

ANALISI DEL PARTICOLATO ATMOSFERICO NEL LAZIO: VARIABILITÀ SPAZIALE E STAGIONALE 2010-2019



Analisi del particolato atmosferico nel Lazio: variabilità spaziale e stagionale 2010-2019

Rapporto a cura di:

ARPA Lazio

Dipartimento stato dell'ambiente

Servizio qualità dell'aria e monitoraggio ambientale degli agenti fisici

Antonio Amoroso, Silvia Barberini, Battista Bellusci, Cesarella Colonna, Alessandro Domenico Di Giosa, Arianna Marinelli, Donatella Occhiuto

Contatti autori

antonio.amoroso@arpalazio.it silvia.barberini@arpalazio.it battista.bellusci@arpalazio.it

cesarella.colonna@arpalazio.it alessandro.digiosa@arpalazio.it arianna.marinelli@arpalazio.it

donatella.occhiuto@arpalazio.it

RIASSUNTO

Il report presenta l'analisi del particolato atmosferico nel Lazio nel periodo 2000-2019 e della sua variabilità spaziale e temporale. L'andamento dei dati mostra una progressiva diminuzione dei valori delle concentrazioni medie annue con l'eccezione del 2015. Il documento contiene una serie di approfondimenti utili a supportare l'analisi dei dati

Parole chiave: inquinamento, particolato atmosferico, monitoraggio

CONTRIBUTI E RINGRAZIAMENTI

I dati di qualità dell'aria che vengono prodotti e diffusi sono il frutto dell'impegno dei tecnici che quotidianamente lavorano al sistema di monitoraggio regionale e alla attività analitiche:

Fabio Barbini, Andrea Bolignano, Bolognesi Stefano, Pierfrancesco Briotti, Marilena Caldarella, Sesto Damizia, Pierantonio Di Legge, Giorgio Evangelisti, Massimo Enrico Ferrario, Cinzia Gatta, Giuseppe Grimaldi, Stefano Listrani, Luigi Martino, Matteo Morelli, Veronica Neri, Marika Ricci, Loredana Rinaldi, Manuela Riva, Marzia Trenta, Fabio Vantaggio, Angelo Zonetti

ARPA Lazio – 2021

Quest'opera è distribuita con Licenza
Creative Commons Attribuzione Italia 4.0



<http://www.arpalazio.it>

Coordinamento editoriale: ARPA Lazio – Area sistemi operativi e gestione della conoscenza

Foto copertina: https://www.leggo.it/italia/roma/roma_domenica_ecologica_smog_ultime_notizie-4972764.html

INDICE

LEGENDA.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
1.1 PARTICOLATO ATMOSFERICO.....	6
1.2 NORMATIVA E LIMITI.....	7
1.3 SORGENTI DI EMISSIONE DEL PM NEL LAZIO.....	10
2 SISTEMA DI MONITORAGGIO DEL PM NEL LAZIO.....	13
3 PM10.....	20
3.1 ANDAMENTO DELLA MEDIA ANNUALE.....	20
3.1.1 <i>Misure</i>	20
3.1.2 <i>Valutazioni con modello</i>	22
3.2 ANDAMENTO DEL VALORE LIMITE GIORNALIERO.....	25
3.2.1 <i>Misure</i>	25
3.2.2 <i>Analisi statistica meteo</i>	26
3.2.3 <i>Mappe da modello</i>	33
3.3 ANDAMENTI STAGIONALI.....	36
3.4 INFLUENZA DEL SAHARA.....	38
4 PM2.5.....	44
5 STUDIO DEI COMPONENTI DEL PM10.....	47
5.1 IPA.....	47
5.2 METALLI PESANTI.....	49
5.3 CARBONIO ORGANICO.....	52
6 ELEMENTI A SUPPORTO DELL'ANALISI DEI DATI.....	57
6.1 POPOLAZIONE.....	57
6.2 EVOLUZIONE TECNOLOGICA DEI MOTORI.....	59
6.3 RISCALDAMENTO DOMESTICO.....	62
6.4 PRODUZIONE INDUSTRIALE.....	64
6.5 PRODUZIONE ENERGIA ELETTRICA.....	65
6.6 AGRICOLTURA.....	67
7 CONCLUSIONI.....	69
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	71

LEGENDA

APAT	Agenzia per la Protezione dell' Ambiente e per i servizi Tecnici
ARPA	Agenzia Regionale Protezione Ambientale
CO	Carbonio Organico
CO₂	Biossido di carbonio o anidride carbonica
EC	Carbonio Elementare
IARC	<i>International Agency Research on Cancer</i> , Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro
IC	Carbonio Inorganico
IPA	Idrocarburi Policiclici Aromatici
ISPRA	Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale
NH₃	Ammoniaca
NO_x	Ossidi di azoto
OMS	Organizzazione Mondiale della Sanità
PM	<i>Particulate Matter</i> , Particolato Atmosferico
PTS	Polveri Totali Sospese
SAU	Superficie Agricola Utilizzata
SO₂	Biossido di zolfo o anidride solforosa
VL	Valore Limite

1 INTRODUZIONE

Il PM è caratterizzato da una spiccata variabilità spaziale e stagionale, con concentrazioni significativamente più alte nel periodo invernale, a causa sia della peggiore capacità dispersiva dell'atmosfera nei mesi più freddi, sia della presenza di sorgenti aggiuntive come, ad esempio, il riscaldamento domestico.

Lo studio mostra l'andamento spaziale dei componenti del particolato, quali idrocarburi policiclici aromatici (IPA), metalli pesanti e carbonio organico.

Il report presenta un'analisi dei dati del particolato atmosferico monitorati dalla rete regionale del Lazio nel periodo tra il 2010 e il 2019, illustrando l'andamento della qualità dell'aria nel corso degli anni e delle stagioni.

1.1 PARTICOLATO ATMOSFERICO

Il particolato atmosferico (*Particulate Matter*, PM) è una miscela complessa di particelle solide e liquide. I suoi macro componenti sono:

- carbonio elementare, originato principalmente dal traffico e dalla combustione di biomassa
- carbonio organico, originato principalmente dal traffico e dalla combustione di biomassa e di origine biogenica
- nitrato d'ammonio, originato dal traffico e dall'agricoltura
- solfato d'ammonio, originato dall'industria, dai trasporti, dall'agricoltura
- aerosol marino, di origine naturale
- sabbie desertiche, di origine naturale
- suolo, originato dal traffico, dai cantieri, dalle cave.

Il PM ha origine sia primaria che secondaria: nel primo caso deriva dall'emissione diretta dell'atmosfera, nel secondo da precursori gassosi come ad esempio NO_x, SO₂, NH₃ e composti organici volatili, che, dopo aver subito delle reazioni in atmosfera, passano in fase solida. Il parametro principale che governa il comportamento aerodinamico di un aerosol è la dimensione delle particelle in sospensione, che per questo motivo rappresenta la grandezza comunemente utilizzata per caratterizzare il particolato. Il diametro aerodinamico delle particelle è identificativo del PM che viene convenzionalmente classificato in:

- particolato grossolano: particolato sedimentabile di dimensioni superiori ai 10 µm
- PM10: particolato inalabile formato da particelle inferiori a 10 µm
- PM2,5: particolato fine con diametro inferiore a 2,5 µm
- PM1: particolato ultra-fine con diametro inferiore ad 1 µm.

1.2 **NORMATIVA E LIMITI**

Negli ultimi quarant'anni il quadro normativo europeo in materia di qualità dell'aria e conseguentemente quello nazionale, attraverso il recepimento delle direttive comunitarie, è stato caratterizzato da una continua evoluzione, sia per la scelta degli inquinanti da monitorare che per l'individuazione dei valori limite di riferimento. Nella legislazione italiana il particolato atmosferico compare con la definizione di "polveri totali sospese" (PTS) nel d.p.r. n. 203 del 24 maggio 1988 [1], che recepiva diverse direttive comunitarie concernenti norme in materia di qualità dell'aria e inquinamento prodotto da grandi impianti industriali. Nel d.m. del 15 aprile 1994 (successivamente aggiornato dal d.m. del 25 novembre 1994) vengono definite norme tecniche in materia di livelli di attenzione e allarme per gli inquinanti atmosferici nelle aree urbane e in particolare per il PM10. Il d.m. N. 60 del 2 aprile 2002 attua le disposizioni del d.lgs. n. 351 del 4 agosto 1999 e recepisce le norme europee di riferimento, ossia le direttive 96/62/CE3 e 1999/30/CE. Con il d.m. 60/02 vengono introdotti due differenti limiti per il PM10 per la protezione della salute umana: un limite per la media giornaliera e uno per quella annuale. In una prima fase (da raggiungere entro il 1 gennaio 2005), il limite di 50 µg/m³, calcolato come media giornaliera, non doveva essere superato per più di 35 volte in un anno, mentre la media annuale (un obiettivo meno stringente) non doveva superare il limite di 40 µg/m³. Nella fase 2, a partire dal 1° gennaio 2010, il valore limite di 50 µg/m³ non doveva essere superato per più di 7 volte l'anno, mentre il valore limite annuale scendeva a 20 µg/m³ (figura 1). Le linee guida dell'OMS sulla qualità dell'aria [2] riportano valori guida, cioè concentrazioni in aria di inquinanti associate a tempi di esposizione, al di sotto delle quali non sono attesi effetti avversi per la salute, secondo le evidenze scientifiche disponibili. I valori guida quindi sono stati fissati per la protezione della salute e sono pertanto più severi delle norme comunitarie. Diffuse nel 2005, le linee guida sono attualmente in fase di revisione.

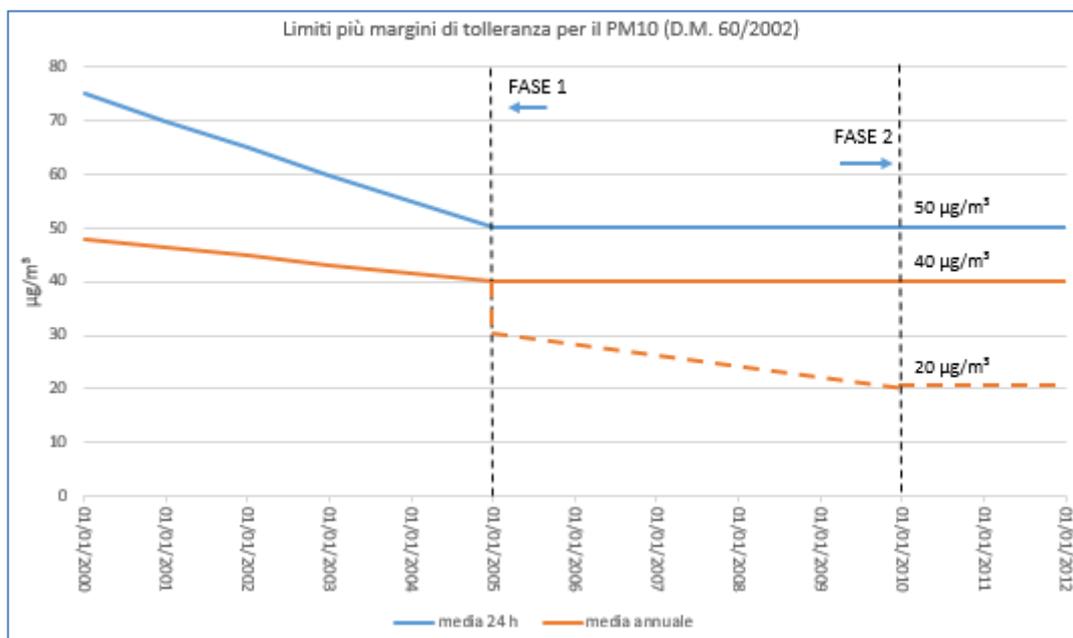


Figura 1: Il passaggio dalla fase 1 alla fase 2 nei limiti stabiliti dal d.m. 60/2002

Il 30 settembre 2010 è entrato in vigore il d.lgs. 13 agosto 2010 n. 155 di attuazione della direttiva 2008/50/CE relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa.

Il decreto modifica la normativa preesistente, istituendo un quadro normativo unitario in materia di valutazione e gestione della qualità dell'aria, aggiornato in relazione all'evoluzione delle conoscenze in campo scientifico e sanitario e alle esperienze maturate. Il d.lgs. 155/2010 introduce importanti novità per il PM2,5, per il quale sono stabiliti un valore limite, un valore obiettivo e un obbligo di concentrazione all'esposizione. In base alle Linee guida sulla qualità dell'aria dell'OMS, al fine di offrire un livello di protezione per i soggetti più vulnerabili, i valori limite per il PM10 e per il PM2.5 sono diminuiti a 20 µg/m³ e 10 µg/m³ rispettivamente (tabella 1).

Tabella 1: Valori limite per la protezione della salute umana imposti dal d.lgs. 155/10 e suggeriti dall'OMS

Inquinante	Tipologia di limite	Periodo di mediazione	Valore D.Lgs.155/2010	Valore linee guida OMS
PM10	Valore limite giornaliero	24 h	50 µg/m ³ da non superare più di 35 volte per anno civile	50 µg/m ³
	Valore limite annuale	Anno civile	40 µg/m ³	20 µg/m ³
PM2,5	Valore limite annuale	Anno civile	25 µg/m ³	10 µg/m ³
		Anno civile dal 1 gen 2020*	20 µg/m ³	

* Il d.lgs. 155/2010 prevede che dal 01/01/2020 il limite normativo venga rivalutato e stabilito con successivo decreto ai sensi dell'articolo 22, comma 6. Il nuovo decreto non è stato ancora emanato

1.3 SORGENTI DI EMISSIONE DEL PM NEL LAZIO

Le sorgenti naturali di PM primario includono: polveri sollevate dal vento, erosione di rocce, aerosol marini, polveri vulcaniche, materiale biologico come pollini, spore, batteri e residui di incendi boschivi. Generalmente le sorgenti naturali producono particelle grossolane, benché sorgenti ad alta temperatura, quali gli incendi boschivi, possano generare anche particelle fini. La loro immissione nell'atmosfera può essere dovuta alla sospensione locale oppure a fenomeni di trasporto a lungo raggio da regioni aride, come le tempeste sahariane (termine con cui si intende il trasporto sull'Europa di sabbie provenienti dal deserto del Sahara per effetto di particolari condizioni meteorologiche).

Le sorgenti antropiche di PM primario grossolano sono rappresentate dalle attività di costruzione e demolizione, dalle attività minerarie e dei cementifici, dalle polveri sollevate da attività agricole e dai terreni facilmente erodibili, dal traffico veicolare attraverso l'usura della pavimentazione stradale, dei pneumatici, delle pastiglie dei freni e dalla polvere sollevata dagli autoveicoli.

Le sorgenti antropiche di PM primario fine sono tutte quelle in cui si ha la combustione, come ad esempio le centrali termoelettriche, il traffico veicolare, il riscaldamento domestico, il riciclo e smaltimento di rifiuti e i numerosi processi industriali. Queste sorgenti portano all'immissione in atmosfera non solo di carbonio organico ed elementare, ma anche di elementi in traccia. A queste sorgenti si affiancano i processi siderurgici, nei quali particelle fini si originano dalla condensazione di vapori ad alta temperatura, la cui composizione varia a seconda del tipo di lavorazione e può comprendere diversi metalli (figura 2).



Figura 2: Fonti di inquinamento atmosferico (modificato da " L'aria che respiriamo, 2013" [3])

Una stima dell'andamento delle emissioni di PM10 nel Lazio è presente negli inventari regionali delle emissioni in atmosfera elaborati dall'ARPA Lazio, a partire dai dati dall'inventario nazionale ISPRA. Prendendo in considerazione i dati degli inventari del 2010, 2015, fino ad arrivare all'ultimo aggiornamento "LAZIO_2017 - ver. 2020", si nota come le emissioni complessive di PM10 nel Lazio siano aumentate nel corso degli anni (figura 3).

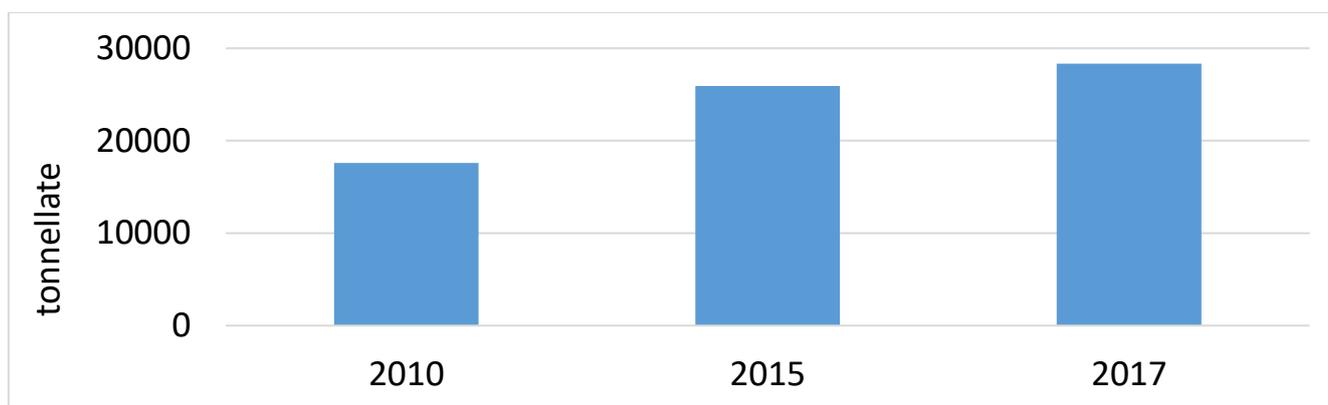


Figura 3: Andamento emissioni di PM10 nel Lazio (Inventario regionale delle emissioni in atmosfera "LAZIO_2017 - ver. 2020", [4])

L'inventario regionale fornisce inoltre importanti informazioni riguardanti i contributi alle emissioni di PM10 dei diversi macrosettori. Considerando l'andamento degli ultimi anni, si osserva che le principali fonti restano gli impianti di combustione non industriale e i trasporti stradali e che questi ultimi hanno un contributo crescente negli anni, mentre il riscaldamento civile subisce un leggero decremento (figura 4)*.

* Negli anni 2015 e 2017 il totale del PM10 del macrosettor "trasporti stradali" include il particolato da risospensione da traffico, pari al 77% del totale del macrosettor, per entrambi gli anni.

Nell'anno 2017 il totale del PM10 del macrosettor "agricoltura" include il particolato da risospensione agricola, pari all'83% del totale del macrosettor,

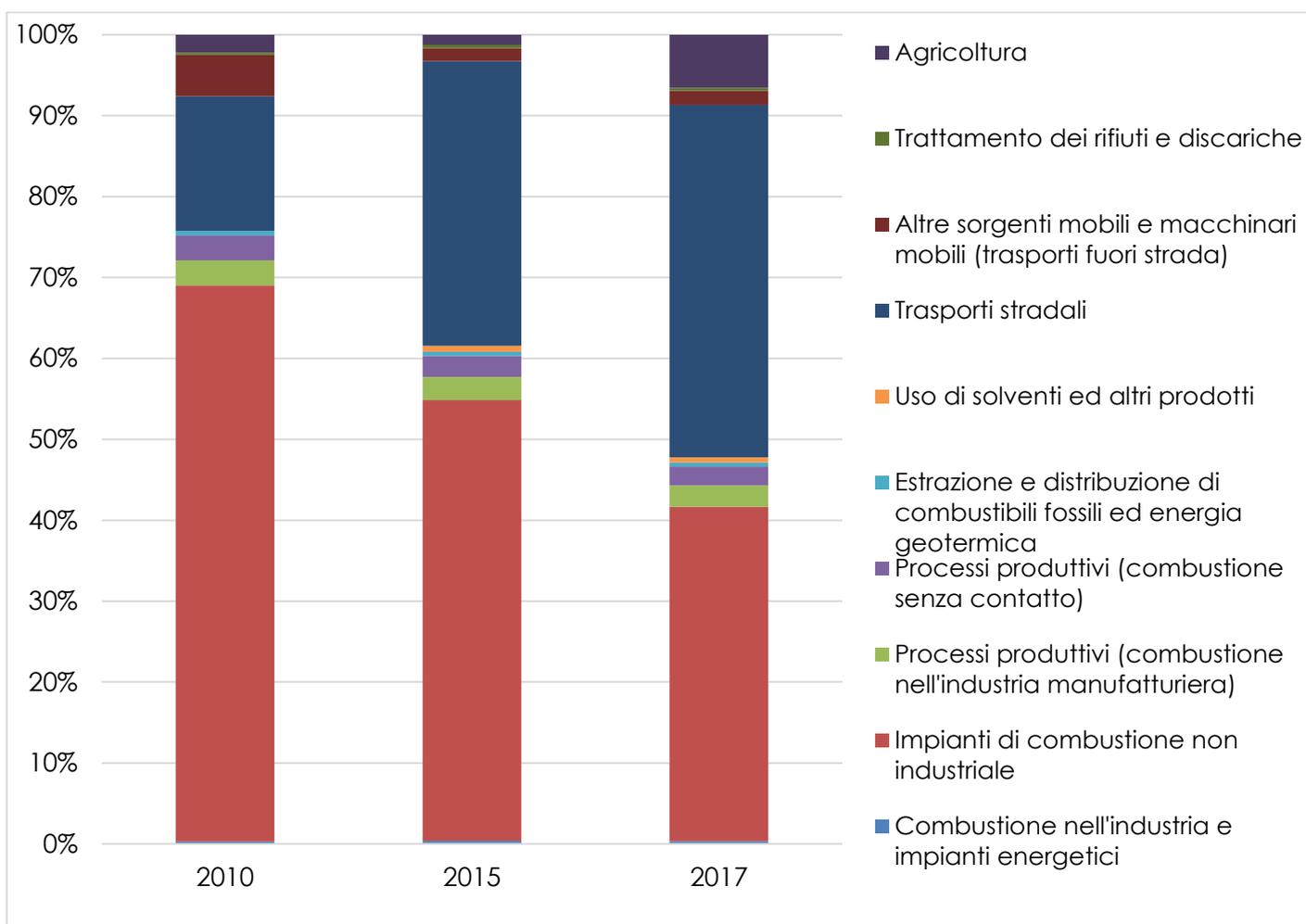


Figura 4: Andamento dei contributi dei macrosettori alle emissioni di PM10 nel Lazio (Inventario regionale delle emissioni in atmosfera "LAZIO_2017 - ver. 2020", [4])

2 SISTEMA DI MONITORAGGIO DEL PM NEL LAZIO

L'ARPA Lazio effettua nel Lazio il monitoraggio dell'inquinamento atmosferico e lo studio delle cause che lo determinano. La valutazione della qualità dell'aria [5] viene realizzata avvalendosi della sinergia di diversi strumenti:

- misure in siti fissi
- misure con stazioni mobili
- tecniche di stima obiettiva
- modelli.

La rete di monitoraggio della qualità dell'aria nel Lazio viene realizzata nel 1993 attraverso l'installazione di 31 stazioni fisse dislocate su tutto il territorio regionale.

La rete è attualmente costituita da 54 postazioni chimiche di misura, di cui 47 appartenenti al programma di valutazione della qualità dell'aria regionale (d.g.r. n.478/2016). In 52 postazioni di misura sono presenti analizzatori del PM10 e in 25 di queste anche analizzatori di PM2.5. La distribuzione delle postazioni di misura del PM è illustrata in figura 5.

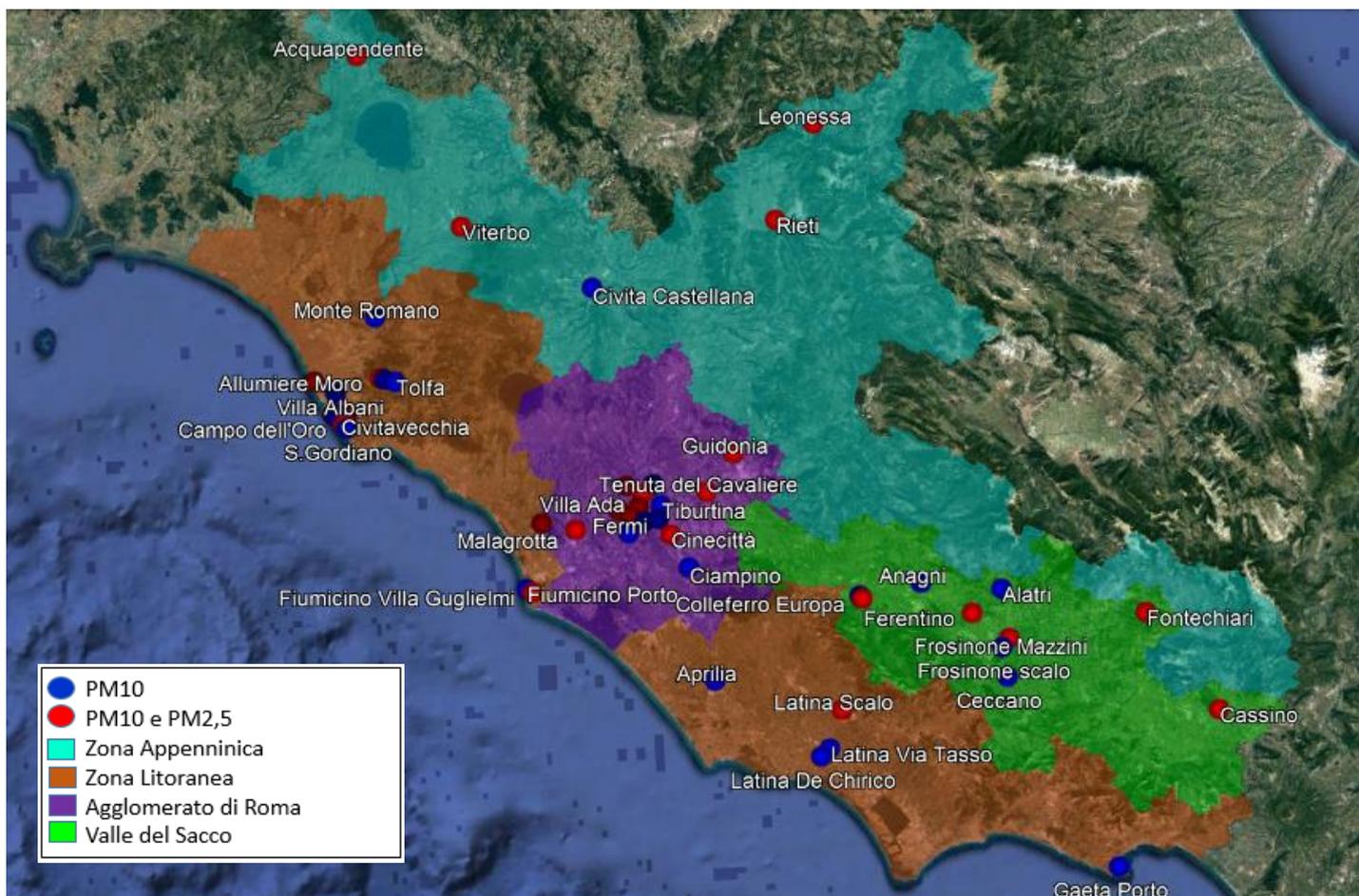


Figura 5: Distribuzione delle postazioni di analizzatori di PM nel Lazio

Nella figura 6 viene presentata la localizzazione delle postazioni nell'Agglomerato di Roma e nella figura 7 sono evidenziate le postazioni presenti nella zona di Civitavecchia.

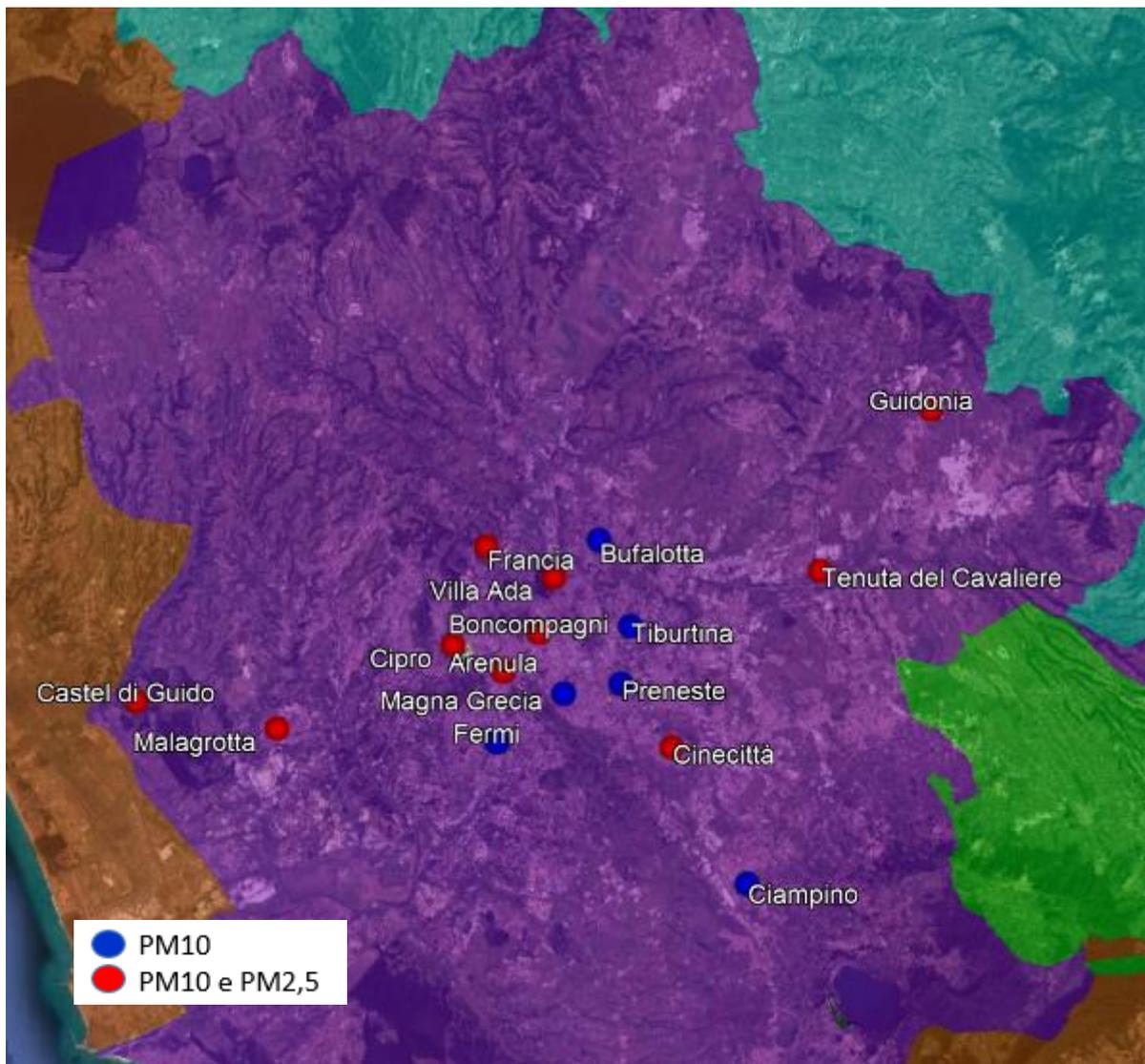


Figura 6: Postazioni di monitoraggio agglomerato di Roma

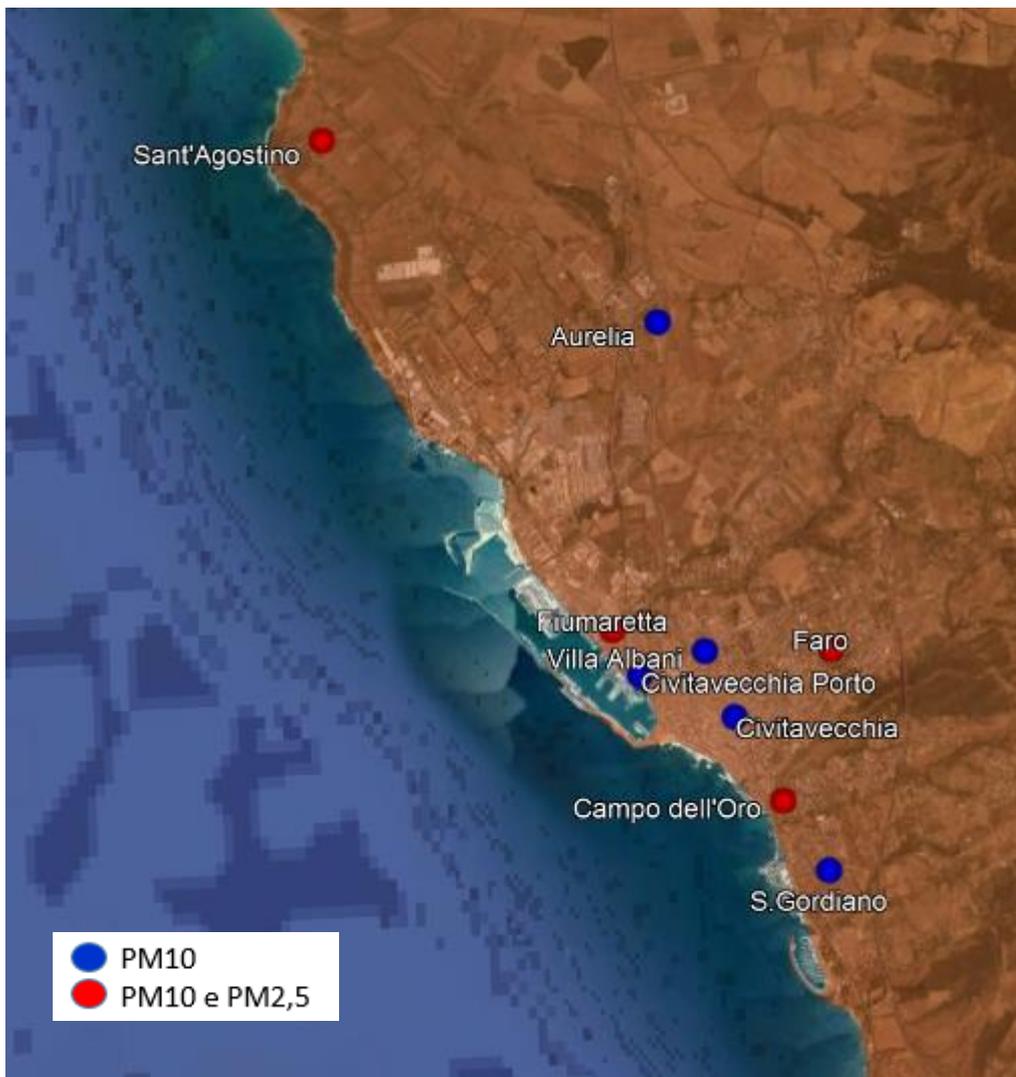


Figura 7: Postazioni di monitoraggio nella zona di Civitavecchia

Il numero dei campionatori di polveri è stato implementato negli ultimi dieci anni. In figura 8 viene riportata l'evoluzione del numero di campionatori di PM10 e PM2,5 a partire dal 2010 fino al 2019.

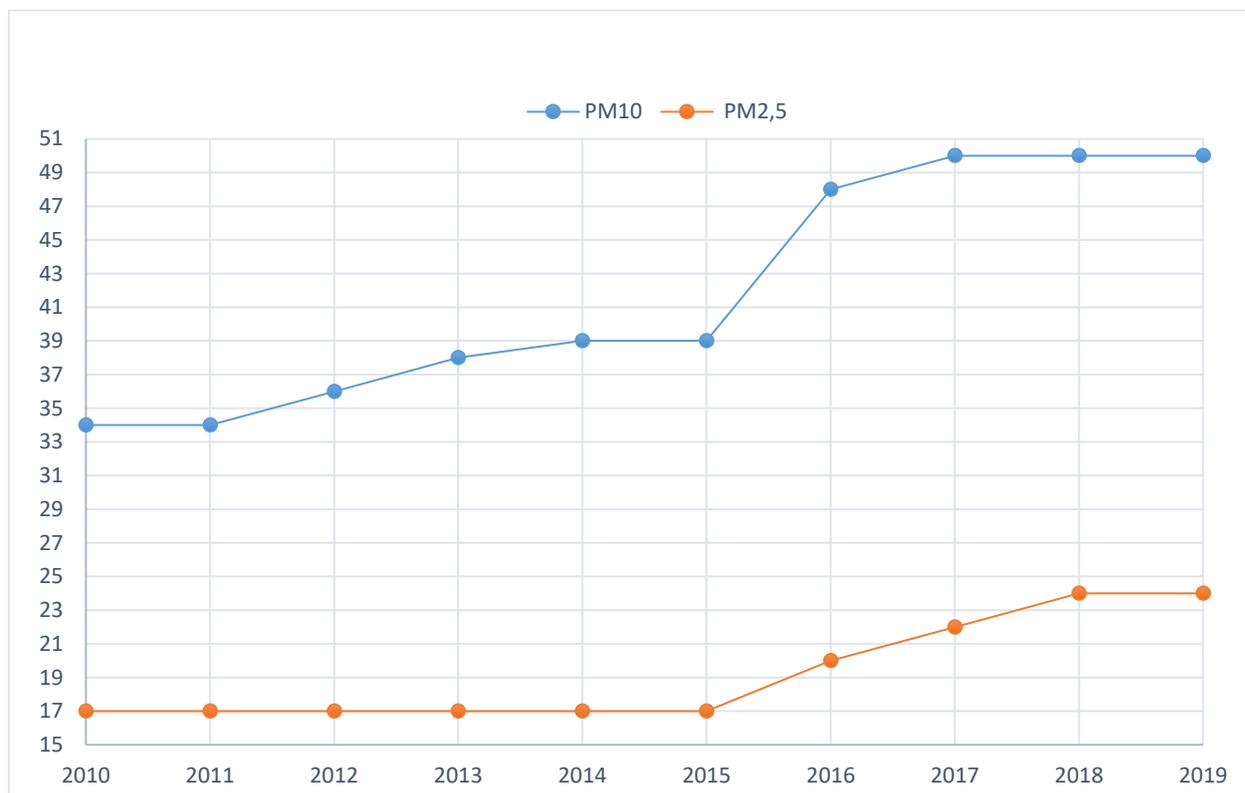


Figura 8: Numero analizzatori PM10 e PM2.5 della rete di monitoraggio ARPA Lazio dal 2010 al 2019

Il PM, oltre che nelle stazioni fisse di monitoraggio, viene misurato anche con i laboratori mobili.

Le campagne di monitoraggio effettuate mediante l'utilizzo di mezzi mobili vengono realizzate per esplorare porzioni di territorio più o meno distanti dai punti fissi di misura, con lo scopo di aumentare e migliorare la conoscenza dello stato della qualità dell'aria sul territorio regionale.

Con riferimento al particolato atmosferico nell'annuale valutazione della qualità dell'aria, per le postazioni in cui è stato possibile effettuare più di una campagna nel corso dell'anno i dati vengono trattati con il metodo BLUE (best linear unbiased estimation) [6] per ricostruire l'intera serie delle concentrazioni giornaliere dell'anno e queste vengono integrate nelle valutazioni con modello di dispersione tramite l'assimilazione a posteriori, al pari delle stazioni fisse, per rendere i campi di concentrazioni quanto più possibile verosimili.

Le misure realizzate con le stazioni fisse e mobili vengono integrate dall'utilizzo di modelli di dispersione degli inquinanti in atmosfera.

L'ARPA LAZIO utilizza una catena modellistica, la cui composizione è schematizzata in figura 9, sia per la previsione dei campi di concentrazione futuri sia per la ricostruzione di quelli passati.

Il sistema modellistico viene continuamente implementato producendo previsioni a cinque giorni e ricostruzioni, sia dei giorni passati che di qualche ora prima, in tempo quasi reale (*near real time*). Le stime ottenute per le concentrazioni orarie vengono aggregate in post processing per la verifica del rispetto dei limiti previsti dalla normativa su tutto il territorio regionale. I campi di concentrazione prodotti dalla catena modellistica vengono integrati con le misure della rete fissa mediante tecniche di assimilazione per una ricostruzione più esatta della situazione sul territorio. Per il solo PM10 vengono assimilati anche i dati delle misure indicative ricostruendo l'intera serie annua delle concentrazioni con tecniche statistiche di stima oggettiva.

Il sistema modellistico è applicato su più domini spaziali (Lazio, Roma, Civitavecchia e Valle del Sacco). Il dominio regionale (Lazio) ha una risoluzione spaziale di 4 km x 4 km, mentre gli altri hanno una risoluzione di 1 km x 1 km.

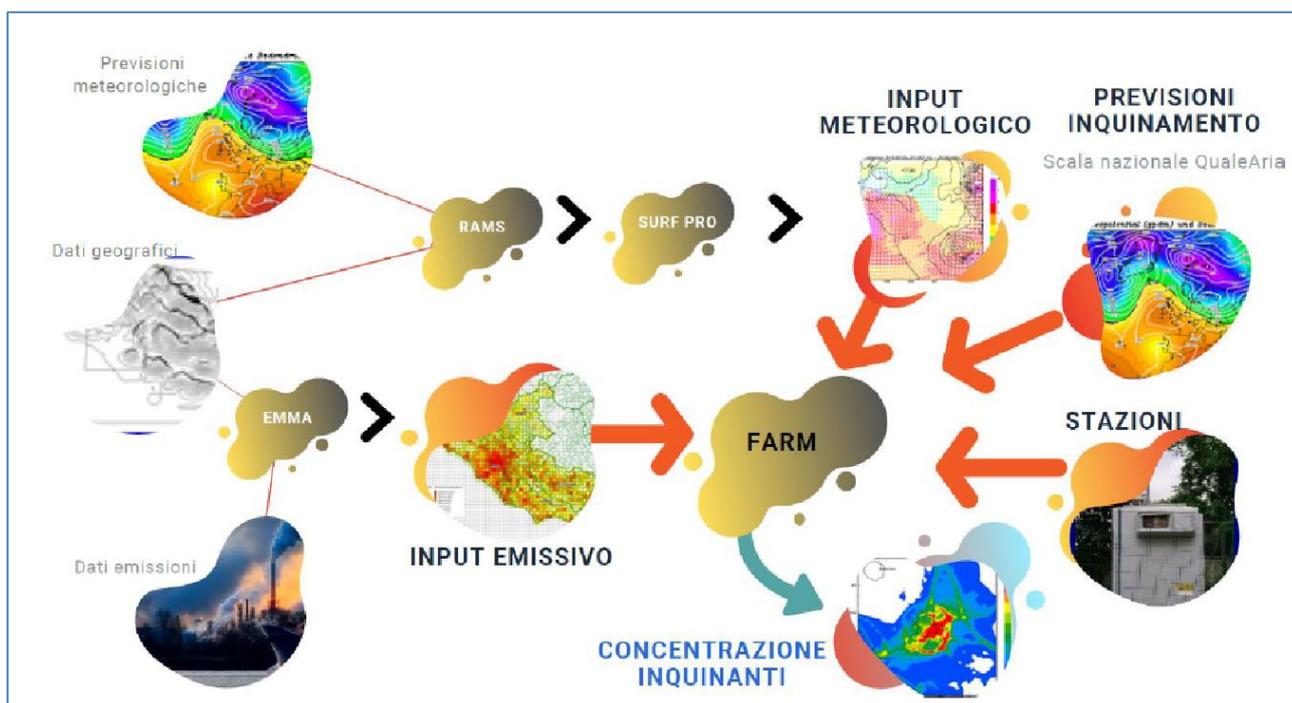


Figura 9: Moduli catena modellistica

Alla luce della rilevanza della meteorologia nella dispersione degli inquinanti e di conseguenza nella determinazione dei livelli di inquinamento, l'ARPA Lazio, a supporto della valutazione e previsione della qualità dell'aria, ha realizzato nel 2012 una rete micro-meteorologica costituita da 8 stazioni con dotazione strumentale avanzata.

Le interazioni della meteorologia con il trasporto, la formazione, le trasformazioni chimiche, la dispersione e la deposizione del PM10 sono molteplici e complesse. L'analisi dei fattori climatici è fondamentale per capire i giorni favorevoli all'accumulo di PM, ossia quei giorni in cui l'indebolirsi della turbolenza nei bassi strati dell'atmosfera determina condizioni di stagnazione.

3 PM10

La definizione di legge per il PM10, di cui nell'introduzione sono state descritte composizione e origine, è puramente fisica: *"il materiale particolato che penetra attraverso un ingresso dimensionale selettivo conforme al metodo di riferimento per il campionamento e la misurazione del PM10 (norma UNI EN 12341), con un'efficienza di penetrazione del 50 per cento per materiale particolato di un diametro aerodinamico di 10 μm ".* La norma fissa due valori limite che la concentrazione del PM10 non deve superare, uno di lungo periodo, sulla media annua, e uno di breve periodo, sulle 24 ore (cfr. tabella 1); di seguito vengono analizzati gli andamenti per entrambe le concentrazioni nel Lazio sia per i valori misurati nelle stazioni che per quelli ottenuti con il modello di dispersione.

3.1 ANDAMENTO DELLA MEDIA ANNUALE

La media annua del PM10 nel periodo 2010-2019 raramente supera nel Lazio il valore limite di 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, evento che si verifica solo in alcune stazioni della provincia di Frosinone.

3.1.1 Misure

Nella figura 10 vengono riportati i valori medi annuali di PM10 per le stazioni presenti nelle diverse zone del Lazio per gli anni dal 2010 al 2019, e con la linea rossa viene indicato il limite (come media annua) secondo il d.lgs.155/2020.

Risulta evidente che l'anno 2015 mostra valori in aumento rispetto agli anni 2013 e 2014. Tale fenomeno è ascrivibile a un episodio di picco di concentrazione registrato nel mese di dicembre 2015 quando, a causa di una combinazione dell'aumento del traffico veicolare tipico del periodo invernale e di fattori climatici avversi (assenza di piogge con relativo aumento della stagnazione nello strato di rimescolamento dell'aria) si sono registrati valori molto elevati di PM10.

Escludendo quest'anno particolare, si nota per l'agglomerato di Roma ma anche per le altre zone del Lazio una diminuzione progressiva delle concentrazioni medie annue.

Per quanto riguarda il valore limite (come media annua) di $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (per gli anni 2010-2019) si nota dalla figura 10 che non sono presenti criticità sia per l'agglomerato di Roma che per le zone litoranea e appenninica, solo la zona della Valle del Sacco presenta dei superamenti di tale limite, che si sono ridotti anno dopo anno fino a non registrare superamenti del limite per l'anno 2019.

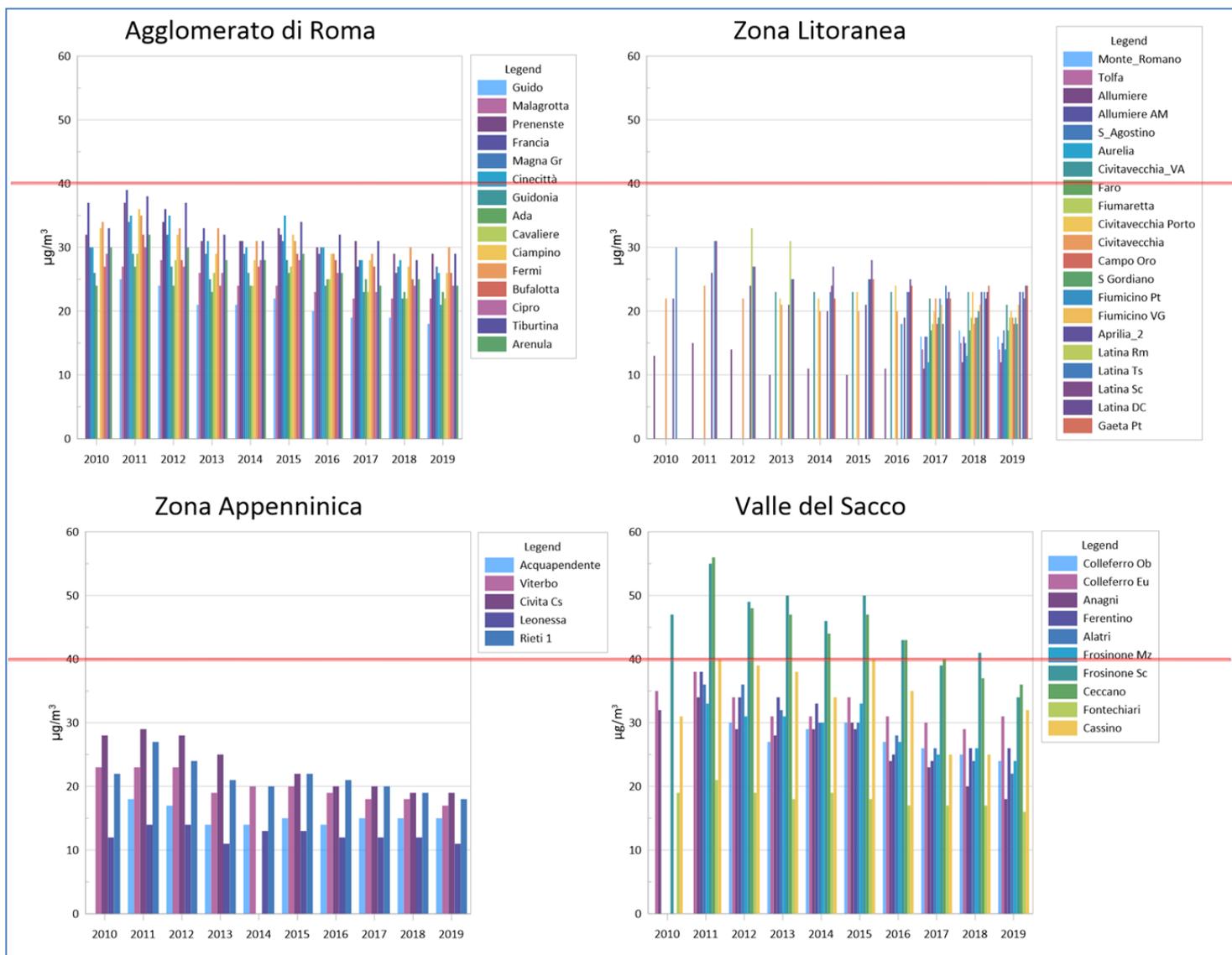


Figura 10: Valore medio di PM10 per le stazioni presenti nelle diverse zone del Lazio per gli anni dal 2010 al 2019, con la linea rossa viene riportato il limite (come media annua) secondo il d.lgs.155/2020

3.1.2 Valutazioni con modello

Di seguito vengono illustrati i risultati delle valutazioni eseguite con il modello di dispersione degli inquinanti (cfr. capitolo 2), a partire dal 2013 fino al 2019.

Sono riportate le mappe delle concentrazioni medie annue di PM10 ottenute sui due domini, Lazio e Roma (figure 11 e 12).

Le mappe del Lazio mostrano come i valori delle concentrazioni di PM10 siano più elevati a Roma e, soprattutto, nella parte centrale della Valle del Sacco.

Sul dominio di Roma si evidenzia un'eterogeneità della distribuzione delle concentrazioni, sempre al di sotto del valore limite, con i valori maggiori presso le arterie stradali a sud ovest ed est dal centro città al Grande Raccordo Anulare.

Analogamente a quanto riscontrato dai dati misurati negli anni, si registra una progressiva diminuzione dei valori delle concentrazioni medie annue con l'eccezione del 2015 che si rivela ancora una volta un anno con meteorologia particolarmente sfavorevole all'inquinamento. La diminuzione è più sensibile su Roma e più marcata ovunque negli ultimi due anni (2018-2019).

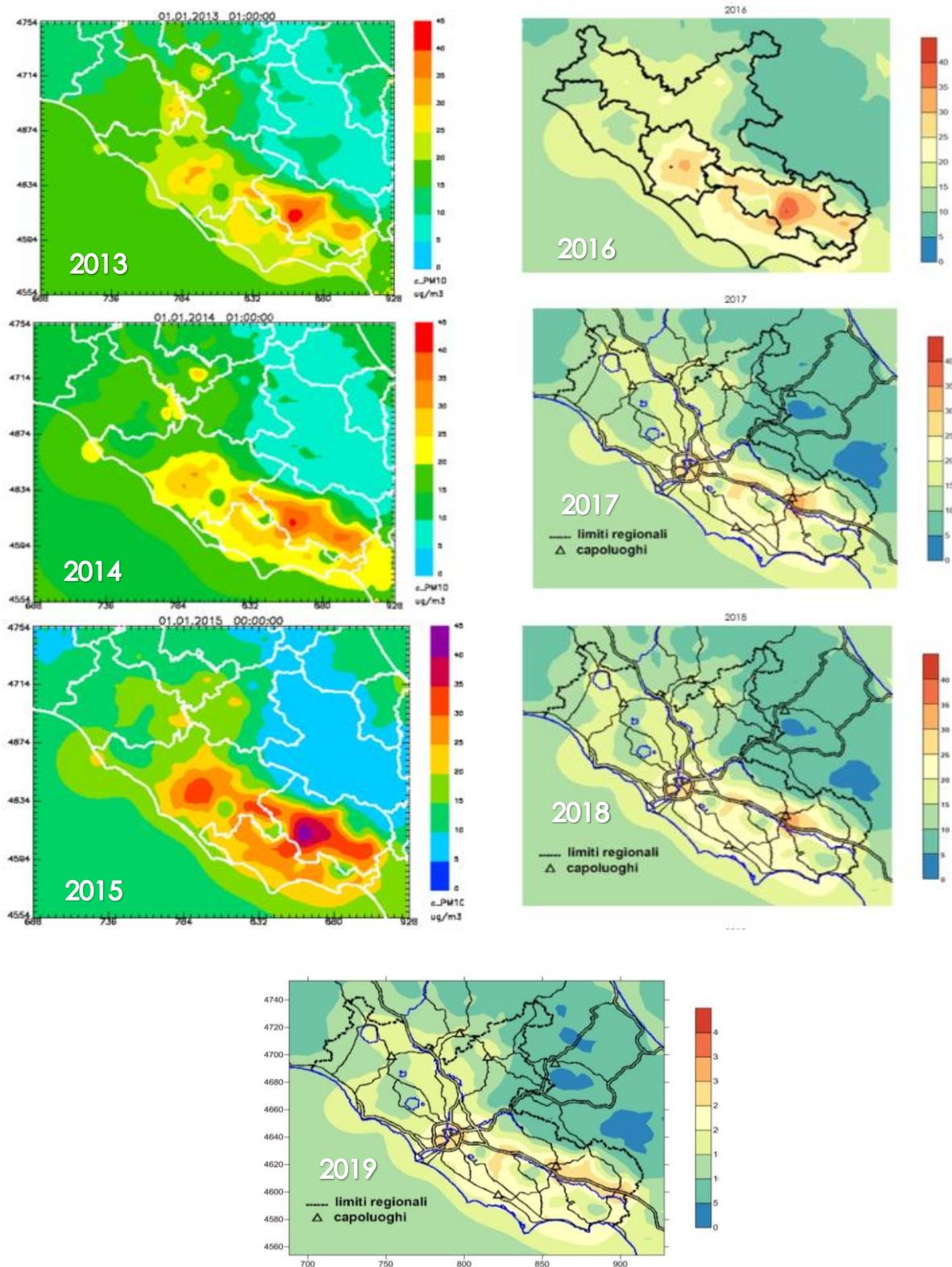


Figura 11: Concentrazioni medie annue PM10 2013-2019

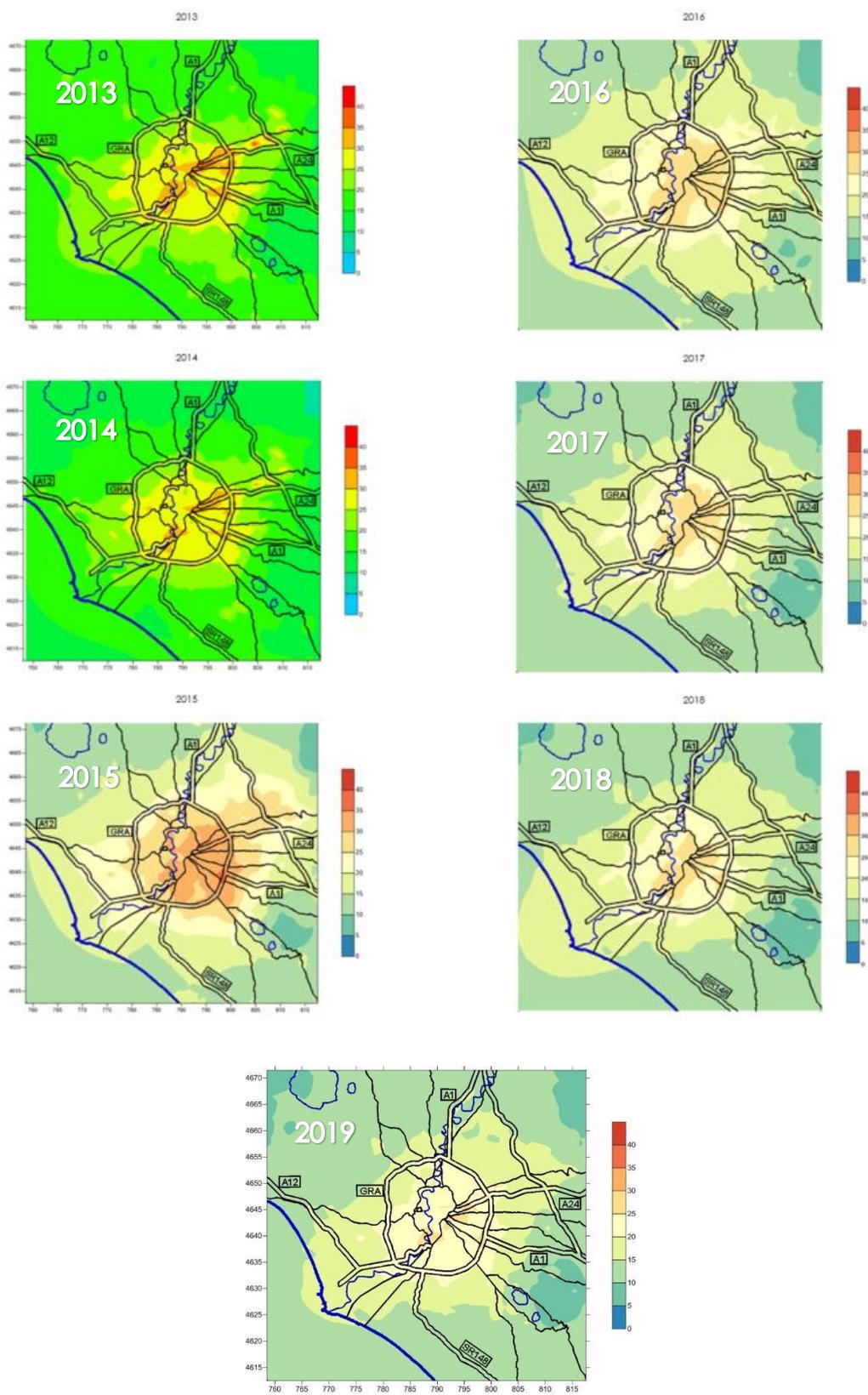


Figura 12: Andamento sul dominio di Roma concentrazioni annue di PM10 2013-2019

3.2 ANDAMENTO DEL VALORE LIMITE GIORNALIERO

Il valore limite giornaliero, tra i due standard di riferimento per il PM10 (media annua e giornaliero), è quello che presenta nel Lazio le maggiori criticità, poiché è indicativo di situazioni di accumulo di breve periodo, che avvengono anche nei territori dove le medie annue presentano valori poco elevati.

3.2.1 Misure

Nella figura 13 si riportano il numero di superamenti del valore giornaliero di 50 µg/m³ di PM10 per le zone del Lazio dal 2010 al 2019, con la linea rossa viene riportato il valore limite annuo di 35 superamenti.

Anche in questo grafico (figura 13), come per le medie annue, si evidenzia per l'anno 2015 un incremento dei superamenti determinato dal mese di dicembre quando si sono registrati numerosi superamenti. Si nota inoltre che per l'agglomerato di Roma negli ultimi tre anni (2017-2019), il valore di 35 superamenti non è mai stato raggiunto né superato, quindi il trend, anche per i superamenti, ha un andamento decrescente. Non si evidenziano criticità per la zona litoranea (l'ultimo superamento si è registrato a Latina Romagnoli nel 2012), né per la zona appenninica, mentre rimane ancora critico il numero di superamenti nella Valle del Sacco, dove comunque si evidenzia un andamento decrescente. Dal 2010 al 2015, infatti, i superamenti giornalieri in alcune stazioni hanno superato i 100 giorni, mentre dal 2016 in poi i superamenti giornalieri sono scesi fino a circa 80 (numero di superamenti giornalieri comunque ampiamente superiore rispetto al valore limite di 35).

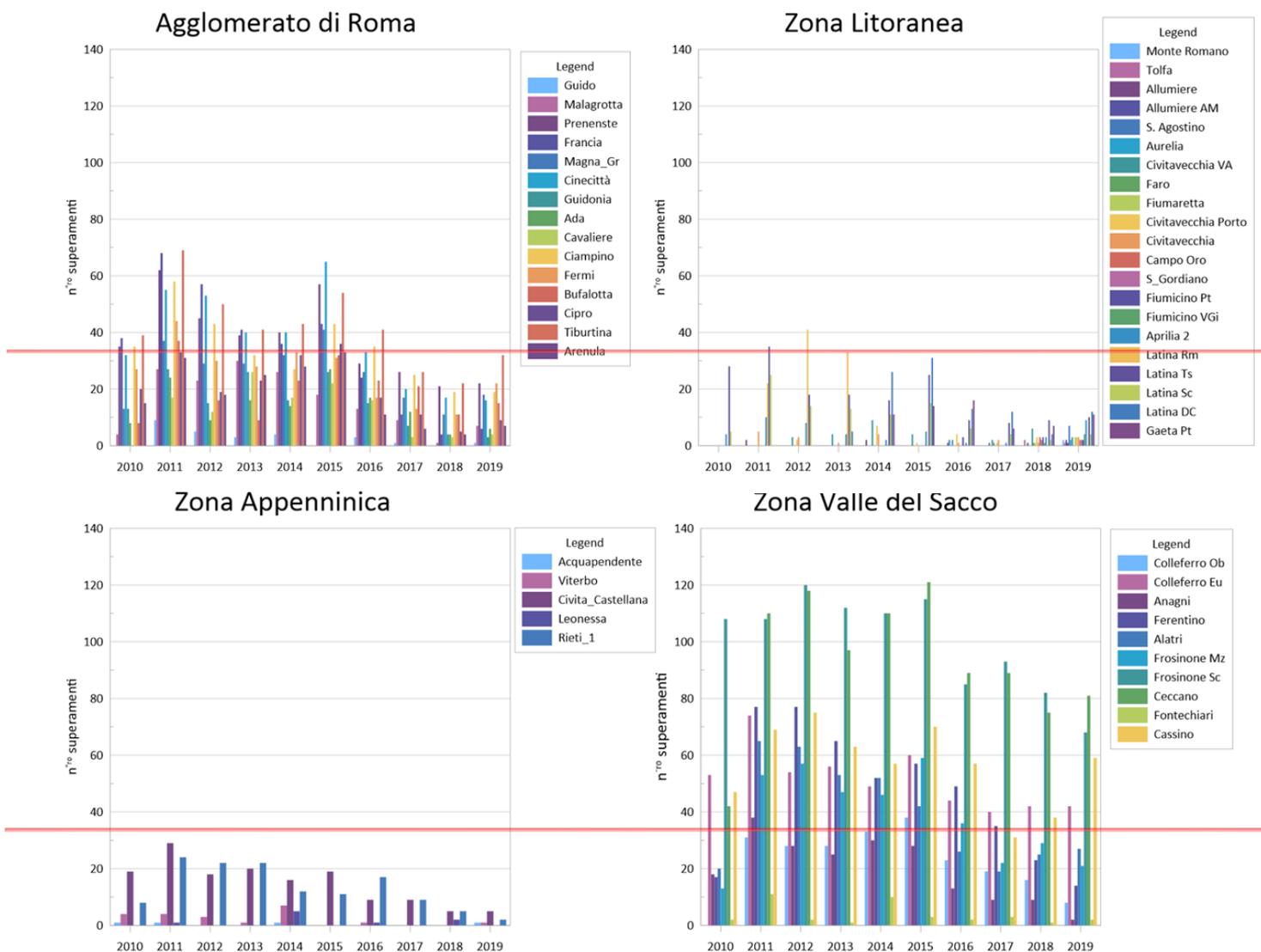


Figura 13: Numero di superamenti del valore giornaliero di $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per la media giornaliera di PM10 per le zone del Lazio dal 2010 al 2019, con la linea rossa viene riportato il valore limite annuo di 35 superamenti

3.2.2 Analisi statistica meteo

A partire dai dati disponibili per le stazioni di Frosinone e Roma-Boncompagni della rete micrometeorologica dell'ARPA Lazio, è stata effettuata un'analisi statistica dei valori registrati per la velocità del vento e la precipitazione in corrispondenza delle giornate di superamento delle stazioni di misura della qualità dell'aria più prossime. Per l'area di Frosinone sono state considerate le stazioni della qualità dell'aria di Frosinone Mazzini e Frosinone Scalo, per l'area limitrofa a Roma-Boncompagni le stazioni di Magna Grecia, Villa Ada e Arenula.

Le stazioni micrometeorologiche di Frosinone e Roma-Boncompagni sono state selezionate perché si trovano nelle due aree della regione che presentano le maggiori criticità per il PM10.

L'analisi non è un confronto tra i valori meteorologici delle due stazioni, che presentano caratteristiche differenti. Dal punto di vista territoriale quella di Frosinone si trova nell'aeroporto, l'altra in pieno centro urbano a Roma, e, soprattutto per il vento, si ha una differenza di quota delle stazioni: Boncompagni è sul lastrico solare di un edificio, Frosinone si trova al suolo.

Il periodo analizzato è quello tra il 2013 e il 2019, in cui erano disponibili i dati delle stazioni micrometeorologiche a cadenza bioraria. A partire da questi sono stati ricavati i valori medi giornalieri della velocità del vento e della precipitazione per tutto il periodo. Da questi sono state calcolate le medie giornaliere per la velocità del vento e la precipitazione cumulata giornaliera.

Di seguito sono rappresentati gli istogrammi per la precipitazione cumulata giornaliera e la velocità del vento, che mostrano la distribuzione dei valori ottenuti sull'intero periodo, nei soli giorni invernali e nei giorni in cui in una stazione di riferimento di qualità dell'aria è stato registrato un superamento.

Le barre degli istogrammi rappresentano il numero di giorni in cui il parametro rappresentato ha assunto un valore maggiore del limite inferiore (numero a sinistra della barra) e minore o uguale al limite superiore (numero di destra). Ad esempio, nella figura 16, il primo istogramma in alto a sinistra ci dice che nell'intero periodo analizzato nella stazione micrometeo di Frosinone sono 50 i giorni in cui la velocità media del vento è stata tra 0,61 e 0,7 m/s.

Riguardo le precipitazioni in entrambe le postazioni (colonna a sinistra di figura 14 e figura 15) la distribuzione su tutto il periodo e in inverno è molto simile. Le distribuzioni nei soli giorni di superamento (colonna a destra di figura 15 e figura 16) mostrano come per entrambe le si supera per lo più nei giorni non piovosi ($\text{mm/g} < 1$), ma gli episodi di superamento nei giorni di pioggia avvengono nei dintorni di Boncompagni per intensità minori e più raramente che a Frosinone, dove alcuni superi avvengono anche quando sono presenti piogge intense (sopra ai 20 mm/g).

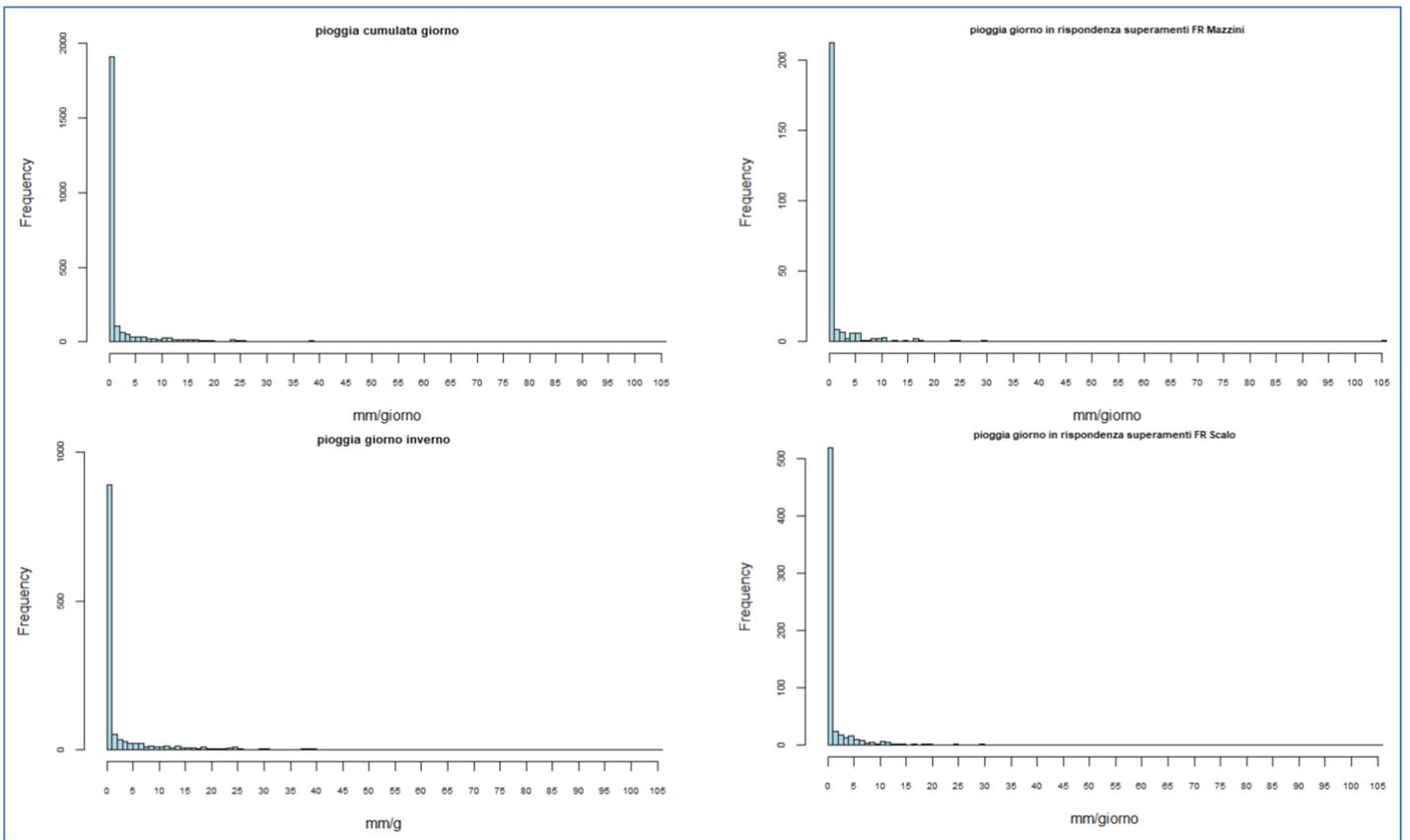


Figura 14: Istogrammi pioggia Frosinone 2013-2019

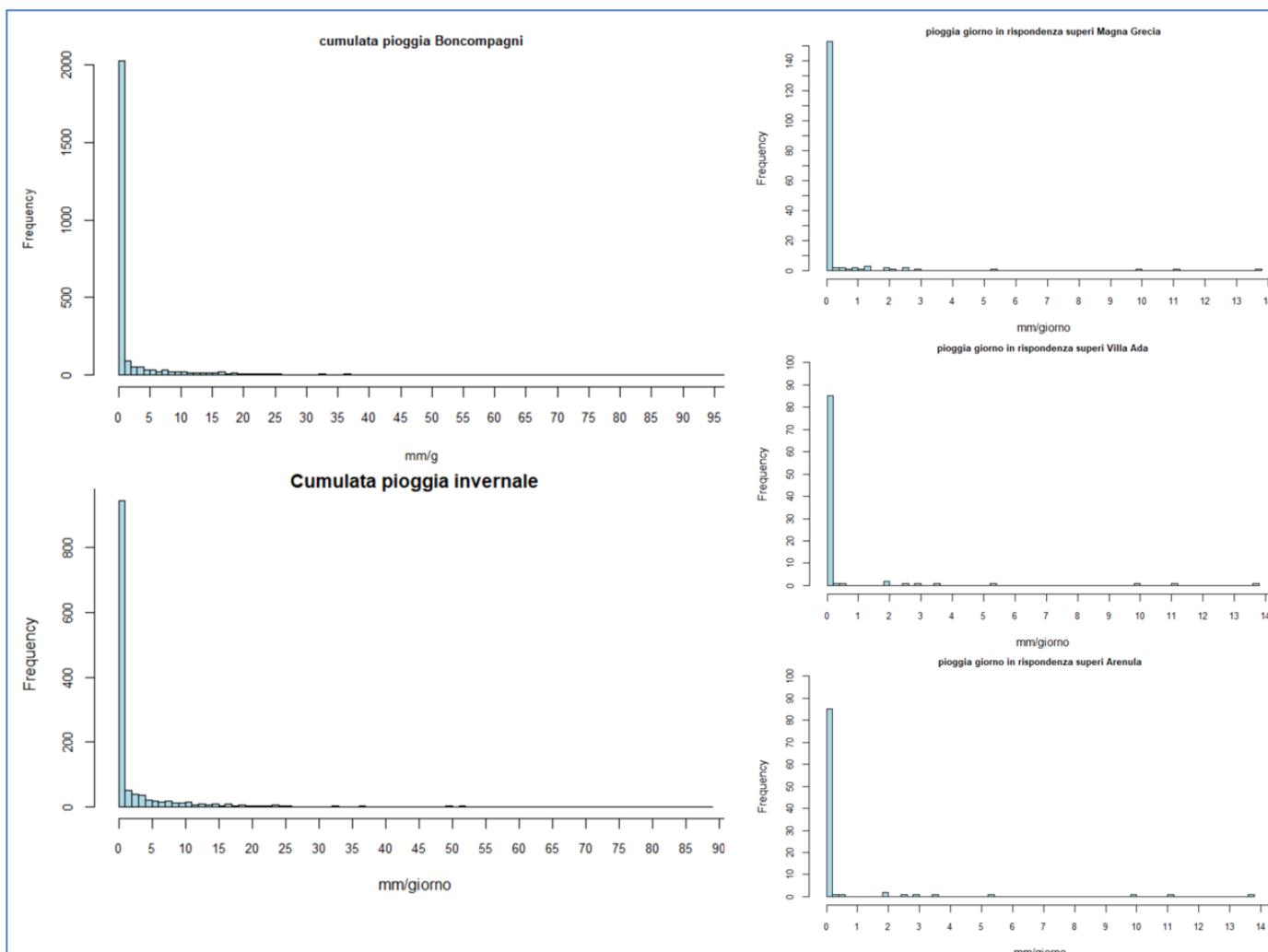


Figura 15: Istogrammi pioggia Roma-Boncompagni 2013-2019

In entrambe le postazioni, considerare solamente i dati invernali sposta la distribuzione delle velocità medie giornaliere del vento a valori più bassi (figura 16 e figura 17 colonna sinistra), visto che i venti più intensi si registrano in estate.

Analizzando le distribuzioni relative alle giornate di superamento (figura 17 e figura 18 colonna destra), nelle stazioni attorno a Roma-Boncompagni la classe di velocità media giornaliera più popolata è quella pari a 1m/s mentre a Frosinone è quella degli 0.8 m/s, anche se ciò è dovuto anche alla differenza di quota delle due stazioni meteo.

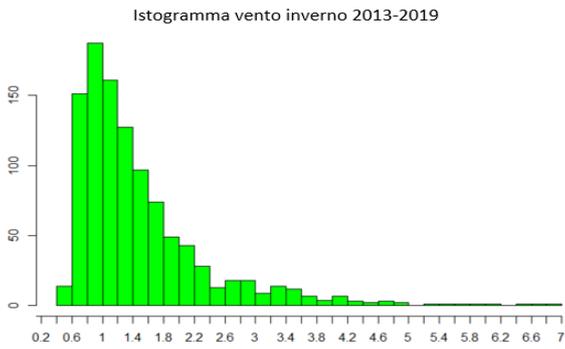
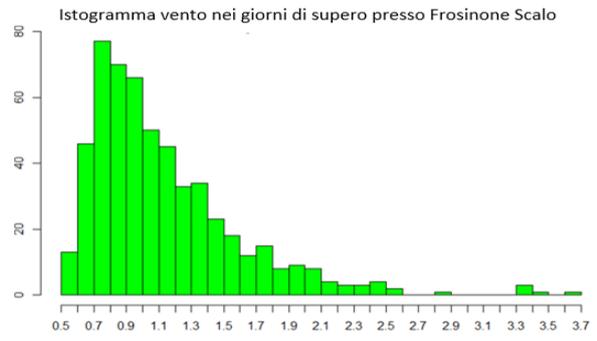
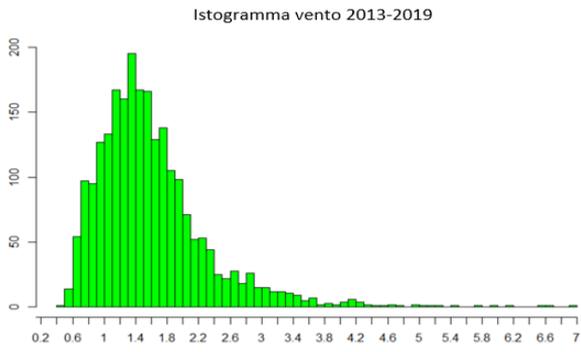


Figura 16: Istogrammi vento Frosinone

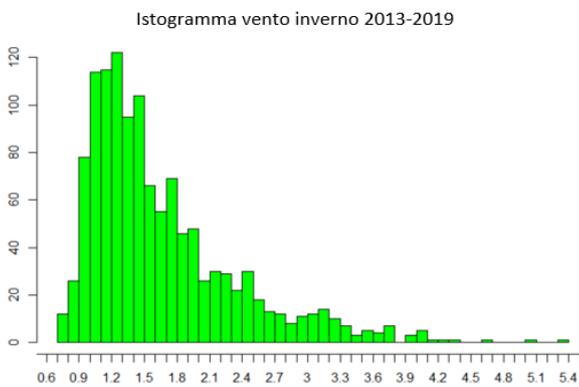
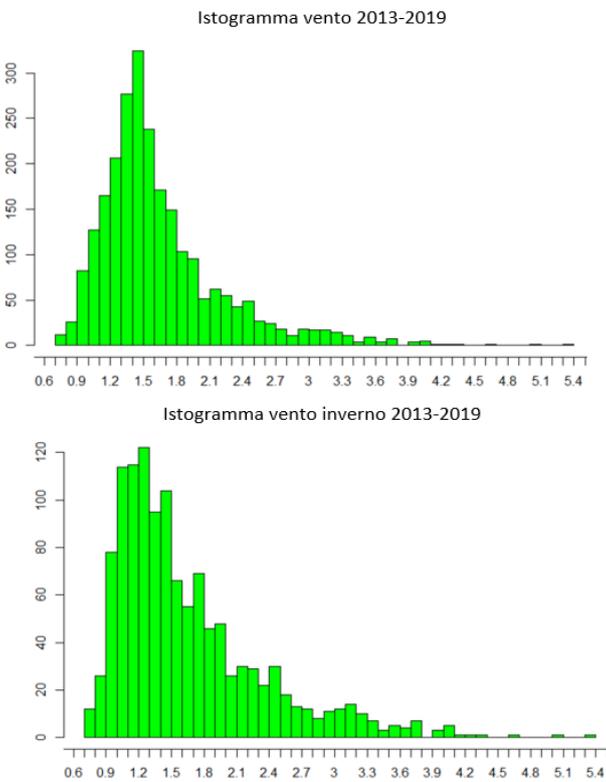


Figura 17: Istogrammi vento Roma-Boncompagni

Per le velocità medie giornaliere del vento registrate nelle due stazioni micrometeorologiche in rispondenza dei giorni di superamento per la media giornaliera del PM10 sulle stazioni limitrofe, sono state costruite le distribuzioni cumulate riportate in figura 18. Fissando un valore per la velocità media giornaliera del vento sull'asse x, la barra indica la percentuale di giorni con velocità media inferiore a tale valore in cui la stazione di monitoraggio ha registrato un superamento del VL giornaliero di PM10.

Analizzando le distribuzioni cumulate in figura 18 si vede come per le stazioni limitrofe a Roma-Boncompagni l'andamento sia simile, le distribuzioni presentano il medesimo intervallo di valori possibili e si arriva al 60% delle occorrenze alla velocità di 1.1 m/s, mentre a Frosinone la stazione Scalo ha un intervallo di valori possibili più ampio e per arrivare al 60% delle occorrenze si deve raggiungere 1.3 m/s. Tra tutte le stazioni considerate, Frosinone Scalo è quella che presenta il maggior numero di superamenti.

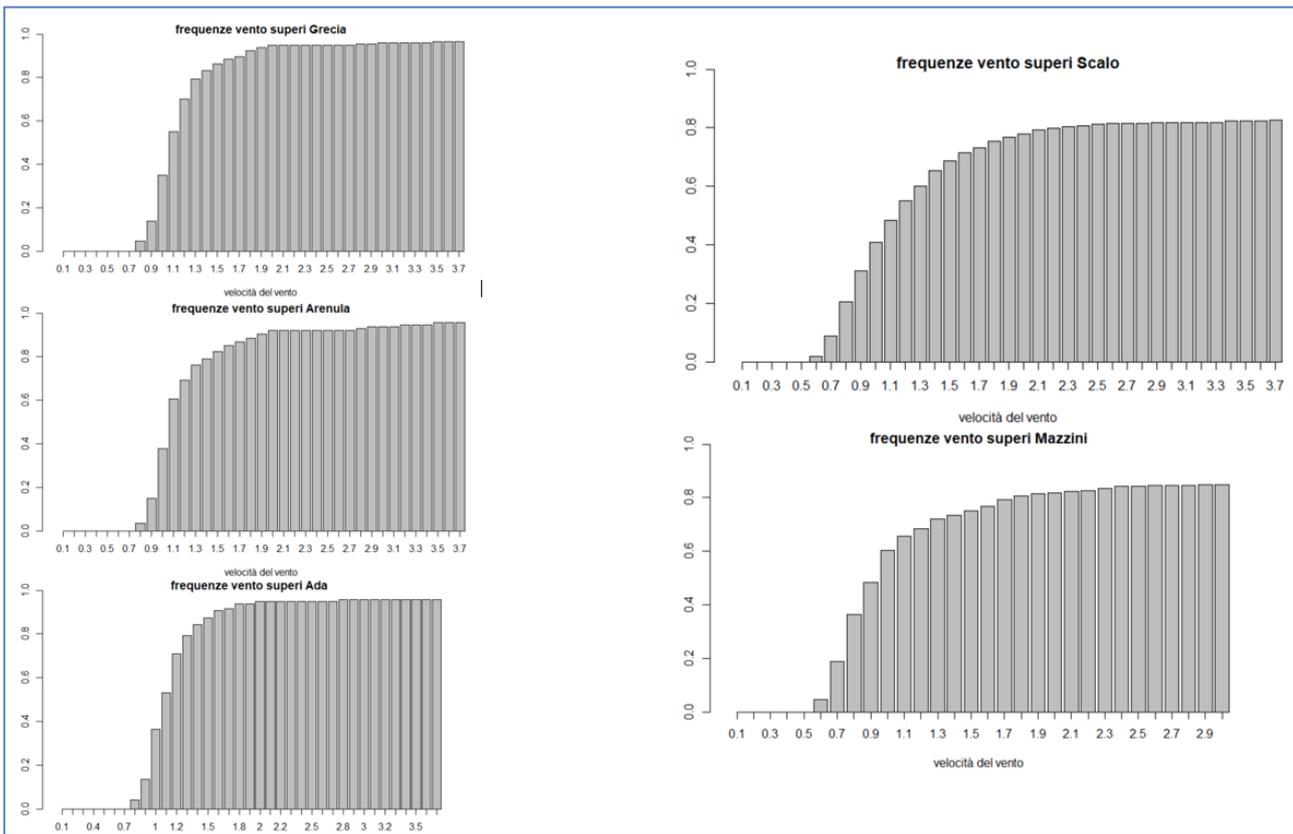


Figura 18: Distribuzione cumulata delle velocità medie giornaliere del vento registrate a Roma-Boncompagni (sn) e Frosinone (dx) del valore limite giornaliero di PM10 delle stazioni limitrofe nei giorni di superamento della qualità dell'aria

3.2.3 Mappe da modello

Di seguito vengono illustrati i risultati delle valutazioni eseguite con il modello di dispersione degli inquinanti (cfr. capitolo 2), a partire dal 2013 fino al 2019.

Vengono presentate le mappe del numero di superamenti del valore limite giornaliero di PM10 ottenute sui due domini, Lazio e Roma, tra il 2013 e il 2019.

Nel 2019 le medie annuali di PM10 sono inferiori ai limiti di legge in tutte le zone, a eccezione della Valle del Sacco. Analizzando le mappe del Lazio si vede come l'area di superamento maggiore sia localizzata nella Valle del Sacco e come, invece, negli anni a Roma i valori siano progressivamente rientrati nel limite di legge. L'area di superamento negli anni si è ridotta di dimensioni con l'eccezione del 2015 che, anche per i superamenti del valore limite giornaliero, si mostra in controtendenza.

A Roma i valori scendono al di sotto del limite a partire dal 2016 e le zone più interessate dai superamenti sono quelle centrali fino al Grande Raccordo Anulare e in corrispondenza delle maggiori arterie di traffico.

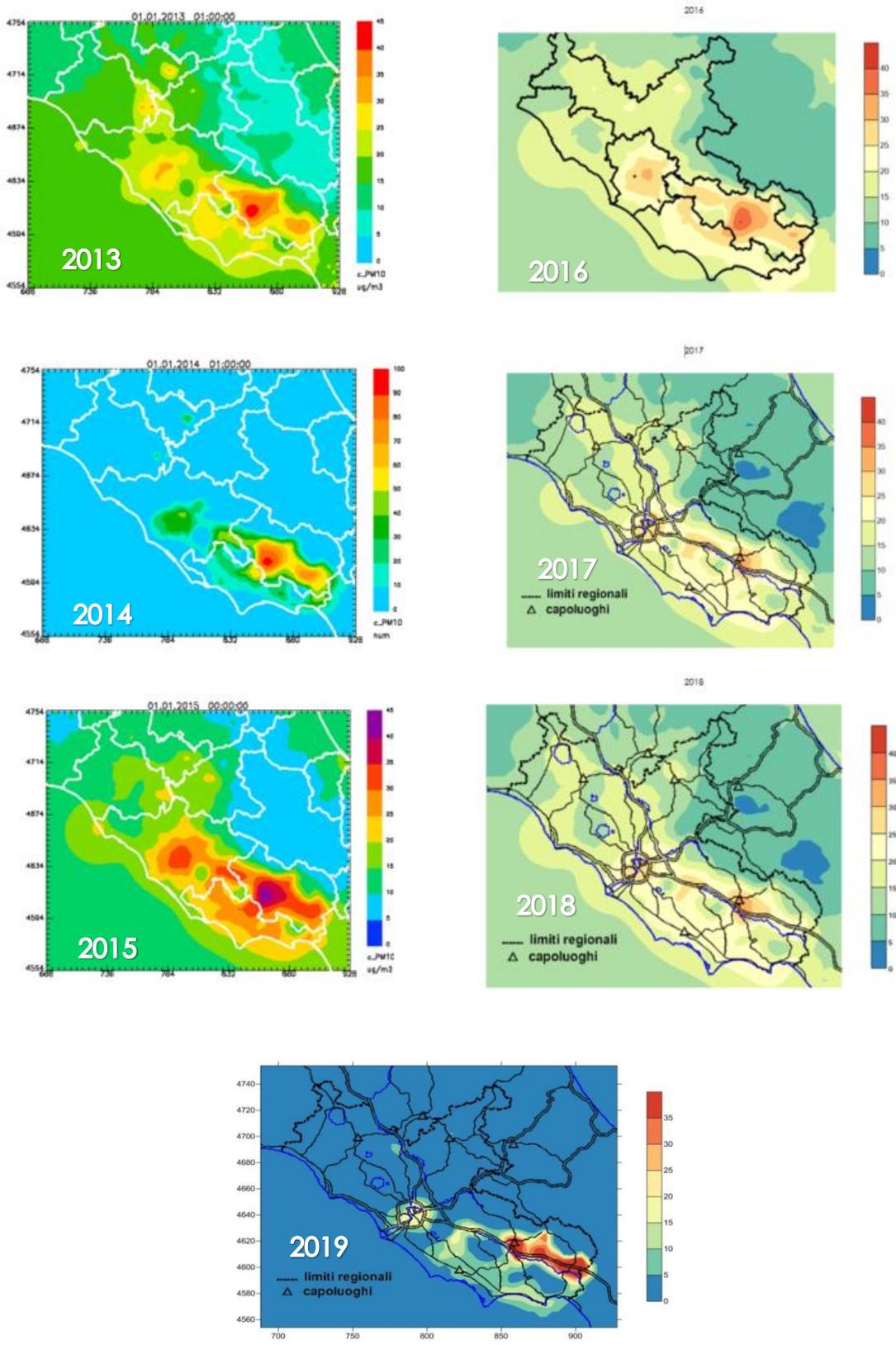


Figura 19: Superamenti del VL giornaliero nella Regione Lazio PM10 2013-2019

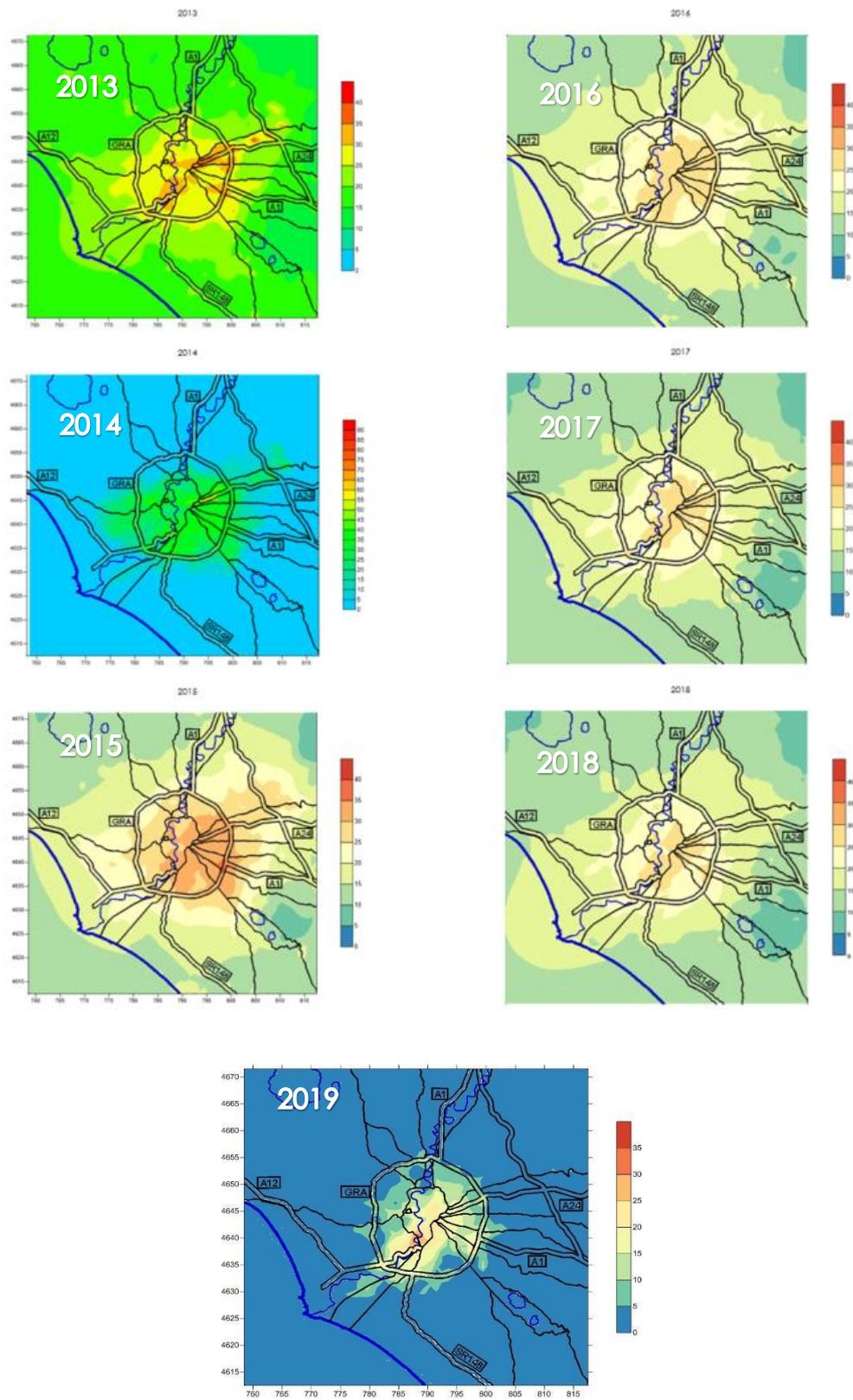


Figura 20: Superamenti del VL giornaliero dominio di Roma PM10 2013-2019

3.3 ANDAMENTI STAGIONALI

Il particolato atmosferico presenta andamenti stagionali tipici, con concentrazioni significativamente più alte nei periodi freddi. Rapidi aumenti di concentrazione si verificano generalmente tra ottobre e dicembre, mentre le concentrazioni diminuiscono tra marzo e aprile. Questi andamenti stagionali sono stati rilevati in tutte le stazioni di monitoraggio della regione (figura 21) e sono attribuibili principalmente alle condizioni meteorologiche, all'accensione degli impianti di riscaldamento residenziale e alle attività agricole stagionali che si svolgono sul territorio. L'accensione degli impianti è regolata dalla legge che prevede la classificazione del territorio in sei diverse zone climatiche, distinte dalle lettere A-F (dove A indica i comuni più caldi e F quelli più freddi). A seconda della zona climatica la normativa definisce il periodo durante il quale è possibile utilizzare gli impianti di riscaldamento. Ad esempio per Roma (inserita nella fascia climatica D, quindi zona mediamente fredda) il periodo di accensione è dal 1 novembre al 15 aprile.



Figura 21: Media mensile del PM10 nell'intervallo temporale 2010-2019. L'analisi è stata condotta su una stazione rappresentativa per ogni zona

Analizzando il numero dei giorni di superamento del valore limite giornaliero si osserva che essi si verificano principalmente nei mesi invernali, annullandosi o quasi nei mesi centrali dell'anno (figura 22). Particolarmente critici sono i mesi di dicembre e gennaio, mesi durante i quali vengono adottati dalle amministrazioni comunali i provvedimenti emergenziali, come il blocco di circolazione dei veicoli più inquinanti, per limitare l'esposizione dei cittadini all'inquinamento.

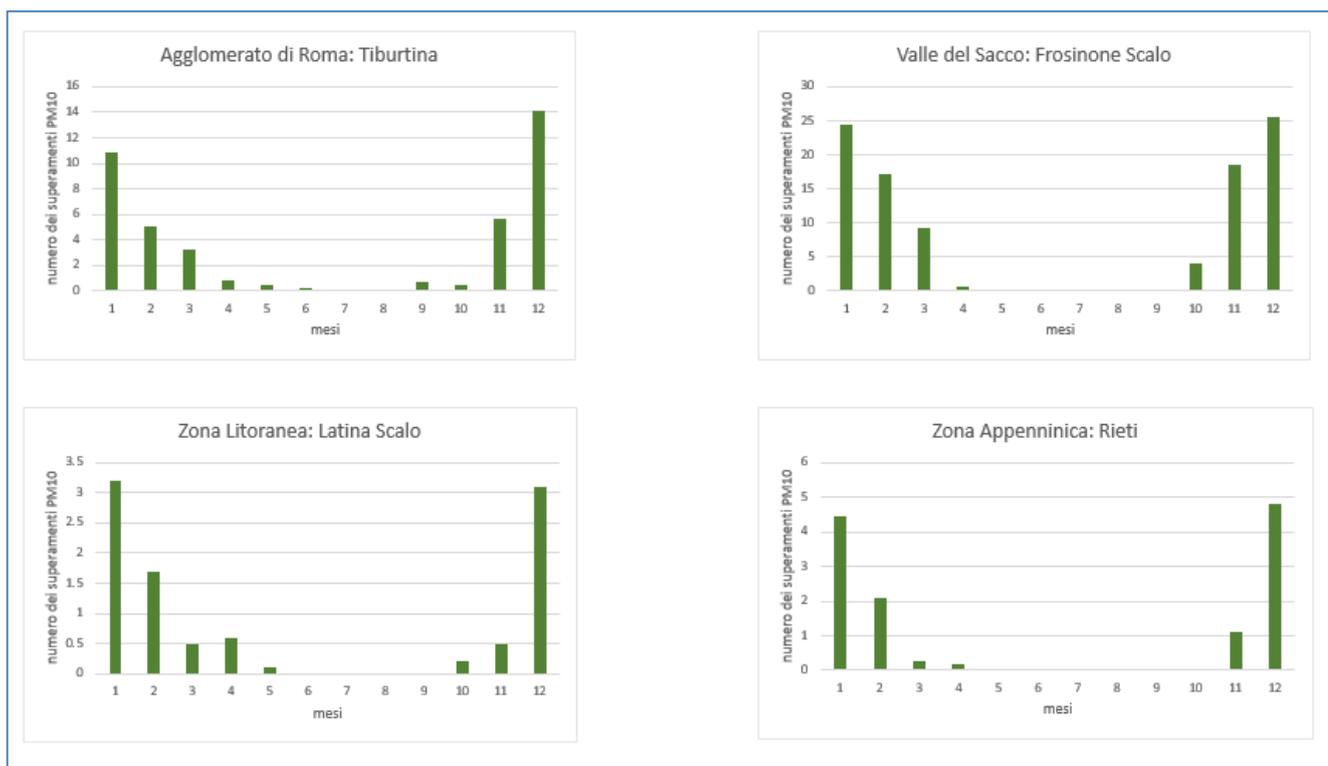


Figura 22: Giorni di superamento di PM10 per una stazione rappresentativa di ogni zona

3.4 INFLUENZA DEL SAHARA

Nelle regioni mediterranee non è raro che si presentino episodi di intrusioni di polveri naturali provenienti dal Sahara. Il particolato si solleva dal deserto a seguito di correnti ascensionali e arriva in Europa trasportato dal vento, investendo maggiormente le aree più a sud d'Europa. La comunità europea ha stilato nel 2011 una linea guida [7] per il riconoscimento degli episodi di avvezione sahariana e la stima degli aumenti di concentrazione del PM10 a essi imputabili.

L'ARPA Lazio ha collaborato con l'ISAC-CNR a un progetto LIFE svoltosi dal 2011 al 2015, denominato DIAPASON (Desert-dust Impact on Air quality through model-Predictions and Advanced Sensors ObservatioNs) [8], il cui scopo era quello di definire una metodologia alternativa a quella delle linee guida, speditiva e oggettiva, per l'individuazione degli eventi sahariani (Dust Days) e la quantificazione del loro impatto sulle concentrazioni di PM10, utilizzando i modelli di trasporto a lunga distanza.

Si riporta di seguito l'analisi eseguita con la metodologia Diapason sugli eventi di avvezione verificatisi nel periodo 2012-2019.

Il numero medio di eventi annui di avvezione di polvere desertica, riportato in figura 23 per le diverse stazioni di misura, varia tra 21 e 27, con una certa continuità spaziale: un numero di eventi minore sulla costa e maggiore nell'entroterra. L'anno con il maggior numero di avvezioni di polveri dal Sahara è stato il 2018, con molte stazioni dove si sono registrati più di 30 episodi, quello con il minor numero il 2017.

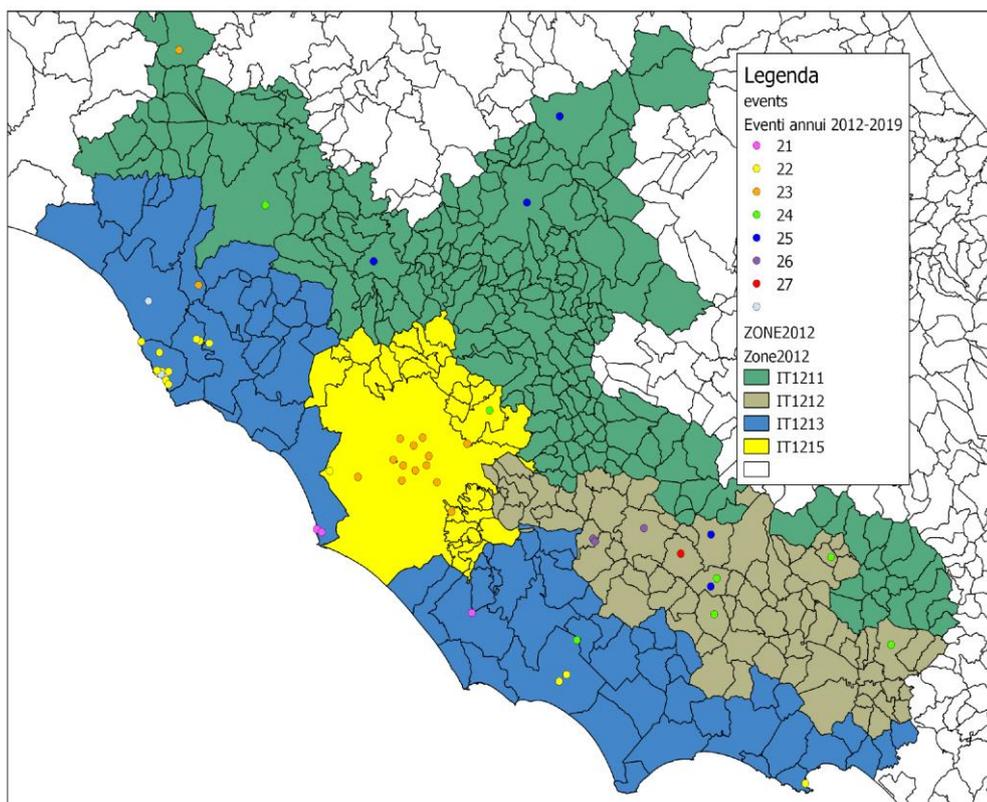


Figura 23: Numero medio di eventi di avvezione 2012-2019

La durata media di un evento di avvezione è, indipendentemente dall'area geografica, di tre giorni, sebbene negli anni ci siano stati anche episodi di durata superiore ai 10 giorni. In figura 24 viene riportato, per ogni stazione dove sono disponibili otto anni di dati (le altre son segnate in grigio), il numero medio di giorni di *dust* riscontrati. La distribuzione è molto simile a quella registrata per il numero di eventi.

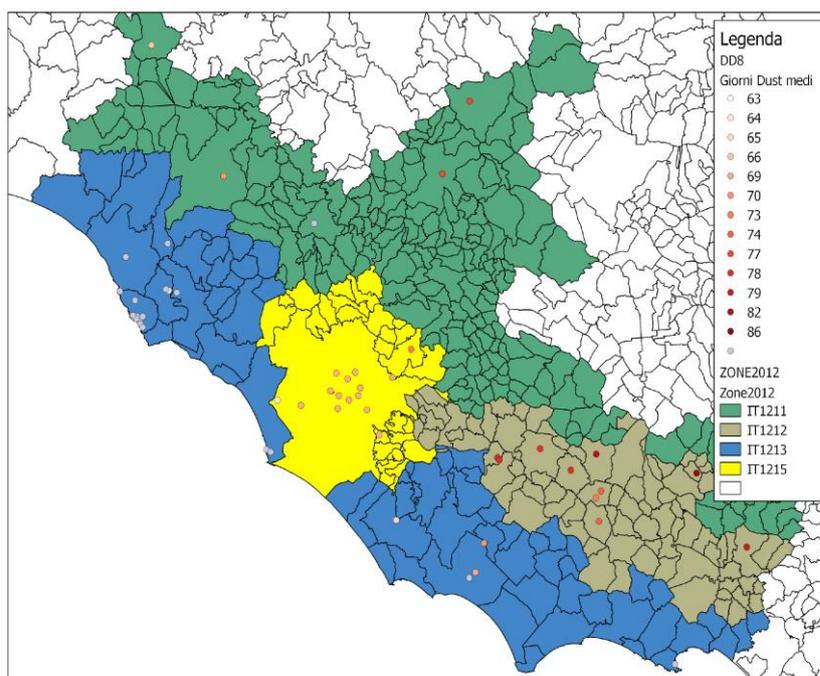


Figura 24: Numero di giorni di avvezione medi tra 2012-2019

La metodologia Diapason permette anche di ottenere le stime del contributo del *dust* sahariano alle concentrazioni giornaliere e annue di PM10; i risultati dell'analisi per gli anni 2012-2019 vengono riportati nelle figure seguenti, suddivisi per zone, per ogni stazione.

In figura 25 sono riportate le medie annue di PM10 con in rosso il contributo legato alle avvezioni dal Sahara per agglomerato di Roma, Valle del Sacco, appenninica e litoranea (sud e nord).

Il contributo medio per zona in questi otto anni varia tra $1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in litoranea e $1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in Valle del Sacco. In ognuna delle zone il minimo contributo del *dust* sahariano alla media annua è riscontrato nel 2013 ($0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in Valle del Sacco a fronte di $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per il resto della regione), mentre il massimo si registra nel 2014 ($3.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in Valle del Sacco, $2.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in litoranea, $2.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in appenninica, $2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nell'agglomerato).

In figura 26 sono riportati il numero di superi annui per le stazioni, con in rosso quelli misurati durante le avvezioni sahariane, suddivisi per zone: agglomerato di Roma, Valle del Sacco, appenninica e litoranea (sud e nord).

Le stazioni non registrano per tutti gli anni in studio dei superamenti nelle giornate di avvezione dal Sahara: in zona appenninica non se ne registrano né nel 2013 né nel 2015. Il 2013 è l'anno con meno superi *dust* per le

zone litoranea e agglomerato di Roma, mentre la Valle del Sacco ha il minimo nel 2015, che conta comunque pochi superi in tutte le zone. Il massimo dei superi per avvezione si registra nel 2014 nelle zone più interne, Valle del Sacco e appenninica, e nel 2019 nell'agglomerato e in zona litoranea. Il numero medio di superi per zona cresce da nord a sud con il minimo in appenninica (meno di 1 superamento dust/anno) e il massimo in Valle del Sacco (3.8 superi/anno), crescendo dalla litoranea nord (1.2 superi/anno) alla parte sud (2.5 superi/anno) e nell'agglomerato (2.8 superi/anno).



Figura 25: Medie annue di PM10, in rosso quelle dovute alle avvezioni sahariane



Figura 26: Superi del VL giornaliero di PM10, in rosso quelli durante avvezioni

4 PM2.5

La normativa definisce il PM_{2,5} come: *“il materiale particolato che penetra attraverso un ingresso dimensionale selettivo conforme al metodo di riferimento per il campionamento e la misurazione del PM_{2,5} (norma UNI EN 14907), con un'efficienza di penetrazione del 50 per cento per materiale particolato di un diametro aerodinamico di 2,5 µm”*. Il d.lgs. 155/2010 prevede per il PM_{2,5} dal 2015 un solo limite di legge relativo alla media annuale e fissato a 25 µg/m³ (la normativa prevede che dal 01/01/2020 il limite normativo venga rivalutato e stabilito con successivo decreto ai sensi dell'articolo 22, comma 6. Il nuovo decreto non è stato ancora emanato).

Non si evidenziano criticità nell'agglomerato di Roma (dove si è registrato un solo superamento del valore medio annuo nel 2011 per la stazione di Corso Francia, prima dell'entrata in vigore del limite stabilito dalla legge), né per la zona litoranea e appenninica. Per quanto riguarda la Valle del Sacco invece si evidenziano superamenti del valore medio per gli anni 2015 e 2016 (sono presenti dei superamenti anche negli anni dal 2010 al 2014 quando non era ancora entrato in vigore il limite) con superamento del valore medio delle stazioni di monitoraggio di Cassino e Frosinone Mazzini per il 2015, e solo per la stazione di monitoraggio di Cassino per il 2016. Dal 2017 le concentrazioni medie annue sono risultate sempre inferiori al limite di legge (figura 27).

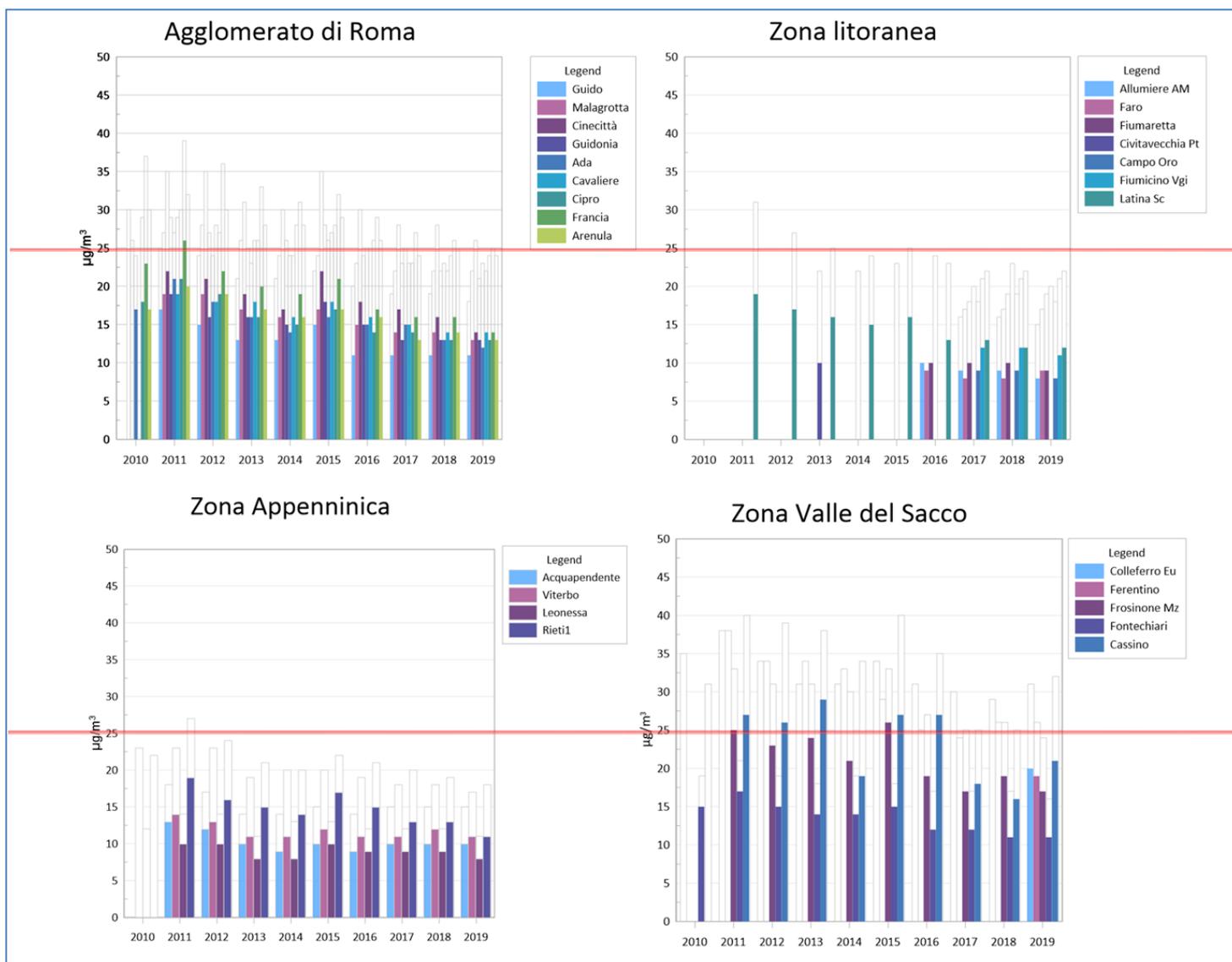


Figura 27: Valore medie annue di PM2.5 per le zone del Lazio per gli anni dal 2010 al 2019, a confronto con le medie annue di PM10 per ogni stazione (istogramma bianco), con la linea rossa viene riportato il limite (come media annua) secondo il d.lgs.155/2020

In figura **28** si riportano i differenti apporti di PM10-PM2.5 e PM2.5 nelle differenti zone del Lazio, si nota che il rapporto PM2.5/PM10 è più alto nella Zona Valle del Sacco ($\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10} = 0.719$), segue la zona appenninica ($\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10} = 0.673$), dopo l'agglomerato di Roma ($\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10} = 0.617$) e infine la zona litoranea ($\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10} = 0.548$).

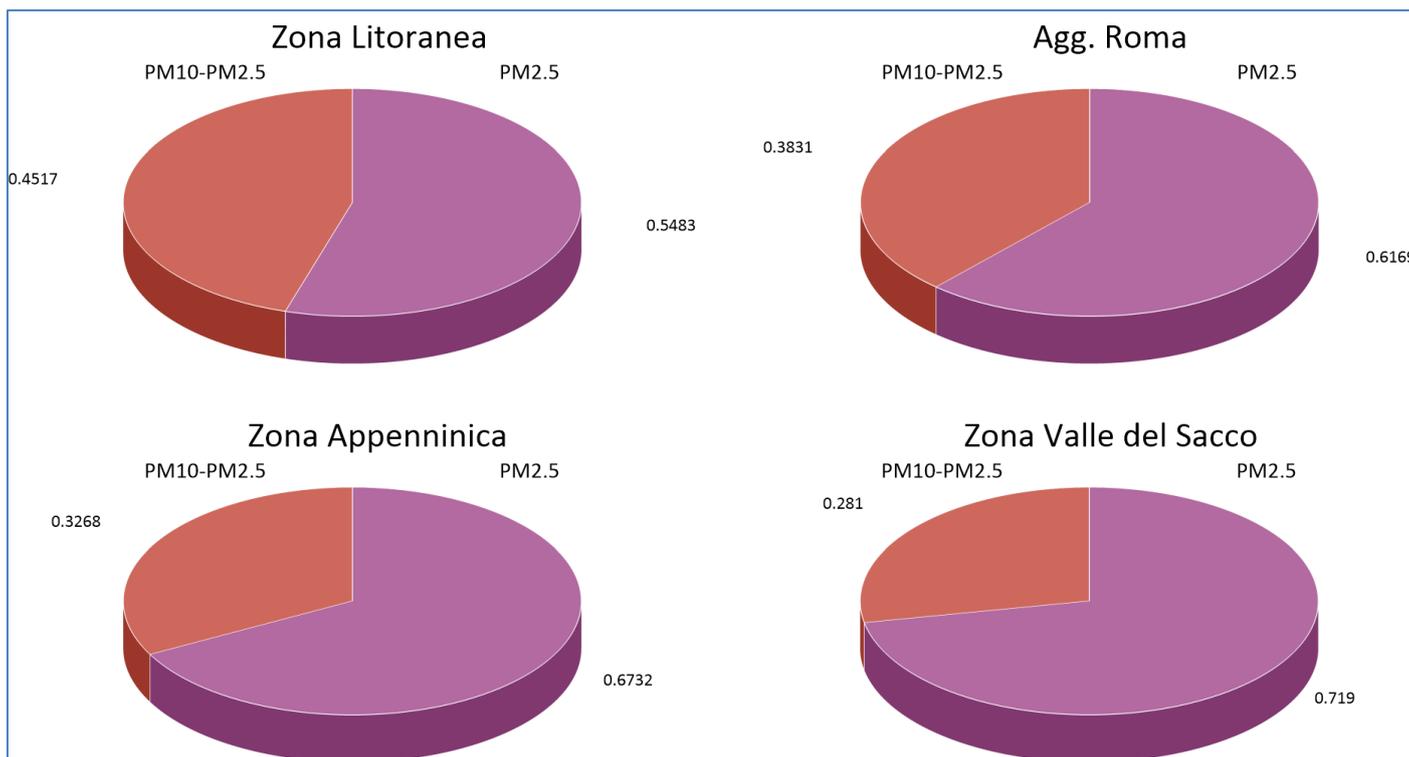


Figura 28: Rapporto tra PM10-PM2.5 e PM2.5 nelle zone del Lazio

5 STUDIO DEI COMPONENTI DEL PM10

Il particolato atmosferico è costituito principalmente da ioni inorganici (solfati, nitriti, ammonio, sodio, cloruri), da una componente carboniosa (comprendente il Carbonio Organico OC, il Carbonio Elementare EC e gli Idrocarburi Policiclici Aromatici) e da materiali della crosta terrestre. Il PM contiene inoltre numerosi metalli in tracce.

5.1 IPA

Tra i composti organici gli Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA), data la loro comprovata tossicità, sono oggetto di particolare studio. Gli IPA sono un'ampia classe di molecole costituite da due o più anelli benzenici uniti fra loro attraverso coppie di atomi di carbonio condivisi fra anelli adiacenti. La loro presenza nell'ambiente può essere legata sia a fonti antropiche che naturali. La maggior parte degli IPA presenti nell'ambiente ha origine da attività antropiche, principalmente rappresentate da quelle industriali legate alla combustione di combustibili fossili, dagli impianti di produzione dell'energia, dall'impiego e dalla lavorazione di asfalti, dalla pirolisi di plastiche e dal traffico veicolare.

Le aree urbane, dove sono presenti elevati livelli di traffico veicolare, sono caratterizzate dalla presenza di IPA. Le emissioni di queste sostanze da parte delle autovetture aumenta con il chilometraggio e il deterioramento del motore. Inoltre i veicoli alimentati con diesel determinano emissioni di IPA nel particolato più alte rispetto ai veicoli alimentati a benzina. Esistono oltre mille diversi IPA, con differenti caratteristiche chimiche e tossicologiche.

L'IARC ha classificato 48 IPA in funzione della loro capacità di fungere da induttori tumorali e ha collocato il Benzo[a]pirene (BaP) nelle classe 1 (cancerogeno per l'uomo) [9].

Il Benzo[a]pirene, vista la sua comprovata tossicità, viene preso come sostanza di riferimento per valutare la concentrazione di IPA nell'aria. Il valore obiettivo del BaP per la protezione della salute umana e dell'ambiente è $1,0 \text{ ng/m}^3$ (concentrazione presente nel PM10, calcolato come media su un anno civile). Tale composto (misurato sui filtri di particolato atmosferico, PM10) viene misurato in quattro stazioni

nell'agglomerato di Roma (Cinecittà, Francia, Villa Ada, Ciampino e Guidonia fino al 2017), in tre stazioni della Zona Valle del Sacco (Colleferro Europa, Frosinone Scalo, Fontechiari), due della zona appenninica (Rieti e Leonessa) e due della zona litoranea (Civitavecchia, Fiumaretta).

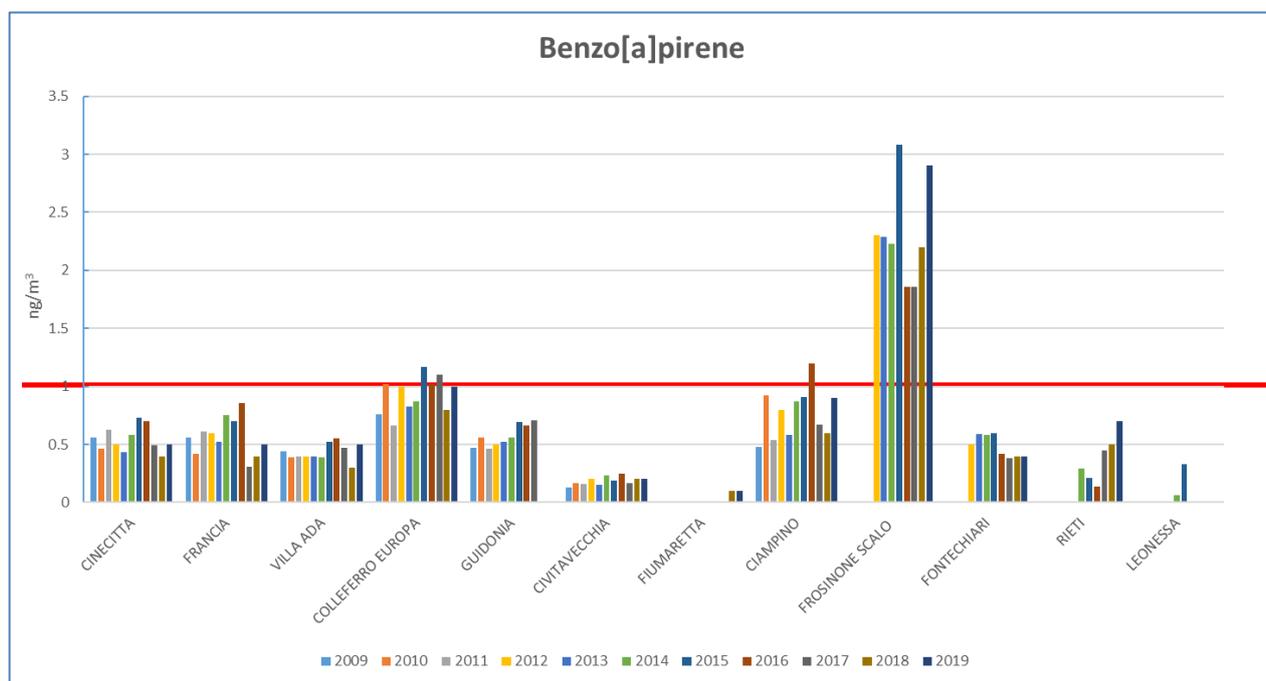


Figura 29: Benzo(a)pirene nelle stazioni del Lazio in cui si misurano gli IPA

Tre sono le stazioni che dal 2009 al 2019 hanno superato il limite di 1,0 ng/m³ come media annuale e sono: Ciampino nell'agglomerato di Roma, Colleferro Europa e Frosinone Scalo nella zona Valle del Sacco. Per Ciampino e Colleferro Europa i valori sono molto prossimi al valore limite di 1,0 ng/m³, mentre per quanto riguarda Frosinone Scalo i valori variano da 1.9 a 3.1 ng/m³, per poi scendere nel 2017 fino a quasi 1,0 ng/m³, ma negli ultimi due anni riportati il valore è ricresciuto fino a sfiorare un'altra volta quello di 3 ng/m³.

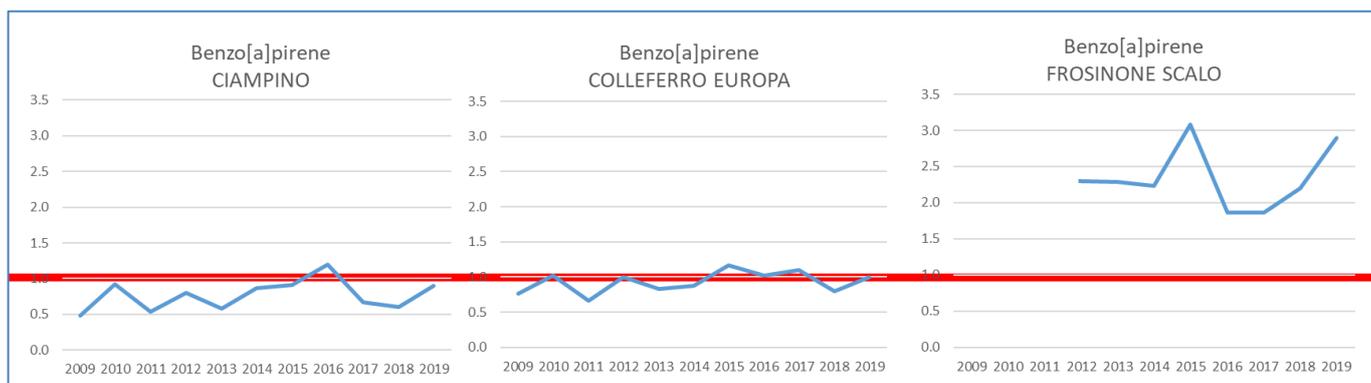


Figura 30: Benzo(a)pirene a Ciampino, Colleferro Europa e Frosinone Scalo ossia le due stazioni in cui tra il 2009 e il 2019 ci sono stati dei superamenti del limite annuale di 1,0 ng/m³

5.2 METALLI PESANTI

In generale metalli pesanti sono presenti in atmosfera sotto forma di particolato aerotrasportato; le dimensioni delle particelle a cui sono associati e la loro composizione chimica dipendono fortemente dalla tipologia della sorgente di emissione; per questo motivo vengono generalmente misurati nelle polveri sospese di PM10. Tra quelli noti per la loro tossicità la normativa ha definito per l'arsenico (As), il cadmio (Cd), il nichel (Ni) e il piombo (Pb) un valore obiettivo di concentrazione nel PM10, definito come media annua di tali sostanze nel PM10 (Tabella 2).

Tabella 2: Valori obiettivo dei metalli per la protezione della salute umana e dell'ambiente imposti dal d.lgs. 155/10

Inquinante	Tipologia di limite	Periodo di mediazione	Valore
Arsenico	Valore obiettivo	Media annua nel PM10	6.0 ng/m ³
Cadmio			5.0 ng/m ³
Nichel			20.0 ng/m ³
Piombo	Valore limite		0.5 µg/m ³

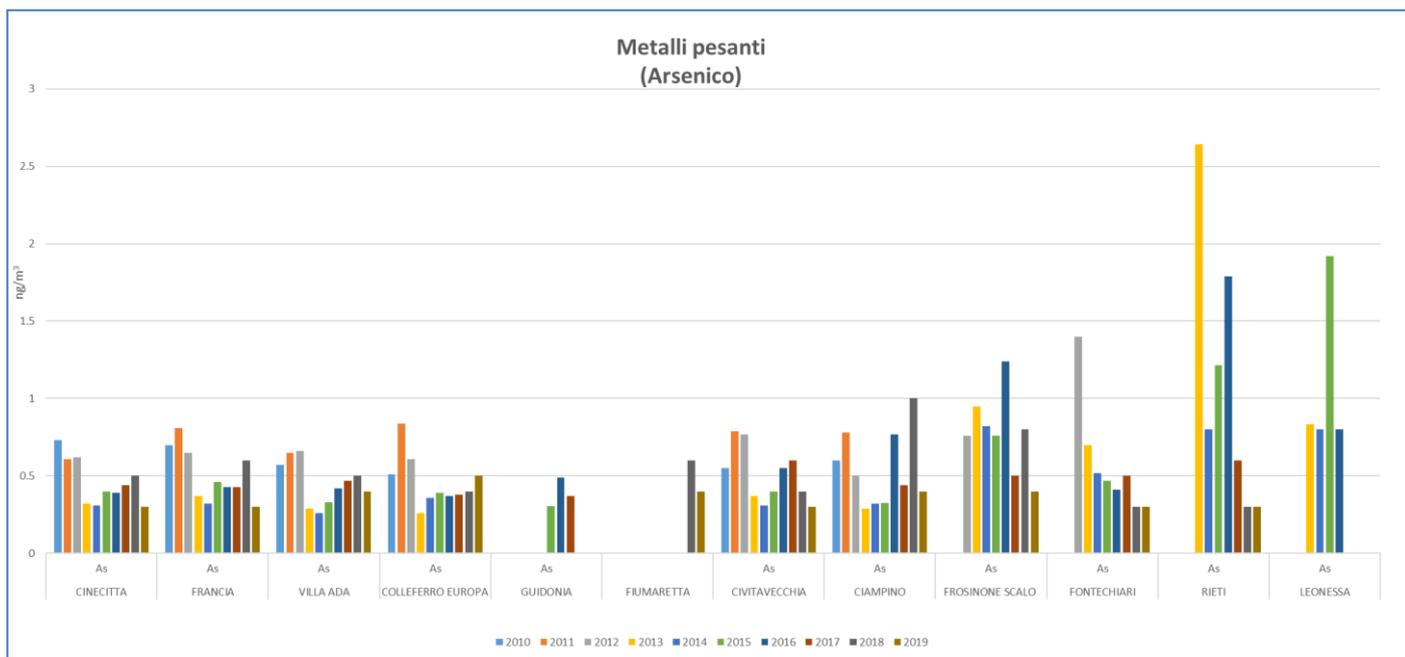


Figura 31: Arsenico

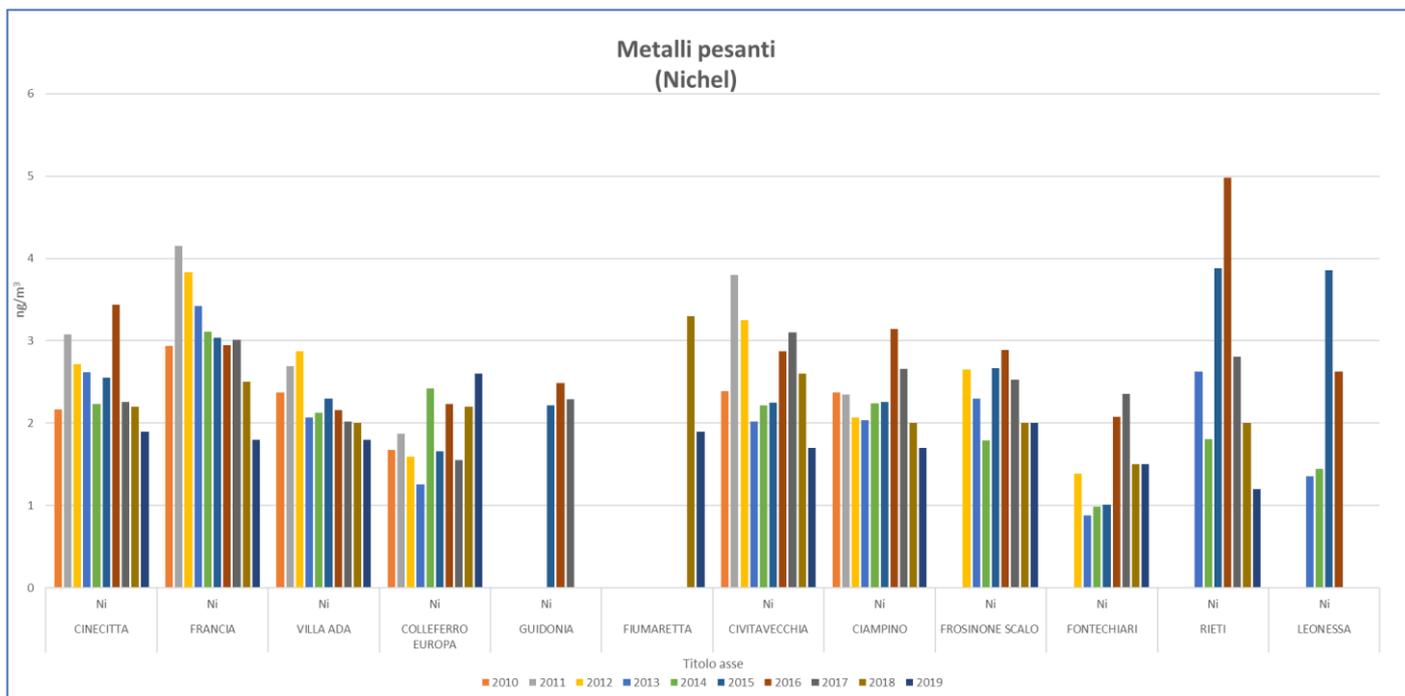


Figura 32: Nichel

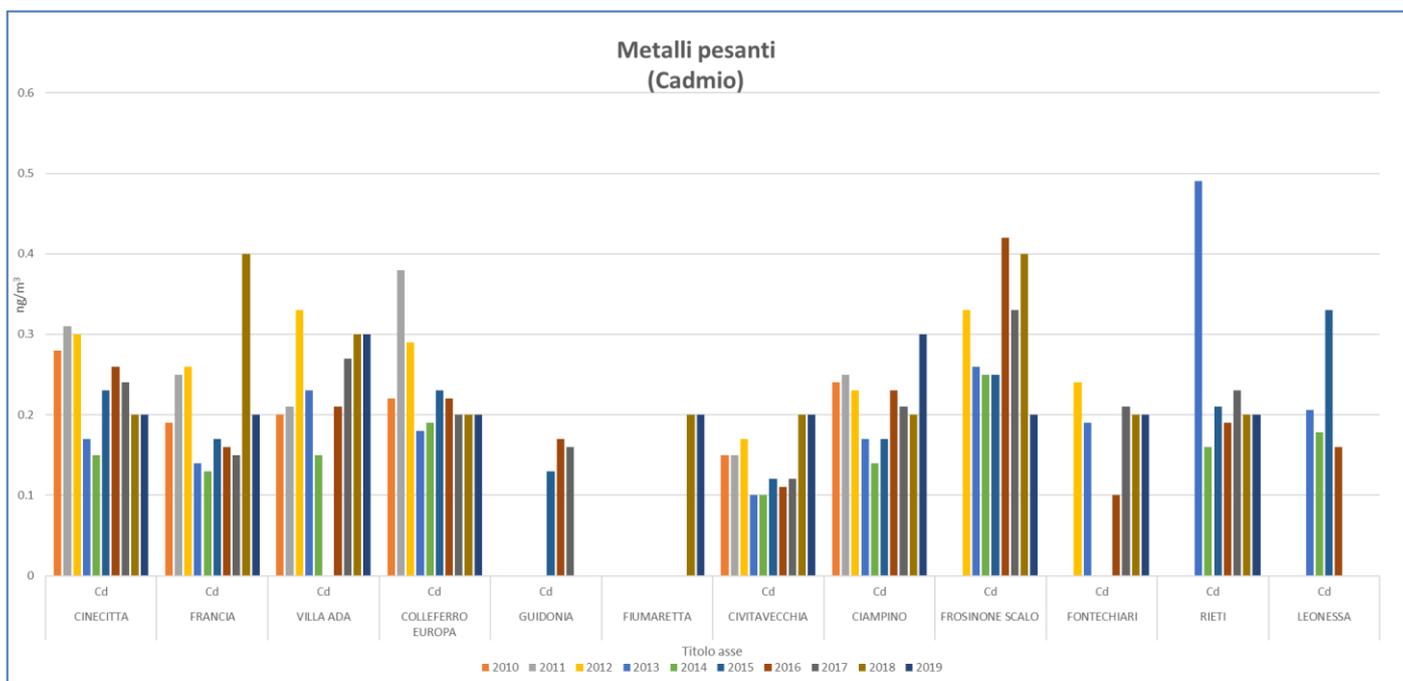


Figura 33: Cadmio

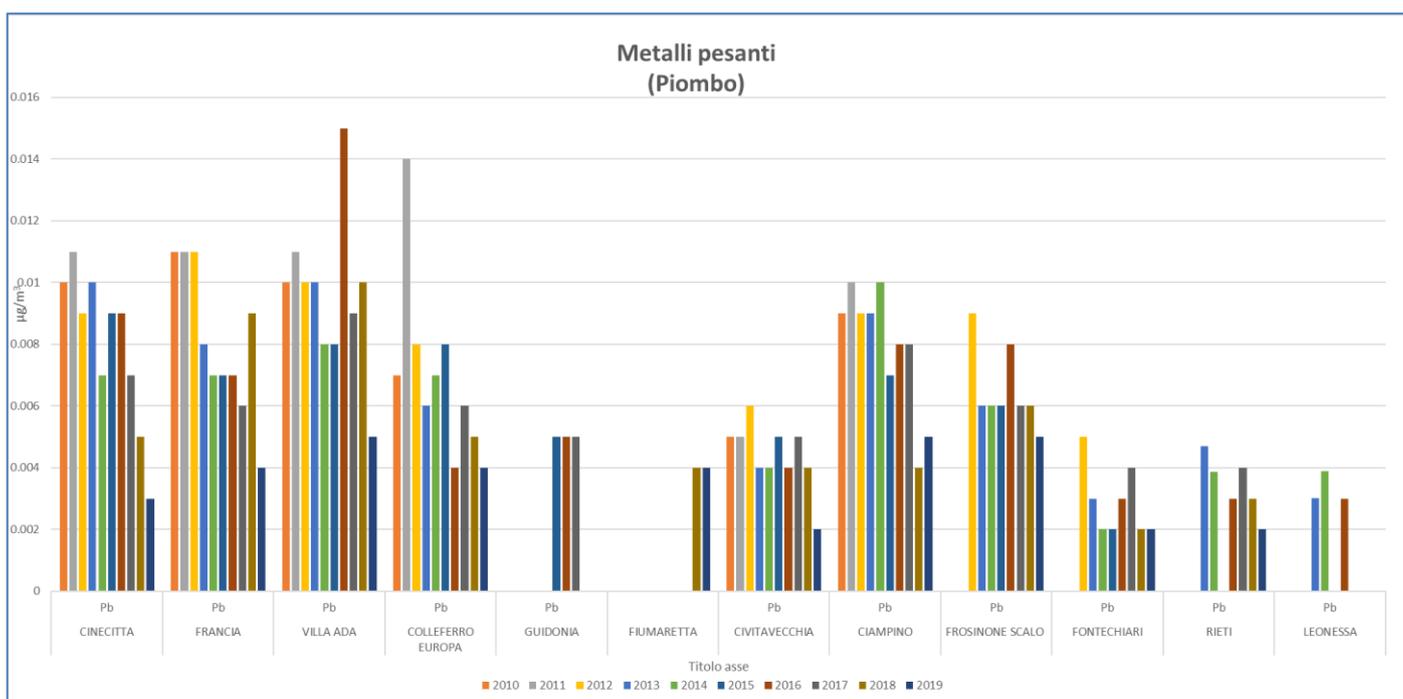


Figura 34: Piombo

In nessun caso (dal 2009 al 2019) e per nessuno dei quattro metalli misurati si registrano superamenti della media annuale (vedi i valori di Tabella 2).

5.3 CARBONIO ORGANICO

La componente carboniosa del PM10 è costituita da: carbonio organico (OC), carbonio elementare (EC) e inorganico (IC) [10].

Il carbonio elementare (EC) è un inquinante primario legato soprattutto alla combustione incompleta di combustibili fossili (carbone) e alle emissioni di veicoli diesel. Viene emesso in atmosfera come particelle di origine primaria, costituisce circa l'1-6 % del PM10 ed è dannoso sia per l'ambiente che per la salute. Infatti, la sua pericolosità è dovuta sia alla sua natura di nano particella, sia alla sua elevata superficie specifica. La combinazione di questi due fattori lo rende in grado di veicolare più facilmente nell'organismo sostanze tossiche e cancerogene come IPA e metalli.

Il carbonio organico (CO) ha una origine sia primaria che secondaria. Il carbonio organico primario viene emesso da particelle submicroniche che si originano in seguito a processi di combustione, mentre il secondario si forma per condensazione di sostanze volatili a bassa tensione di vapore, per adsorbimento chimico-fisico di specie gassose sulle particelle e per reazioni chimiche durante episodi di smog fotochimico. Il rapporto tra il carbonio organico (OC) ed elementare (EC) varia in base alla sorgente di emissione.

Il carbonio inorganico, prevalentemente di origine cristallina, è presente solo in piccole concentrazioni rispetto alle altre due frazioni, tale da essere poco considerato.

La determinazione delle frazioni carboniose viene effettuata sulle membrane filtranti di quarzo in cui è stato effettuato il campionamento delle polveri atmosferiche PM2,5. Le stazioni in cui sono state effettuate le misure sono:

- ✓ la stazione di Castel di Guido, situata nella zona nord - ovest di Roma in una area a basso impatto antropogenico; per tale motivo questa stazione viene definita di "background rurale" (in verde nella Figura 35). L'agglomerato urbano più vicino è quello di Massimina-Casal Lumbroso, distante circa 8 km, e l'aeroporto internazionale di Fiumicino a circa 8 Km.
- ✓ la stazione di Villa Ada, situata all'interno di un parco di 160 ettari dentro Roma, considerata come stazione di "background urbano" (in giallo nella Figura 35).

- ✓ la stazione di Via Cipro, situata a 0,5 Km dalla Città del Vaticano, in zona urbana di background (in giallo nella Figura 35).
- ✓ la stazione di Corso Francia, situata nella zona nord della città, in una delle arterie principali da traffico di ingresso/uscita dalla città (in rosso nella Figura 355).

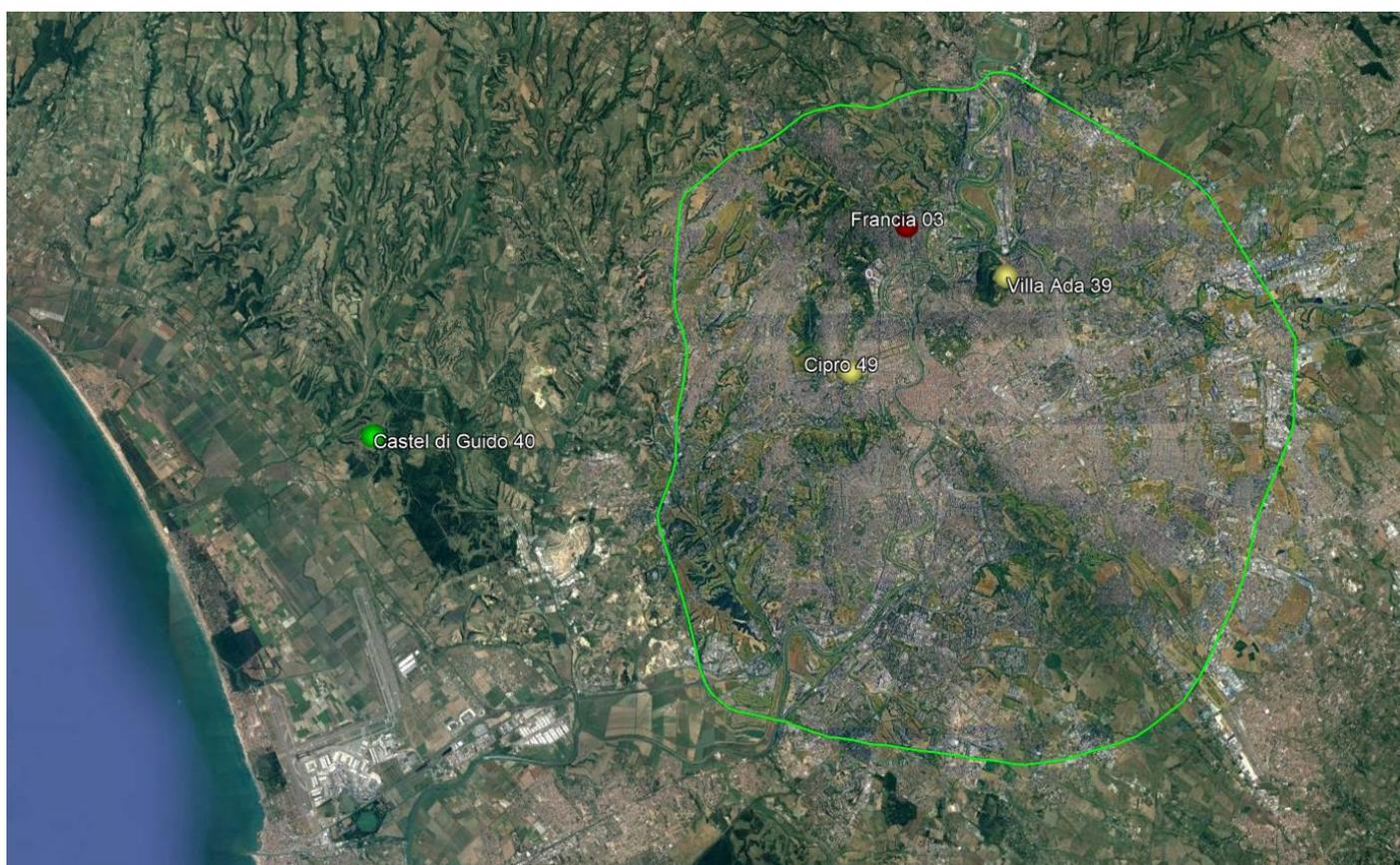


Figura 35: Punti di campionamento del PM_{2,5}, in rosso la stazione urbana da traffico di Corso Francia, in giallo le stazioni urbane di background di Cipro e Villa Ada e in verde la stazione rurale di background di Castel di Guido

Le membrane vengono sottoposte, tal quali, ad analisi termo-ottica mediante protocolli di analisi standardizzati. Questa tecnica di analisi si basa su un processo di volatilizzazione e ossidazione dei componenti carboniosi presenti nel campione di particolato atmosferico e sulla quantificazione di gas rilasciati, con correzione ottica dell'annerimento dovuto alla pirolisi del OC che si verifica durante il processo [11].

L'analisi termo-ottica del contenuto di OC e EC è stata eseguita tramite l'analizzatore Lab OC-EC Aerosol Analyzer della Sunset Laboratory Inc.

Tale rilevazione analitica è stata introdotta nell'Agenzia nel 2016, in alcune stazioni di monitoraggio di PM2.5 del comune di Roma; al momento non ci sono limiti normativi.

All'aumentare dell'antropizzazione delle stazioni (ossia passando in sequenza da Castel di Guido a Villa Ada, a Cipro e a Corso Francia) si ha un incremento di EC e OC nel particolato atmosferico PM2,5, confermando che la concentrazione di EC e OC è più alta nei siti da traffico rispetto ai siti rurali.

Nella Tabella 3 sono riportati i valori di carbonio organico, carbonio elementare e totale (somma dei due), presso quattro stazioni di monitoraggio della qualità dell'aria nell'agglomerato di Roma, mentre in Tabella 4 sono riportati alcuni valori di riferimento di carbonio organico e carbonio elementare. I dati sono confrontabili e hanno lo stesso ordine di grandezza.

Tabella 3: Valori di carbonio organico, carbonio elementare e totale (somma dei due), presso quattro stazioni di monitoraggio della qualità dell'aria nell'agglomerato di Roma

Stazione di monitoraggio	Anno	Periodo	Campioni analizzati	EC	OC	TC
			numero	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Castel di Guido	2016	marzo-dicembre	40	0.2	1.6	1.9
	2017	gennaio-luglio	31	0.3	2.0	2.3
	2018		0			
	2019	febbraio-settembre	37	0.4	2.5	2.9
Villa Ada	2016	marzo-dicembre	46	0.7	3.3	3.9
	2017	gennaio-maggio	21	0.8	4.7	5.5
	2018		0			
	2019	gennaio-settembre	40		3.3	
Cipro	2016	aprile-dicembre	44	1.5	4.8	6.3
	2017	gennaio-maggio	21	1.4	5.5	6.9
	2018		0			
	2019	aprile-settembre	20	1.0	2.4	3.2
Francia	2016	aprile-dicembre	44	2.8	4.9	7.8
	2017	gennaio-maggio	24	2.3	5.5	7.8
	2018	luglio-dicembre	15	3.7	4.0	7.7
	2019	marzo	5	2.9	4.9	7.8

Tabella 4: Valori di riferimento di carbonio organico e carbonio elementare

Città	EC	OC	Riferimenti
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	
Ispra	1.03	4.19	Yttri,Aas,Bjerke,Cape7,Cavalli,Ceburnis,Dye,Emblico,Facchini, Forster,Hanssen,Hansson,Jennings,Maenhaut,Putaud,Tørseth1 Elemental and organic carbon in PM10: a one year measurement campaign within the European Monitoring and Evaluation Programme EMEP Atmos. Chem. Phys., 7, 5711–5725, 2007 www.atmos-chem-phys.net/7/5711/2007/
Milano	1.4	9.2	Lonati,Ozgen,Giuliano Primary and secondary carbonaceous species in PM2.5 samples in Milan (Italy) Atmospheric Environment 41 (2007) 4599–4610
Roma outdoor	1.5	3.3	Tofful,Perrino Chemical Composition of Indoor and Outdoor PM2.5 in Three Schools in the City of Rome Atmosphere 2015, 6, 1422-1443; doi:10.3390/atmos6101422
Roma outdoor	1.3	3.2	
Roma outdoor	1.9	3.6	
Roma downtown	6.8	8.5	Avino,Manigrasso,Dodaro Measurement of organic and elemental carbon in downtown Rome and background area: Physical behavior and chemical Environmental Science: Processes and Impacts DOI: 10.1039/C4EM00471J
Roma background	3.5	5.0	
Amsterdam winter	1.7	6.7	Viana,Maenhaut,Brink,Chi,Weijers,Querol,Alastuey,Mikuška,Večeřa Comparative analysis of organic and elemental carbon concentrations in carbonaceous aerosols in three European cities Atmospheric Environment Volume 41, Issue 28, September 2007, Pages 5972-5983
Barcellona winter	2.6	6.9	
Ghent winter	1.2	5.4	
Amsterdam summer	1.9	3.9	
Barcellona summer	1.5	3.6	
Ghent summer	0.8	2.7	

6 ELEMENTI A SUPPORTO DELL'ANALISI DEI DATI

La presenza di molteplici sorgenti di emissioni del PM, la complessità dei meccanismi che regolano la sua formazione, l'influenza delle condizioni meteorologiche rendono complesso individuare i fattori che hanno determinato la variabilità registrata nello spazio e nel tempo e illustrata nei capitoli precedenti.

Si ritiene utile fornire una serie di elementi che possano supportare l'analisi dei dati presentati presentando l'andamento durante il periodo 2010-2019 di una serie di fattori correlati all'inquinamento atmosferico.

6.1 POPOLAZIONE

La popolazione e la sua distribuzione sul territorio costituiscono un fattore di pressione di grande rilevanza. Le persone presenti in un determinato territorio generano, infatti, pressioni sull'ambiente attraverso lo sfruttamento delle risorse naturali, la produzione di rifiuti, la modifica dell'ambiente originario ecc. Dall'analisi dei dati della popolazione residente nel Lazio dal primo gennaio 2012 al primo gennaio 2020 risulta che la popolazione è aumentata del +6,6% dal 2012 (dati post-censimento), ma è in calo del -0,2% rispetto al 2019 [12] (figura 36).

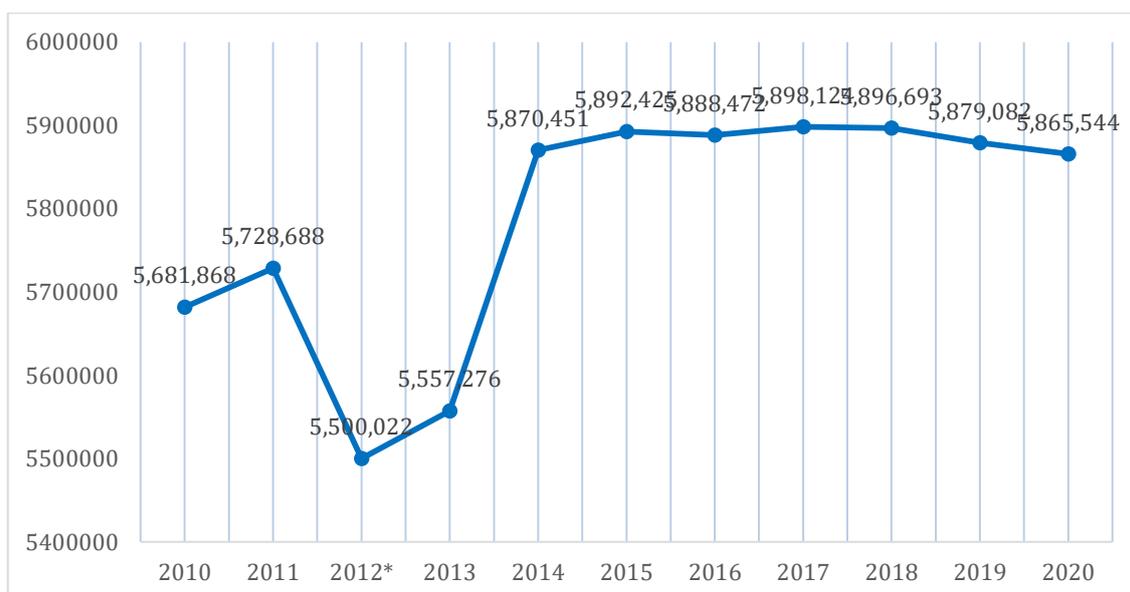


Figura 36: Popolazione totale residente nel Lazio dall'01 gennaio 2010 all'01 gennaio 2020 (*post-censimento)

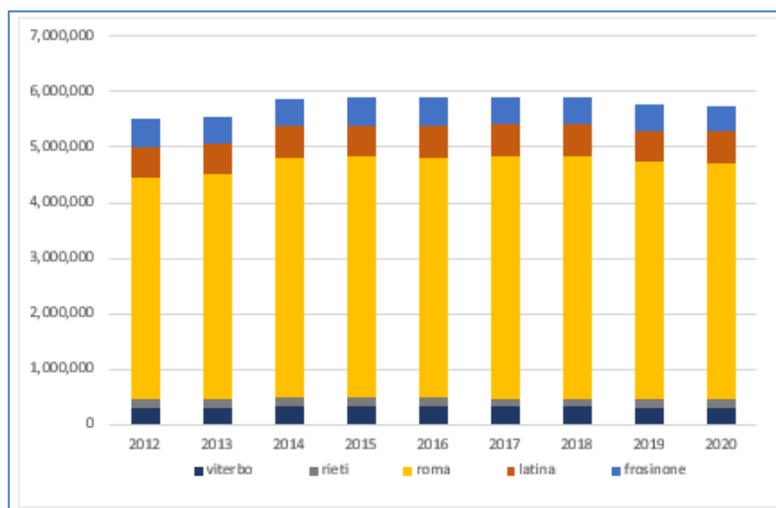


Figura 37: Popolazione totale residente nel Lazio per provincia all'1 gennaio 2020

Analizzando i dati per provincia (figura 37), si nota un aumento della popolazione per le sole province di Latina (+3,2%) e Roma (+6,5%), mentre per le altre province si registra un calo (più marcato a Frosinone con -3%). Questo andamento è evidente anche dall'esame della densità di popolazione. La densità della popolazione è un indicatore utile per determinare l'impatto che la pressione antropica esercita sull'ambiente: essa è fortemente influenzata dalle caratteristiche geofisiche della zona di riferimento e antropiche, in funzione dei differenti contesti insediativi delle aree urbane e rurali. La densità di popolazione è espressa come rapporto tra il numero di persone che risiedono in una determinata area e la superficie dell'area stessa.

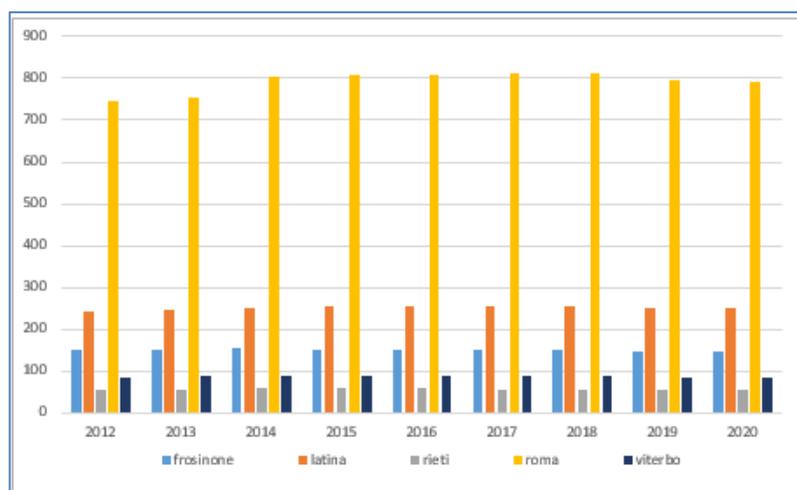


Figura 38: Densità abitativa (ab/kmq) per provincia nel Lazio dall'1 gennaio 2012 all'1 gennaio 2020

Nel periodo 2012-2020 è evidente anche dalla figura 35 l'aumento della densità per le province di Roma (+48 ab/kmq) e Latina (+8 ab/kmq) e uno spopolamento delle altre province (soprattutto Frosinone con -4 ab/kmq).

6.2 EVOLUZIONE TECNOLOGICA DEI MOTORI

Il traffico veicolare contribuisce alla concentrazione di PM10, non solo attraverso il processo di combustione e quindi per l'emissione dei gas di scarico, ma anche tramite un processo meccanico di erosione e usura sia dei pneumatici che dei freni, nonché dell'asfalto, e tramite la risospensione del materiale particolato. Il traffico veicolare legato al trasporto sia delle persone che delle merci rimane quindi ancora oggi una delle principali fonti d'inquinamento atmosferico, in particolare nelle aree urbane. Sebbene l'evoluzione della tecnologia abbia contribuito negli ultimi decenni alla riduzione delle emissioni specifiche dei veicoli, la crescita del parco circolante e delle percorrenze veicolari hanno parzialmente ridotto i miglioramenti della qualità dell'aria, che pur si sono verificati per gli inquinanti convenzionali nella maggior parte delle aree urbane. Focalizzando l'attenzione sul particolato, è noto che per i veicoli a benzina il rinnovo del parco con l'introduzione delle classi Euro ha determinato una diminuzione sostanziale delle emissioni. D'altra parte, però, in anni recenti si è assistito a una sempre maggiore diffusione dell'alimentazione a gasolio, più critica in termini di emissioni di ossidi di azoto.

La consistenza del parco autoveicoli nel Lazio è tra le più alte d'Italia (seconda solo alla Lombardia), con un trend in aumento negli ultimi anni, salvo per le annualità 2012 e 2013, a causa della crisi economica [13].

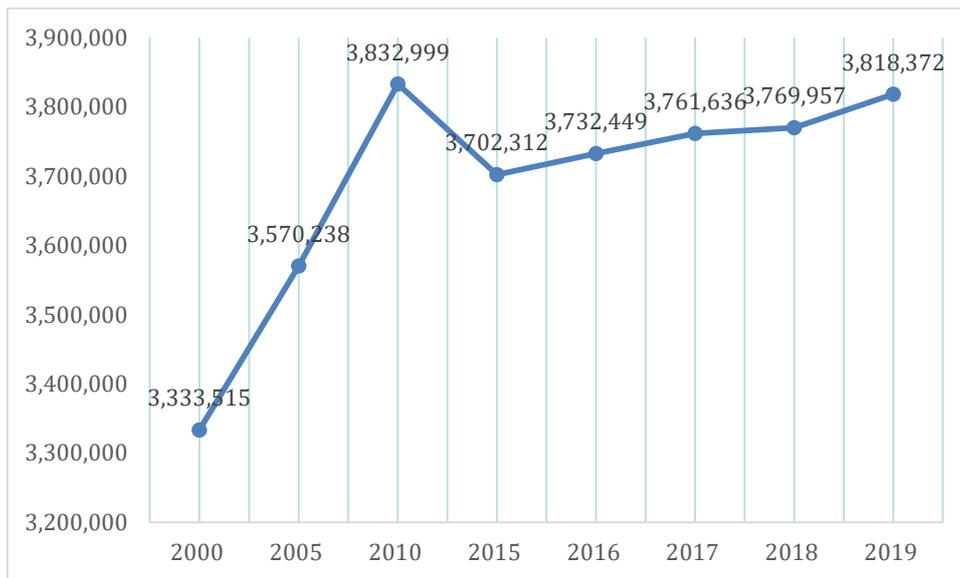


Figura 39: Consistenza del parco autovetture del Lazio nel periodo 2000-2019 (elaborazione dati ACI)

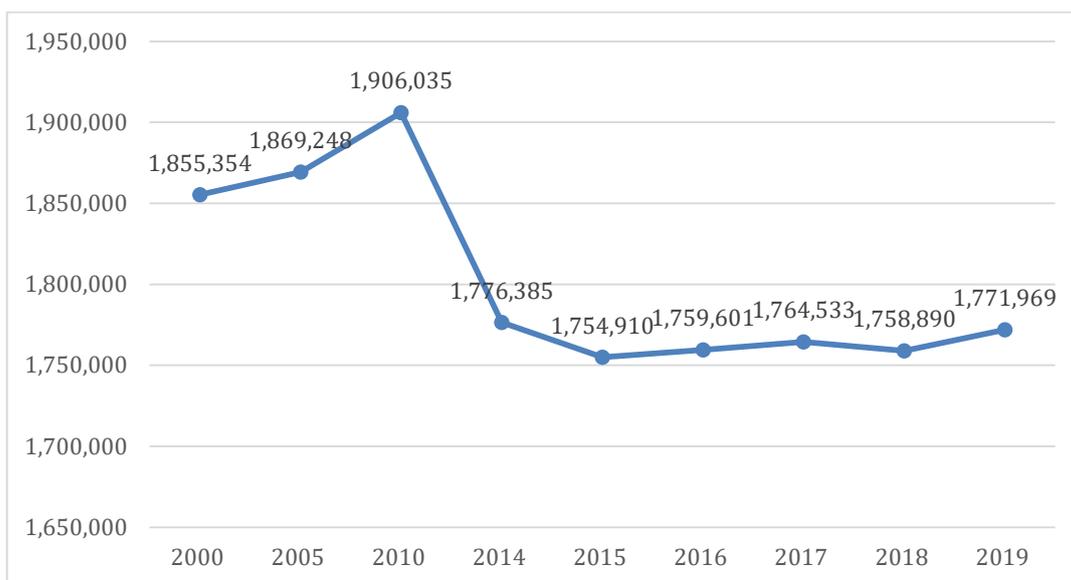


Figura 40: Consistenza del parco autovetture a Roma nel periodo 2000-2019 (elaborazione dati ACI)

Nel 2019, come evidenzia la figura 40, si interrompe la tendenza all'attenuarsi del tasso di crescita del parco veicolare a Roma: il numero dei veicoli registrati a Roma cresce dello +0,7% rispetto al 2018 (trend nazionale +1,4% rispetto al 2018). Delle 1,771,969 autovetture registrate a Roma al 31.12.2019 (75,6% del parco

veicolare), il 43,8% sono veicoli in classe di emissione Euro 5 o 6 (figura 41). Ancora rilevante il numero di vetture di classe 0 (9,7%).

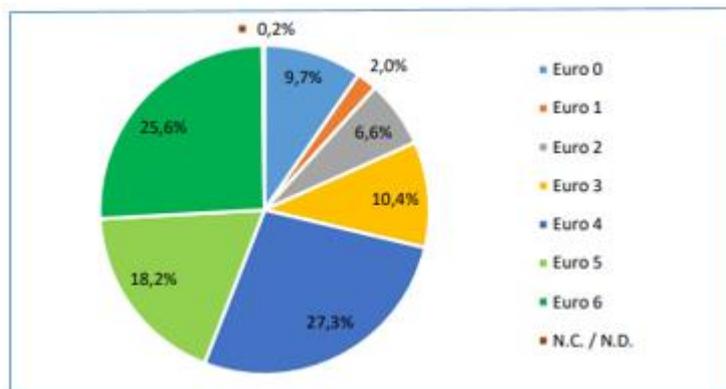


Figura 41: Autovetture per classi di emissioni (%) a Roma anno 2019 (tratto da "La mobilità sostenibile a Roma" [14])

La decrescita negli ultimi vent'anni delle automobili a benzina è bilanciata dall'aumento dei veicoli diesel (figura 42). Questi ultimi sono fonti rilevanti di carbonio elementare.

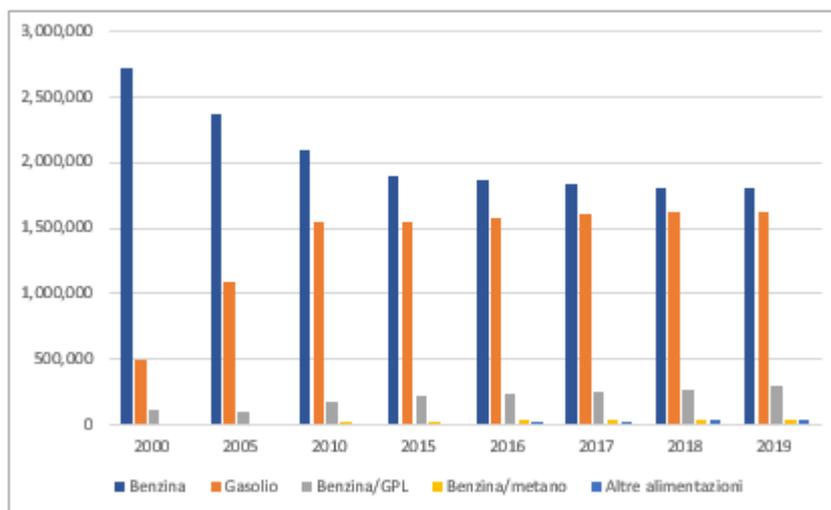


Figura 42: Consistenza parco autovetture nel Lazio secondo l'alimentazione nel periodo 2000-2019

Il numero degli autoveicoli a Roma è diminuito da 692 ogni 1000 abitanti registrato nel 2010 a 630 ogni mille abitanti nel 2019; il numero sull'intero territorio nazionale è di 646 automobili ogni 1000 abitanti.

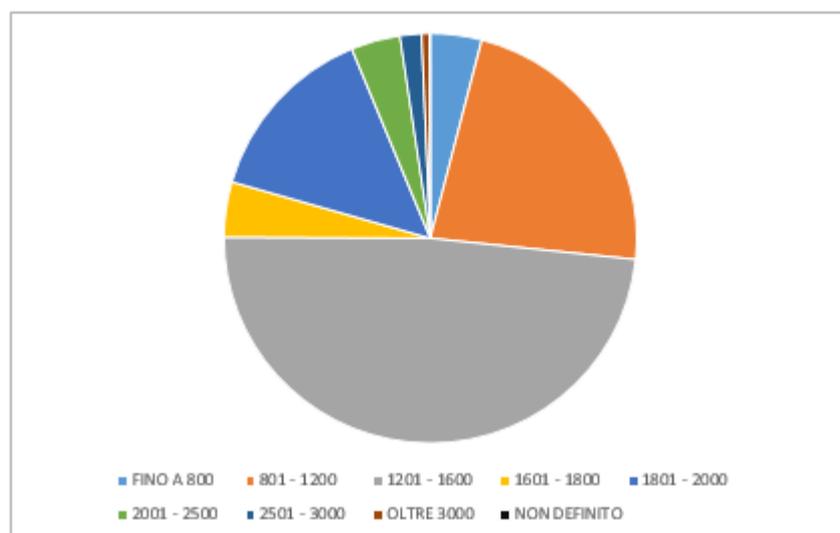


Figura 43: Consistenza parco autovetture secondo la cilindrata nel Lazio al 31/12/2019

6.3 RISCALDAMENTO DOMESTICO

Gli impianti di combustione non industriale comprendono gli impianti commerciali, istituzionali, residenziali (riscaldamento, camini, stufe ecc) e quelli agricoli. Nell'ambito del riscaldamento domestico si stima che circa il 98% delle emissioni di PM10 derivi dalla combustione della legna in piccoli apparecchi. Il rapporto fra la combustione domestica della legna e la qualità dell'aria ha due facce: una faccia positiva, grazie alla quale si riducono le emissioni di CO₂ in atmosfera e si contrastano i cambiamenti climatici, e una faccia negativa dovuta al fatto che le combustioni domestiche – soprattutto se mal condotte nei piccoli impianti domestici - emettono in atmosfera particolato. L'uso della legna come combustibile per il riscaldamento domestico e la cottura dei cibi si è diffuso negli ultimi anni a parziale sostituzione dei combustibili fossili (metano, gasolio, GPL) prevalentemente per ragioni di risparmio economico, ma anche sotto la spinta incentivante delle politiche di lotta ai cambiamenti climatici, che considerano le biomasse legnose a emissione di CO₂ nulla.

L'indagine svolta dall'ENEA nel 1999 stimava un consumo di legna nel Lazio pari a 1.108.816 tonnellate [15] mentre lo studio APAT "Stima dei consumi di legna da ardere per riscaldamento e uso domestico in Italia" del 2006 ha evidenziato un consumo di 1.707.416 tonnellate [16].

L'ARPA Lazio ha realizzato nel 2019 un'indagine campionaria sul consumo domestico di biomasse legnose nel Lazio, dalla quale emerge che il consumo di biomassa è aumentato negli ultimi anni e le famiglie che utilizzano biomasse legnose per il riscaldamento in modo esclusivo sono il 64%.

Dai risultati dell'indagine è stato possibile stimare una distribuzione percentuale degli impianti di riscaldamento per famiglia/abitazione, rappresentato nella figura 44.

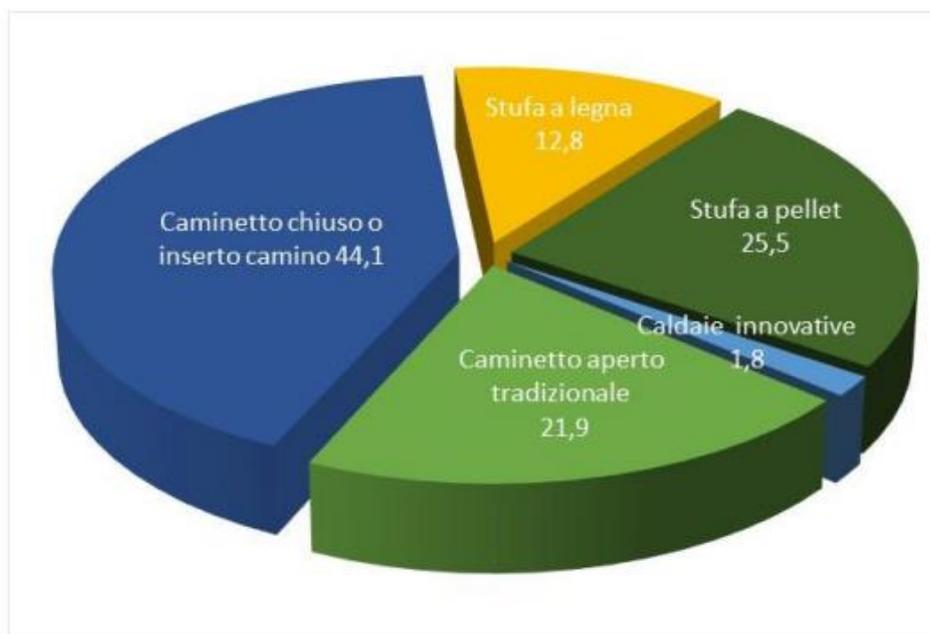


Figura 44: Distribuzione percentuale degli impianti di riscaldamento per famiglia/abitazione

Prevalgono i caminetti chiusi, seguiti dalle stufe a pellet, e il caminetto tradizionale esprime ancora dei numeri consistenti, circa 21%. Va sottolineato che i sistemi "tradizionali" sono caratterizzati da livelli nettamente maggiori di emissioni specifiche rispetto ai sistemi "innovativi" per via delle condizioni di combustione determinate dalla variabilità all'interno del focolare delle temperature e della presenza di aria di combustione.

La rilevanza delle emissioni di particolato fine primario derivate dalla combustione della legna in piccoli impianti domestici evidenzia la necessità di politiche mirate al controllo di questa fonte. Indubbi vantaggi derivano dalla limitazione dell'utilizzo degli apparecchi più obsoleti nelle aree con livelli di PM più elevati o dalla loro sostituzione con altri più efficienti e a minori emissioni specifiche.

6.4 PRODUZIONE INDUSTRIALE

Oltre ai fattori demografici, anche il settore dell'industria contribuisce all'inquinamento. La figura 45 mostra il numero delle imprese attive dal 2012 al 2018 nel Lazio e in Italia (elaborazione dati ISTAT [12]), evidenziando un aumento nel Lazio del 3,3 % negli ultimi anni a fronte di un calo nazionale dello -0,9%.

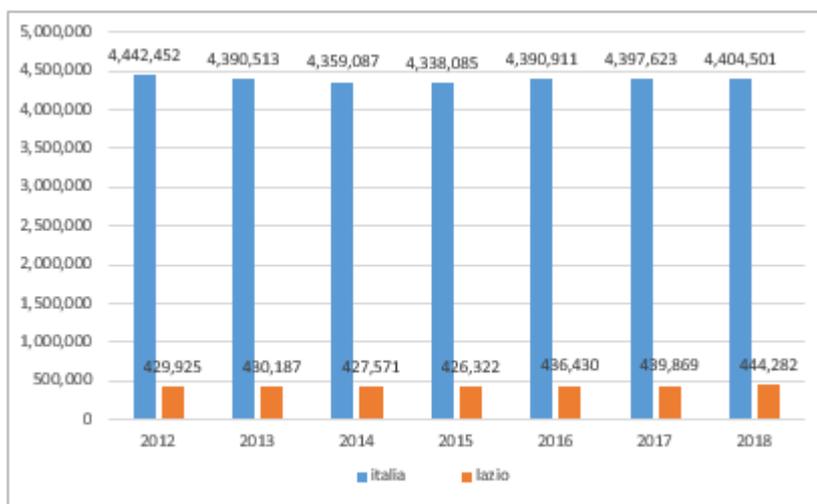


Figura 45: Confronto del numero delle imprese attive nel Lazio e in Italia (dati ISTAT [12])

Delle 444,282 imprese attive nel Lazio nel 2018, 32,545 sono imprese *green* (il 7% del totale), con un aumento del +8,4% rispetto all'anno precedente, sottolineando la vocazione sostenibile del Lazio, grazie agli eco-investimenti effettuati [17].

Il numero di addetti nel 2019 è pari a 1,887,591.59 e la dimensione media delle imprese nel Lazio è di 4,2 addetti (figura 46).

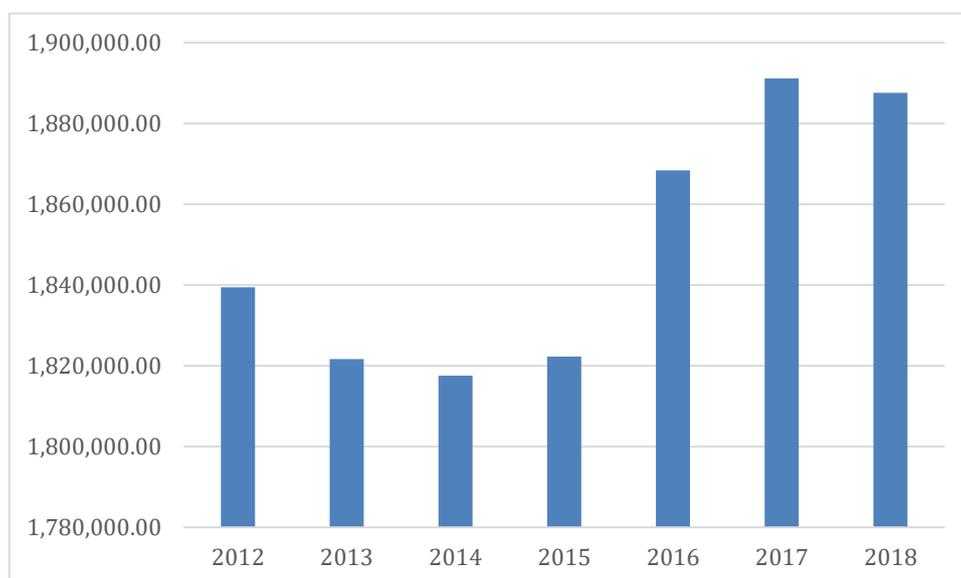


Figura 46: Numero di addetti delle imprese attive nel Lazio (valori medi annui) (dati ISTAT [12])

6.5 PRODUZIONE ENERGIA ELETTRICA

La produzione e il consumo di energia esercitano pressioni considerevoli sull'ambiente. La produzione nazionale lorda nel 2019 è stata pari a 293.853 GWh (+1,4% rispetto al 2018) ed è stata coperta per il 60,0% dalla produzione termoelettrica non rinnovabile (+1,5% rispetto al 2018), per lo 0,6% dalla produzione idroelettrica da pompaggio (+6,9% rispetto al 2018) e per il restante 39,4% dalle fonti rinnovabili (i drica -5,1% rispetto al 2018, eolica +14,0% rispetto al 2018, fotovoltaica +4,6% rispetto al 2018, geotermica -0,5% rispetto al 2018 e bioenergie +2,1% rispetto al 2018) [18]. Nella figura 47 si mostra l'andamento della produzione di energia in Italia e nel Lazio negli anni 2010-2019. Mentre in Italia nel 2019 la produzione lorda è aumentata dell'1,4% rispetto al 2018, nel Lazio si registra invece un calo del 23%; complessivamente dal 2010 la diminuzione è del 5,3%.

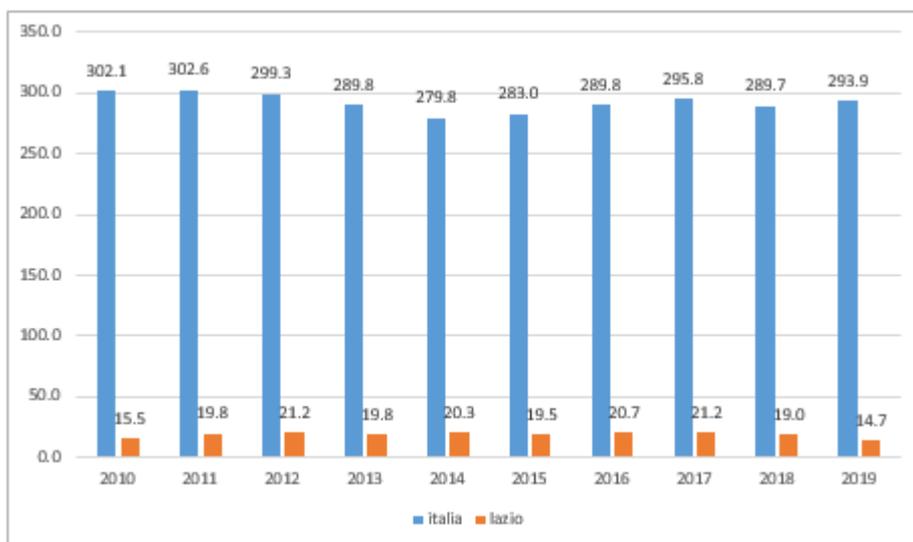


Figura 47: Produzione elettrica totale (GWh) in Italia e nel Lazio anni 2010-2019 (elaborazione dati TERNA [18])

Nel periodo analizzato si evidenzia l'aumento della produzione di energia da fonti rinnovabili, in particolar modo da fotovoltaico (+1012%) ed eolico (+876%).

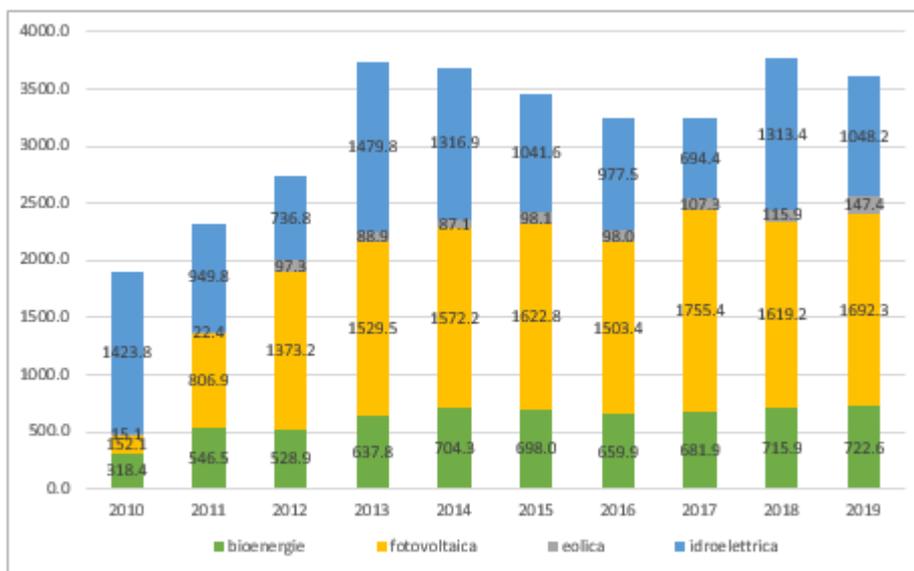


Figura 48: Produzione elettrica da fonti rinnovabili nel Lazio anni 2010-2019 (elaborazione dati TERNA [16])

7.6 AGRICOLTURA

L'uso del suolo ai fini agricoli costituisce un fattore di pressione per la matrice aria. L'agricoltura è infatti la principale responsabile (più del 90%) delle emissioni totali di ammoniaca, dovute all'utilizzo esteso dei fertilizzanti sintetici e organici e dalla gestione degli allevamenti (emissioni dal ricovero e dallo stoccaggio). La deposizione di NH_3 contribuisce a diversi problemi ambientali, quali l'acidificazione dei suoli, l'alterazione della biodiversità e l'eutrofizzazione delle acque; inoltre, essa interviene nella formazione del particolato, con conseguenze sulla salute umana. A livello nazionale le emissioni di ammoniaca dal settore agricoltura sono diminuite del 23% nel periodo 1990-2018 (figura 49 [19]). Questo calo è dovuto principalmente alla riduzione del numero dei capi, delle superfici e produzioni agricole e alla diffusione delle tecniche di riduzione delle emissioni.

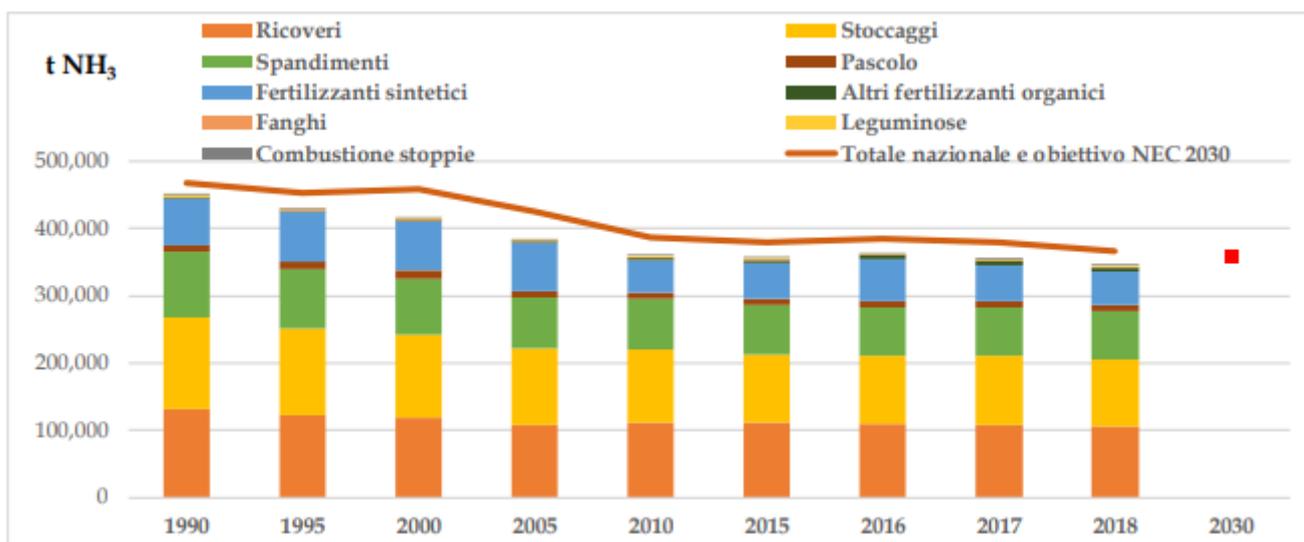


Figura 49: Andamento delle emissioni di ammoniaca in Italia (fonte ISPRA [19])

Il settore agricoltura rappresenta inoltre il 7% circa delle emissioni nazionali di gas serra.

Il numero delle aziende agricole nel Lazio dal 2010 è diminuito del 30,5%, mentre la superficie agricola utilizzata è scesa del 3,1% [12 e 20].

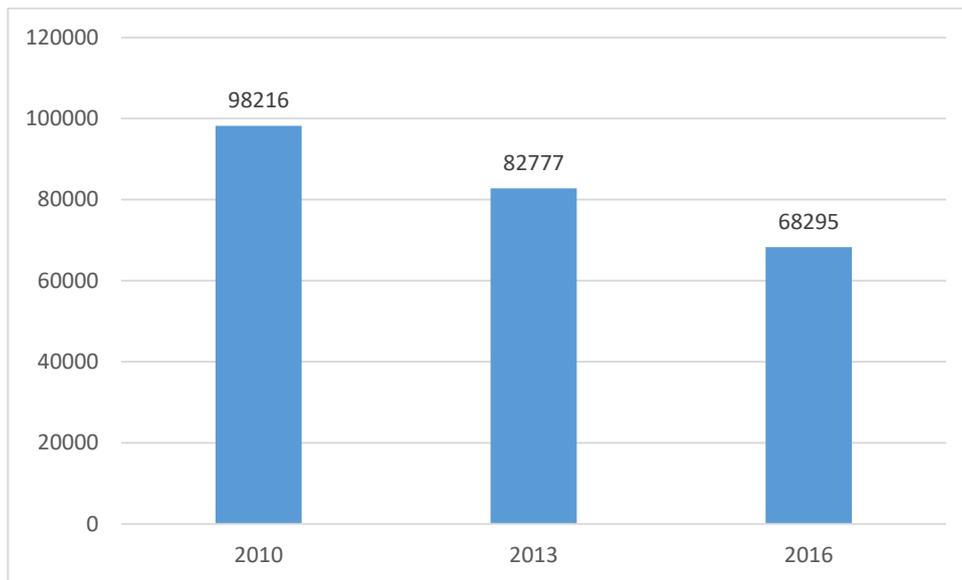


Figura 50: Numero aziende agricole nel Lazio anni 2010-2016

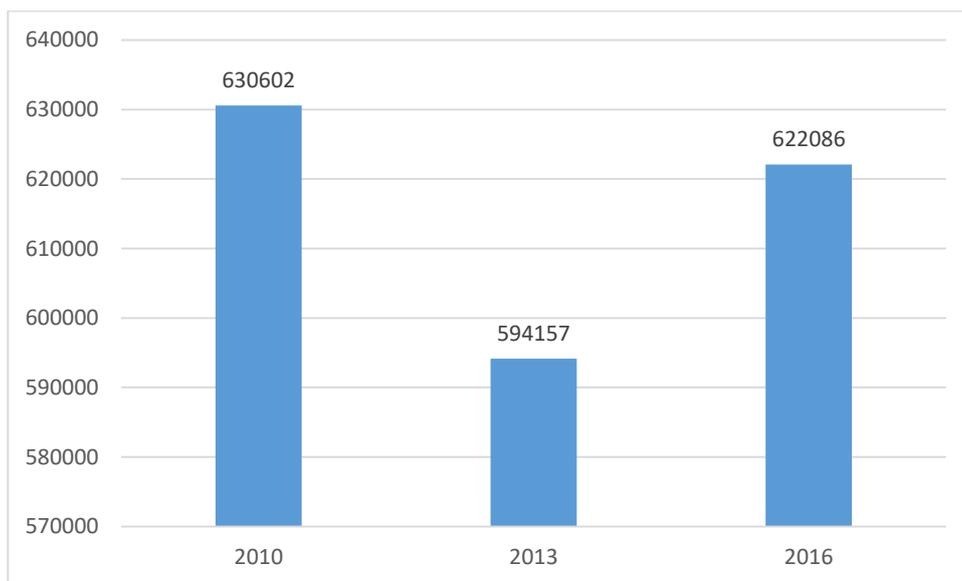


Figura 51: Superficie Agricola Utilizzata (SAU, in ettari) nel Lazio anni 2010-2016

7 CONCLUSIONI

L'analisi dei dati del particolato atmosferico rilevati nel Lazio dal sistema di monitoraggio dell'ARPA Lazio tra il 2010 e il 2019 ha evidenziato una riduzione della concentrazione media annua e del numero dei superamenti del valore limite giornaliero definito dalla normativa in tutta la regione.

I risultati sono coerenti con quanto osservato in Europa, dove si è registrata una riduzione significativa delle emissioni e di conseguenza dei livelli d'inquinamento atmosferico.

L'andamento decrescente è legato all'effetto delle politiche comunitarie, nazionali e regionali, che hanno definito valori progressivamente sempre più bassi per le emissioni dei diversi settori economici, dallo sviluppo di tecnologie a ridotto impatto ambientale specialmente nel trasporto e nell'industria e da una sempre maggiore consapevolezza da parte dei cittadini sul tema della sostenibilità ambientale.

Lo studio mostra come siano ancora presenti nel Lazio delle aree di superamento, in particolare nella Valle del Sacco, che, per la sua particolare conformazione orografica, risente durante la stagione invernale di lunghi periodi di accumulo delle polveri sottili.

Pur registrando in ampie zone della regione il rispetto dei limiti previsti dalla normativa europea e nazionale, gli obiettivi definiti dall'Organizzazione Mondiale della Sanità, più stringenti rispetto a quelli del legislatore, sono ancora lontani dall'essere raggiunti in diverse aree del Lazio.

L'episodio del dicembre 2015, quando si sono registrati numerosi giorni di superamento del limite giornaliero del PM10 (ad esempio a Roma Tiburtina e a Frosinone Scalo si sono contati 29 giorni su 31), dimostra chiaramente come, anche in presenza di un notevole miglioramento del quadro ambientale, l'inquinamento atmosferico costituisca un importante fattore di rischio per la salute della popolazione e sia per questo importante continuare e in alcuni casi incrementare le azioni di contrasto. Sono stati infatti stimati 29 decessi per cause naturali dovuti ai superamenti del PM10 del dicembre 2015, 24 ricoveri ospedalieri e 32 accessi al pronto soccorso per cause cardio-respiratorie [21].

La possibilità di raggiungere un miglioramento della qualità dell'aria è legata all'efficacia delle politiche energetiche, industriali, agricole e sulla mobilità e alla loro integrazione alle diverse scale (europee, nazionali e locali).

Tra le azioni strutturali efficaci per ridurre le emissioni di polveri è necessario prevedere una forte integrazione delle politiche ambientali con quelle di pianificazione urbanistica (riducendo e affrontando in modo sistematico il problema della rapida espansione delle aree urbane e del conseguente consumo di suolo), migliorando il servizio di trasporto pubblico (garantendo reti di trasporto efficaci ed efficienti, con mezzi a bassa emissione), promuovendo azioni che limitino la necessità di mobilità, la realizzazione nelle città di infrastrutture per la mobilità ciclo-pedonale, riprogettando la mobilità e la logistica delle merci (riducendo i chilometri percorsi delle merci e razionalizzando la distribuzione all'interno della città).

L'attuazione di queste azioni potranno dare un forte impulso alla lotta all'inquinamento e alla riduzione dei livelli di concentrazione del PM nel prossimo decennio.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1) Decreto del Presidente della Repubblica 24-05-1988 n. 203, Attuazione delle direttive CEE numeri 80/779, 82/884, 84/360 e 85/203 concernenti norme in materia di qualità dell'aria, relativamente a specifici agenti inquinanti, e di inquinamento prodotto dagli impianti industriali, ai sensi dell'art. 15 della legge 16 aprile 1987, n. 183, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana del 16 giugno 1988, n.140 - Suppl. Ordinario n. 53

2) WHO, 2006. *Air Quality Guidelines. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*. Global Update 2005. Copenhagen, WHO Regional Office for Europe Regional Publications, 2006.
http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/en/

3) AEA, 2013. L'aria che respiriamo, migliorare la qualità dell'aria in Europa. AEA, Copenaghen, 2013.

4) ARPA Lazio, 2020. Inventario regionale delle emissioni in atmosfera.

<http://www.arpalazio.gov.it/ambiente/aria/inventario.htm#:~:text=L'Inventario%20Regionale%20delle%20Emissioni,all'intero%20territorio%20della%20regione.>

5) ARPA Lazio, 2020. Valutazione della Qualità dell'Aria della Regione Lazio 2019.

http://www.arpalazio.net/main/aria/doc/pubblicazioni/ValutazioneQA_2019.pdf

6) Sozzi et al., Stimatore statistico lineare per la stima della concentrazione giornaliera di PM10. In Bea-UNIDEA, 2013/03.

7) European Commission (EC), Establishing guidelines for demonstration and subtraction of exceedances attributable to natural sources under the Directive 2008/50/EC on ambient air quality and cleaner air for Europe. 38 pp., February, 2011.

8) Barnaba et al., 2017. Desert dust contribution to PM10 loads in Italy: methods and recommendations addressing the relevant european commission Guidelines in support to the air quality directive 2008/50 Atmos. Environ., 161 (2017), pp. 288-305

9) <https://monographs.iarc.who.int/list-of-classifications>

- 10) Avino, Pasquale, et al. 2015. Measurement of organic and elemental carbon in downtown Rome and background area: physical behavior and chemical speciation
Environmental Science: Processes e Impacts, Vol. 17, p. 300-315.
- 11) Fung , Kochy , Chow, Judith C. e Watson, John G. 2002 Evaluation of OC/EC Speciation by Thermal.
Journal of the Air & Waste Management Association, Vol. 52, p. 1333-1341.
- 12) ISTAT, 2020. Annuario statistico italiano 2020
https://www.istat.it/storage/ASI/AnnuarioStatistico_2020/Asi_2020.pdf
- 13) ACI, 2019. Annuario statistico 2020.
<http://www.aci.it/laci/studi-e-ricerche/dati-e-statistiche/annuario-statistico/annuario-statistico-2020.html>
- 14) Dipartimento Trasformazione Digitale. U.O. Statistica, novembre 2020. La mobilità sostenibile a Roma. Anno 2019.
https://www.comune.roma.it/web-resources/cms/documents/Mobilita_sostenibile_Roma_2019_rev.pdf
- 15) ENEA, 2001. I consumi energetici di biomasse nel settore residenziale in Italia nel 1999.
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/015/33015097.pdf
- 16) APAT, 2008. Stima dei consumi di legna da ardere per riscaldamento ed uso domestico in Italia.
<https://www.isprambiente.gov.it/contentfiles/00004100/4156-stima-dei-consumi-di-legna-da-ardere.pdf>
- 17) Fondazione Symbola, Unioncamere, 2020. *GreenItaly 2020 Un'economia a misura dell'uomo per affrontare il futuro.*
- 18) TERNA, 2019. Annuario statistico.
<https://www.terna.it/it/sistema-elettrico/statistiche/pubblicazioni-statistiche>
- 19) ISPRA, 2020. Focus sulle emissioni da agricoltura e allevamento
<https://www.isprambiente.gov.it/files2020/eventi/gas-serra/decrisofaro.pdf>

20) Regione Lazio, 2010, Censimento 2010.

http://www.regione.lazio.it/binary/prtl_statistica/statistica_normativa/RapportoDatiDefinitivi6CensimentoAgricolturaRegioneLazio.pdf

21) DEP Lazio, Inquinamento atmosferico ed effetti sulla salute a Roma nel mese di dicembre 2015. Rapporto tecnico, 2015

http://www.ccm-network.it/imgs/C_27_MAIN_page_1046_listaFile_List11_itemName_4_file.pdf