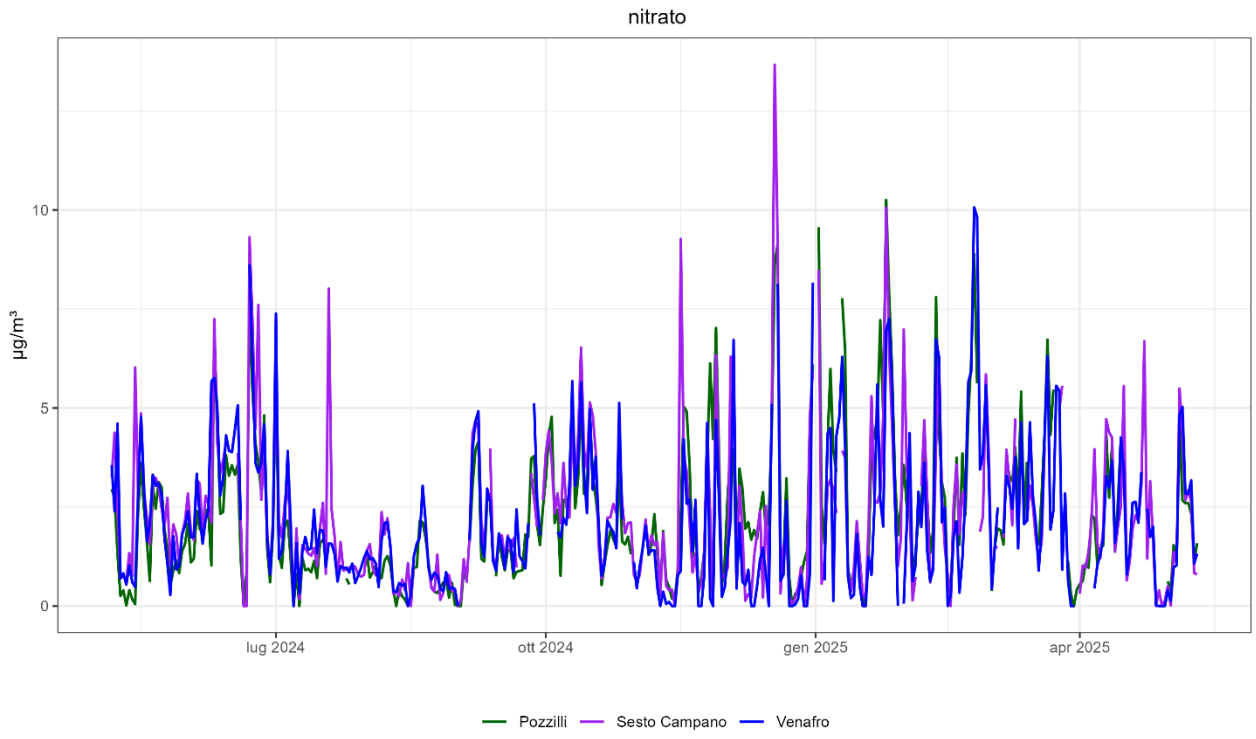


Grafico 94 - andamento temporale nitrato

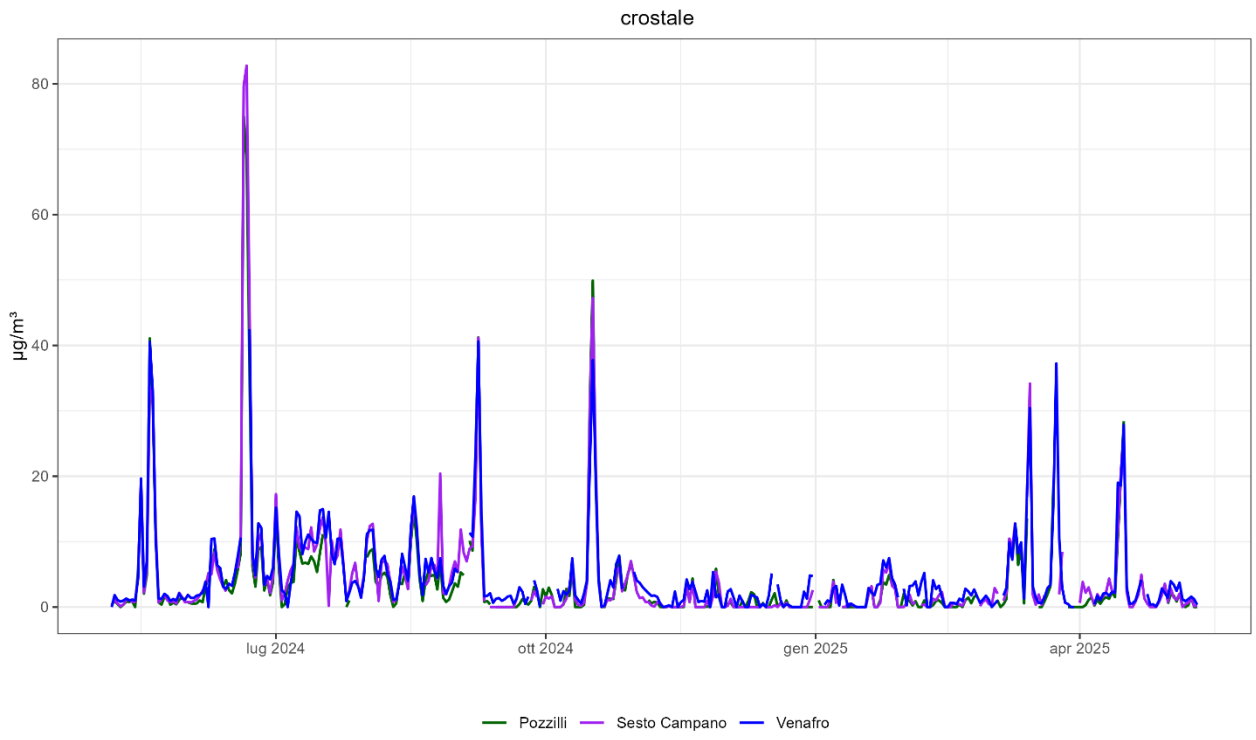


Grafico 95 - andamento temporale crostale

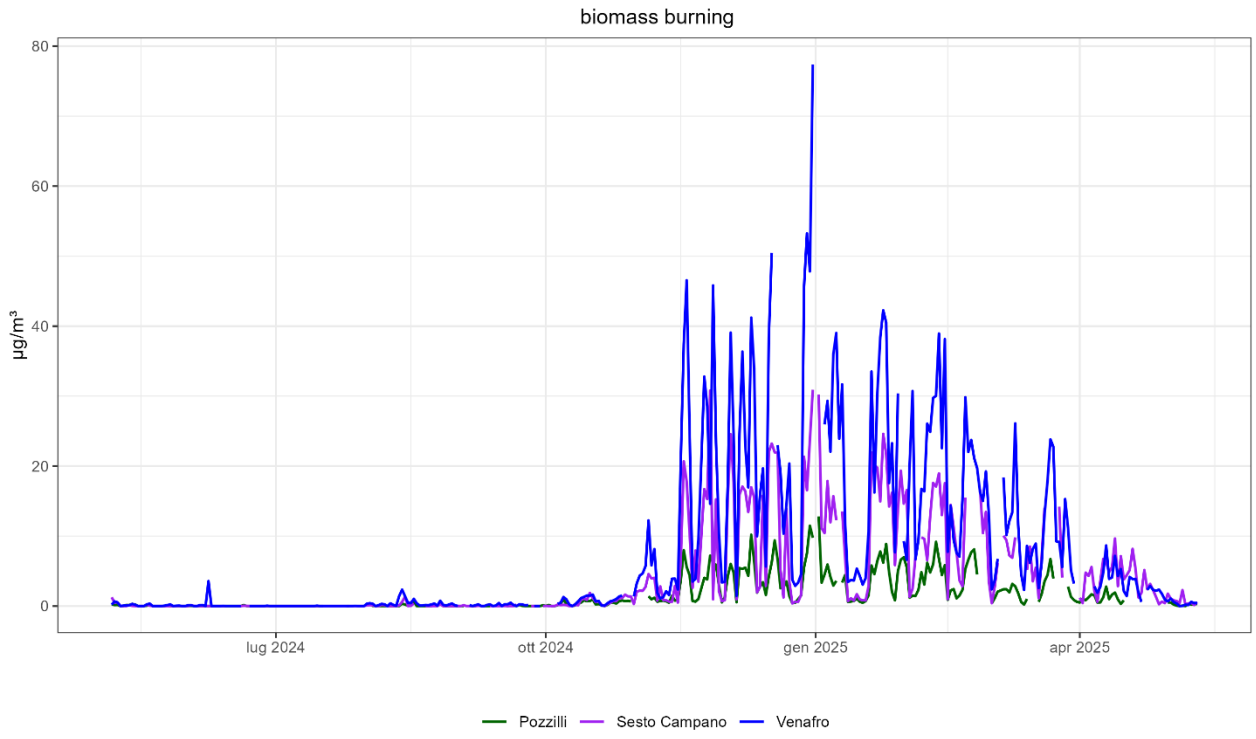


Grafico 96 - andamento temporale biomass burning

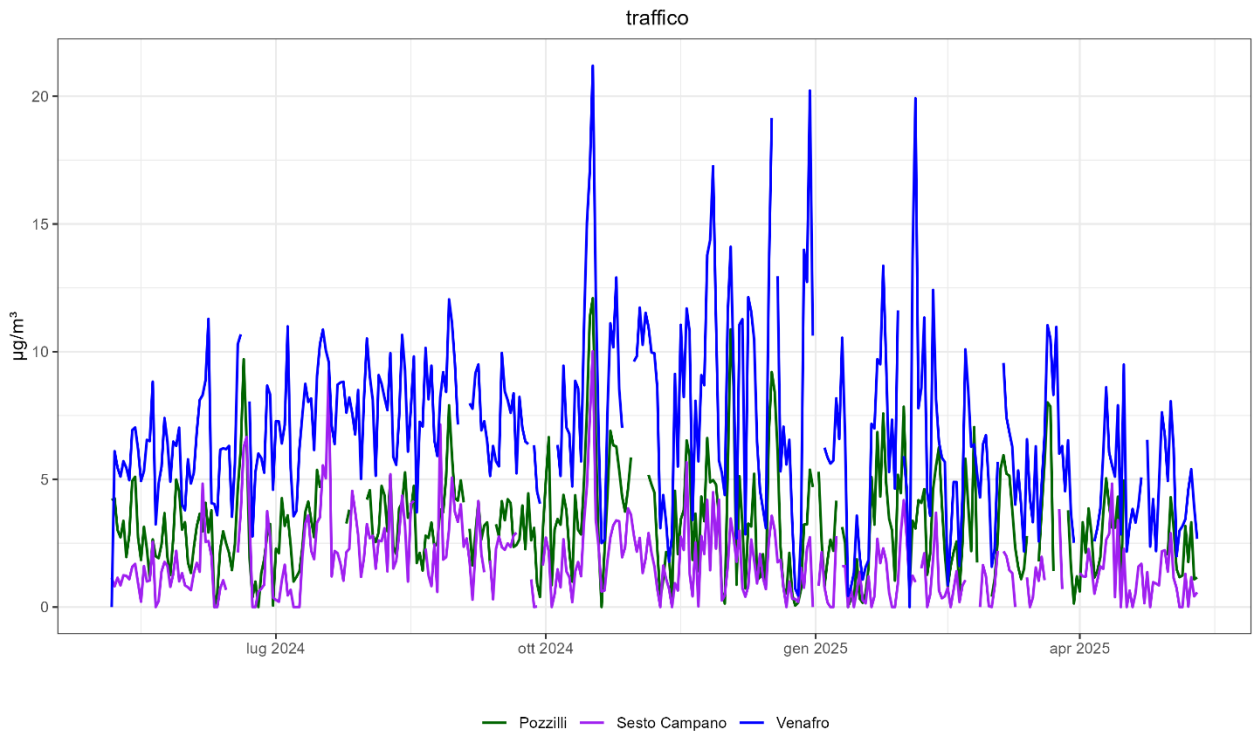


Grafico 97 - andamento temporale traffico

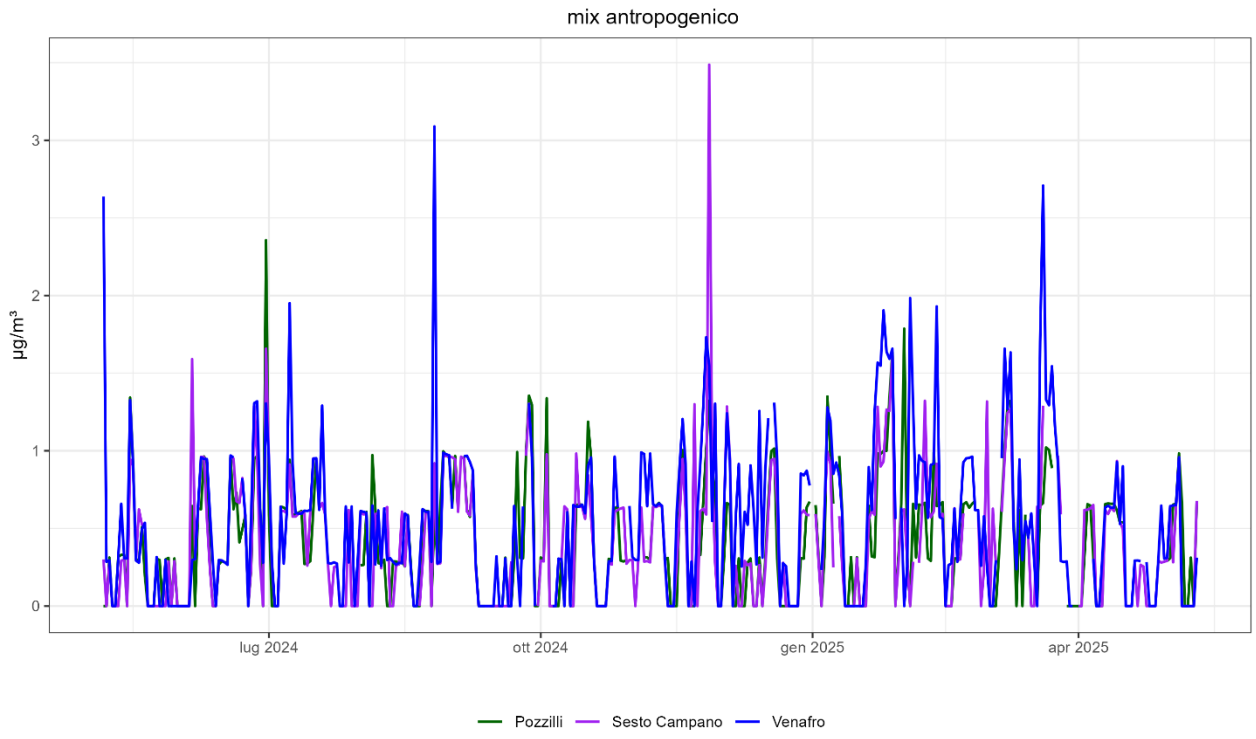


Grafico 98 - andamento temporale mix antropogenico

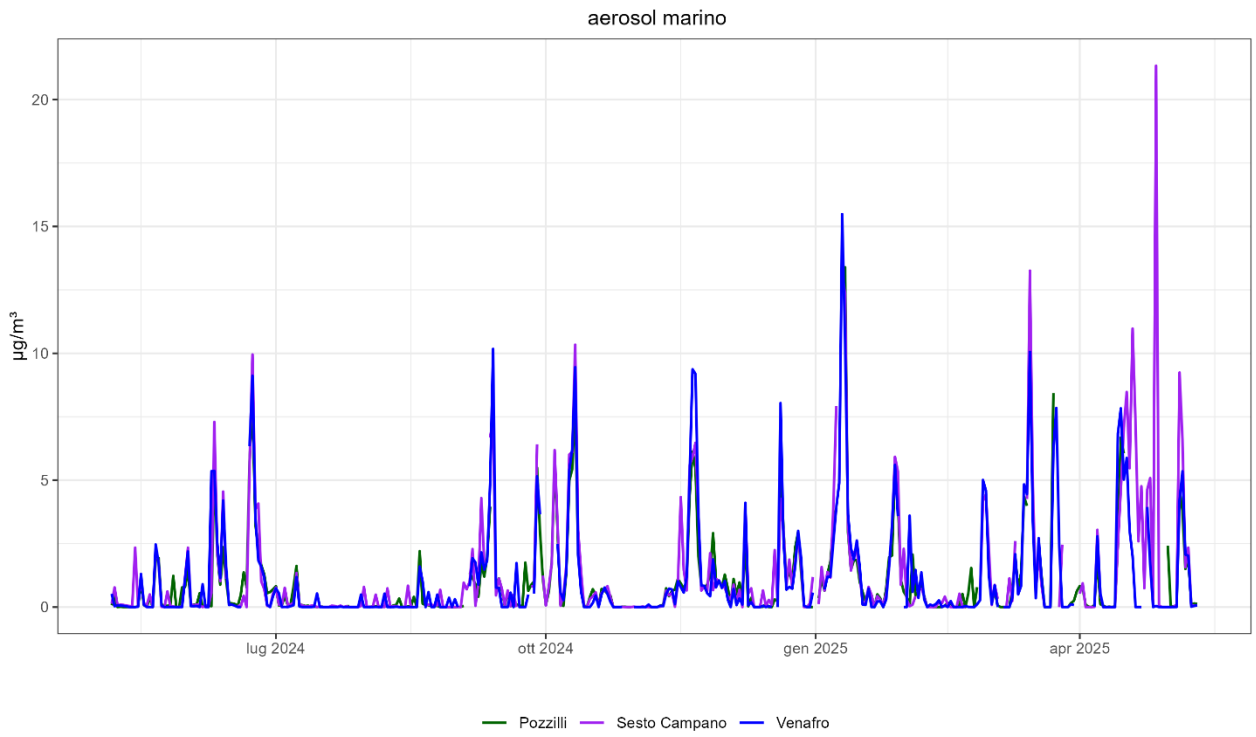


Grafico 99 - andamento temporale aerosol marino

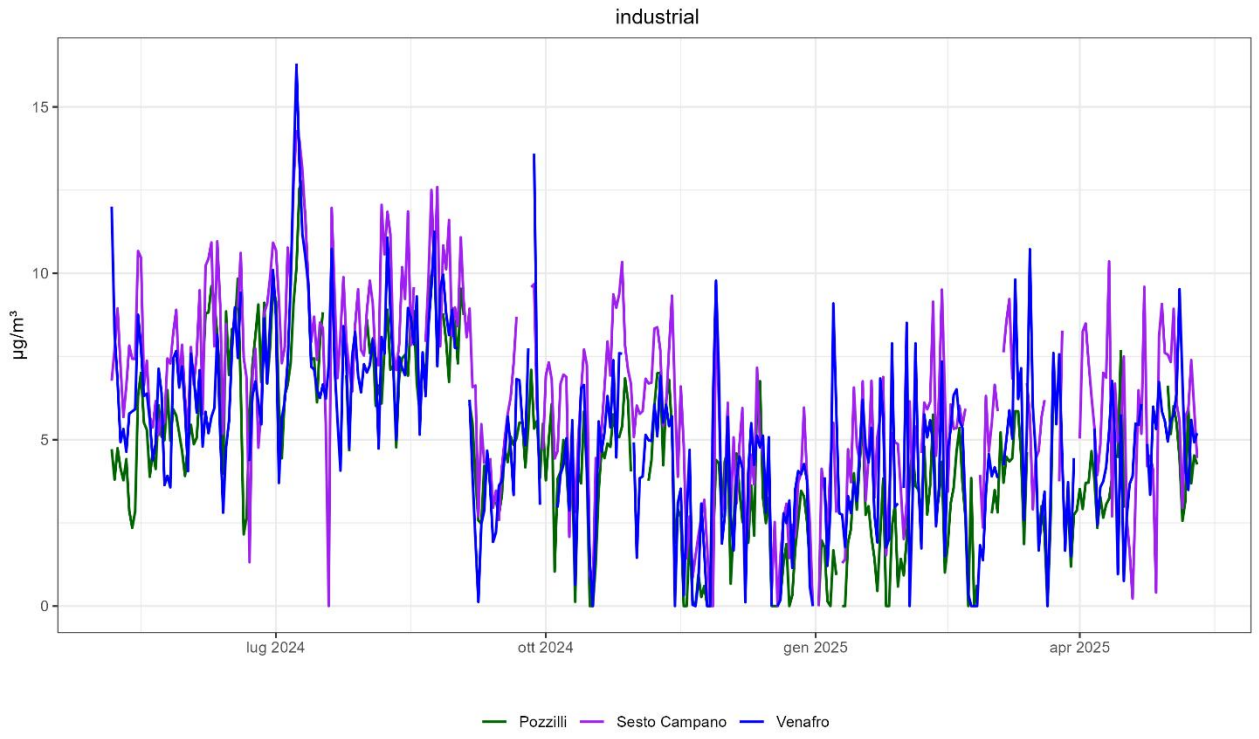


Grafico 100 - andamento temporale indutrial

12.2.4. Analisi mensile

Il Grafico 101 e il Grafico 102 mostrano l'andamento mensile da cui emerge che nei primi mesi dell'anno ci sono contributi elevati dei fattori più sensibili alle condizioni fredde: biomass burning rappresenta il contributo dominante sia in valore assoluto (12.2 µg/m^3 in gennaio, 12.0 µg/m^3 in febbraio) sia in percentuale (oltre il 43%), mentre nitrato, traffico e industrial mantengono valori intermedi ma comunque significativi. Questa configurazione si riflette nelle percentuali, che vedono biomass burning assumere un ruolo preponderante nella struttura del particolato, accompagnato da contributi non trascurabili di nitrato e delle componenti legate alle attività antropiche.

Con l'avanzare della primavera, i dati mostrano una diminuzione progressiva e continua dei fattori invernali. In marzo e aprile, biomass burning scende rispettivamente a 6.8 e 2.9 µg/m^3, mentre nitrato si riduce fino a 2.0 µg/m^3. Parallelamente, la loro incidenza percentuale cala in modo coerente, lasciando spazio a una distribuzione più equilibrata tra i diversi contributi. In questi mesi aumentano, infatti, le quote relative di crostale, aerosol marino e solfato ammonio, che pur mantenendo valori assoluti moderati acquisiscono un peso percentuale maggiore grazie alla riduzione dei fattori dominanti dell'inverno. In questo stesso periodo emerge con chiarezza anche il contributo industrial, che cresce fino a raggiungere il 25% in aprile e quasi il 34% in maggio, assumendo un ruolo sempre più rilevante nella composizione del particolato.

Durante l'estate, la composizione percentuale assume una configurazione completamente diversa. I fattori tipicamente invernali diventano marginali (biomass burning scende fino a valori prossimi allo zero in luglio e agosto), mentre emergono in modo netto i contributi caratterizzati da un andamento temporale più stabile. Il Crostale diventa uno dei fattori principali (10.6 µg/m^3 in giugno, 7.1 µg/m^3 in luglio), affiancato da industrial, che raggiunge valori compresi tra 7.1 e 8.3 µg/m^3 e percentuali comprese tra il 25% e oltre il 36%. Anche traffico mantiene un andamento regolare e una presenza percentuale significativa, mentre solfato ammonio e aerosol marino mostrano un maggiore contributo relativo pur mantenendo valori assoluti contenuti.

Con l'arrivo dell'autunno, i dati evidenziano una graduale ricomparsa dei contributi invernali. In settembre e ottobre si osserva un aumento dei valori di nitrato e biomass burning, che in novembre e dicembre tornano a crescere sia in termini assoluti (biomass burning raggiunge 7.4 µg/m^3 in novembre e 13.6 µg/m^3 in dicembre) sia percentuali (oltre il 32% in novembre e più del 52% in dicembre). Parallelamente, i contributi estivi si riducono, ristabilendo la configurazione tipica dei mesi freddi. In questa fase, industrial decresce gradualmente ma mantiene comunque un ruolo significativo, con percentuali comprese tra il 17% e il 28%.

Nel complesso, i due grafici descrivono un ciclo annuale ordinato e coerente:

- una fase invernale dominata dai fattori più sensibili alle condizioni fredde e stagnanti,
- una fase estiva in cui prevalgono i contributi di fondo e le componenti più stabili,
- due transizioni intermedie che accompagnano la progressiva diminuzione e successiva ricomparsa dei fattori stagionali.

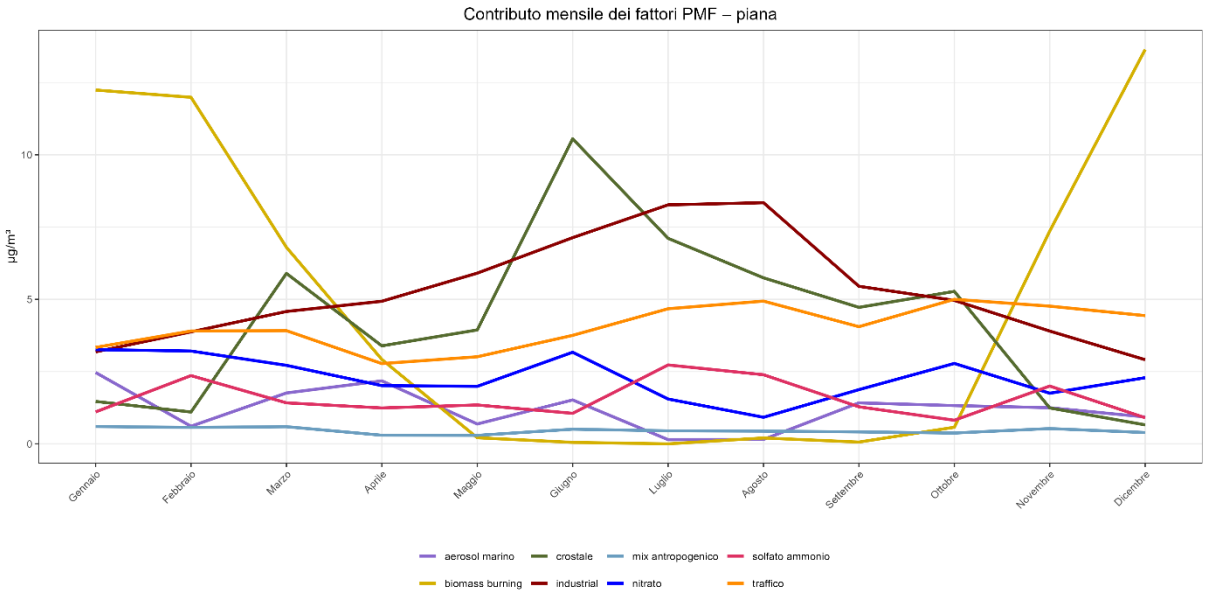


Grafico 101 - contributo mensile fattori piana

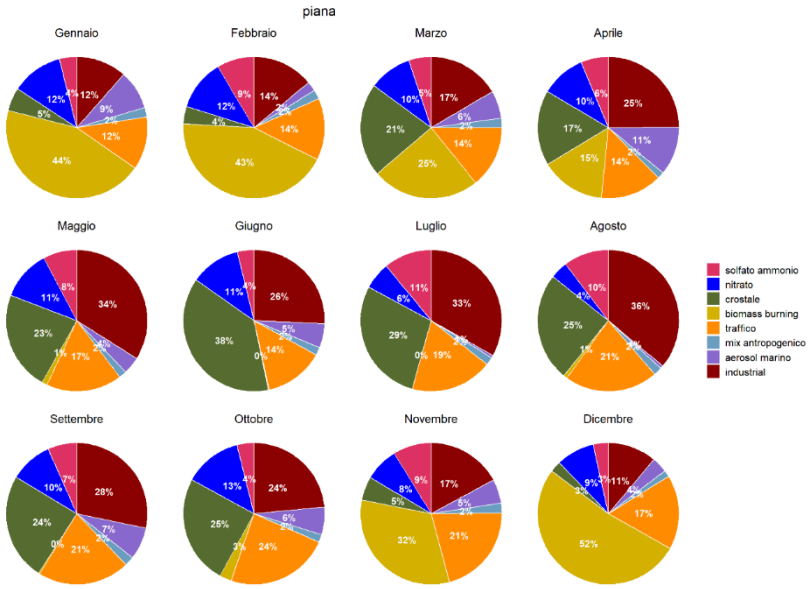


Grafico 102 - contributo percentuale mensile piana

A integrazione della lettura complessiva, si riportano di seguito i grafici mensili dei singoli fattori, utili a evidenziarne nel dettaglio le specifiche dinamiche stagionali.

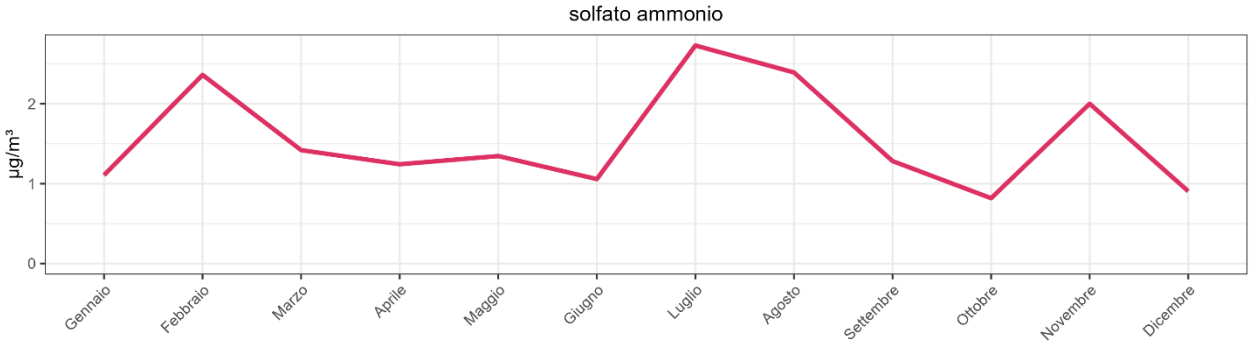


Grafico 103 - contributo mensile solfato di ammonio piana

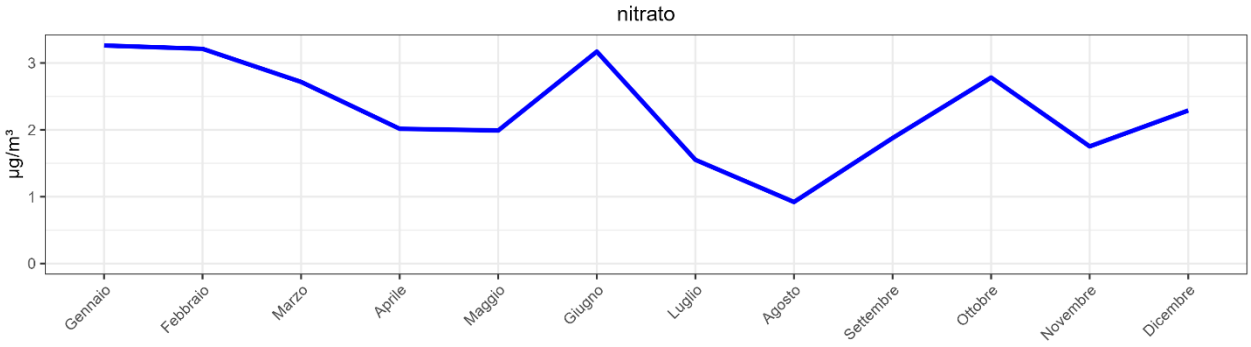


Grafico 104 - contributo mensile nitrato piana

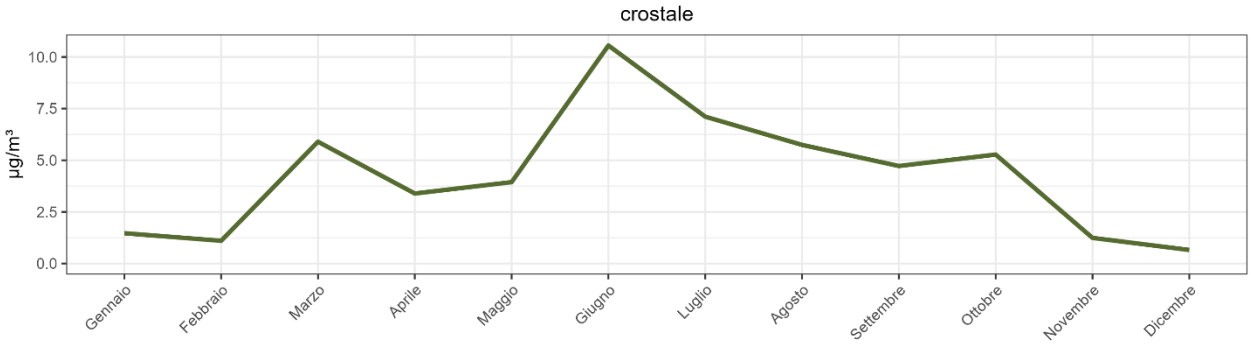


Grafico 105 - contributo mensile crostale piana

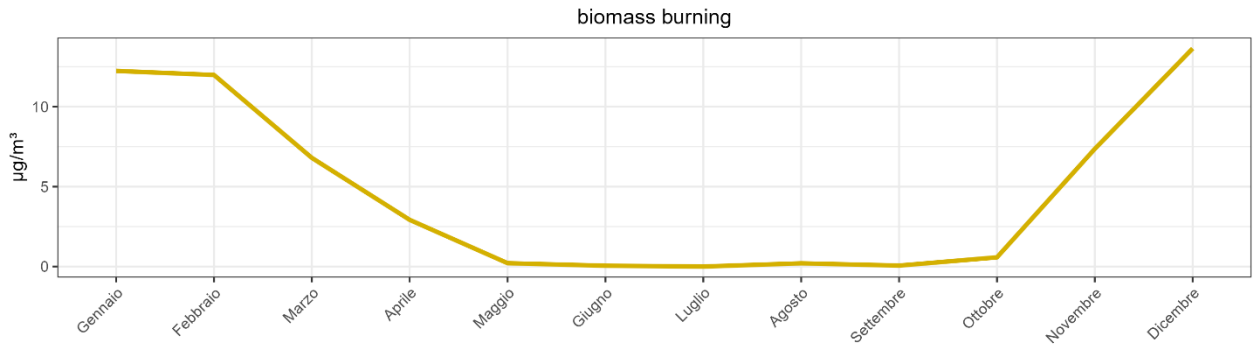


Grafico 106 - contributo mensile biomass burning piana

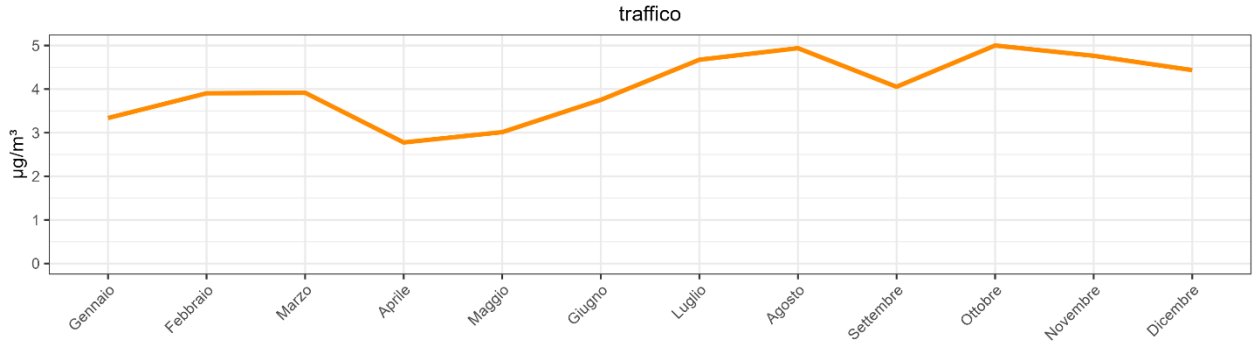


Grafico 107 - contributo mensile traffico piana

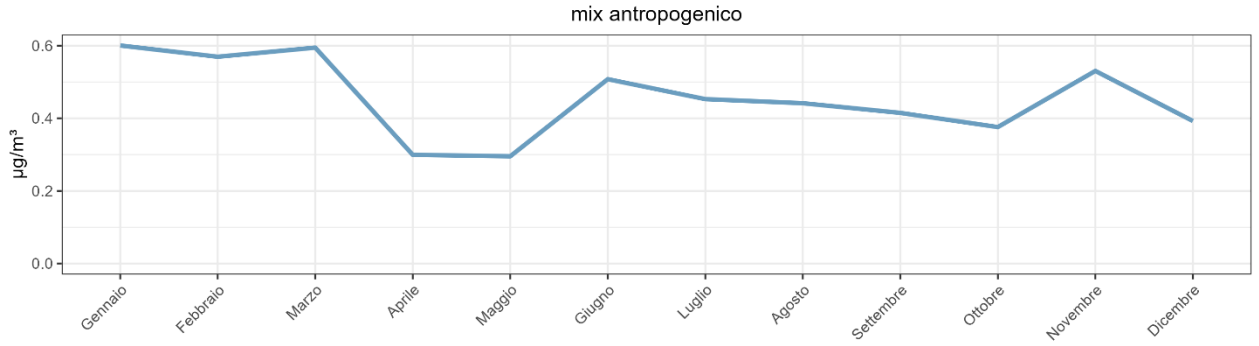


Grafico 108 - contributo mensile mix antopogenico piana

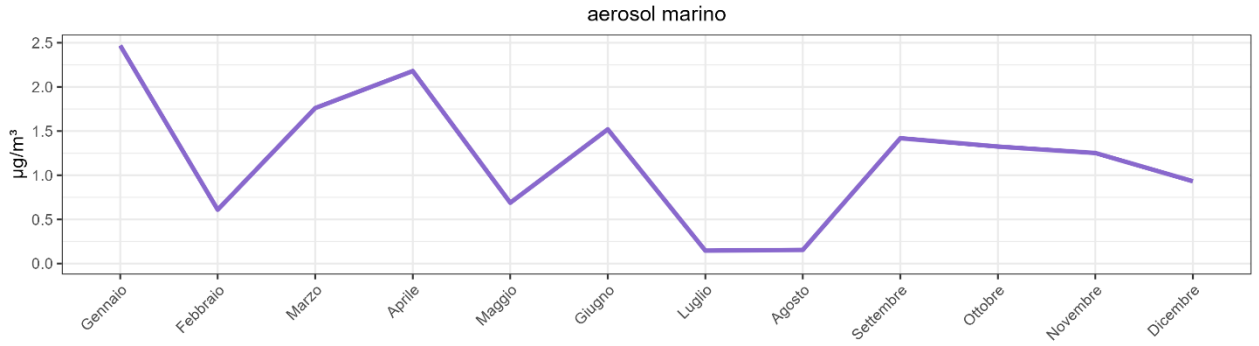


Grafico 109 - contributo mensile aerosol marino piana

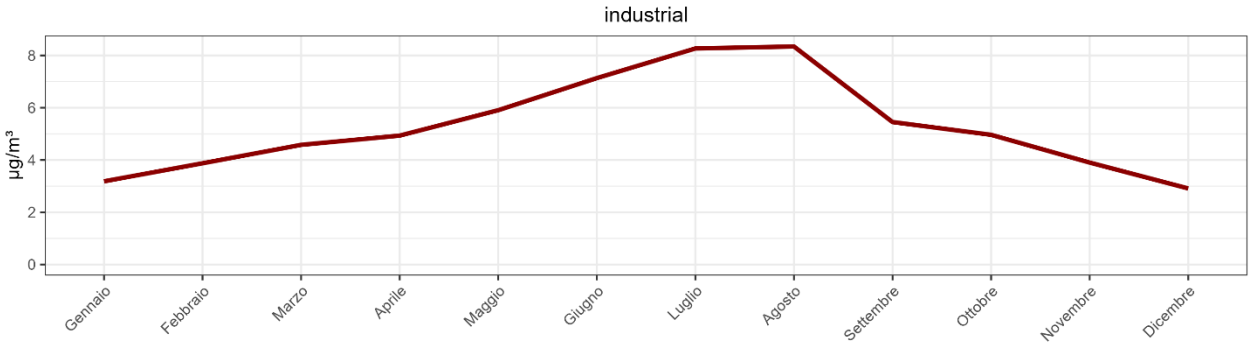


Grafico 110 - contributo mensile industrial piana

12.2.5. Analisi settimana

L'analisi dei grafici relativi al giorno della settimana (da Grafico 111 a Grafico 112) mostra per la piana un andamento complessivamente stabile, con variazioni molto contenute sia nei valori assoluti sia nelle percentuali di composizione per la quasi totalità dei fattori. L'unica dinamica chiaramente riconoscibile riguarda il traffico, che evidenzia un calo nel fine settimana, coerente con la riduzione delle attività veicolari e con la conseguente diminuzione della sua incidenza percentuale.

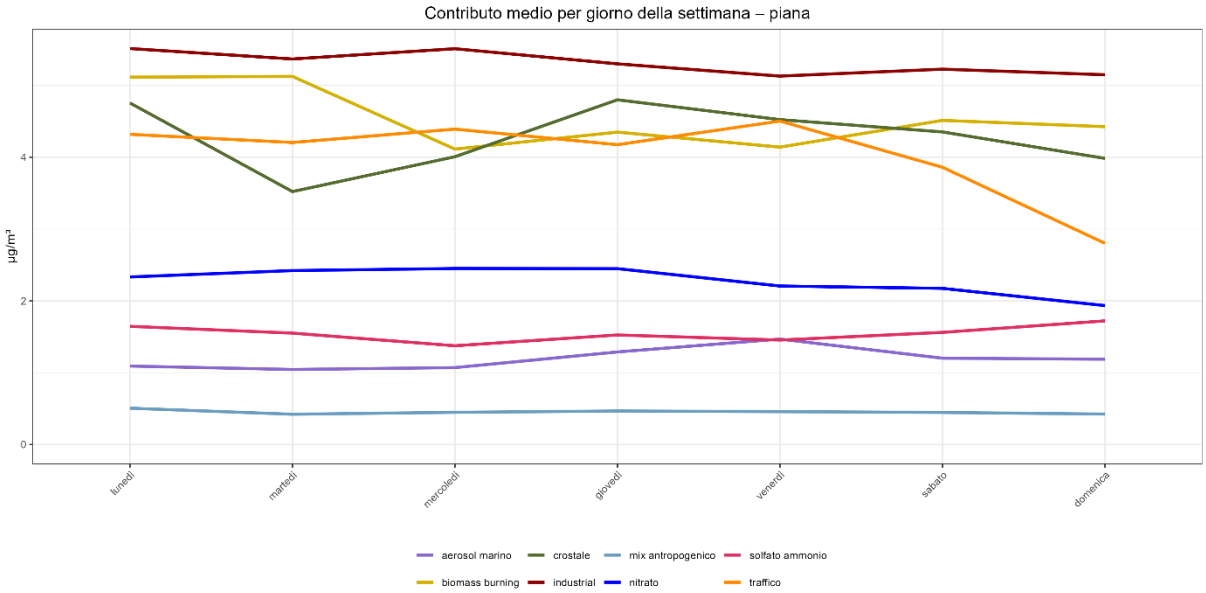


Grafico 111 - contributo fattori per giorno della settimana piana

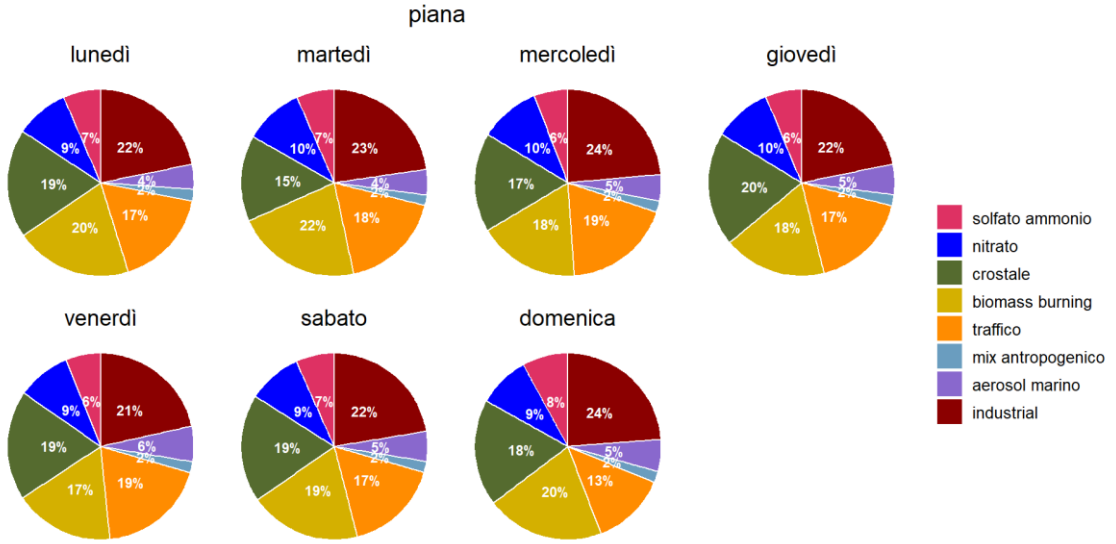


Grafico 112 - contributo percentuale settimanale piana

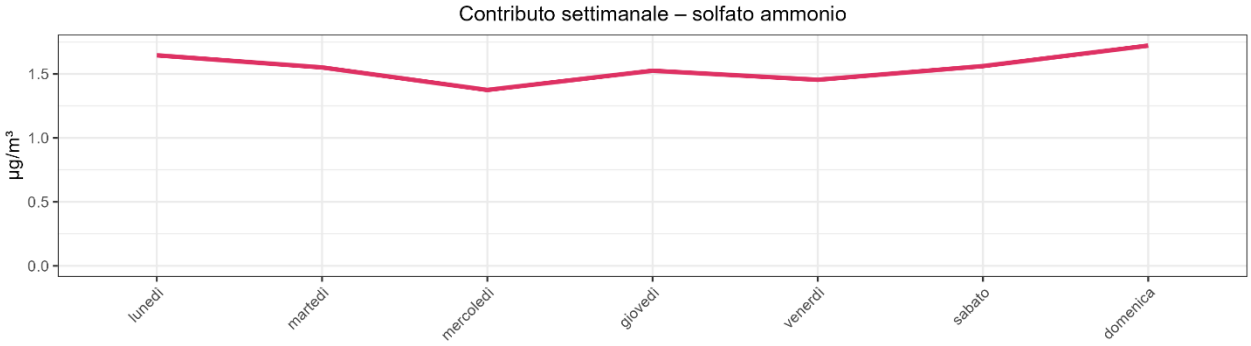


Grafico 113 - contributo giorno solfato di ammonio piana

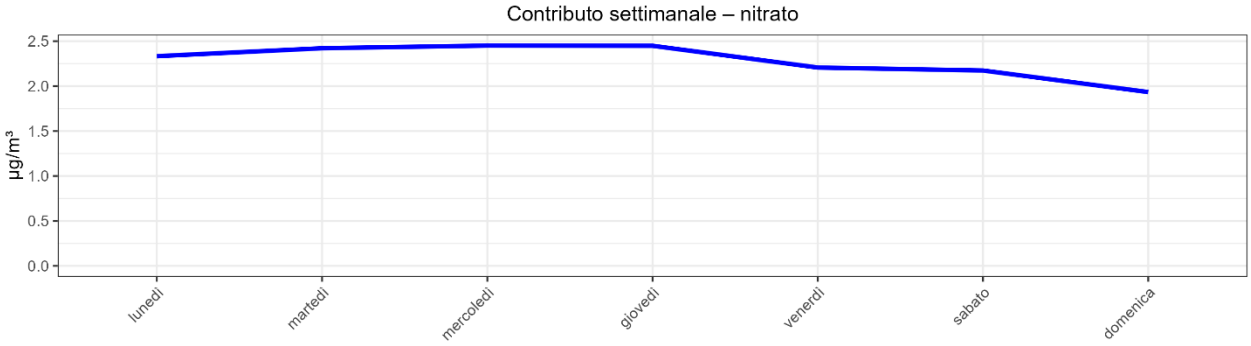


Grafico 114 - contributo giorno nitrato piana

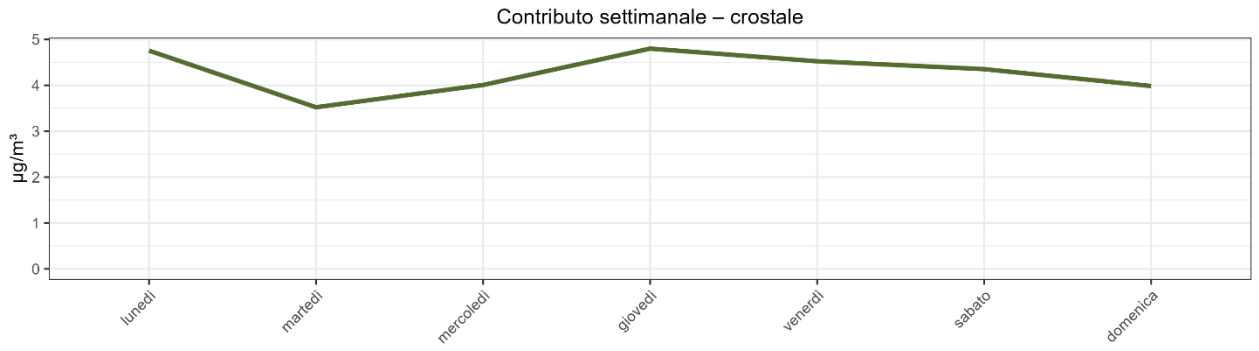


Grafico 115 - contributo giorno crostale piana

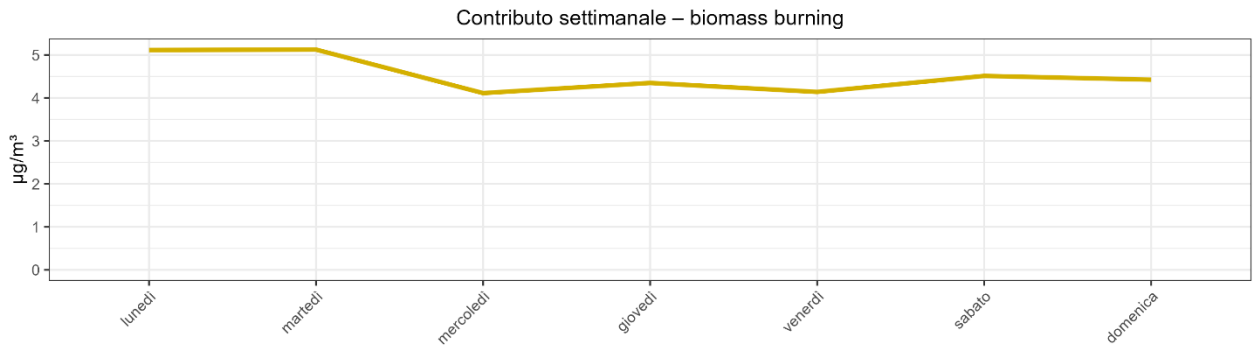


Grafico 116 - contributo gorno biomass burning piana

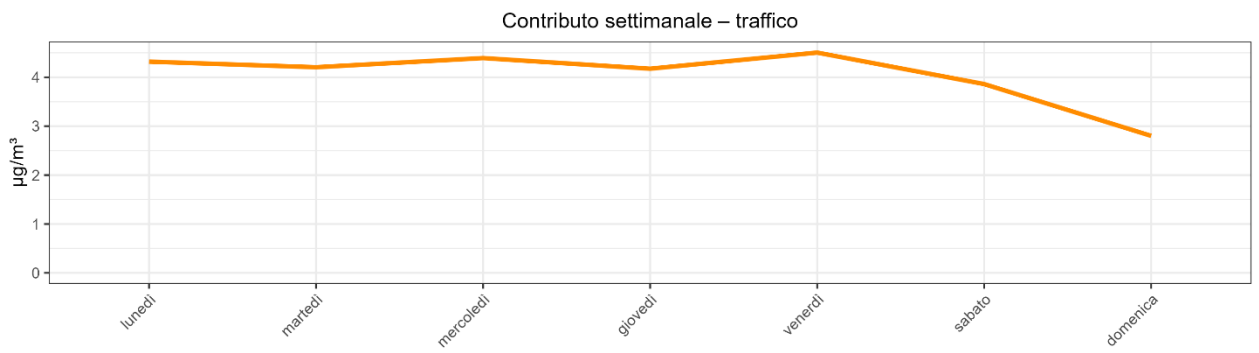


Grafico 117 - contributo giorno traffico piana

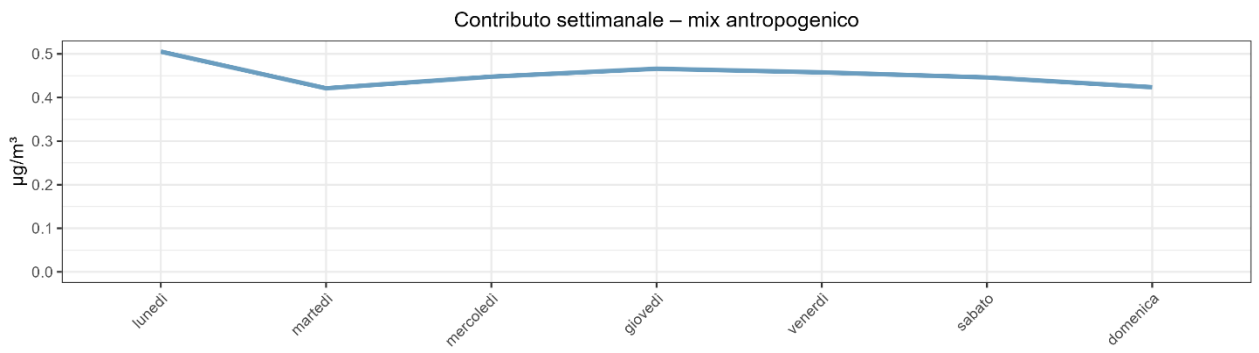


Grafico 118 - contributo giorno mix antopogenico piana

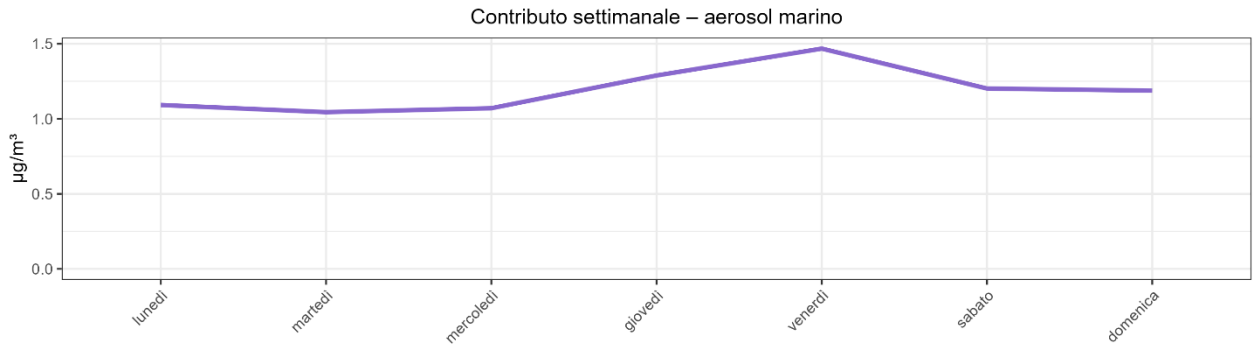


Grafico 119 - contributo giorno aerosol marino piana

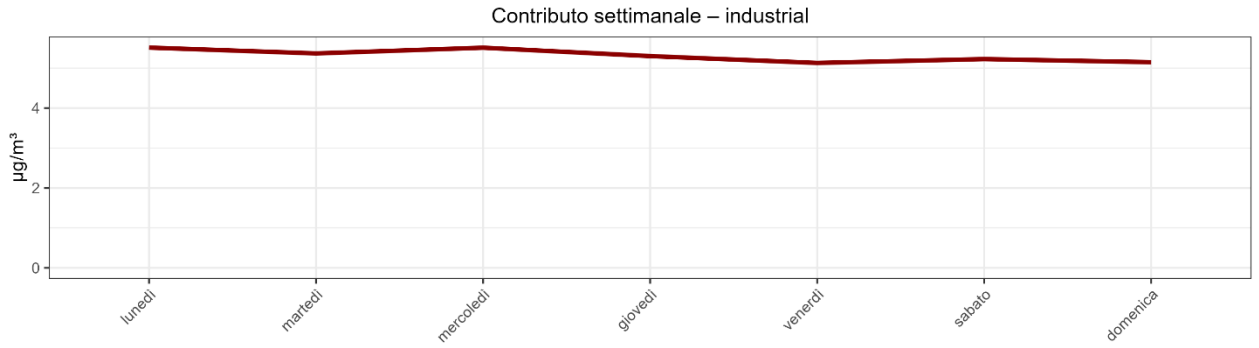


Grafico 120 - contributo giorno industrial piana

12.2.6. Valutazione della solidità della soluzione PMF

Per garantire che la soluzione PMF ottenuta sia interpretabile in modo univoco e supportata da una base statistica adeguata, è stata effettuata una valutazione della sua solidità. In questo contesto, la stabilità indica la capacità della soluzione di mantenere la stessa struttura dei profili anche quando i dati vengono leggermente perturbati, mentre l'affidabilità riguarda la coerenza chimica dei fattori e la variabilità associata ai contributi stimati. Questa analisi consente di verificare che i profili siano ben determinati, che non emergano soluzioni alternative equivalenti e che i contributi stimati siano compatibili con la natura delle sorgenti identificate.

Le verifiche condotte mostrano un quadro complessivamente coerente e stabile. La maggior parte dei fattori presenta un comportamento ben definito, con livelli di variabilità contenuti e assenza di rotazioni o scambi significativi tra profili. Sei fattori su otto risultano pienamente stabili, mentre nitrato e industriale mostrano una variabilità leggermente superiore, ma comunque compatibile con la loro composizione e con la fisiologica sovrapposizione con altre sorgenti. Si osservano piccole percentuali di assegnazioni incrociate tra fattori con composizione parzialmente sovrapposta (cross-mapping), un comportamento atteso che non incide sulla stabilità complessiva della soluzione.

Nel complesso, la struttura dei profili risulta ben determinata e non emergono indicazioni di fattori deboli o instabili. La soluzione adottata può quindi essere considerata solida dal punto di vista sia statistico sia interpretativo.

A queste valutazioni qualitative si affianca l'analisi quantitativa dell'incertezza dei contributi, espressa come semi-ampiezza dell'intervallo 5°-95° percentile. Per ciascun fattore la stima può essere rappresentata come valore ± incertezza, fornendo un'indicazione immediata della variabilità associata alla soluzione. I valori sono riportati nella Tabella 31.

Fattore	Stima ± incertezza (µg/m³)
solfato di ammonio	1.54 ± 0.66
nitrato	2.24 ± 1.29
crostale	4.10 ± 0.39
biomass burning	4.46 ± 1.21
traffico	4.01 ± 1.77
mix antropogenico	0.45 ± 0.60
aerosol marino	1.14 ± 0.31
industrial	5.31 ± 1.05

Tabella 31 - stima incertezza profili PMF

I fattori con una struttura più definita e riconoscibile mostrano anche le incertezze più contenute. Il contributo crostale, ad esempio, presenta una variabilità molto ridotta (4.10 ± 0.39 µg/m^3). Anche il fattore industriale mantiene un'incertezza relativamente limitata (5.31 ± 1.05 µg/m^3). I fattori più influenzati da processi atmosferici dinamici o da sovrapposizioni tra sorgenti come il nitrato (2.24 ± 1.29 µg/m^3), il solfato di ammonio (1.54 ± 0.66 µg/m^3) ed il traffico (4.01 ± 1.77 µg/m^3), mostrano ampiezze maggiori. Il mix antropogenico rimane il fattore meno definito, con un'incertezza superiore alla sua stessa stima (0.45 ± 0.60 µg/m³). Questo comportamento conferma la natura residuale del profilo, che raccoglie componenti eterogenee non attribuibili a sorgenti specifiche e svolge il ruolo di assorbire la variabilità non spiegata dal modello.

Commento finale

La convergenza tra bootstrap, DISP, Fpeak e analisi delle incertezze fornisce un quadro estremamente coerente della qualità della soluzione PMF. I tre strumenti di sensibilità giungono a conclusioni analoghe, indicando che la struttura a otto fattori è stabile, riproducibile e fisicamente plausibile. La maggior parte dei profili sorgente risulta ben determinata, con composizioni chimiche robuste e contributi temporali coerenti, privi di rotazioni alternative equivalenti. Le lievi variabilità osservate nei fattori nitrato e industriale sono pienamente compatibili con la loro natura chimica e con la fisiologica sovrapposizione con altre sorgenti, e non compromettono la solidità complessiva della soluzione.

All'interno del modello emerge anche un profilo caratterizzato da maggiore incertezza, identificato come mix antropogenico. La presenza di un fattore debole è un comportamento tipico dei modelli PMF quando una parte della variabilità del dataset non è riconducibile a una sorgente univoca. In questi casi il modello tende a raccogliere contributi eterogenei in un unico profilo residuale, che svolge una funzione utile: assorbe la variabilità non spiegata evitando che venga impropriamente attribuita ai profili principali, preservandone così la stabilità e la coerenza chimica.

Nel complesso, la soluzione PMF a otto fattori risulta solida e affidabile. La coerenza tra gli strumenti di sensibilità e l'analisi quantitativa delle incertezze rafforza ulteriormente la credibilità interpretativa dei profili e dei contributi stimati, confermando la validità della soluzione adottata nel presente studio.

12.3. Risultati sito-specifici

Per completare l'interpretazione dei risultati del PMF, sono stati analizzati i contributi dei fattori nei singoli siti di monitoraggio, così come restituiti dal modello applicato al dataset combinato della piana. Questa analisi consente di valutare come le sorgenti identificate si manifestino localmente e di verificare eventuali differenze nella loro distribuzione spaziale.

12.3.1. Pozzilli

La distribuzione dei contributi riportata nella Tabella 32 delinea la situazione del sito di Pozzilli, collocato all'interno della zona industriale e che influenza in modo diretto la composizione del particolato. Il modello restituisce un PM_{10} ricostruito pari a 18.4 µg/m^3, molto vicino al valore misurato nel sito pari a 19 µg/m^3.

Lo scostamento minimo tra le due stime indica che la soluzione individuata è stabile e rappresentativa delle sorgenti effettivamente presenti nell'area, confermando la capacità del modello di descrivere in modo robusto la composizione del particolato a Pozzilli.

solfato ammonio	nitrato	crostale	biomass burning	traffico	mix antropogenico	aerosol marino	industrial
1.6 µg/m^3	2.3 µg/m^3	3.7 µg/m^3	1.6 µg/m^3	3.3 µg/m^3	0.4 µg/m^3	1.0 µg/m^3	4.5 µg/m^3

Tabella 32 - contributi in concentrazione dei fattori sito di Pozzilli

- Il fattore industrial (4.5 µg/m^3), rappresenta la componente dominante. In un sito situato in zona produttiva, un contributo di questa entità è coerente con la presenza di impianti emissivi e attività industriali che costituiscono una sorgente strutturale del PM_{10} locale.
- Il fattore crostale (3.7 µg/m^3) mostra un apporto rilevante, compatibile con risospensione di polveri da superfici non asfaltate, movimentazione di materiali e traffico pesante tipico delle aree industriali.
- Anche il contributo del traffico (3.3 µg/m^3) risulta non trascurabile e riflette sia le emissioni veicolari sia la risospensione indotta dal transito di mezzi pesanti.
- La componente biomass burning, pari a 1.6 µg/m^3, assume un ruolo secondario rispetto ai fattori dominanti, compatibile con combustioni residenziali nelle aree circostanti o con episodi stagionali di riscaldamento.
- I fattori nitrato (2.3 µg/m^3) e solfato ammonio (1.6 µg/m^3) rappresentano la quota di particolato secondario formata in atmosfera a partire da precursori gassosi. La loro presenza conferma l'influenza di processi di trasformazione chimica che contribuiscono stabilmente al PM_{10}, pur senza assumere un ruolo dominante.
- L'aerosol marino (1.0 µg/m^3) mostra un apporto modesto, coerente con un contributo di fondo regionale.
- Il mix antropogenico (0.4 µg/m^3), costituisce la componente meno rilevante e può essere interpretato come un insieme di sorgenti minori non dominanti nel sito.

Il quadro complessivo evidenzia una forte impronta industriale, affiancata da contributi significativi legati alla risospensione e al traffico, elementi tipici di un'area produttiva. Le componenti secondarie mantengono un ruolo stabile ma non prevalente, mentre i fattori legati a sorgenti residenziali o naturali risultano contenuti.

Nel Grafico 121 sono riportate le percentuali di ripartizione dei contributi associati ai diversi fattori, così da evidenziare il peso relativo di ciascuna sorgente nella composizione del PM_{10}, da cui emerge che il sito di Pozzilli presenta un impatto rilevante delle componenti industrial, traffico e crostale, mentre la biomassa risulta meno incisiva.

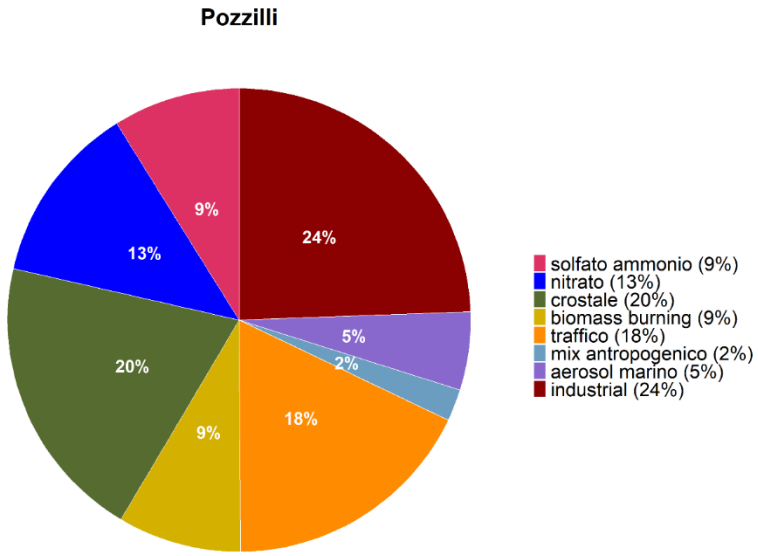


Grafico 121 - contributo percentuale delle sorgenti Pozzilli

Analisi mensile

Dall'analisi del Grafico 122 e del Grafico 123 emerge che nei mesi invernali emergono contributi elevati dei fattori più sensibili alle condizioni fredde e stagnanti: biomass burning rappresenta uno dei contributi principali (4.0-4.5 µg/m^3 tra gennaio e dicembre), affiancato da nitrato, traffico e industrial, che mantengono valori significativi e relativamente stabili. Questa configurazione si riflette nelle percentuali, che vedono biomass burning assumere un ruolo rilevante nella struttura del particolato, con quote che superano il 20% in gennaio e febbraio e raggiungono quasi il 30% nel mese più freddo, dicembre.

Con l'avanzare della primavera, i dati mostrano una riduzione progressiva dei contributi invernali. In marzo e aprile, biomass burning scende rispettivamente a 2.1 e 1.2 µg/m^3, mentre nitrato si stabilizza su valori più contenuti. Parallelamente, la loro incidenza percentuale diminuisce, lasciando spazio a una distribuzione più equilibrata tra i diversi fattori. In questo periodo aumentano infatti le quote relative di crostale, aerosol marino e solfato ammonio, che pur mantenendo valori assoluti moderati acquisiscono un peso percentuale maggiore grazie alla riduzione dei contributi dominanti dell'inverno.

Durante l'estate, i valori assoluti raggiungono i livelli più bassi dell'anno per i fattori stagionali, mentre la composizione percentuale assume una configurazione completamente diversa. I contributi invernali diventano marginali (biomass burning scende a valori prossimi allo zero in giugno e luglio), mentre emergono in modo netto i fattori più stabili o di fondo. Crostale e industrial diventano i contributi principali (fino a 9.5 µg/m^3 per crostale e oltre 8 µg/m^3 per industrial), affiancati da traffico, che mantiene un andamento regolare e una presenza percentuale più uniforme. Anche solfato ammonio e aerosol marino mostrano una maggiore visibilità relativa, pur rimanendo su valori assoluti contenuti.

Con l'arrivo dell'autunno, i dati evidenziano una graduale ricomparsa dei contributi invernali. In settembre e ottobre si osserva un aumento dei valori di nitrato e biomass burning, che in novembre e dicembre tornano a rappresentare una quota rilevante sia in termini assoluti sia percentuali. Parallelamente, i contributi estivi si riducono, ristabilendo la configurazione tipica dei mesi freddi.

Nel complesso, Pozzilli mostra un ciclo annuale ordinato e coerente:

- una fase invernale dominata dai fattori più sensibili alle condizioni fredde
- una fase estiva in cui prevalgono i contributi di fondo e le componenti più stabili

- due transizioni intermedie che accompagnano la progressiva diminuzione e successiva ricomparsa dei fattori stagionali.

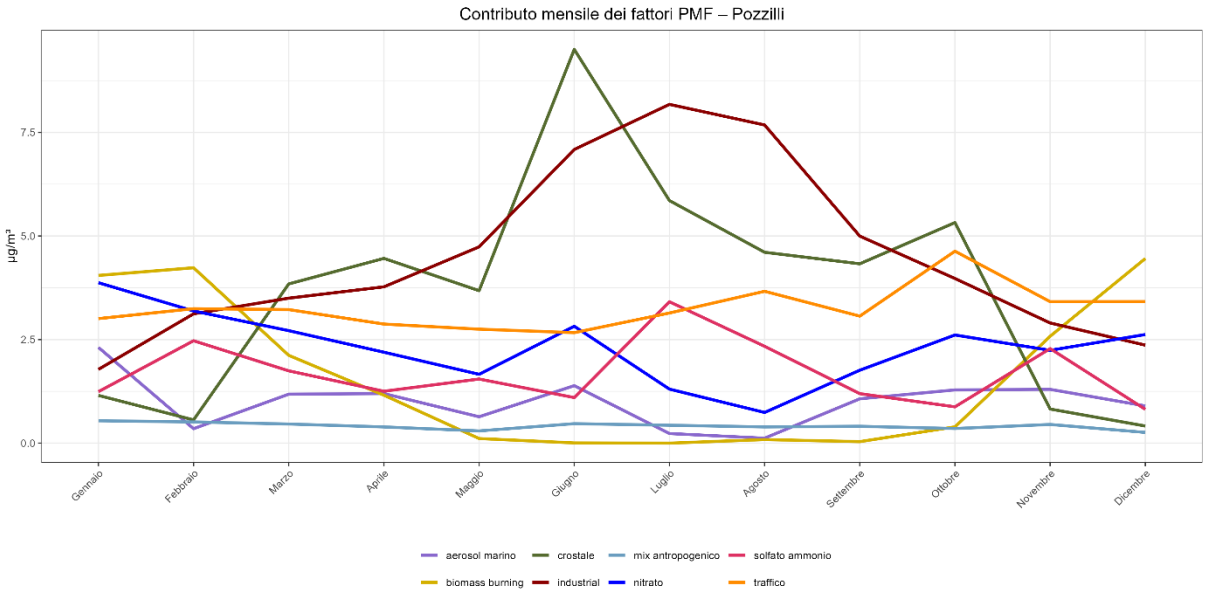


Grafico 122 - contributo mensile fattori sito Pozzilli

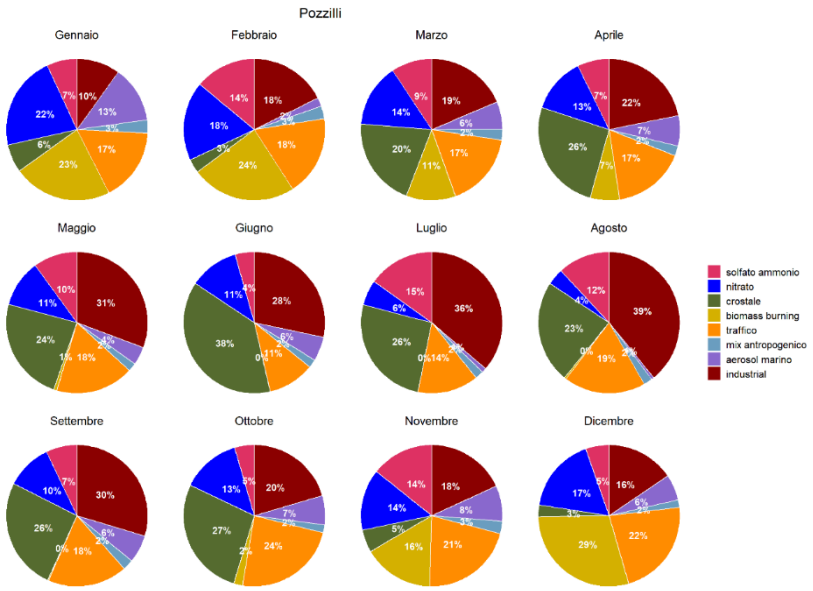


Grafico 123 - contributo percentuale mensile Pozzilli

A integrazione della lettura complessiva, si riportano di seguito i grafici mensili dei singoli fattori, utili a evidenziarne nel dettaglio le specifiche dinamiche stagionali.

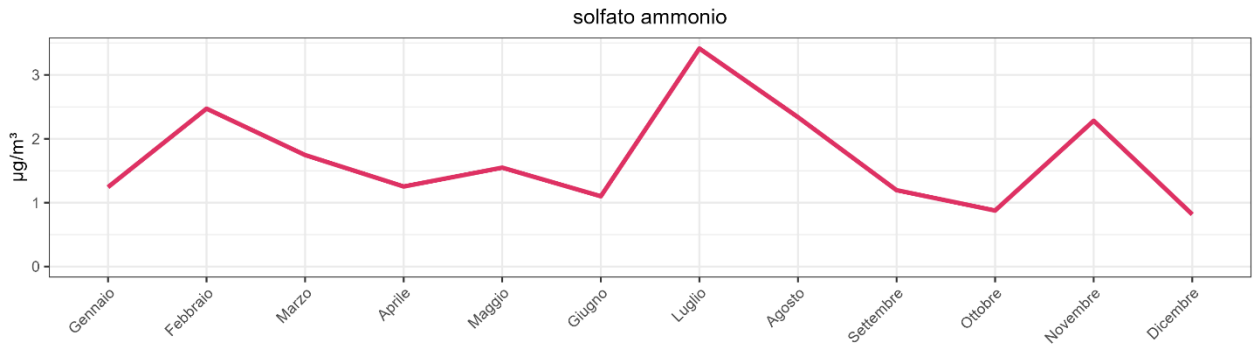


Grafico 124 - contributo mensile solfato di ammonio sito Pozzilli

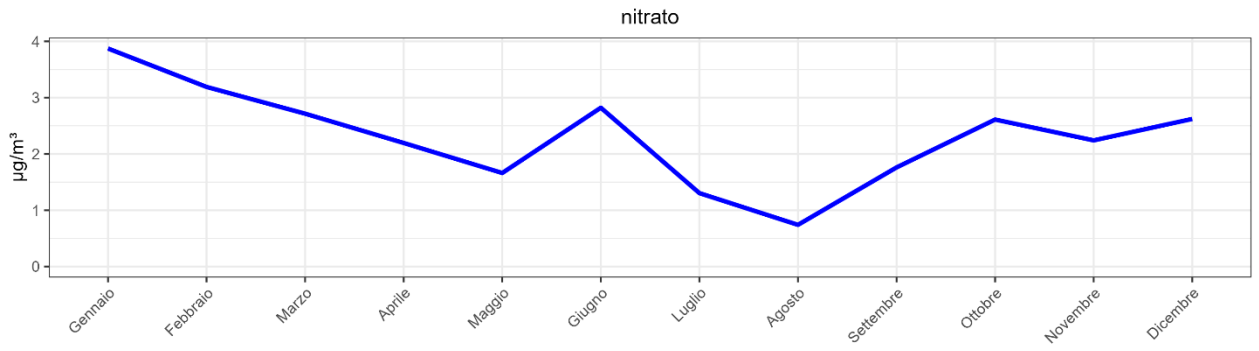


Grafico 125 - contributo mensile nitrato sito Pozzilli

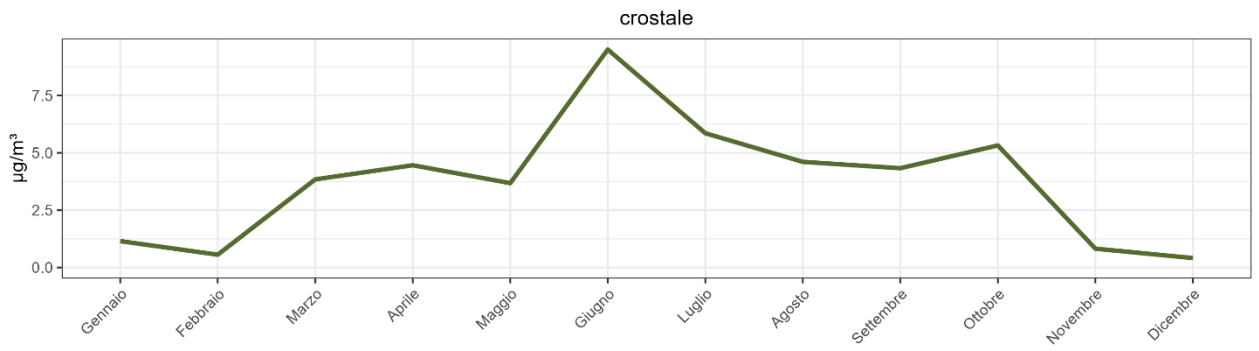


Grafico 126 - contributo mensile crostale sito Pozzilli

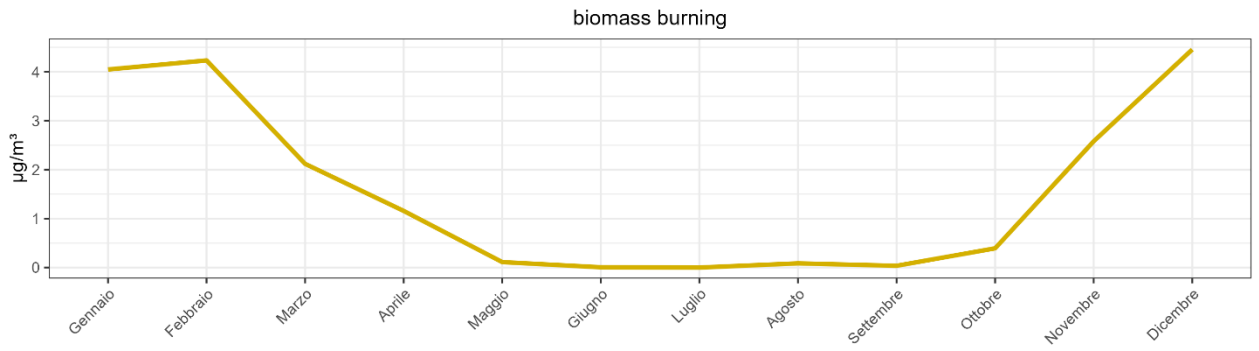


Grafico 127 - contributo mensile biomass burning Pozzilli

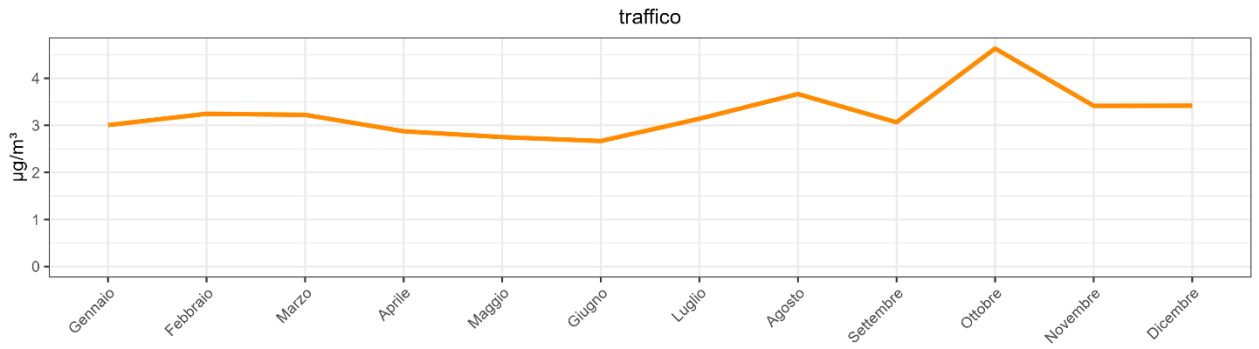


Grafico 128 - contributo mensile traffico sito Pozzilli

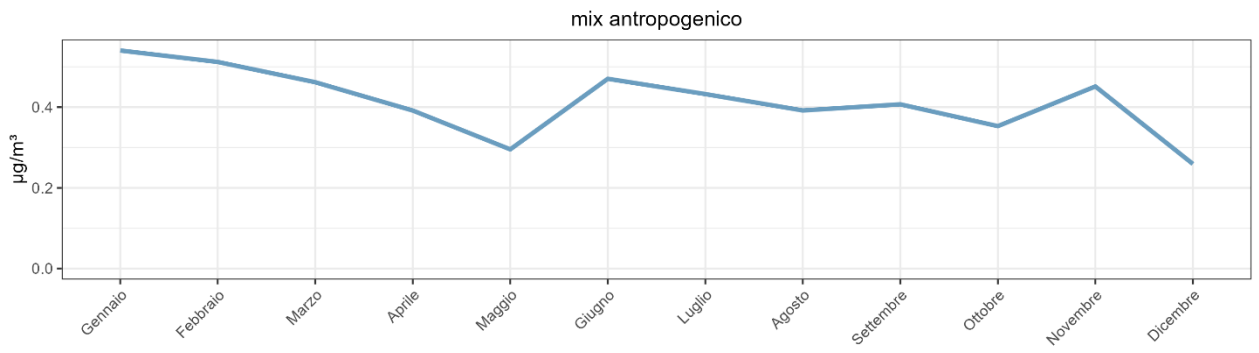


Grafico 129 - contributo mensile mix antopogenico sito Pozzilli

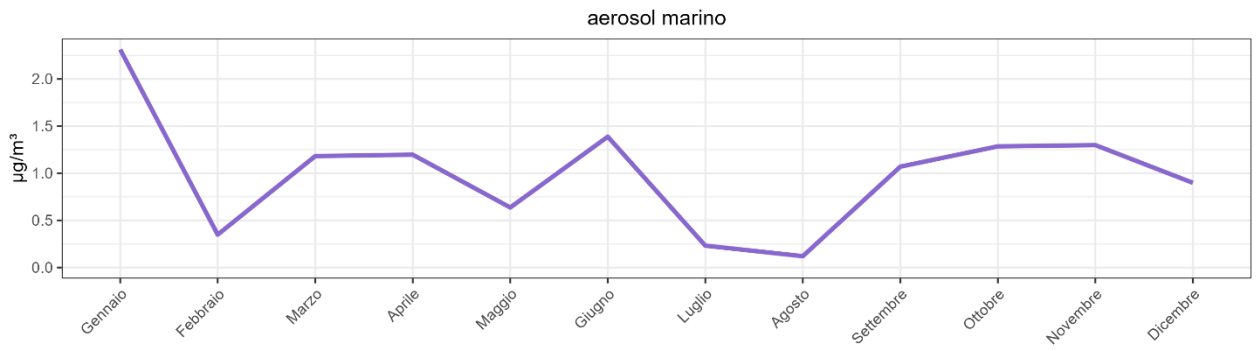


Grafico 130 - contributo mensile aerosol marino sito Pozzilli

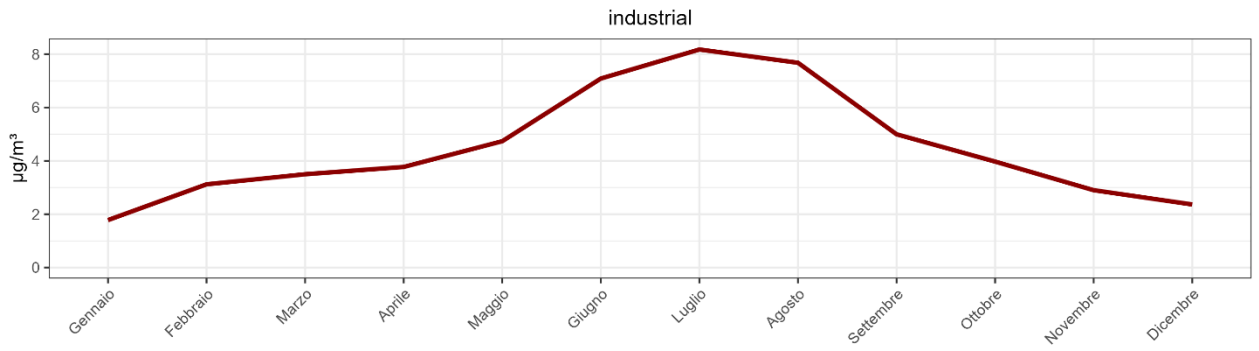


Grafico 131 - contributo mensile industrial sito Pozzilli

Analisi settimana

Anche i grafici del sito di Pozzilli relativi al giorno della settimana (Grafico 132 e Grafico 133) mostrano valori pressocché stabili durante tutta la settimana, ad eccezione del traffico dove si nota un calo netto il fine settimana.

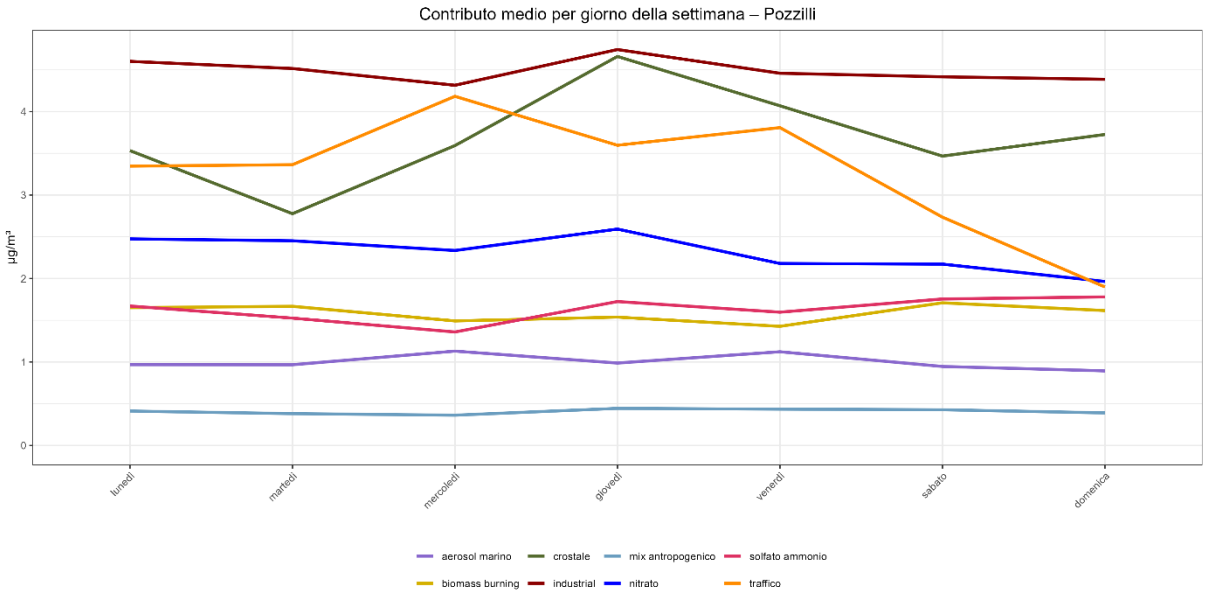


Grafico 132 - contributo fattori per giorno della settimana sito di Pozzilli<

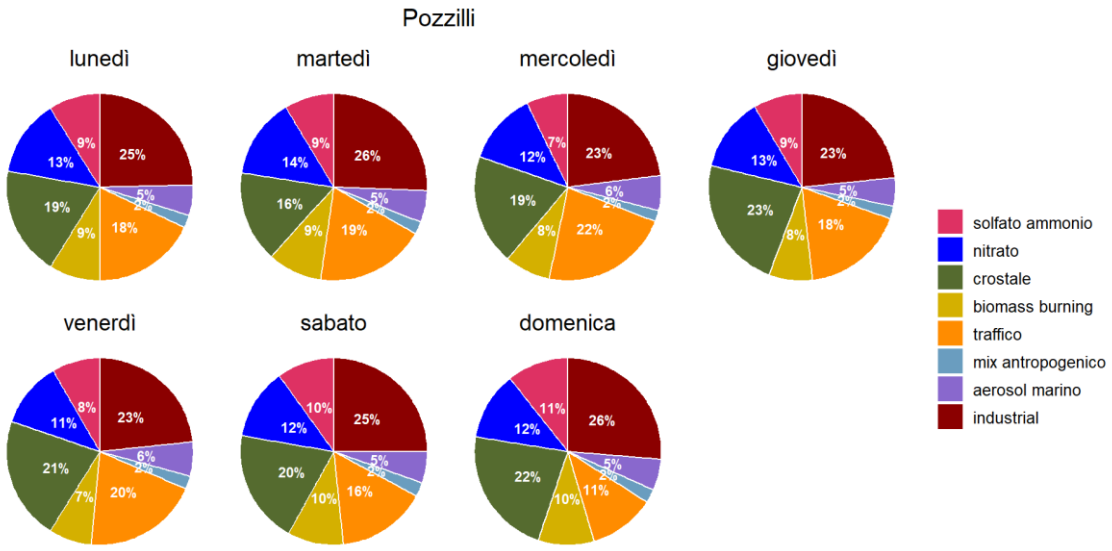


Grafico 133 - contributo percentuale settimanale Pozzilli

12.3.2. Sesto Campano

La distribuzione dei contributi riportata nella Tabella 33 delinea la situazione del sito di Sesto Campano, un contesto esposto a sorgenti eterogenee che combinano componenti industriali, combustione di biomassa legnosa e processi di risospensione. Il modello stima un PM_{10} ricostruito pari a 22.1 µg/m^3, molto vicino al valore misurato paria a 23 µg/m^3. La differenza contenuta tra le due grandezze indica che, anche in questo, la

soluzione modellistica è ben calibrata e riesce a rappresentare in modo robusto la composizione del particolato nel sito di Sesto Campano.

solfato ammonio	nitrato	crostale	biomass burning	traffico	mix antropogenico	aerosol marino	industrial
1.4 µg/m^3	2.3 µg/m^3	4.3 µg/m^3	4.2 µg/m^3	1.8 µg/m^3	0.4 µg/m^3	1.3 µg/m^3	6.3 µg/m^3

Tabella 33 - contributi in concentrazione dei fattori sito di Sesto Campano

- Il fattore industrial (6.3 µg/m^3), costituisce la componente più rilevante della tabella. Un valore di questa entità suggerisce un'influenza significativa di attività produttive presenti nell'area o nelle immediate vicinanze, che contribuiscono in modo strutturale al particolato locale.
- Il contributo crostale (4.3 µg/m^3) risulta anch'esso elevato e indica un ruolo importante della risospensione di polveri, favorita da superfici non asfaltate, movimentazione di materiali o traffico pesante.
- La componente biomass burning (4.2 µg/m^3) mostra un apporto consistente, compatibile con combustioni residenziali o attività stagionali di riscaldamento nelle zone circostanti.
- Il fattore nitrato (2.3 µg/m^3) rappresenta insieme al solfato ammonio (1.4 µg/m^3) il contributo del particolato secondario
- Il contributo del traffico (1.8 µg/m^3) riflette sia le emissioni dirette dei veicoli sia la risospensione indotta dal transito
- L'aerosol marino (1.3 µg/m^3) mostra valori più contenuti ma comunque rilevanti nel quadro complessivo, mentre il mix antropogenico (0.4 µg/m^3) rappresenta la frazione residuale associata a sorgenti minori.

Il profilo emissivo di Sesto Campano evidenzia una combinazione di contributi industriali, risospensione e combustioni, con una presenza non trascurabile di particolato secondario.

Il Grafico 134 conferma in termini % che il sito di Sesto Campano mostra un profilo con contributi significativi da industrial e biomassa; di contro la presenza del fattore traffico è molto ridotta.

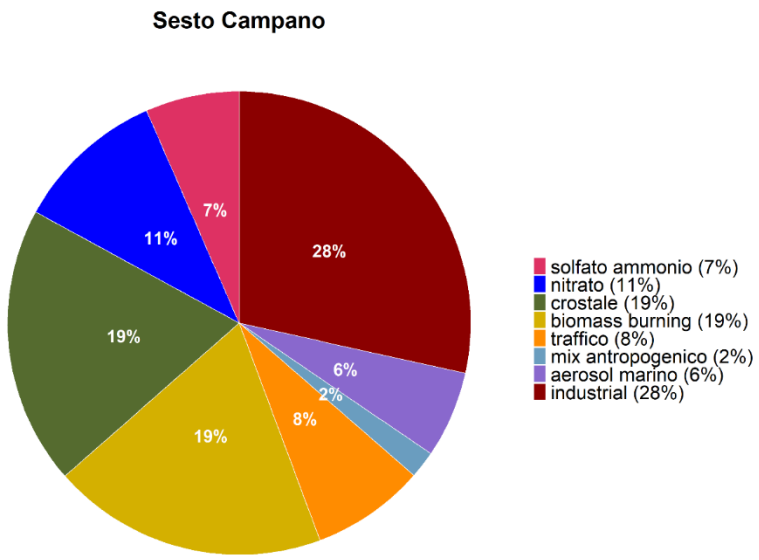


Grafico 134 - contributo percentuale delle sorgenti Sesto Campano

Analisi mensile

I grafici relativi a Sesto Campano (Grafico 135 e Grafico 136) mostrano un'evoluzione mensile in cui nei mesi invernali emergono contributi elevati dei fattori più sensibili alle condizioni fredde e stagnanti: biomass burning rappresenta il contributo dominante, con valori che raggiungono 12.5 µg/m^3 in dicembre e oltre 11 µg/m^3 in gennaio, corrispondenti a quote percentuali molto elevate (fino al 56% in dicembre). Accanto a questo fattore, mantengono un ruolo significativo anche nitrato, industrial e, in misura minore, traffico, che insieme contribuiscono a definire la struttura del particolato nei mesi più freddi.

Con l'avanzare della primavera, i dati mostrano una riduzione progressiva dei contributi invernali. In marzo e aprile, biomass burning scende rispettivamente a 6.6 e 3.7 µg/m^3, mentre nitrato si stabilizza su valori più contenuti. Parallelamente, la loro incidenza percentuale diminuisce, lasciando spazio a una distribuzione più equilibrata tra i diversi fattori. In questo periodo aumentano infatti le quote relative di crostale, aerosol marino e solfato ammonio, che pur mantenendo valori assoluti moderati acquisiscono un peso percentuale maggiore grazie alla riduzione dei contributi dominanti dell'inverno. Anche il contributo industriale rimane rilevante, con valori che superano i 5 µg/m^3 in aprile.

Durante l'estate, la configurazione cambia in modo netto. I fattori tipicamente invernali diventano marginali: biomass burning scende a valori prossimi allo zero in giugno e luglio, mentre nitrato si mantiene su livelli moderati. In questo periodo emergono con forza i contributi più stabili o di fondo. Crostale diventa il fattore principale, raggiungendo 11.8 µg/m^3 in giugno e oltre 7 µg/m^3 in luglio, con percentuali che superano il 40% nei mesi più caldi. Anche industrial mantiene un ruolo di primo piano, con valori compresi tra 7 e 9 µg/m^3 e percentuali che oscillano tra il 28% e il 38%. Traffico, solfato ammonio e aerosol marino mostrano un andamento regolare, con una presenza percentuale più uniforme e relativamente più visibile proprio nei mesi in cui i contributi invernali si riducono.

Con l'arrivo dell'autunno, i dati evidenziano una graduale ricomparsa dei contributi invernali. In settembre e ottobre si osserva un aumento dei valori di nitrato e biomass burning, che in novembre e dicembre tornano a rappresentare una quota rilevante sia in termini assoluti sia percentuali. Parallelamente, i contributi estivi si riducono, ristabilendo la configurazione tipica dei mesi freddi. In particolare, biomass burning torna a superare i 6 µg/m^3 in novembre e raggiunge nuovamente valori molto elevati in dicembre, mentre industrial e traffico mantengono un ruolo significativo nella struttura del particolato.

Nel complesso, Sesto Campano mostra un ciclo annuale ordinato e coerente:

- una fase invernale dominata dai fattori più sensibili alle condizioni fredde, con biomass burning come contributo principale
- una fase estiva in cui prevalgono i contributi di fondo, in particolare crostale e industrial
- due transizioni intermedie che accompagnano la progressiva diminuzione e successiva ricomparsa dei fattori stagionali.

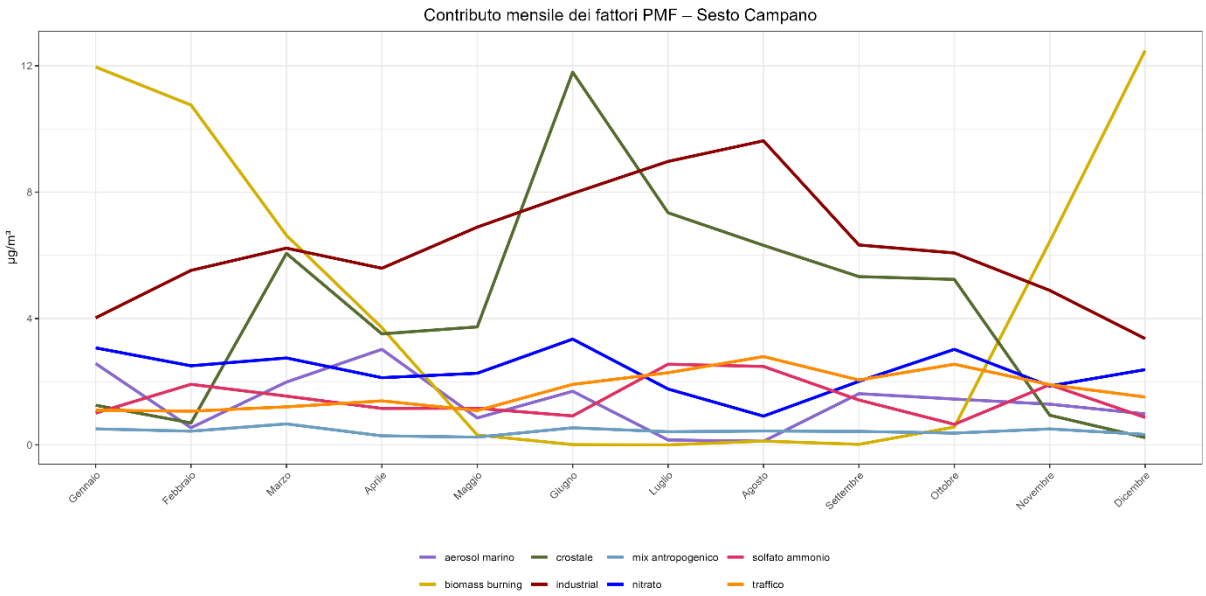


Grafico 135 - contributo mensile fattori sito Sesto Campano

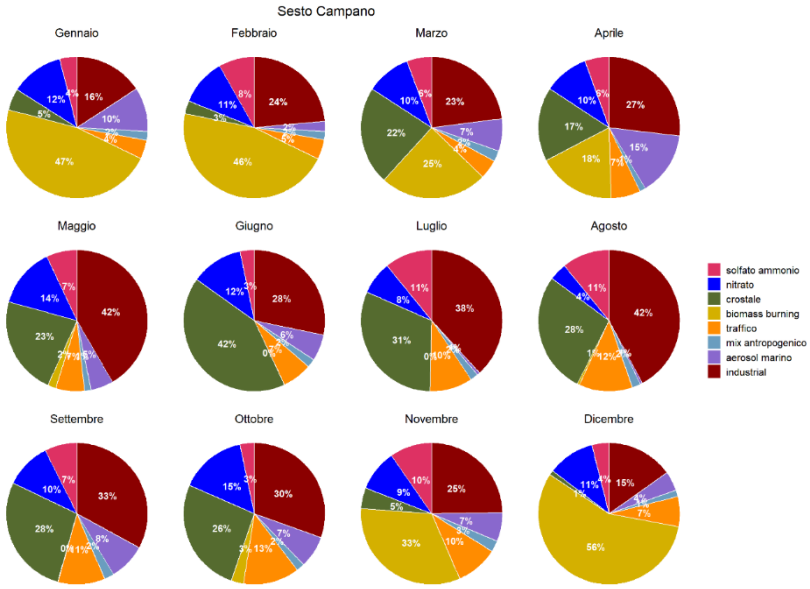


Grafico 136 - contributo percentuale mensile Sesto Campano

A integrazione della lettura complessiva, si riportano di seguito i grafici mensili dei singoli fattori, utili a evidenziarne nel dettaglio le specifiche dinamiche stagionali.

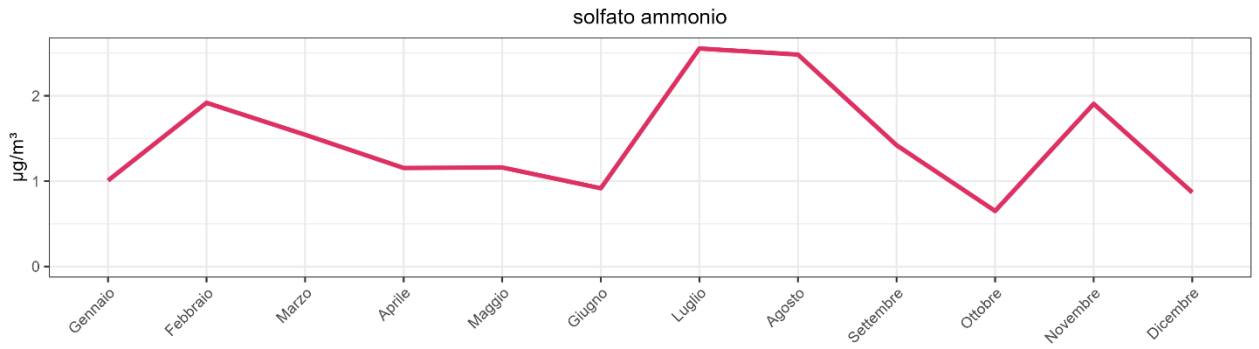


Grafico 137 - contributo mensile solfato di ammonio sito Sesto Campano

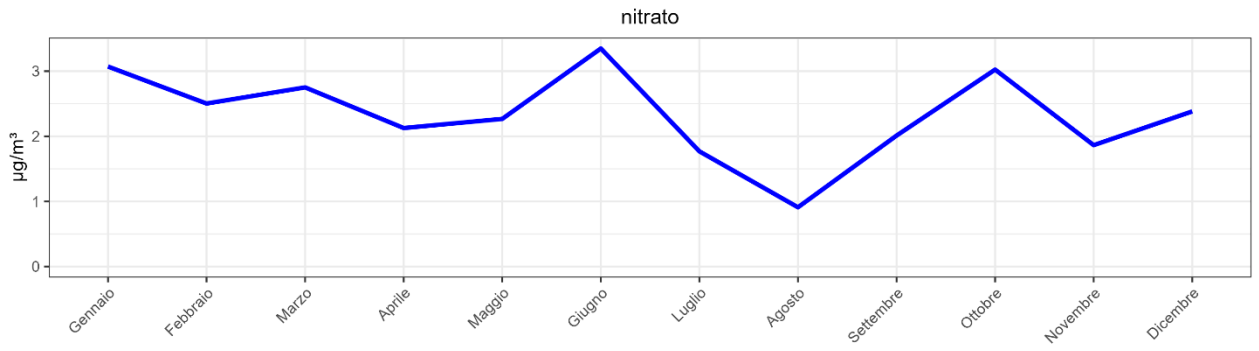


Grafico 138 - contributo mensile nitrato sito Sesto Campano

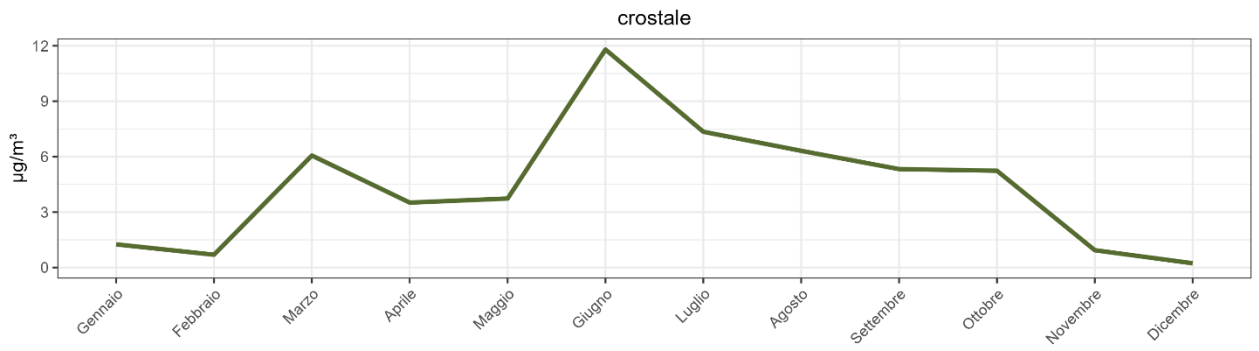


Grafico 139 - contributo mensile crostale sito Sesto Campano

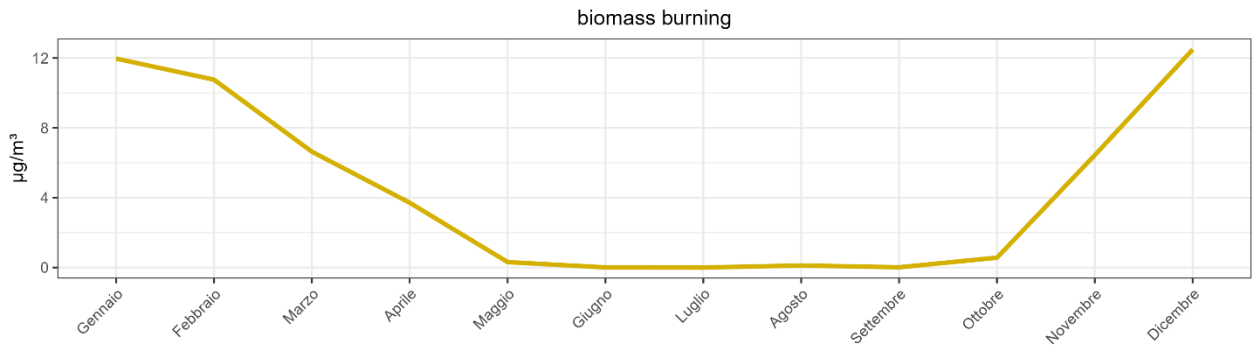


Grafico 140 - contributo mensile biomass burning Sesto Campano

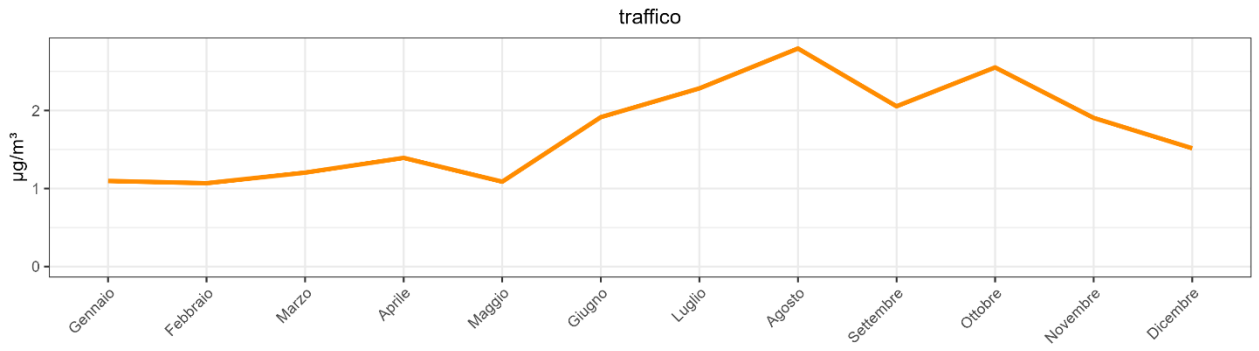


Grafico 141 - contributo mensile traffico sito Sesto Campano

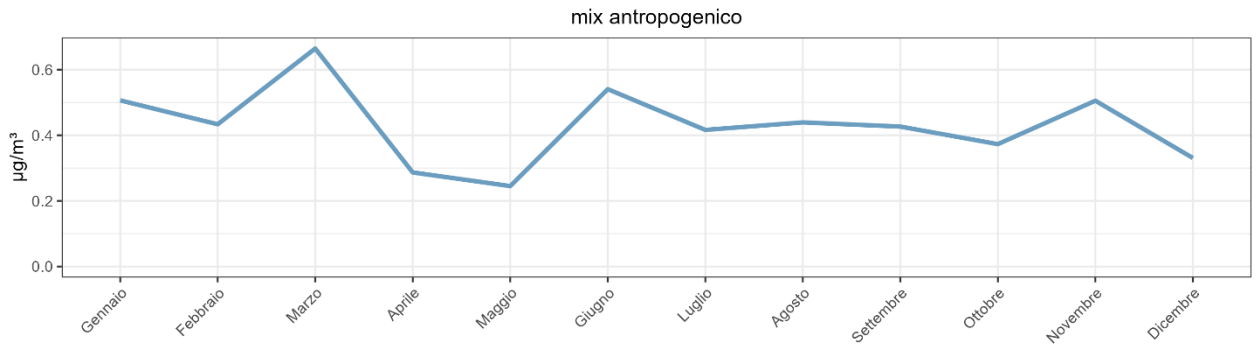


Grafico 142 - contributo mensile mix antopogenico sito Sesto Campano

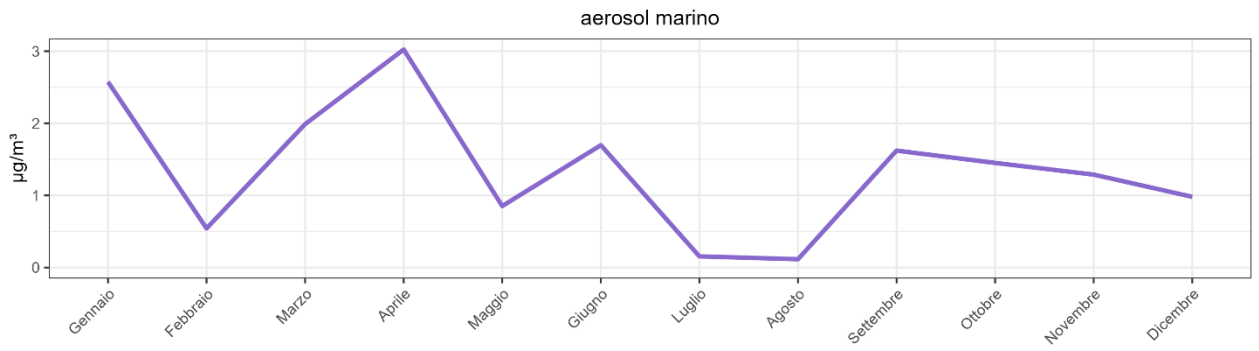


Grafico 143 - contributo mensile aerosol marino sito Sesto Campano

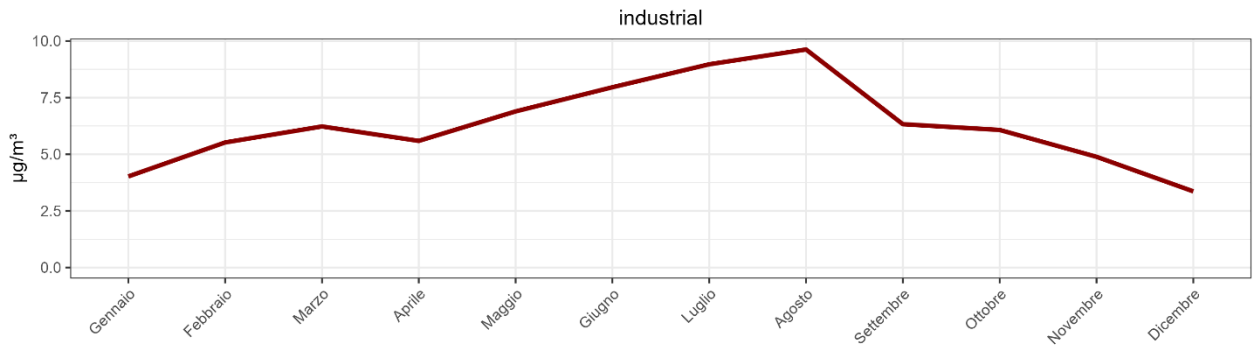


Grafico 144 - contributo mensile industrial sito Sesto Campano

Analisi settimana

Anche a Sesto Campano i dati giornalieri (Grafico 142 e Grafico 143) mostrano valori pressocché stabili durante tutta la settimana, ad eccezione del traffico dove si nota il calo nel fine settimana.

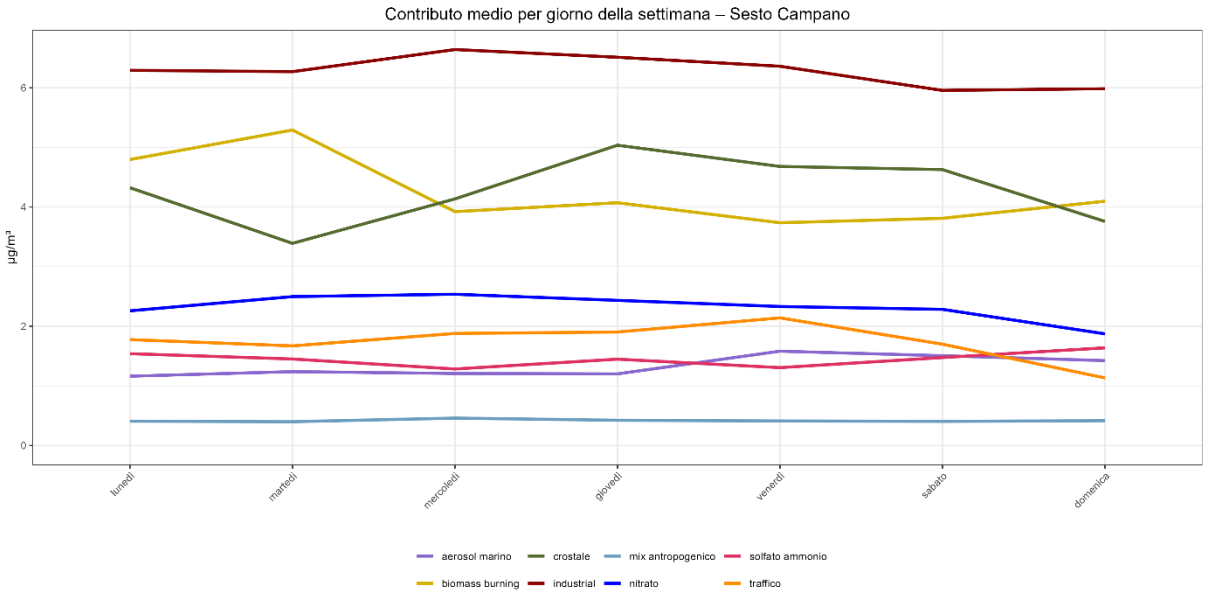


Grafico 145 - contributo fattori per giorno della settimana sito di Sesto Campano<

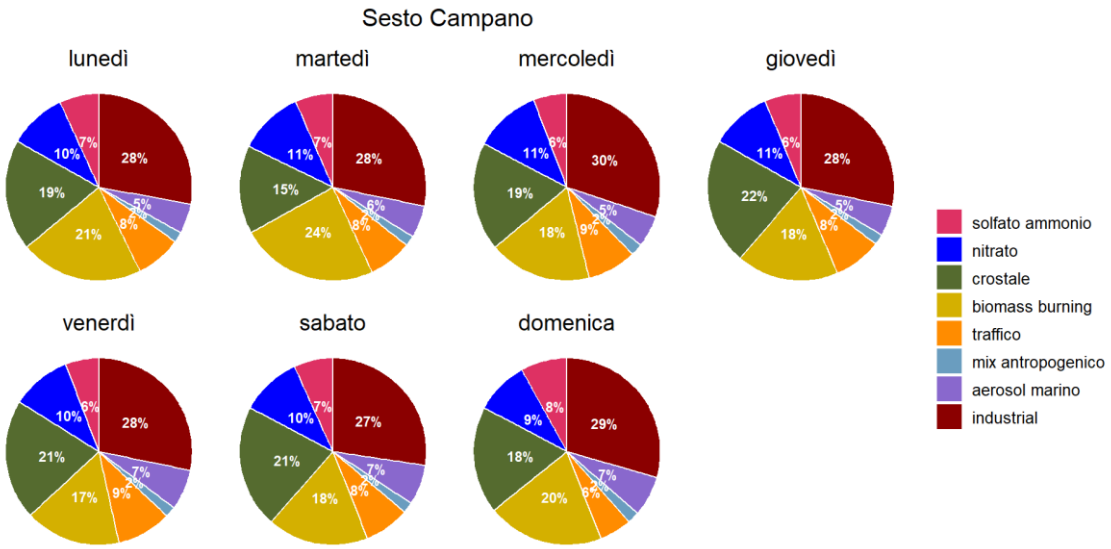


Grafico 146 - contributo percentuale settimanale Sesto Campano

12.3.3. Venafro

La distribuzione dei contributi riportata nella Tabella 34 delinea un profilo delle sorgenti particolarmente articolato per il sito di Venafro, dove convergono apporti legati sia a combustioni sia a sorgenti meccaniche e industriali. Il modello stima un PM_{10} ricostruito pari a 29.8 µg/m^3, in buona corrispondenza con il valore misurato pari a 29 µg/m^3. La differenza molto contenuta tra le due grandezze conferma anche per Venafro,

come per gli altri siti, la soluzione modellistica ben strutturata e riesce a rappresentare in maniera solida la composizione del particolato nel sito.

solfato ammonio	nitrato	crostale	biomass burning	traffico	mix antropogenico	aerosol marino	industrial
1.6 µg/m^3	2.1 µg/m^3	4.5 µg/m^3	7.6 µg/m^3	7.0 µg/m^3	0.5 µg/m^3	1.1 µg/m^3	5.2 µg/m^3

Tabella 34 - contributi in concentrazione dei fattori sito di Venafro

- Il fattore biomass burning (7.6 µg/m^3), emerge come la componente più rilevante. Un valore di questa entità suggerisce un ruolo marcato delle combustioni, verosimilmente legate a riscaldamento domestico.
- Anche il contributo del traffico (7.0 µg/m^3) risulta molto elevato, indicando un peso significativo delle emissioni veicolari e della risospensione indotta dal transito, elementi tipici delle aree attraversate da flussi di mobilità consistenti.
- Il fattore industrial (5.2 µg/m^3) rappresenta un ulteriore contributo importante, compatibile con la presenza di attività produttive o impianti emissivi che influenzano la composizione del particolato.
- La componente crostale (4.5 µg/m^3) conferma un apporto rilevante di polveri di origine meccanica o naturale, spesso associate a risospensione da superfici stradali, movimentazione di materiali o condizioni meteorologiche favorevoli all'accumulo.
- Il nitrato (2.1 µg/m^3) e il solfato ammonio (1.6 µg/m^3) rappresentano la quota di particolato secondario formata in atmosfera a partire da precursori gassosi, indicando processi di trasformazione chimica.
- L'aerosol marino (1.1 µg/m^3) mostra un apporto modesto ma riconoscibile, mentre il mix antropogenico (0.5 µg/m^3) costituisce la componente residuale associata a sorgenti minori non dominanti.

Il quadro emissivo di Venafro evidenzia una combinazione di contributi legati a combustioni, traffico e risospensione, affiancati da una componente industriale significativa e da una quota stabile di particolato secondario. La buona corrispondenza tra PM_{10} ricostruito e misurato conferma la solidità della soluzione PMF e la capacità del modello di rappresentare in modo realistico le dinamiche emissive del sito.

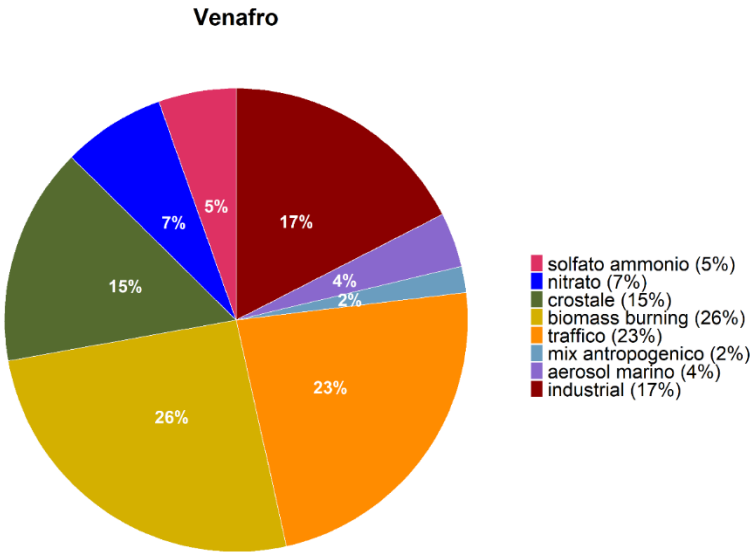


Grafico 147 - contributo percentuale delle sorgenti Venafro

Analisi mensile

I grafici mensili di Venafro (Grafico 148 e Grafico 149) mostrano un'evoluzione mensile da cui emerge che nei mesi invernali sono presenti contributi elevati dei fattori più sensibili alle condizioni fredde: biomass burning domina in modo netto, raggiungendo valori estremamente elevati (20.3 µg/m^3 in gennaio, 19.5 µg/m^3 in febbraio e oltre 24 µg/m^3 in dicembre), con percentuali che superano il 50% nei mesi più freddi e arrivano quasi al 59% in dicembre. Accanto a questo fattore, mantengono un ruolo significativo anche traffico, industrial e nitrato, che contribuiscono in modo stabile alla struttura del particolato invernale.

Con l'avanzare della primavera, i dati mostrano una riduzione progressiva dei contributi invernali. In marzo e aprile, biomass burning scende rispettivamente a 10.4 e 3.3 µg/m^3, mentre nitrato si stabilizza su valori più contenuti. Parallelamente, la loro incidenza percentuale diminuisce, lasciando spazio a una distribuzione più equilibrata tra i diversi fattori. In questo periodo aumentano, infatti, le quote relative di crostale, traffico e industrial, che pur mantenendo valori assoluti moderati acquisiscono un peso percentuale maggiore grazie alla riduzione dei contributi dominanti dell'inverno. Anche aerosol marino e solfato ammonio mostrano una presenza più visibile, contribuendo a definire una configurazione primaverile più articolata.

Durante l'estate, la configurazione cambia in modo netto. I fattori tipicamente invernali diventano marginali: biomass burning scende a valori prossimi allo zero in giugno e luglio, mentre nitrato si mantiene su livelli moderati. In questo periodo emergono con forza i contributi più stabili o di fondo. Crostale, traffico e industrial diventano i fattori principali, con valori che oscillano tra 6 e 8 µg/m^3 e percentuali che superano il 25% nei mesi più caldi. Anche solfato ammonio e aerosol marino mantengono un andamento regolare, con una presenza percentuale più uniforme e relativamente più visibile proprio nei mesi in cui i contributi invernali si riducono.

Con l'arrivo dell'autunno, i dati evidenziano una graduale ricomparsa dei contributi invernali. In settembre e ottobre si osserva un aumento dei valori di nitrato e biomass burning, che in novembre e dicembre tornano a rappresentare una quota rilevante sia in termini assoluti sia percentuali. Parallelamente, i contributi estivi si riducono, ristabilendo la configurazione tipica dei mesi freddi. In particolare, biomass burning torna a superare i 12 µg/m^3 in novembre e raggiunge nuovamente valori molto elevati in dicembre, mentre traffico e industrial mantengono un ruolo significativo nella struttura del particolato. Nel complesso, Venafro mostra un ciclo annuale ordinato e molto marcato:

- una fase invernale dominata in modo netto dai fattori più sensibili alle condizioni fredde, con biomass burning come contributo largamente prevalente;
- una fase estiva in cui prevalgono i contributi di fondo, in particolare crostale, traffico e industrial;
- due transizioni intermedie che accompagnano la progressiva diminuzione e successiva ricomparsa dei fattori stagionali.

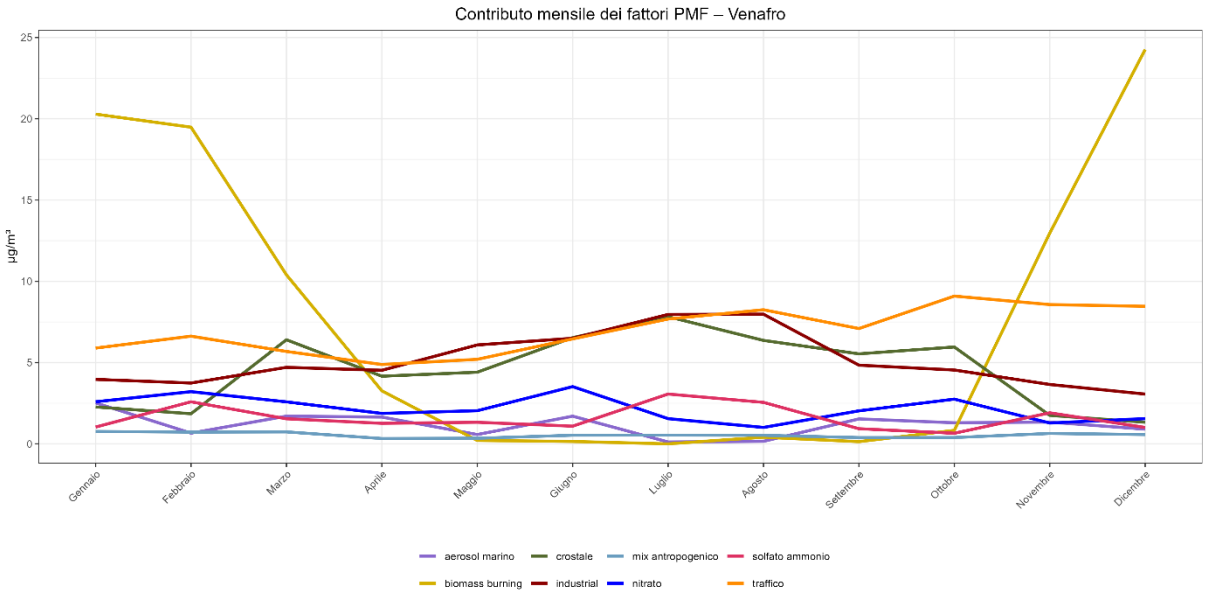


Grafico 148 - contributo mensile fattori sito Venafro

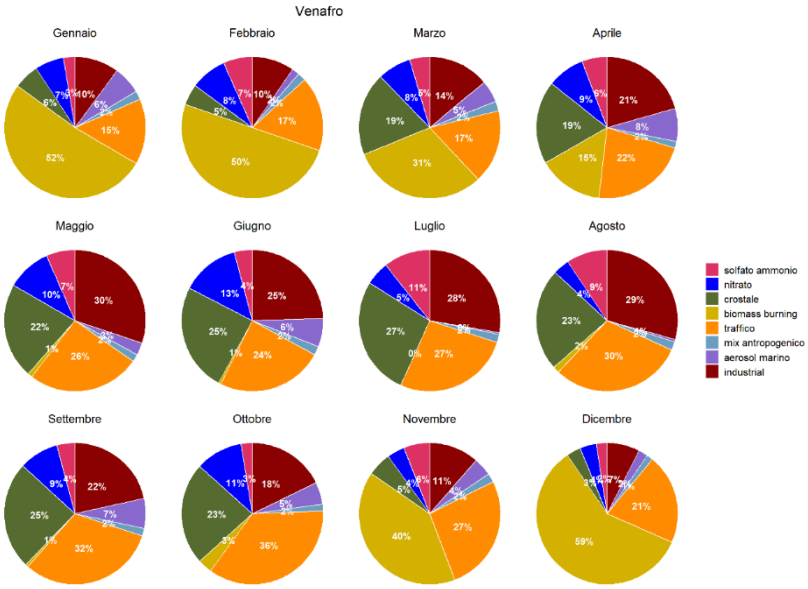


Grafico 149 - contributo percentuale mensile Venafro

A integrazione della lettura complessiva, si riportano di seguito i grafici mensili dei singoli fattori, utili a evidenziarne nel dettaglio le specifiche dinamiche stagionali.

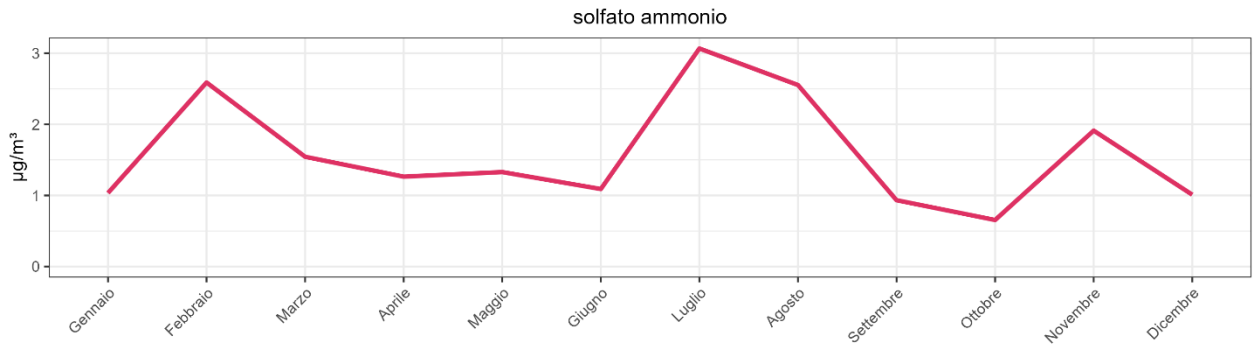


Grafico 150 - contributo mensile solfato di ammonio sito Venafro

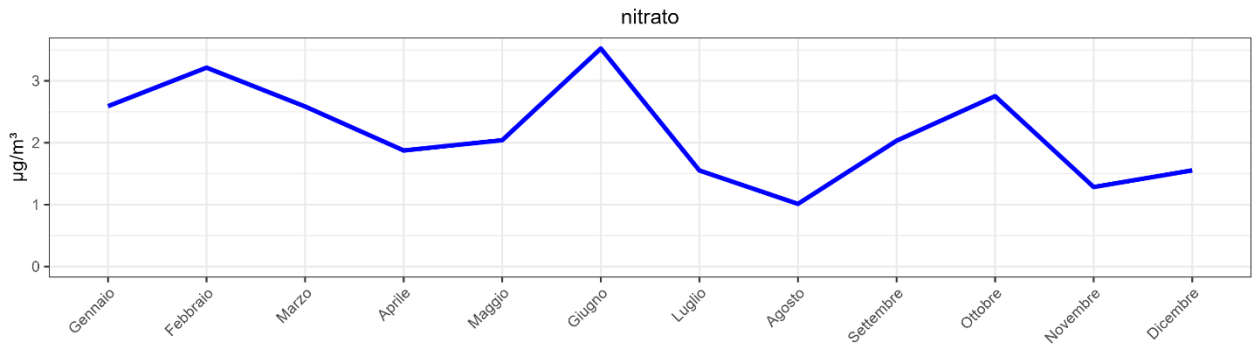


Grafico 151 - contributo mensile nitrato sito Venafro

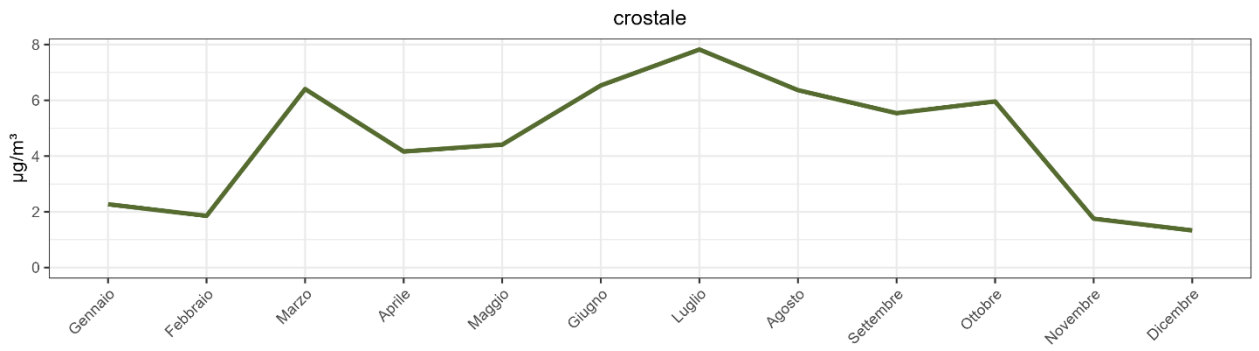


Grafico 152 - contributo mensile crostale sito Venafro

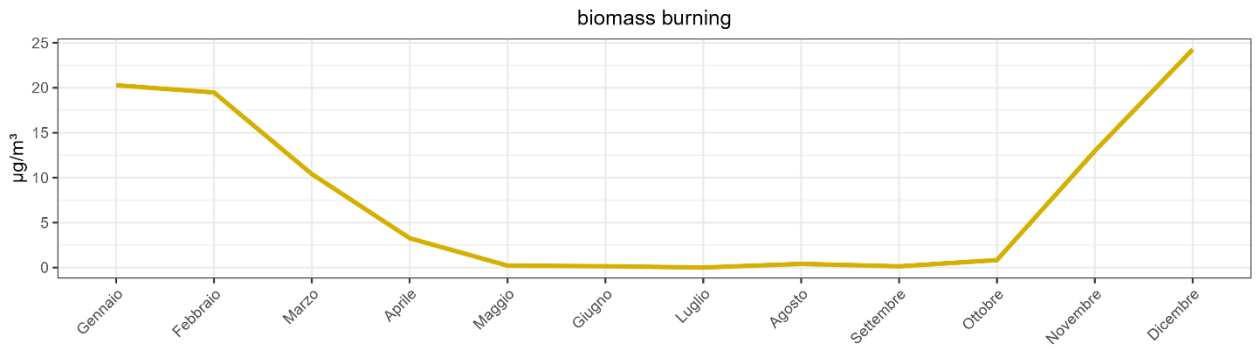


Grafico 153 - contributo mensile biomass burning Venafro

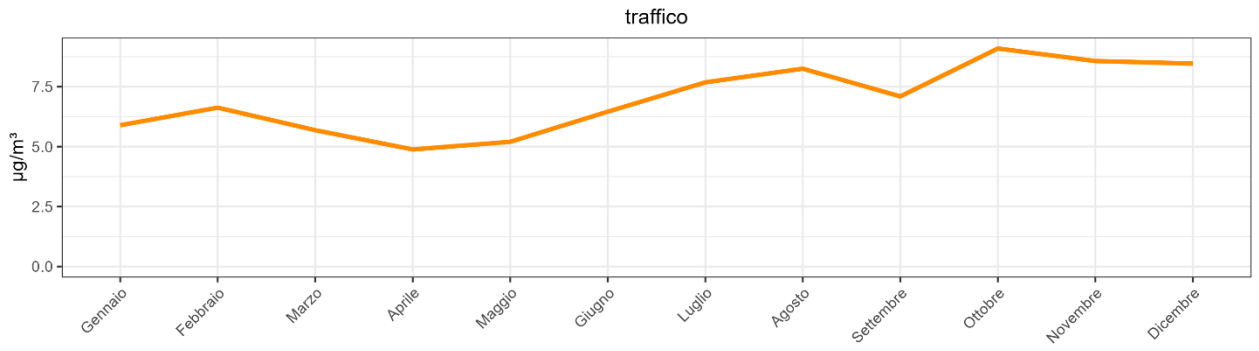


Grafico 154 - contributo mensile traffico sito Venafro

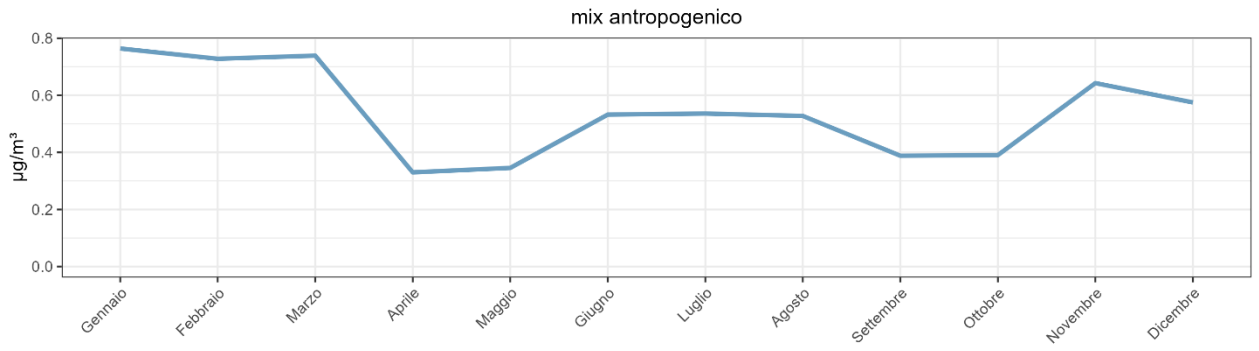


Grafico 155 - contributo mensile mix antopogenico sito Venafro

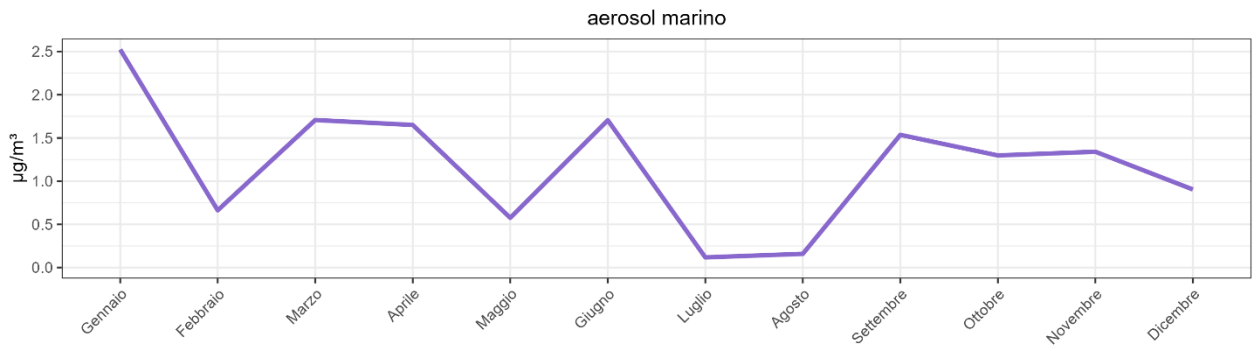


Grafico 156 - contributo mensile aerosol marino sito Venafro

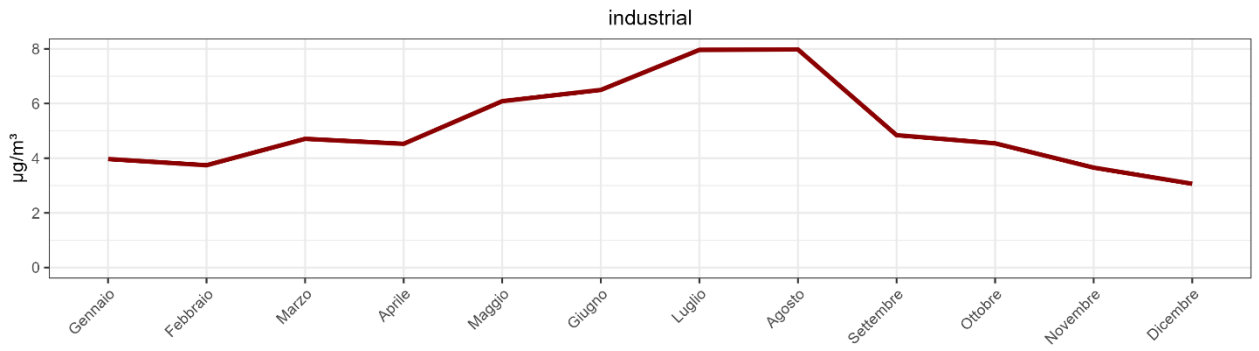


Grafico 157 - contributo mensile industrial sito Venafro

Analisi settimana

L'andamento settimanale dei profili (Grafico 158 e Grafico 159) è confermato anche a Venafro, con una stabilità di tutte le sorgenti, fatta eccezione per il traffico, per il quale si nota una diminuzione nel fine settimana.

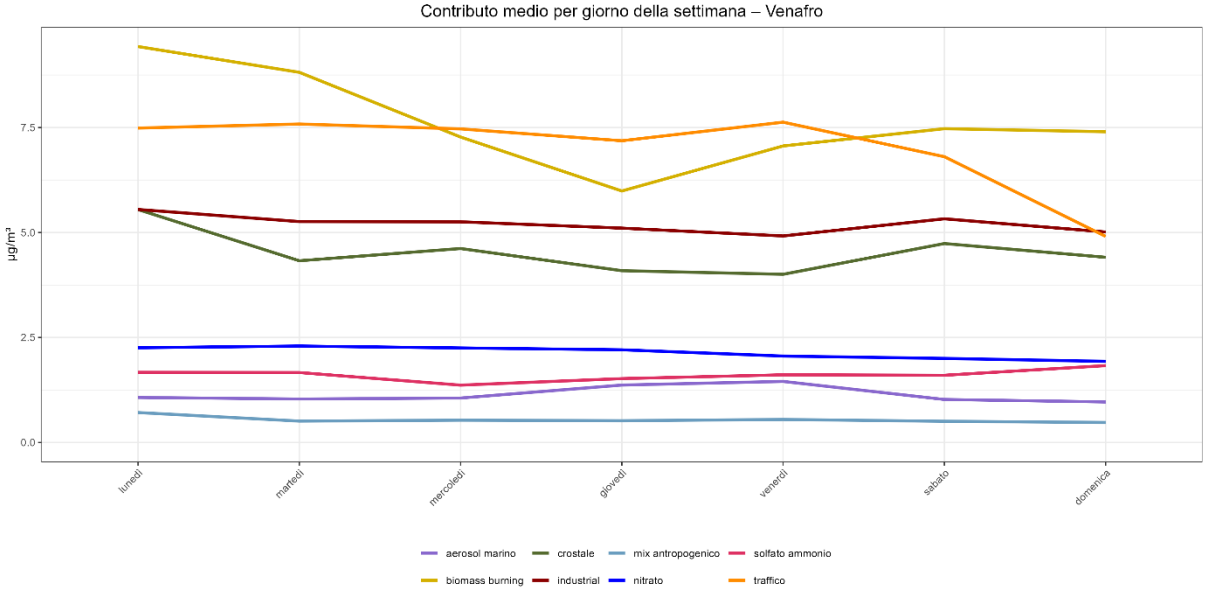


Grafico 158 - contributo fattori per giorno della settimana sito di Venafro

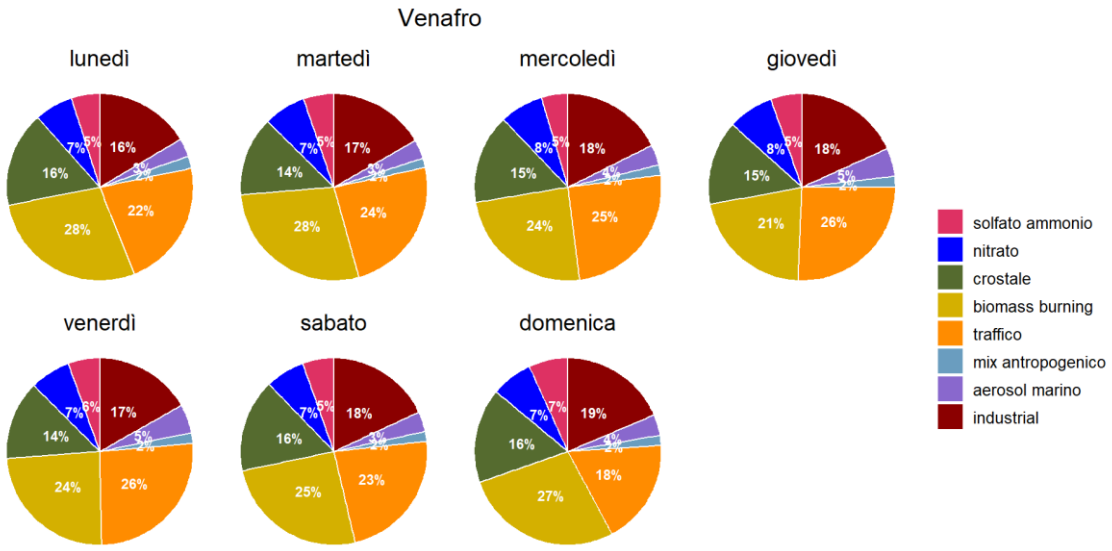


Grafico 159 - contributo percentuale settimanale Venafro

12.3.4. Confronto tra siti

A completamento dell'analisi dei risultati sito-specifici, in questo paragrafo si analizzano le differenze tra i siti recettori, infatti, l'analisi dei contributi percentuali dei fattori PMF nei tre siti di monitoraggio (Grafico 161 - Grafico 163), integrata con i valori di concentrazione assoluti (Tabella 35), permette di comprendere non solo il peso relativo delle sorgenti, ma anche la loro effettiva rilevanza in termini di massa. Nel complesso, la

struttura delle sorgenti sulla piana risulta coerente, ma emergono differenze locali che riflettono condizioni emissive e caratteristiche microambientali specifiche.

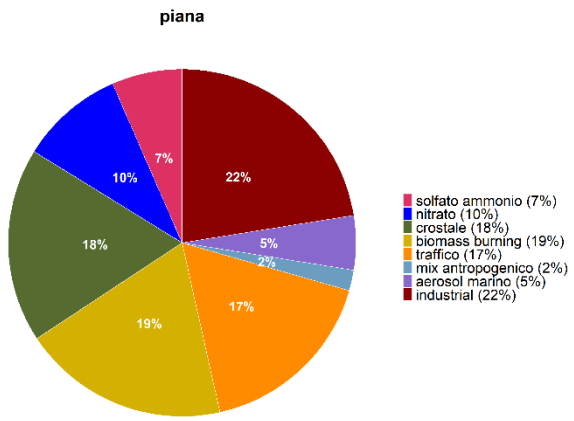


Grafico 160 - contributi delle sorgenti piana

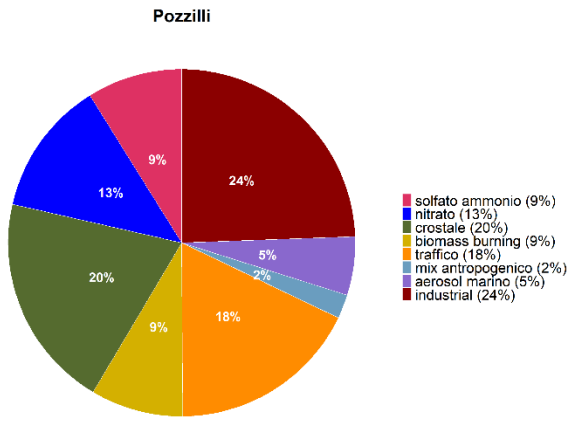


Grafico 161 - contributi delle sorgenti Pozzilli

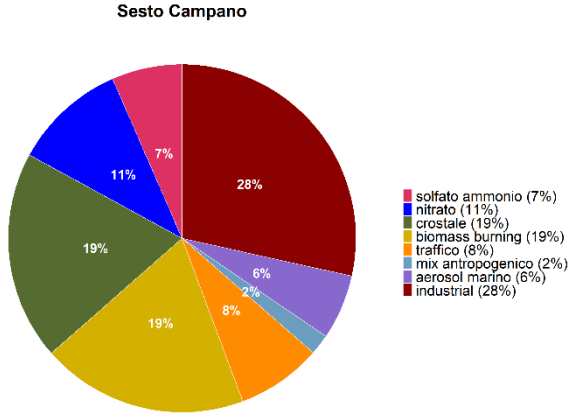


Grafico 162 - contributi delle sorgenti Sesto Campano

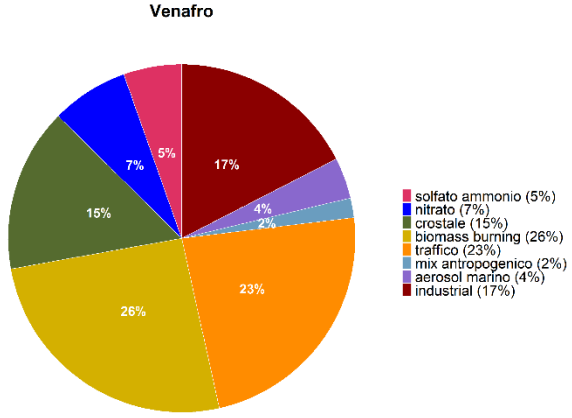


Grafico 163 - contributi delle sorgenti Venafro

sito	solfato ammonio	Nitrato	Crostale	biomass burning	Traffico	mix antropogenico	aerosol marino	Industrial
Pozzilli	1.6 µg/m^3	2.3 µg/m^3	3.7 µg/m^3	1.6 µg/m^3	3.3 µg/m^3	0.4 µg/m^3	1.0 µg/m^3	4.5 µg/m^3
Sesto Campano	1.4 µg/m^3	2.3 µg/m^3	4.3 µg/m^3	4.2 µg/m^3	1.8 µg/m^3	0.4 µg/m^3	1.3 µg/m^3	6.3 µg/m^3
Venafro	1.6 µg/m^3	2.1 µg/m^3	4.5 µg/m^3	7.6 µg/m^3	7.0 µg/m^3	0.5 µg/m^3	1.1 µg/m^3	5.2 µg/m^3

Tabella 35 - contributi in concentrazione dei fattori nei tre siti

Fattore - solfato di ammonio

Il contributo del solfato di ammonio è relativamente uniforme, con valori compresi tra il 5% e il 9%. Questa apparente variabilità percentuale, tuttavia, non si traduce in differenze reali in termini di massa: le concentrazioni assolute oscillano infatti in un intervallo molto ristretto, tra 1.4 e 1.6 µg/m^3. Questo comportamento indica che le differenze percentuali sono principalmente legate al diverso PM totale dei siti, mentre il contributo effettivo del fattore rimane sostanzialmente costante. La coerenza tra i valori assoluti conferma la natura regionale del solfato di ammonio, legato a processi di formazione secondaria ampiamente distribuiti.

Fattore - nitrato

Il nitrato mostra un andamento molto simile a quello del solfato di ammonio. Le percentuali variano tra il 7% e il 13%, con valori più elevati a Pozzilli e Sesto Campano e più bassi a Venafro. Tuttavia, anche in questo caso, le concentrazioni assolute risultano quasi identiche nei tre siti, comprese tra 2.1 e 2.3 µg/m^3. La lieve variabilità percentuale riflette, anche in questo caso, più le differenze nel PM totale che reali variazioni nella presenza del fattore. La sostanziale uniformità delle masse conferma la natura regionale del nitrato, anch'esso legato a processi di formazione secondaria.

Fattore - crostale

Il fattore crostale è rilevante in tutti i siti, con contributi percentuali compresi tra il 15% e il 20%. L'analisi delle concentrazioni assolute, tuttavia, introduce un elemento interpretativo importante: Venafro, che percentualmente presenta il valore più basso (15%), mostra invece la concentrazione più elevata, pari a 4.5 µg/m^3, superiore sia a Pozzilli (3.7 µg/m^3) sia a Sesto Campano (4.3 µg/m^3). In questo caso, quindi, la percentuale non riflette la massa effettiva del fattore. Il dato evidenzia che a Venafro il contributo crostale rimane molto significativo in termini assoluti, per via di un PM totale più elevato e/o di condizioni locali favorevoli alla risospensione.

Fattore - biomass burning

La combustione di biomassa presenta una forte variabilità spaziale, con percentuali che vanno dal 9% di Pozzilli al 26% di Venafro, con quest'ultimo sito che presenta il contributo più elevato sia in termini assoluti che percentuali. Le concentrazioni assolute confermano pienamente la variabilità osservata in termini percentuali: 1.6 µg/m^3 a Pozzilli, 4.2 µg/m^3 a Sesto Campano e 7.6 µg/m^3 a Venafro.

Fattore - traffico

Il traffico mostra differenze marcate tra i siti, con percentuali che vanno dall'8% di Sesto Campano al 23% di Venafro. Le concentrazioni assolute amplificano ulteriormente questo divario: 1.8 µg/m^3 a Sesto Campano, 3.3 µg/m^3 a Pozzilli e 7.0 µg/m^3 a Venafro. Anche in questo caso, percentuali e masse sono pienamente coerenti e indicano una maggiore esposizione di Venafro alle emissioni veicolari.

Fattore - mix antropogenico

Il mix antropogenico presenta un contributo percentuale costante (2%) in tutti i siti, e le concentrazioni assolute risultano altrettanto uniformi, comprese tra 0.4 e 0.5 µg/m^3, indicando una sorgente diffusa e non dominante.

Fattore - aerosol marino

L'aerosol marino mostra contributi molto simili nei tre siti, sia in termini percentuali (4 - 6%) sia in termini di concentrazione assoluta, che rimane compresa in un intervallo estremamente ristretto (1.0 - 1.3 µg/m^3). La quasi perfetta sovrapposizione tra valori relativi e assoluti indica un comportamento stabile e omogeneo, pienamente coerente con una sorgente regionale.

Fattore - industrial

Il fattore industrial presenta percentuali più elevate a Sesto Campano (28%) e Pozzilli (24%), mentre Venafro mostra un valore più basso (17%). Le concentrazioni assolute confermano il ruolo dominante di Sesto Campano, che registra la massa più elevata (6.3 µg/m^3). Il quadro si articola osservando Venafro: pur avendo la percentuale più bassa, presenta una massa pari a 5.2 µg/m^3, superiore a quella di Pozzilli (4.5 µg/m^3). In

questo caso, quindi, la percentuale non riflette pienamente il contributo assoluto del fattore. Il dato suggerisce che, pur essendo meno dominante nel profilo di Venafro, la sorgente industriale rimane comunque rilevante in termini di massa.

Nel complesso, l'analisi congiunta dei fattori mostra che le differenze percentuali tra i siti non sempre corrispondono a variazioni reali nelle concentrazioni assolute. Per diversi fattori, le masse risultano quasi identiche nonostante la variabilità dei contributi relativi, segnalando che le differenze percentuali riflettono soprattutto il diverso PM totale. Altri fattori mostrano invece una piena coerenza tra percentuali e concentrazioni, mentre in alcuni casi il peso relativo non rappresenta correttamente la massa effettiva.

12.4. Conclusioni

L'analisi PMF condotta sulla piana di Venafro ha permesso di delineare la composizione del PM_{10}, evidenziando il ruolo predominante delle componenti industriali, della combustione di biomassa, del traffico e delle polveri crostali. Le componenti secondarie, pur non dominanti, confermano l'influenza di processi di trasformazione atmosferica che contribuiscono stabilmente al particolato.

L'evoluzione mensile mostra un ciclo stagionale ben definito: nei mesi freddi prevalgono i fattori legati alle condizioni stagnanti e al riscaldamento domestico, mentre in estate emergono le componenti più stabili o di fondo, in particolare crostale e industrial. Le transizioni primaverili e autunnali accompagnano la progressiva attenuazione e successiva ricomparsa dei contributi invernali, restituendo un quadro temporale ordinato e coerente.

Le analisi sito-specifiche confermano la coerenza del sistema emissivo complessivo, pur evidenziando differenze legate alla distribuzione delle attività produttive, dei flussi di traffico e delle aree residenziali. Queste peculiarità locali modulano l'intensità relativa dei fattori senza alterarne la struttura generale.

La soluzione PMF, risultata stabile e interpretabile grazie alla presenza di specie traccianti affidabili e a un comportamento temporale coerente, ha permesso di ottenere, quindi, risultati solidi e consistenti, che costituiscono una base conoscitiva robusta per orientare le politiche di qualità dell'aria e definire interventi mirati sui comparti maggiormente responsabili, nel quadro di una gestione integrata dell'inquinamento atmosferico nella piana venafrana.

13. Bibliografia

APPA Trento. (2018, dicembre). Caratterizzazione tramite modello a recettore delle fonti emissive di particolato aerodisperso a Borgo Valsugana (Prot. RFS301-731823).

ARPAE Emilia-Romagna. (2022). Specie chimiche nel particolato (PM2.5) in atmosfera: Anno 2022 (1 gennaio – 31 dicembre 2022).

Colombi, C. (2022, 21–22 novembre). Chemical Mass Balance. In Giornate di studio: La caratterizzazione chimica del particolato atmosferico (V ed.). ARPA Lombardia, Terni.

Colombi, C. (2023, 27–28 novembre). Introduzione alle tecniche di Source Apportionment. In Giornate di studio: La caratterizzazione chimica del particolato atmosferico (VI ed.). ARPA Lombardia, Bologna.

Colombi, C., Cuccia, E., & Del Santo, U. (2018, dicembre). Progetto Supersiti: La stazione di Milano via Pascal. ARPA Lombardia.

European Commission, Joint Research Centre. (2019). European guide on air pollution source apportionment with receptor models (EUR 29816 EN). Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2760/439106

Joint Research Centre. (s.d.). SPECIEUROPE – Source Apportionment Database. http://source-apportionment.jrc.ec.europa.eu/

Microsoft Corporation. (s.d.). Power BI [Software per visualizzazione dati].

Pernigotti, D., Belis, C. A., & Spanó, L. (2016). SPECIEUROPE: Il database europeo per i profili di sorgente PM. Atmospheric Pollution Research, 7(2), 307–314. https://doi.org/10.1016/j.apr.2015.10.007

Posit Software, PBC. (2025). RStudio (Versione 2025.09.2 Build 418) [Ambiente di sviluppo integrato].

PREPAIR. (2021, gennaio). Report 3 COVID-19: Studio degli effetti delle misure COVID-19 sulla composizione chimica del particolato nel Bacino Padano.

Scotto, F. (2019, 16–17 aprile). Identificazione delle sorgenti del particolato tramite modelli a recettore (PMF). In La caratterizzazione chimica del particolato atmosferico. Arpae Emilia-Romagna, Palermo.

Scotto, F. (2022, 22–23 novembre). Identificazione delle sorgenti del particolato tramite Positive Matrix Factorization (PMF). IV Giornata di caratterizzazione chimica del particolato atmosferico, Terni. Arpae Emilia-Romagna.

Scotto, F. (2023, 27–28 novembre). Identificazione delle sorgenti del particolato tramite Positive Matrix Factorization (PMF). In Giornate di studio: La caratterizzazione chimica del particolato atmosferico (VI ed.). Arpae Emilia-Romagna, Bologna.

U.S. Environmental Protection Agency. (2014). EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0: Fundamentals and user guide (Versione 5.0.14.21735). EPA.

Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale
Dipartimento Tecnico
UOC Monitoraggi e Prevenzione Ambientale
www.arpamolise.it
e-mail: monitoraggi@arpamolise.it
PEC: arpamolise@legalmail.it