



**Politecnico
di Torino**

Facoltà di Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio
Corso di Laurea Magistrale in Rischi Naturali e Protezione Civile
A.a. 2020/2021

***“Analisi della concentrazione di particolato in
area metropolitana e influenza dei parametri
meteoclimatici”***

Relatori:

Prof. Ing. Clerico Marina

Correlatori:

Ing. Boanini Chiara

Ing. Mecca Domenico

Candidato:

Vaccaro Vincenzo S278418

Sommario

1. Abstract	4
2. Introduzione	4
2.1. Inquadramento normativo	7
2.2. Inquinamento Atmosferico	10
2.3. Particolato Atmosferico	12
2.4. Effetto del vento sulle concentrazioni di particolato	21
2.5. Effetto della pioggia sulle concentrazioni di particolato	25
2.6. Obiettivo della ricerca	30
3. Metodi	30
3.1. Stazione di misura	31
3.1.1 Comde Derenda APM2	31
3.1.2 Palas Fidas 200S	32
3.1.3 Davis Vantage Pro 2	34
3.2. Caso studio	36
3.2.1. Analisi integrata sulla concentrazione	36
3.2.2. Analisi integrata sull'abbattimento di concentrazione	37
3.2.3. Analisi differenziata sull'abbattimento di concentrazione	38
3.3. Strumenti statistici	40
3.4. Modellistica	40
3.4.1. Regressione Lineare Multivariata (MLR)	42
3.4.2. Regressione Polinomiale Multivariata	44
3.4.3. Regressioni in Python	44
3.4.4. Generalized Additive Model (GAM)	45
3.4.5. GAM in Python	47
3.4.6. Artificial Neural Network	48
3.4.7. ANN in Python	49
3.5. Ricerca del best-fitting	50
3.6. Convalida incrociata K-Fold	52
4. Risultati	53
4.1. Analisi integrata sulla concentrazione	53
4.2. Analisi integrata sull'abbattimento di concentrazione	77
4.3. Analisi differenziata sull'abbattimento di concentrazione	99
5. Conclusioni	117
6. Ringraziamenti	Errore. Il segnalibro non è definito.
7. Bibliografia	120
8. Sitografia	125
9. Appendice	129

1. Abstract

Nel presente lavoro di tesi viene investigata la relazione tra i parametri meteoroclimatici e la concentrazione di particolato aerodisperso, focalizzandosi maggiormente sugli effetti che fenomeni di vento e di pioggia esercitano su di essa. Nella prima parte dell'elaborato viene effettuato un inquadramento generale e normativo del lavoro, introducendo il concetto di particolato aerodisperso e illustrandone le proprietà che lo caratterizzano, insieme ai meccanismi fisici che governano la sua dispersione in atmosfera. Successivamente vengono valutati gli effetti del vento e della pioggia sulle concentrazioni di PM10 e PM2.5, grazie all'elaborazione di una serie storica di dati nel periodo settembre 2018-settembre 2021, acquisita presso il Politecnico di Torino.

Sono preliminarmente analizzati i metodi e le tecniche utilizzate sia in fase di acquisizione che in fase di elaborazione dei dati, mostrando tutte le componenti della stazione di misura e i modelli impiegati. Per svolgere questo lavoro sono stati utilizzati strumenti di machine learning, elementi fondamentali nella modellistica di fenomeni di tale complessità. Tutte le analisi, sia grafiche che numeriche, sono state implementate in ambiente Python che, grazie alle sue caratteristiche quali semplicità e versatilità, ha consentito di svolgere le elaborazioni di seguito presentate. Partendo dall'utilizzo di elaborazioni statistiche, il lavoro è poi evoluto in tecniche più avanzate come il GAM o le reti neurali, con il costante obiettivo di ricercare delle correlazioni tra la variazione di concentrazione di particolato e l'intensità dei fenomeni meteorologici di pioggia e vento. Sarà evidente sin dai primi risultati l'importanza di differenziare i fenomeni per comprendere l'influenza di ognuno di essi, analizzando in maniera quanto più distinta possibile fenomeni di vento e fenomeni di pioggia.

Dalle elaborazioni si è potuto notare come all'aumentare della velocità del vento, l'abbattimento percentuale di concentrazione di particolato segua un trend di tipo esponenziale. Un'altra importante evidenza che riguarda non solo i fenomeni di vento, ma anche quelli di pioggia, è la forte correlazione positiva tra concentrazione di particolato prima del fenomeno e abbattimento complessivo all'interno dell'evento meteorologico.

2. Introduzione

Inquinamento atmosferico e cambiamenti climatici sono alcuni tra i temi maggiormente discussi negli ultimi anni. Il legame che sussiste tra di essi è tuttora oggetto di dibattito poiché, trattandosi di fenomeni di una certa complessità, non è possibile ottenere una relazione

lineare che lega entrambi (EEA, 2013). Gli esperti delle più grandi agenzie ambientali e governative del mondo sottolineano come il legame esista e di come esso sia forte, ribadendo l'esistenza di una corrispondenza reciproca tra inquinamento e cambiamento climatico (EEA, 2013). Variazioni delle condizioni meteorologiche causate dai cambiamenti climatici alterano i meccanismi principali del particolato aerodisperso quali il trasporto, la dispersione, la deposizione, la formazione di nuovi inquinanti in atmosfera e la ricaduta al suolo (EEA, 2013). Viceversa, l'aumento di particolato e altri inquinanti in atmosfera influenza fortemente il clima di una zona, oltre a rappresentare una delle concause principali di malattie al tratto respiratorio. Secondo una valutazione pubblicata dall'Agenzia europea dell'ambiente (EEA), gli ambienti di scarsa qualità contribuiscono al 13% dei decessi in Europa (EEA, 2012). Sono molteplici i fattori di pressione che influenzano l'emissione di inquinante in atmosfera. Uno dei principali è sicuramente la natura della sorgente, che può essere naturale o antropica. In tal senso diventano di fondamentale importanza gli inventari delle emissioni per la gestione delle emissioni antropiche. Tali inventari contengono informazioni quantitative sulla tipologia di inquinante introdotto in atmosfera e sono un importantissimo punto di partenza per l'esecuzione di metodologie di calcolo e per la modellistica (art. 22 D.lgs. 155/2010). In Italia l'inventario delle emissioni è stato realizzato da ISPRA e rappresenta il principale strumento per verificare che le emissioni siano in linea con gli obiettivi prefissati in ambito internazionale, ovvero raggiungere livelli di qualità dell'aria che non comportino rischi non accettabili per la salute umana e per l'ambiente (Direttiva (UE) 2016/2284 che modifica la direttiva 2003/35/CE e abroga la direttiva 2001/81/CE). A tal proposito, nel prossimo capitolo si vedrà quali sono le principali normative atte a limitare le emissioni di inquinante in atmosfera.

Altri importanti fattori di influenza dell'inquinamento sono le caratteristiche geomorfologiche del territorio, che influenzano il modo con cui le masse di inquinante si espandono, e naturalmente, le condizioni meteorologiche sitospecifiche (ARPA, 2017).

Così come i fattori di influenza, anche gli effetti dell'inquinamento sono molteplici. Uno degli effetti più critici riguarda sicuramente i danni che esso provoca sulla salute dell'uomo, in particolar modo alle vie respiratorie. Altri settori che risentono di questo fenomeno sono l'ambiente, l'agricoltura, l'economia e il clima (EEA, 2015).

Oltre a quelli già visti, un altro fattore che influenza fortemente l'inquinamento atmosferico è la natura sia fisica che chimica dell'inquinante stesso. Si tratta di caratteristiche che variano da inquinante ad inquinante. In questo lavoro verrà trattato principalmente il particolato aerodisperso, tuttavia sarà necessario far menzione anche di altri inquinanti principali come

gli ossidi di zolfo (SO_x), gli ossidi di azoto (NO_x), il monossido di carbonio (CO), l'ozono (O₃), il benzene (C₆H₆), gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA), gli elementi in traccia (As, Cd, Ni) e il piombo (Pb). Si tratta per lo più di molecole in forma gassosa, fatta eccezione proprio per il particolato che è un aerosol di particelle solide.

Sia i composti particellari che quelli gassosi vengono definiti dagli esperti del settore "forzanti climatiche". Questo termine viene utilizzato per descrivere l'attitudine che tali sostanze possiedono nell'influenzare la quantità di energia solare che la Terra riesce ad immagazzinare, così come quella che riesce a riflettere verso lo spazio.

Come detto, nel seguente lavoro ci si soffermerà appunto sullo studio del particolato, sostanza complessa, le cui caratteristiche verranno approfondite nel capitolo **Il particolato aerodisperso (2.3.)**. A seconda delle sue molteplici caratteristiche, l'azione che esso svolge sul clima globale o locale varia, passando da un effetto di raffreddamento ad uno di riscaldamento. Nel primo caso si può pensare ai composti di azoto o zolfo ("particelle bianche"), che grazie alle loro proprietà chimico-fisiche fungono da specchio riflettendo la radiazione solare verso l'esterno, diminuendo quella che riesce effettivamente a giungere sulla superficie terrestre. Nel secondo caso, invece, si può far riferimento al nerofumo ("particelle nere") che è in grado di assorbire le radiazioni solari e infrarosse producendo un effetto di riscaldamento (EEA, 2013). Inoltre, il nerofumo, così come tutti i particolati più fini, possiede la capacità di essere trasportato per lunghe distanze, riuscendo a restare sospeso in aria per lungo tempo. Negli ultimi anni sono stati ritrovati depositi di nerofumo anche nell'Artico. Gli effetti di tale sostanza su di un ecosistema così delicato sono disastrosi, provocando una riduzione dell'albedo a causa dell'annerimento delle superfici bianche. Ciò provoca un incremento nel quantitativo di calore immagazzinato dalla superficie terrestre, producendo l'inevitabile scioglimento dei ghiacciai (EEA, 2013).

Alcuni studi dimostrano infatti come la variazione di alcuni elementi, presenti in maniera non così rilevante, siano in realtà predominanti nell'influenzare e alterare il clima.

La relazione dell'AEA "Cambiamento climatico, impatti e vulnerabilità in Europa al 2012" mostra come il cambiamento climatico agisca indistintamente su tutte le regioni Europee, provocando danni su ampia scala a tutti gli aspetti della società moderna.

2.1. Inquadramento normativo

In Italia dal punto di vista normativo, in merito alla qualità dell'aria, si fa riferimento al D.lgs. 155/2010 che ha abrogato il D.lgs. 351/1999 e i rispettivi decreti attuativi. Il seguente decreto contiene le definizioni di diversi valori, soglie, livelli critici e obiettivi a lungo termine. Inoltre, individua ed elenca tutti gli inquinanti per i quali è obbligatorio il monitoraggio (NO₂, NO_x, SO₂, CO, O₃, PM₁₀, PM_{2.5}, Benzene, Benzo(a)pirene, Piombo, Arsenico, Cadmio, Nichel, Mercurio, precursori dell'ozono), stabilendo, inoltre, le modalità di comunicazione e i contenuti sullo stato di qualità dell'aria, da trasmettere al Ministero dell'ambiente.

Con il D.lgs. 155/2010 sono stati introdotti dei valori limite riguardanti sia PM_{2.5} che PM₁₀. L'obiettivo è ovviamente quello di salvaguardare la salute umana, data l'evidente correlazione tra elevate concentrazioni di particolato e l'insorgere di malattie al tratto respiratorio. La normativa vigente fissa il valore limite annuale per il PM_{2.5} a 25 µg/m³. Tale valore non rappresentava solo un limite, bensì un obiettivo da raggiungere entro il 1° gennaio 2015. Per quanto riguarda invece il PM₁₀, la direttiva 2008/50/CE e il D.lgs. 155/2010 fissano un valore limite annuale di 40 µg/m³ e un valore limite giornaliero di 50 µg/m³. Tale valore non dovrà essere superato per più di 35 volte in un anno.

I rapporti dell'ISPRA e del Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente mostrano i superamenti rispetto al valore limite annuale. Si tratta naturalmente di una media sull'intero anno.

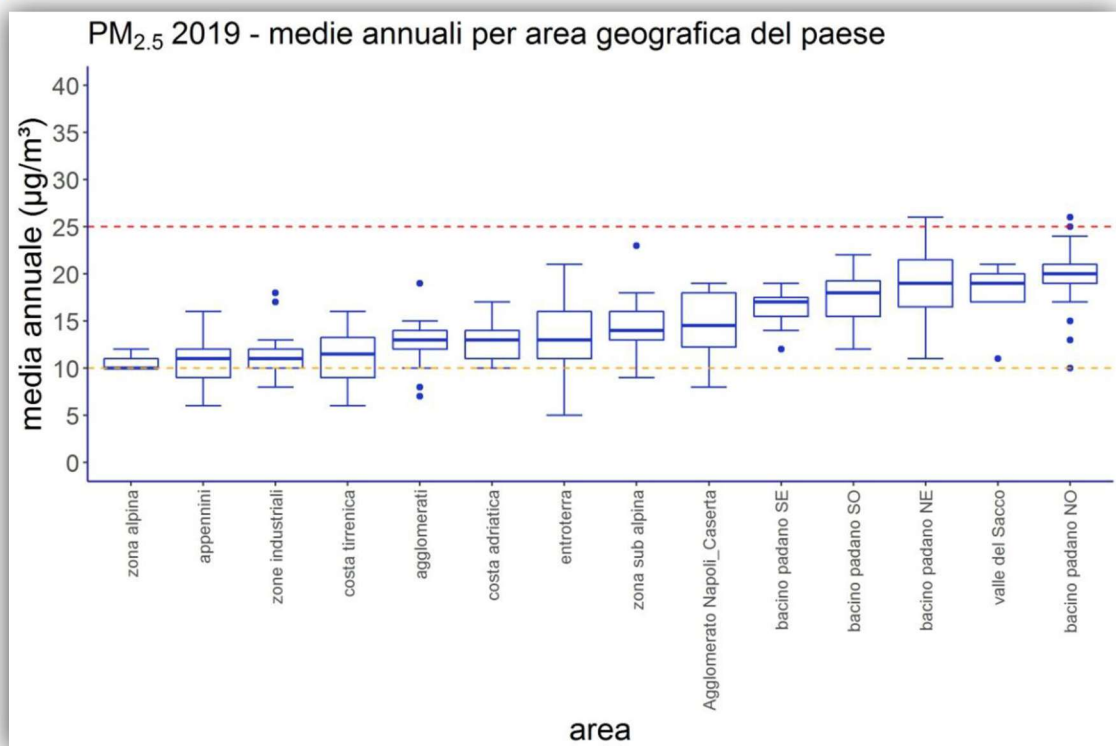


Figura : distribuzione delle medie annuali di PM_{2.5} per zona geografica (report di sistema SNPA | 17 2020)

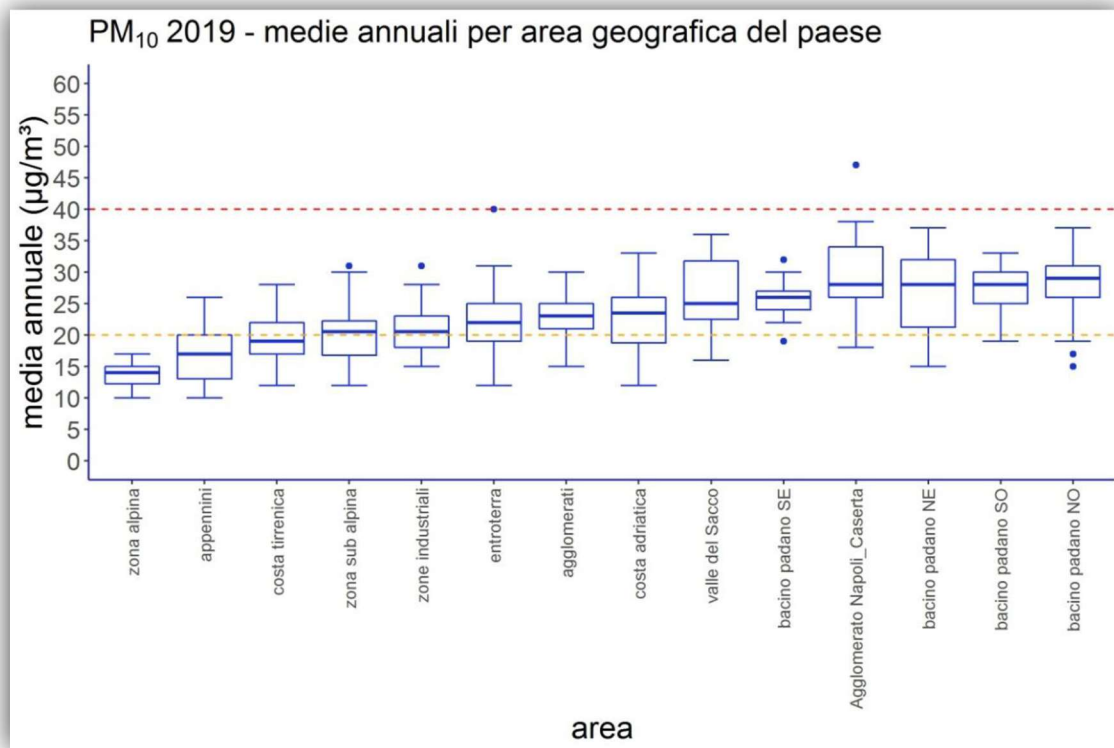


Figura : distribuzione delle medie annuali di PM10 per zona geografica (estratto dal report di sistema SNPA | 17 2020)

Dal rapporto “la qualità dell’aria in Italia” prodotto dal SNPA nel 2020 si possono ottenere tante informazioni relative ai punti di campionamento presenti sul territorio, oltre che ai valori medi misurati durante l’anno. Inoltre, è importante capire quanti sono i giorni in cui si verifica un superamento dei valori limite. Dalle due figure riportate in precedenza, così come dalle valutazioni presenti nel rapporto si può notare come il bacino padano sia la zona caratterizzata dalle concentrazioni di particolato maggiori. Anche dal rapporto dell’ISPRA del 2016 si può osservare come le uniche zone in cui il valore medio annuale di PM2.5 viene superato sono in Lombardia (Milano, Bergamo, Brescia, Cremona), in Veneto (Padova e Venezia) e a Terni. Per quanto riguarda invece il PM10, se si fa riferimento al I semestre del 2017, si può osservare come le zone più critiche sono sempre quelle del Nord Italia, con superamenti della soglia di $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per più di 35 giorni in un anno.

Inoltre, tali superamenti non si sono verificati per un periodo limitato, ma in maniera continuativa, dal 2008 al 2017. A tal proposito, la Corte di Giustizia dell’Unione Europea, con la sentenza del 10 novembre 2020 ritiene che l’Italia abbia violato la direttiva 2008/50. All’Italia è stato imputato il fatto di non aver adottato le misure necessarie per il rispetto dei valori limite.

Ritornando a parlare del d.lgs. 155/2010, nel seguente decreto la valutazione della qualità

dell'aria viene predisposta seguendo il principio della zonizzazione. Tale principio prevede la suddivisione del territorio italiano in agglomerati e successivamente in zone. Questa procedura è a carico delle Regioni e delle Provincie autonome. Gli enti incaricati non hanno solo il compito di studiare le caratteristiche del territorio, ma anche quelle dei singoli inquinanti presenti. Altro capitolo fondamentale riguarda le modalità di misurazione. Si tratta delle tecniche di classificazione delle diverse tipologie di inquinanti, integrate alla modellistica o ad altre misure indicative. Come per la zonizzazione, anche questa fase è a carico delle Regioni e delle Provincie autonome. Spesso l'installazione di stazioni di misura rientra all'interno di procedimenti autorizzativi nell'ambito della messa in funzione di impianti che rilasciano emissioni.

Un altro punto chiave del 155/2010 è il piano d'azione. Si tratta dell'insieme delle procedure e delle misure che l'ente deve elaborare prima ed attuare poi nel caso in cui ci sia il superamento dei limiti imposti. Le azioni principali che tali piani comprendono sono:

- Limitazione del traffico veicolare;
- Limitazione nell'utilizzo dei combustibili;
- Misure specifiche per la tutela della popolazione.

Inoltre nei piani d'azione vengono ripresi i valori limite di emissione e le prescrizioni già introdotte con la parte V del D.lgs. 152/2006.

Di fatti, per quanto concerne le emissioni, la norma quadro in materia di prevenzione e limitazione delle emissioni in atmosfera è costituita dal D.lgs. 152/2006 parte V ("Norme in materia di tutela dell'aria e di riduzione delle emissioni in atmosfera"). La seguente parte si occupa di prevenzione e limitazione dell'inquinamento atmosferico, applicandosi agli impianti e alle attività che producono emissioni in atmosfera, stabilendo i valori di emissione, le prescrizioni, i metodi di campionamento e di analisi e i criteri per la valutazione della conformità.

Il primo titolo si occupa di dare le disposizioni di carattere generale, le modalità di individuazione dei limiti emissivi e anche dell'aspetto sanzionatorio della questione. Il secondo titolo invece disciplina gli impianti termici civili con potenza nominale inferiore a 3MW. Il titolo III invece disciplina i combustibili controllandone le condizioni di utilizzo.

Uno dei principi fondamentali di suddetta parte, introdotto con l'articolo 269, è il principio per il quale tutti gli stabilimenti che producono emissioni devono essere previamente autorizzati. Tale autorizzazione viene rilasciata per l'impianto in generale e non tiene conto del singolo componente. Gli elementi che vengono presi in considerazione per il rilascio

dell'autorizzazione sono molteplici:

- L'impiego delle migliori tecnologie disponibili (BAT);
- Tutte le emissioni provenienti dagli impianti o da altre fonti;
- La qualità dell'aria nella zona interessata.

In correlazione all'articolo 269, è necessario menzionare anche l'articolo 272. Tale articolo esclude dal processo di autorizzazione tutti quegli impianti ed attività le cui emissioni sono debolmente impattanti sugli effetti dell'inquinamento atmosferico.

Con l'entrata in vigore di più recenti decreti (D. lgs. 183/2018 e D.lgs. 102/2020), la parte V del testo unico ambientale ha subito importanti modifiche.

2.2. Inquinamento Atmosferico

Dopo aver inquadrato il problema da un punto di vista sia generale che normativo, viene approfondita meglio quella che è la conseguenza principale della presenza di inquinante in atmosfera. La tipologia di inquinamento atmosferico è strettamente correlata all'agente chimico e alla fonte da cui esso proviene. In tal senso si possono distinguere tre diversi tipologie, a seconda del tipo di inquinamento:

- Inquinamento fisico come il suono, l'odore o l'inquinamento termico;
- Inquinamento chimico come l'ozono, il particolato e gli ossidi (azoto e zolfo);
- Inquinamento biologico come pollini e microrganismi.

Naturalmente in questo lavoro ci si è focalizzati solamente sulla seconda tipologia, ovvero l'inquinamento chimico, ed in particolare sul particolato aerodisperso.

È importante vedere quali sono i processi che l'inquinante subisce in atmosfera:

- Emissione: si tratta della fase in cui l'inquinante dalla sorgente viene emesso in atmosfera o della fase in cui l'inquinante naturale viene generato (sabbia del deserto, spray marino, etc.).
- Trasporto: in questa fase l'inquinante viene trasportato in luoghi diversi. In base alle caratteristiche della sostanza cambiano la distanza e il tempo di permanenza in atmosfera.
- Scambio: si tratta della fase in cui i diversi inquinanti presenti in atmosfera interagiscono tra di loro a causa delle proprie caratteristiche di reattività chimica.

- Distribuzione: in questa fase gli inquinanti si distribuiscono nell'aria.
- Immissione: gli inquinanti si stabilizzano in una certa zona.
- Deposito: ultima fase in cui si ha una decrescita della concentrazione di inquinante in atmosfera a causa della deposizione di quest'ultimo al suolo o su altre superfici.

Nel capitolo introduttivo sono stati esposti brevemente quelli che sono i molteplici effetti dell'inquinamento. Partendo da quelli sull'ambiente è necessario citare effetto serra e piogge acide. Altri effetti sull'ambiente sono l'eutrofizzazione, lo smog e il buco dell'ozono.

L'effetto serra di per sé non costituisce una criticità per l'ambiente, anzi rappresenta un fenomeno fondamentale per la presenza di vita sulla terra. Tale effetto è il risultato della capacità che certi costituenti dell'atmosfera possiedono nel filtrare le radiazioni solari più nocive e ostacolare la fuoriuscita di un certo spettro di radiazioni riflesse dalla terra. Questo non fa altro che incrementare la quantità di energia che rimane intrappolata all'interno dell'atmosfera, accrescendo la temperatura. Tuttavia, l'aumento di concentrazione dei cosiddetti gas serra produce un incremento anomalo nelle temperature, causando una notevole alterazione del clima (F W Taylor 1991).

La pioggia acida o deposizione acida, invece, è il risultato dell'emissione in atmosfera di depositi acidi a causa della combustione di combustibili fossili. I principali protagonisti di questo fenomeno sono gli ossidi di azoto e di zolfo che nel momento in cui entrano in contatto con l'acqua presente in atmosfera reagiscono, trasformandosi in acido solforico e acido nitrico. Tali agenti a seguito delle precipitazioni vanno a colpire gli elementi presenti al suolo come le acque superficiali, i terreni e le piante compromettendone la salute (EEA, 2016).

Se si pensa invece all'aspetto economico, l'inquinamento atmosferico ha prodotto un danno alla società compreso tra i 277 e i 433 miliardi di euro nel solo 2017, in accordo con le stime effettuate dall'EEA (EEA, 2021). Tali danni sono da imputare principalmente al calo nella produttività e al degrado della qualità della vita.

2.3. Particolato Atmosferico

Con il termine particolato ci si riferisce ad una miscela di sostanze allo stato liquido o solido sospese in aria. Si tratta di una miscela complessa, la cui dimensione delle particelle costituenti varia da pochi nanometri fino a 100 micron. Trattandosi di un elemento così eterogeneo non è facile capire quali fattori, sia fisici che chimici, ne influenzino le proprietà. Si può dire per certo che esse sono influenzate dall'origine, che può essere sia di tipo naturale che di tipo antropico. Quando si parla di proprietà, non ci si riferisce solamente alla forma o alle dimensioni, bensì anche alla composizione chimica e alla distribuzione a livello dimensionale. Il particolato è stato classificato come carcinogeno dall'Agenzia internazionale per la ricerca sul cancro (IARC) e dall'organizzazione mondiale della sanità (OMS). Tale classificazione definisce il particolato come sostanza in grado di causare tumori o favorirne l'insorgenza.

Classificazione

Non esiste una classificazione univoca quando si parla di particolato, bensì diverse metodologie legate alle sue molteplici caratteristiche. In primis, si possono distinguere particolato primario e particolato secondario:

- Primario: comprende tutte quelle particelle, sia fini che grossolane, emesse direttamente in atmosfera, provenienti da processi meccanici erosivi, dilavamento, rottura di particelle grossolane, processi di evaporazione dello spray marino, combustioni.
- Secondario: si tratta di quelle particelle, aventi in genere dimensioni inferiori al micron, prodotte da processi di conversione chimico-fisica di gas precursori. Nella formazione di questo particolato è di fondamentale importanza la presenza di vapore acqueo e delle radiazioni solari. Il particolato secondario, infatti, si forma attraverso processi di condensazione di sostanze con bassa tensione di vapore, formati a sua volta attraverso processi di evaporazione ad alte temperature o attraverso altre reazioni chimiche.

Oltre a questa prima classificazione duale, ne esistono altre basate principalmente sulla dimensione delle particelle costituenti la miscela. Data la forma irregolare di suddette particelle, per semplificare il processo si fa riferimento ad un diametro aerodinamico equivalente, ovvero il diametro di una particella sferica con densità unitaria pari a 1000

Kg/m^3 avente una velocità di sedimentazione pari a quella della particella interessata.

Facendo una prima distinzione si può classificare il particolato in particolato grossolano, nel caso di un campione con particelle avente un diametro aerodinamico maggiore di 2.5 micron, e in particolato fine, nel caso di un diametro aerodinamico minore di 2.5 micron.

Più comunemente, per indicare il particolato e le relative dimensioni si utilizza la sigla PM seguita dal diametro equivalente. Facendo ulteriori distinzioni si possono introdurre le seguenti classi:

- PM2.5: particolato composto da particelle con diametro aerodinamico minore di 2.5 micron;
- PM10: particolato composto da particelle con diametro aerodinamico minore di 10 micron.

Oltre queste due classi, che rappresentano le due principali, si può far riferimento con la stessa dicitura al particolato ultrafine, frazione particolarmente critica, in quanto è in grado di penetrare profondamente nei polmoni. Si possono distinguere:

- PM0.001: particolato composto da particelle con diametro aerodinamico dell'ordine dei nanometri;
- PM0.1: particolato composto da particelle con diametro aerodinamico minore di 0.1 micron;
- PM1: particolato composto da particelle con diametro aerodinamico minore di 1 micron.

Inoltre, è possibile definire con la dicitura PM10-2.5 la frazione di PM10 senza la frazione del PM2.5.

Esistono altre classificazioni basate su elementi come il meccanismo di formazione (classificazione di Hinds) o la natura delle particelle (polveri, aerosol, esalazioni, nebbia, fumo, foschie, sabbie) (Seinfeld & Pandis, Atmospheric Chemistry and Physics).

Le particelle fini, a differenza delle grossolane, vengono trasportate anche a grandi distanze rispetto al punto di emissione. Possiedono, inoltre, lunghi tempi di permanenza in atmosfera. Un'altra caratteristica che aumenta la criticità del particolato fine è la capacità di veicolare sulla superficie di altri inquinanti come metalli pesanti e idrocarburi.

Composizione chimica

Per quanto concerne la composizione chimica delle particelle fini, è possibile individuare diverse componenti principali che includono solfati, nitrati, ammonio, carbonio elementare, carbonio organico, silicio e ioni sodio. Per quanto riguarda, invece, il particolato grossolano, le componenti principali sono nitrati, materiali cristallini come il calcare o la silice, metalli, frammenti di vegetazione e sostanze organiche. In generale, la composizione chimica varia molto in funzione della provenienza del particolato. Infatti, nel caso in cui il particolato provenga da una sorgente naturale piuttosto che da una antropica, esso sarà più ricco di materiali cristallini, ossidi di ferro e di alluminio e composti in cui è presente il silicio. Prodotti di combustione quali idrocarburi e metalli pesanti caratterizzano, invece, il particolato proveniente da origine antropica come traffico veicolare o fabbriche (Seinfeld & Pandis, Atmospheric Chemistry and Physics).

Origine del particolato

In questo paragrafo verranno elencati quelli che sono i principali fenomeni legati alla formazione di particolato. Si è visto come l'origine possa essere di tipo naturale o di tipo antropica e come questa incida fortemente sulla composizione chimica. Entrando più nel dettaglio, le fonti di tipo naturale principali sono:

- Eruzioni vulcaniche;
- Erosione del suolo;
- Incendi;
- Vento e trasporto di sale marino e di sabbia dal deserto;
- Microorganismi, spore e pollini (polline di origine vegetale può essere una componente del particolato).

Per quanto riguarda, invece, le principali fonti antropogeniche, se si osservano le statistiche in Europa del 2008, i processi di combustione negli usi energetici commerciali, istituzionali e domestici rappresentano il 35% delle emissioni, seguiti dai processi industriali, il trasporto su strada e l'agricoltura (SNPA, 2020)

È possibile fare una distinzione anche sull'origine di particolato primario e particolato secondario. Per quanto riguarda il particolato primario le sorgenti principali sono: le attività costruttive, le attività agricole, i pollini, le muffe, le piante e gli insetti. Inoltre, attività legate all'uso delle abitazioni come il riscaldamento domestico o ad altre attività quotidiane come l'uso delle automobili (funzionamento di motori diesel, erosione della superficie stradale,

degli pneumatici e dei freni) rappresentano anch'esse importanti fonti di particolato primario (ISPRA, 2011). Discorso diverso per il particolato secondario, che, come detto in precedenza si genera dalla conversione di gas. Per definire le sorgenti è possibile utilizzare come riferimenti il documento "Strategic Workplan for Particulate Matter Research: 2000 to 2004", redatto dall'U.S Department of Transportation (USDOT) e le linee guida sulla qualità dell'aria emesse dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO). Entrambi i documenti indicano come sorgenti del particolato secondario il carbonio organico ed elementare, i solfati, i nitrati, i metalli pesanti e l'ammoniaca.

Distribuzione dimensionale delle particelle

L'analisi di come le particelle atmosferiche si distribuiscono in numero e in volume rispetto alle dimensioni del loro diametro rappresenta uno strumento preliminare molto importante nel comprendere i meccanismi di formazione e rimozione del particolato atmosferico.

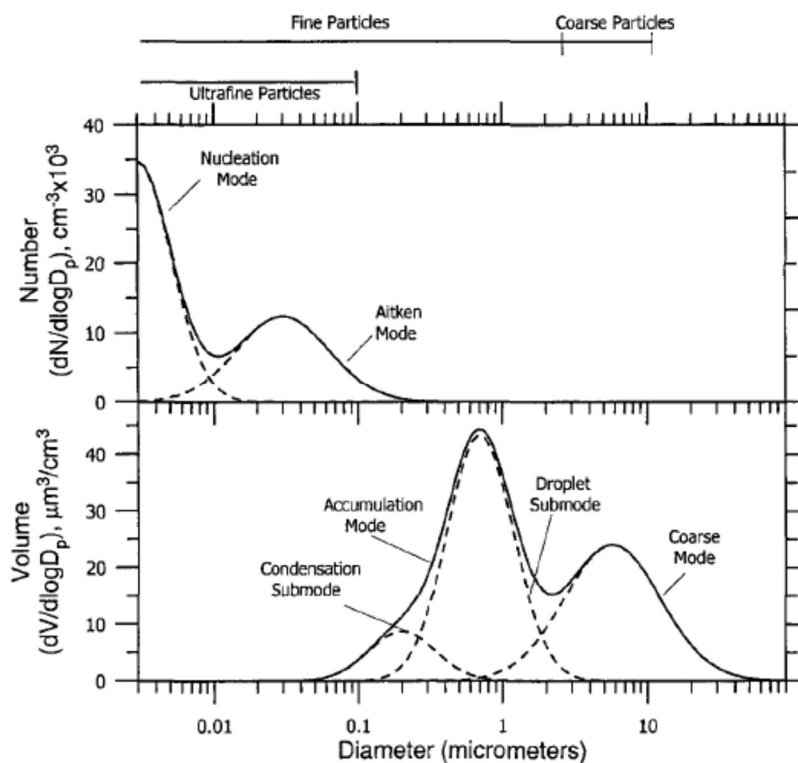


Figura : distribuzioni in numero (sopra) ed in volume (sotto) (estratta da "**Atmospheric chemistry and physics**" Seinfeld-Pandis)

Da un primo sguardo al grafico, si può notare come le particelle con diametro inferiore a 0.01 micron siano quelle predominanti dal punto di vista del numero. Tuttavia, spostandoci sul grafico che fa riferimento al volume, non si ha nessun contributo da parte di queste particelle, a differenza di quelle con dimensioni comprese tra 0.1 e 10 micron.

In una tipica atmosfera di tipo urbano, il particolato aerodisperso mostra una distribuzione

dimensionale a quattro mode:

- Moda di nucleazione (Nucleation mode): interessa un range dimensionale che va da 0.005 a 0.01 micron. Comprende la maggior parte delle particelle, che però a causa della loro ridotta dimensione, non influenzano più di tanto la massa totale del particolato. I processi di formazione per quanto riguarda questa classe di particelle sono i cosiddetti processi di nucleazione.
- Moda di Aitken (Aitken mode): interessa un range dimensionale che va da 0.01 a 0.1 micron. Così come la moda di nucleazione, le particelle comprese in questo range sono rilevanti solo dal punto di vista numerico. I tempi di residenza che possiedono queste particelle sono in genere limitate (ordine dell'ora per atmosfere pulite e meno di un'ora per quelle inquinate). I tempi sono brevi poiché esse sono interessate da processi di coagulazione e condensazione che le porta a formare aggregati più grandi. Quindi, così come per la moda di nucleazione, queste particelle sono osservabili solo in prossimità delle loro sorgenti.
- Moda di Accumulazione (Accumulation mode): interessa un range dimensionale che va da 0.1 a 2.5 micron. Si tratta proprio di quelle particelle ottenute dai processi di coagulazione e aggregazione di particelle più fini oppure mediante condensazione di vapori su particelle esistenti o dalla disgregazione di particelle più grandi. Essendo per lo più degli aggregati di particelle più fini, i meccanismi di rimozione sono meno efficaci. Di conseguenza i tempi di permanenza in atmosfera sono più lunghi.
- Moda Grossolana (Coarse mode): copre tutte le dimensioni maggiori a 2.5 micron. Si tratta di tutte quelle particelle formate in seguito a processi meccanici quali processi erosivi, attriti o risospensione di polveri, pollini e sale marino.

Meccanismi di formazione del particolato

Partendo dalle dimensioni più piccole è doveroso introdurre quali sono i meccanismi di formazione principale per il particolato. Come la prima moda può suggerire, il primo importante processo di formazione è la nucleazione. La nucleazione è un processo attraverso il quale un certo numero di molecole di vapore si aggregano formando un agglomerato. Da questo processo si vengono così a formare nuove particelle in atmosfera. È possibile fare due diverse distinzioni per inquadrare meglio il fenomeno. La prima:

- Nucleazione omomolecolare: il processo interessa solo una singola specie chimica di particelle.

- Nucleazione eteromolecolare: il processo interessa più specie chimiche.

La seconda:

- Nucleazione omogenea: il processo avviene in assenza di superfici o qualsiasi materiale estraneo.
- Nucleazione eterogenea: il processo avviene in presenza di superfici o qualsiasi materiale estraneo.

Il secondo importante meccanismo di formazione è la condensazione. Si tratta di un processo di crescita del particolato atmosferico, caratterizzato da una prima fase in cui si instaura un equilibrio tra aerosol e fase gassosa. Durante questa fase la molecola gassosa subisce un fenomeno di diffusione verso la superficie della particella. Dopo questa fase, la superficie della particella cattura definitivamente la molecola gassosa, accrescendo così il proprio volume. In realtà questi fenomeni di accrescimento non vengono sempre descritti con il termine condensazione. Esso, infatti, viene utilizzato solamente nel caso in cui la superficie della particella sia secca. Al contrario, nel caso in cui la particella sia rivestita da un film acquoso, si parlerà più correttamente di dissoluzione.

Infine, il terzo meccanismo è la coagulazione. Si tratta della formazione di nuove particelle a seguito del contatto tra particelle già presenti in atmosfere che collidono a seguito del moto Browniano e alla turbolenza che le contraddistingue. Così facendo, il numero delle particelle diminuisce in numero, accrescendo tuttavia il loro volume.

Meccanismi di rimozione del particolato

Gli inquinanti presenti in atmosfera non sono soggetti solamente a fenomeni di formazione, ma anche a meccanismi di rimozione o deposizione. La deposizione al suolo del particolato o più in generale di tutti gli inquinanti atmosferici rappresenta uno dei più importanti meccanismi di salvaguardia di cui l'atmosfera dispone. Oltre alla deposizione, anche l'innescio di reazioni chimiche dovute alla presenza di reagenti può portare alla rimozione di inquinanti dall'atmosfera.

Per quanto riguarda il particolato, a differenza degli altri inquinanti atmosferici, si ha un vero e proprio deposito al suolo. Tuttavia bisogna far attenzione poiché il processo di impoverimento di inquinante in aria non comporta solamente aspetti positivi. Se si pensa a tutte le reazioni che si innescano una volta che il particolato raggiunge il suolo, ci sarà un fenomeno di impoverimento che interesserà tutti gli elementi presenti come la vegetazione o

i bacini d'acqua.

Deposizione secca

È possibile distinguere tra due tipologie di deposizione. La prima viene conosciuta con il nome di deposizione secca. Si tratta del fenomeno di rimozione di inquinante in assenza di precipitazioni. Interessa tutti i processi che in assenza di acqua generano un flusso negativo (verso il basso e non nullo) di inquinante. Gli elementi fondamentali che caratterizzano il processo sono la turbolenza, le proprietà dell'inquinante e la natura della superficie.

Essa si articola in tre fasi distinte:

- Stadio aerodinamico: si tratta del trasporto di inquinante in prossimità della superficie terrestre. Il motore di questo spostamento è la turbolenza atmosferica. Si tratta di uno stadio non correlato con la natura e le proprietà dell'inquinante, dipendente solo dalla turbolenza.
- Stadio superficiale o trasporto browniano: si tratta della diffusione dell'inquinante all'interno del quasi-laminar sublayer, ovvero lo strato avente spessore circa 1 mm che avvolge l'interfaccia tra aria e suolo. Viene detto trasporto browniano poiché nel particolato non è più la turbolenza a caratterizzarne la diffusione, bensì i movimenti di natura Browniana.
- Stadio di trasferimento superficiale o assorbimento della superficie: si tratta dello stadio in cui la propagazione dell'inquinante è influenzata dalla natura dell'inquinante stesso e dalle caratteristiche e proprietà del suolo.

Bisogna dire che i meccanismi di deposizione secca sono profondamente diversi per quanto riguarda inquinanti gassosi e particelle solide, quali il particolato. In questo lavoro verranno approfonditi solamente i concetti fondamentali riguardanti quest'ultimo. Per le particelle solide, il fenomeno di deposizione secca è fortemente influenzato, così come anche altre proprietà dello stesso, dalla dimensione delle particelle e dalla loro densità. La principale differenza con gli inquinanti gassosi è dettata dal fatto che la turbolenza viene amplificata dall'azione della forza gravitazionale.

Nello studio del fenomeno, un parametro di fondamentale rilievo sarà la velocità di sedimentazione o deposizione v_s . Si tratta della velocità di caduta di un particella all'interno di un gas come l'aria per il solo effetto della gravità. Tale parametro varia in funzione delle dimensioni delle particelle e della loro densità.

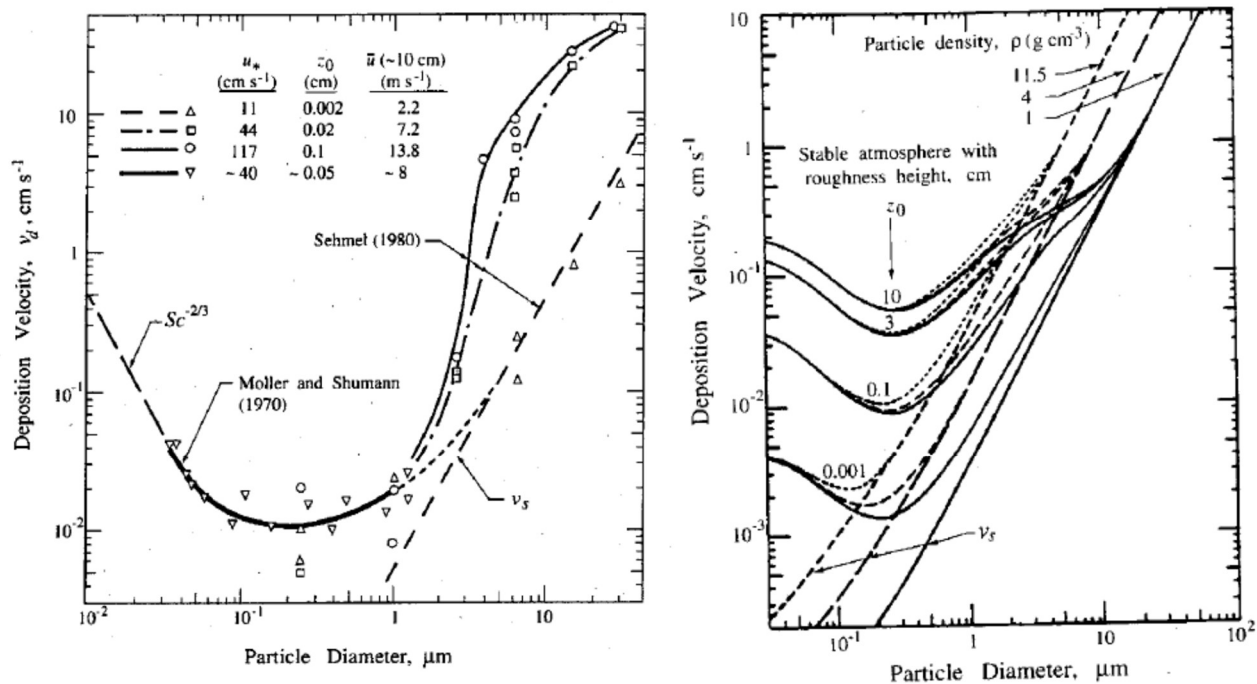


Figura : velocità di deposizione in funzione del diametro delle particelle (estratta da “Atmospheric chemistry and physics” Seinfeld-Pandis)

Come si evince dai grafici, si può notare nei trend della velocità di deposizione che il minimo, indipendentemente dalla densità, cade all'interno di un range che va da 0.1 a 1 micron. Questo non fa altro che rimarcare il fatto che le particelle di piccola dimensione hanno un comportamento molto simile ai gas. In questo intervallo sarà la diffusione Browniana la causa degli spostamenti delle particelle, la cui efficacia decresce all'aumentare delle dimensioni di esse. Invece, per le particelle con diametro superiore a 2 micron sarà la gravità ad influenzare il moto, sia direttamente che indirettamente, rendendo la deposizione secca un fenomeno preponderante per particelle di tali dimensioni. Al contrario, le particelle con dimensioni inferiori, con diametro compreso tra 0.05 e 2 micron, non risentendo della forza di gravità, non vengono influenzate molto dalla deposizione secca.

Un modo molto intelligente, ma comunque esaustivo, per studiare la deposizione secca è utilizzando una similitudine elettrica, attraverso le seguenti ipotesi (Seinfeld e Pandis, 1998, Slinn e Slinn 1980; Pleim et al. 1984):

- Resistenza superficiale nulla;
- Azione della resistenza aerodinamica e della resistenza alla deposizione secca all'interno del quasi-laminar sublayer in parallelo alla velocità di deposizione.

Si può quindi definire il flusso di inquinante, che, come detto in precedenza sarà negativo,

ovvero diretto verso il basso, attraverso la seguente equazione:

$$F_d = -v_d C_3$$

Dove:

- v_d : termine contenente la velocità di deposizione, la resistenza aerodinamica e la resistenza alla deposizione secca;
- C_3 : concentrazione di inquinante solido.

Deposizione umida

Quando la rimozione delle particelle avviene sotto l'azione dell'acqua si parlerà invece di deposizione umida. L'argomento verrà trattato interamente nel capitolo **L'effetto della pioggia sul particolato (2.5.)**.

Effetti sulla salute

Come già detto in precedenza, il particolato è stato classificato come carcinogeno sia dall'IARC che dall'OMS. Questo perché le particelle di particolato sono in grado di adsorbire gas e vapori tossici sulle proprie superfici. Sono molti in letteratura gli studi che riportano correlazioni quanto più allarmanti tra esposizione acuta a particolato e problemi respiratori quali alterazioni nella funzionalità respiratoria e malattie del suddetto tratto (ISS, 2018). Non è trascurabile nemmeno l'esposizione cronica a basse concentrazioni, poiché anche in questo caso si nota una forte correlazione con l'incremento di tumore delle vie respiratorie. Infatti, l'esposizione cronica prolungata si configura come una delle principali concause allo sviluppo della seguente malattia (Ministero della Salute, 2015).

Riallacciandoci a quanto detto nel paragrafo relativo alla classificazione del particolato, anche in rapporto all'interazione tra di esso e l'organismo umano è possibile effettuare una suddivisione in classi, in funzione della pericolosità. La norma di riferimento che ha definito le seguenti classi è la EN 481:1994 "Atmosfera nell'ambiente di lavoro. Definizione delle frazioni granulometriche per la misurazione delle particelle aerodisperse". Le seguenti classi sono ordinate per pericolosità crescente:

- Frazione inalabile;
- Frazione extratoracica;
- Frazione toracica;
- Frazione tracheobronchiale;

- Frazione respirabile.

Appartengono a queste classi tutte quelle particelle aventi dimensioni inferiori a 20 micron. Tra i 20 e i 10 micron non si hanno grossi problemi poiché le particelle si depositano nel naso e nella parte superiore della trachea, venendo successivamente espulse senza riuscire a penetrare nelle vie più interne. È il caso delle prime due classi. Le ultime tre classi sono quelle che fanno riferimento a particelle con dimensioni inferiori a 10 micron, ovvero quelle particelle che si depositano per sedimentazione nelle regioni respiratorie con un'efficienza via via maggiore al diminuire delle dimensioni. Il range più preoccupante è quello che va da 0.5 a 5 micron.

2.4. Effetto del vento sulle concentrazioni di particolato

In precedenza sono stati introdotti alcuni dei principali elementi che influenzano la concentrazione di particolato in atmosfera come il numero e la natura delle sorgenti emissive, la composizione e la natura fisico-chimica del composto. Adesso invece verranno introdotti gli effetti dei fenomeni meteorologici, partendo da quelli del vento. Per quanto riguarda appunto questo fenomeno si può fare una distinzione tra fenomeni a scala locale e fenomeni a scala globale. A scala locale, la natura del vento è correlata a ciò che accade nello strato limite atmosferico o planetario (PBL), cioè quella parte di atmosfera strettamente condizionata dalla vicinanza alla superficie terrestre (Stull, 1998). A scala globale, invece, gli elementi che condizionano il fenomeno sono lo shear del vento (variazione delle caratteristiche del vento al variare della quota) e la turbolenza (legata alla presenza di aree cicloniche ed anticicloniche) (Zhang et al. 2020).

Parlando dell'interazione tra vento e particolato aerodisperso è possibile individuare due azioni fondamentali esercitate dal primo sul secondo. Si tratta di erosione e trasporto.

Nel primo caso, il vento partecipa all'incremento nella concentrazione di particolato in atmosfera poiché la sua azione erosiva strappa le particelle dal suolo immettendole in atmosfera. Tale azione è condizionata dalla dimensione delle particelle, dalla forza stessa del vento e dalla capacità intrinseca delle particelle di essere sollevate. Inoltre, se l'azione del vento agisce su di un terreno alterato come una duna di sabbia o un cantiere risulta certamente più efficace. In generale, il potere erosivo è più efficace nelle zone aride rispetto a quelle umide poiché nelle zone aride i venti sono più forti, mentre nelle zone umide, oltre alla presenza di venti meno impetuosi, acqua e vegetazione presenti nel suolo fanno da legante, ostacolando il sollevamento delle particelle.

Nel secondo caso, il vento funge da dispersore delle concentrazioni di particolato. Tale azione è più efficace per le particelle fini che grazie alle loro caratteristiche sono in grado di rimanere sospese per diverso tempo, anche giorni, venendo trasportate per lunghi tragitti.

Dall'analisi di queste due azioni appare chiaro come non sia così scontato il risultato dell'interazione tra vento e particolato poiché se è vero che il trasporto esercita un abbattimento sulle concentrazioni di particolato, il potere erosivo dal canto suo incrementa il numero di particelle in atmosfera.

Verranno qui di seguito riportati i risultati di alcuni studi presenti in letteratura per approfondire il rapporto tra caratteristiche del vento e concentrazione di particolato.

Partendo dal considerare la velocità del vento come discriminante, si è notato che per il PM_{2.5} o comunque più in generale per il particolato fine, si ha una continua diminuzione nella concentrazione all'aumentare della velocità del vento. Lo stesso non si può affermare per il particolato più grossolano come ad esempio il PM₁₀. Infatti, all'aumentare delle dimensioni delle particelle, si può notare come ci sia sempre una certa soglia di velocità oltre il quale si nota un incremento nella concentrazione (Zhang et al. 2018).

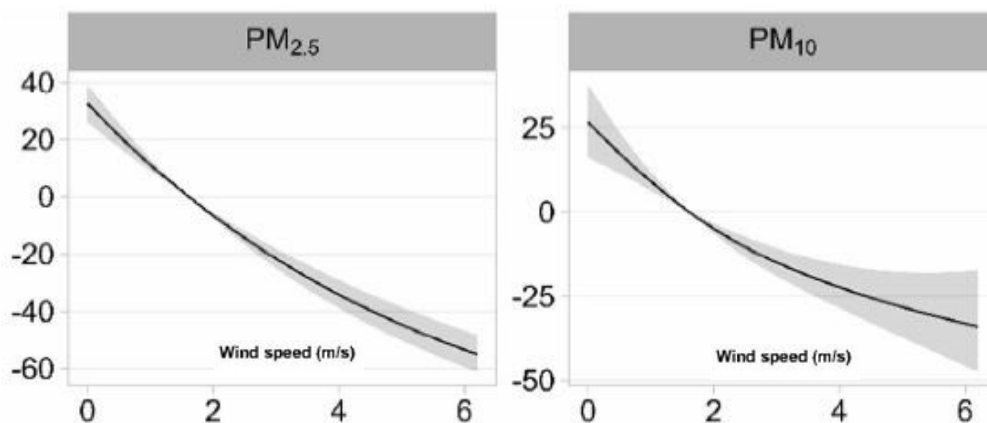


Figura estratta da Zhang 2018 "Influences of wind and precipitation on different-sized particulate matter concentrations (PM_{2.5}, PM₁₀, PM_{2.5-10})"

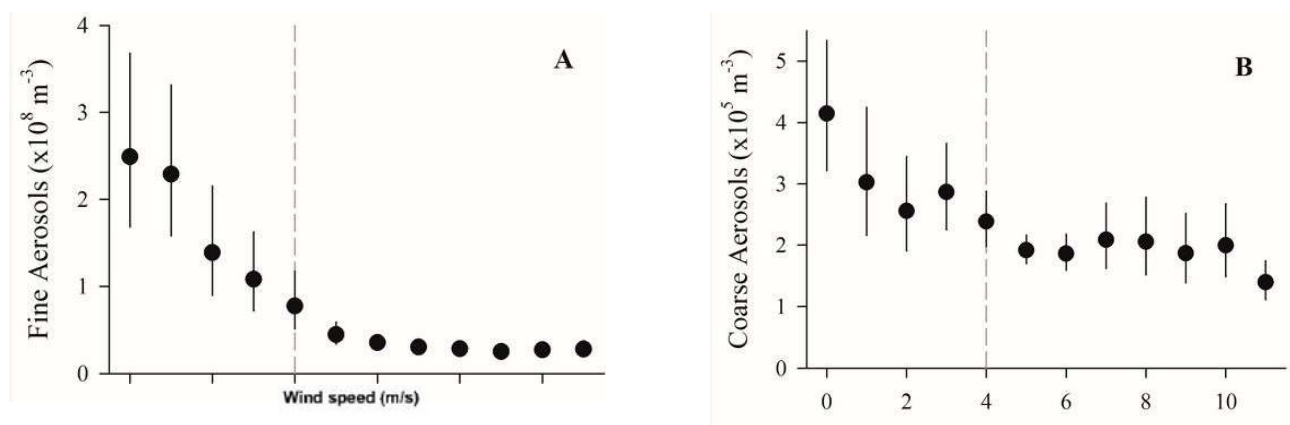


Figura estratta da "Onshore Wind Speed Modulates Microbial Aerosols along an Urban Waterfront"

Dai grafici estratti da questi due articoli si può osservare quanto detto prima. Per il PM_{2.5} e per l'aerosol fine la diminuzione di concentrazione è continua. Per il PM₁₀ e per l'aerosol grossolano si può notare un incremento per velocità maggiori a 7.5 m/s. Ciò sta a dimostrare come per velocità elevate il potere erosivo del vento diventi via via più efficace, portando ad una risospensione di particolato grossolano in atmosfera (Nicholson, 1988; Kassomenos et al., 2012).

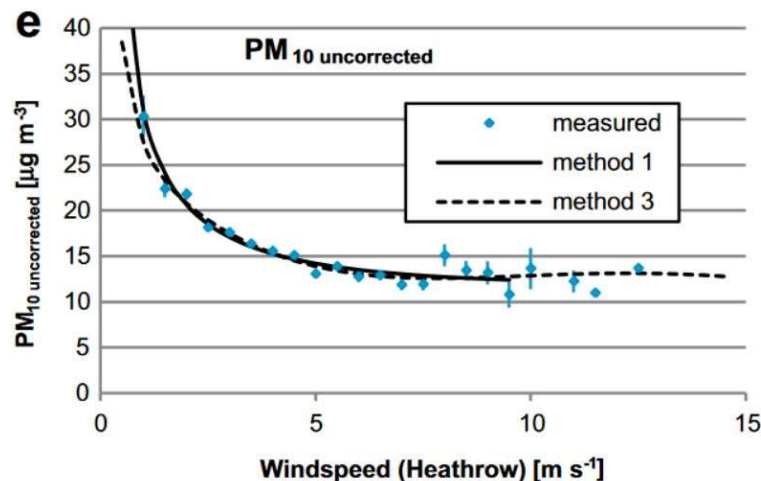


Figura estratta da “[The wind speed dependence of the concentrations of airborne particulate matter and NO_x](#)”

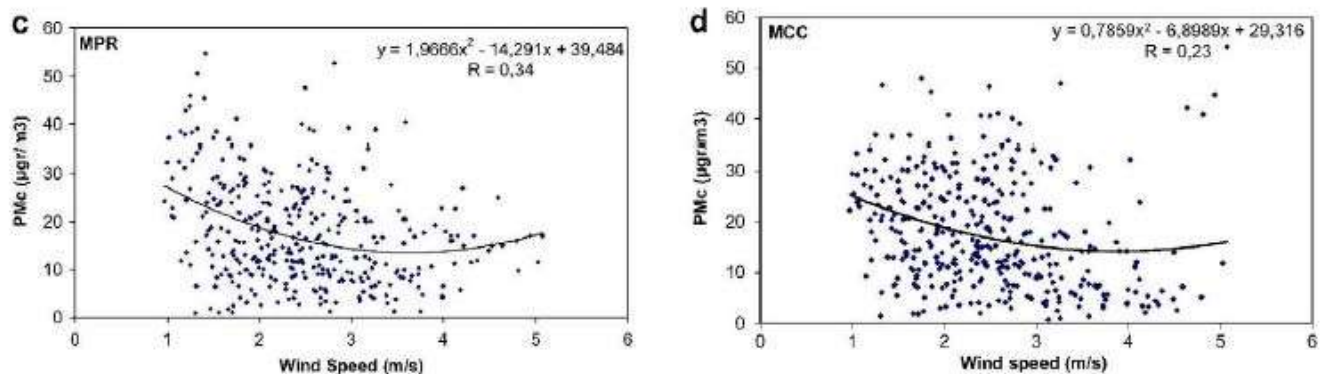


Figura estratta da “[Levels, sources and seasonality of coarse particles \(PM₁₀-PM_{2.5}\) in three European capitals - Implications for particulate pollution control](#)”

Da questi altri grafici si nota la stessa cosa, a differenza della soglia per la quale si verifica l'incremento nella concentrazione. Sarebbe molto interessante approfondire quali sono i meccanismi legati allo spostamento di tale soglia.

Quando si parla di legame tra particolato e vento non si fa riferimento soltanto alla velocità, ma anche alla direzione. Tale legame non è frutto di fenomeni di natura fisica come si è potuto osservare per la velocità del vento, ma è funzione delle caratteristiche del sito e della

posizione delle sorgenti di particolato all'interno di esso. Tener conto di questo parametro è quindi importante poiché potrebbero esistere delle direzioni da attenzionare maggiormente rispetto ad altre, per cui si registrano valori più alti nella concentrazione di particolato.

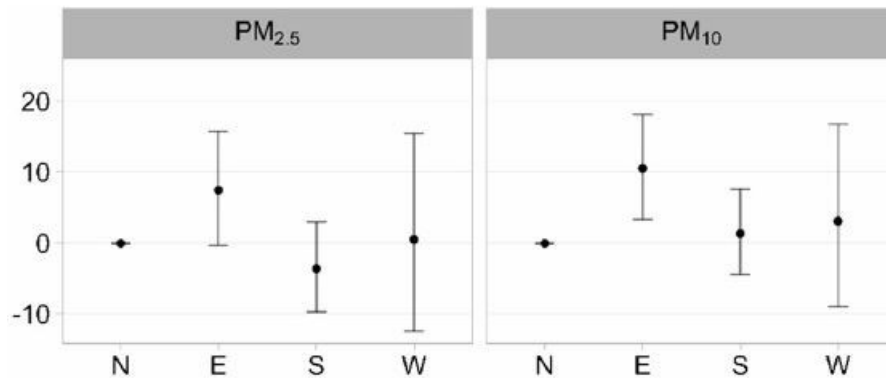


Figura estratta da Zhang 2018 “Influences of wind and precipitation on different-sized particulate matter concentrations (PM_{2.5}, PM₁₀, PM_{2.5-10})”

In questa figura, estratta dallo studio sopracitato effettuato nella città di Wuhan, si può vedere come i venti in direzione est siano quelli caratterizzati da concentrazioni maggiori. Di fatti la gran parte delle industrie presenti in quel territorio si trovano appunto sotto quella direzione di vento.

Site Parameter	N	Downwind		Upwind	
		Mean (μg/m ³)	Standard Deviation	Mean (μg/m ³)	Standard Deviation
Chanute-PM ₁₀	26	29.49	16.09	27.66	12.31
Chanute-PM _{2.5}	36	11.65	6.20	12.05	5.68
Independence-PM ₁₀	21	26.85	11.83	24.66	10.77
Independence-PM _{2.5}	39	14.37	9.40	12.56	7.09
Fredonia-PM ₁₀	40	22.61	12.72	21.26	10.23
Fredonia-PM _{2.5}	36	11.50	6.28	12.00	5.62
Coffeyville-PM ₁₀	18	23.67	9.08	26.71	15.62
Coffeyville-PM _{2.5}	22	12.53	5.69	13.93	6.43

Figura estratta da Guerra 2006 “Effects of Wind Direction on Coarse and Fine Particulate Matter Concentrations in Southeast Kansas”

In quest'altra figura sono riportati i risultati in merito ad uno studio svolto nel sud-est del Kansas. Qui sono stati riportate le concentrazioni medie misurate in quattro diversi siti, effettuate in stazioni sottovento e sopravento. Come è possibile notare dai valori, non ci sono

differenze significative tra il valore “**downwind**” e il corrispettivo “**upwind**”. Questo ci fa capire come ognuna di queste sorgenti non dia nessun importante contributo alle concentrazioni di particolato nella suddetta area.

2.5. Effetto della pioggia sulle concentrazioni di particolato

Per quanto riguarda la pioggia, è necessario tornare al concetto di deposizione umida. Come già detto prima, questo fenomeno va ad indicare tutti i processi di rimozione ed impoverimento di un certo plume di inquinante emesso da una sorgente, dovuti all’interazione tra l’acqua in fase liquida o solida e gli inquinanti stessi, all’interno del PBL (Seinfeld & Pandis, Atmospheric Chemistry and Physics). Ruolo fondamentale tra questi processi di rimozione viene ricoperto dal dilavamento prodotto dalle precipitazioni. La deposizione umida nel complesso è caratterizzata da complessi fenomeni fisico-chimici. Volendo semplificare il problema, è possibile definire la deposizione umida come costituita da due soli fenomeni principali:

- Rainout: indica il dilavamento degli inquinanti a causa dell’azione di cattura esercitata dalle nuvole.
- Washout: dilavamento al di sotto delle nuvole prodotto direttamente dalle precipitazioni.

La deposizione umida produce così un flusso discendente di inquinante, così come la deposizione secca. Entrambi rappresentano importanti meccanismi di autodepurazione del PBL. Per quanto riguarda il particolato, a differenza degli altri inquinanti gassosi, si ha una deposizione al suolo a tutti gli effetti. Tuttavia, tale deposizione produce un’alterazione dei suoli e delle acque superficiali.

In letteratura, uno dei riferimenti più importanti in merito alla deposizione umida ci viene dato da Seinfeld e Pandis, 1998. Come per la deposizione secca è utile fare delle semplificazioni nell’applicare questo fenomeno alla modellistica di dispersione degli inquinanti e, nel nostro caso particolare, del particolato aerodisperso. Rainout e Washout sono due fenomeni distinti, che però, in termini modellistici presentano una notevole somiglianza, consentendo di poterli trattare simultaneamente.

Per le particelle solide, lo studio si basa sull’interazione e la collisione tra le gocce d’acqua e le particelle solide. I parametri da considerare sono il diametro della goccia d’acqua D_d e il

diametro della particella D_p . L'equazione di riferimento è la seguente:

$$\Lambda(D_p) = \frac{3}{2} \frac{E(D_d, D_p) p_0}{D_d}$$

Tale equazione descrive il coefficiente di dilavamento. Tale coefficiente è dato dal rapporto tra l'efficienza di collisione E (rapporto tra le collisioni verificatisi tra gocce d'acqua e particelle, e numero di particelle presenti nel volume di caduta della goccia), p_0 (intensità di pioggia) e il diametro della goccia D_d . Il fenomeno viene semplificato come la caduta di una goccia di diametro D_d all'interno di un cilindro che ha come diametro la somma dei due diametri caratteristici (D_d, D_p). Da evidenze sperimentali si può osservare come tale coefficiente assuma i valori massimi in corrispondenza di diametri o molto piccoli (inferiori a 0.1 micron) o superiori a 1 micron. Per quanto riguarda le particelle molto piccole, tale risultato è spiegato dalla presenza di moti Browniani che incrementano l'efficienza di collisione. Invece, per quanto riguarda le particelle con dimensione superiore al micron, sarà l'inerzia a influenzare la deposizione umida. Il trend è abbastanza assimilabile a quanto visto per la deposizione secca, dove la velocità di deposizione aveva i suoi massimi agli estremi del range dimensionale. In conclusione, le particelle con dimensioni comprese tra 0.1 e 1 micron sono più resistenti ai fenomeni di deposizione sia umida che secca.

Come per l'azione del vento, sono molti in letteratura i lavori che studiano l'influenza della pioggia sull'abbattimento della concentrazione di particolato.

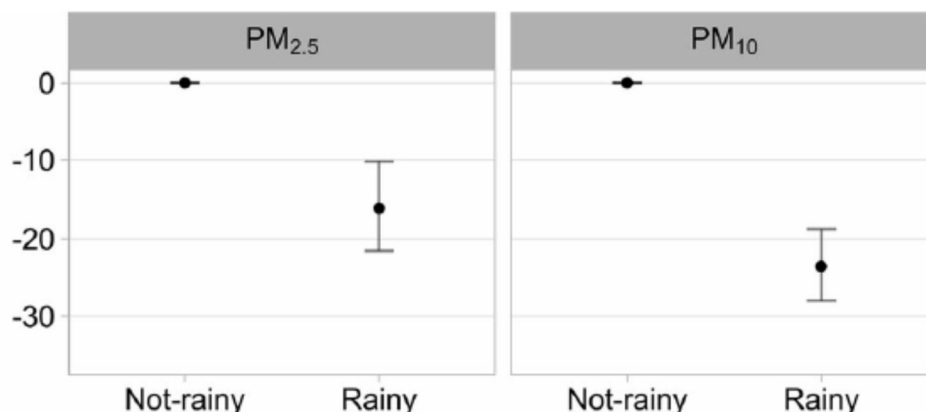


Figura estratta da Zhang 2018 "Influences of wind and precipitation on different-sized particulate matter concentrations (PM_{2.5}, PM₁₀, PM_{2.5-10})"

In questa figura, estratta dall'articolo già citato in precedenza (Wuhan, Cina) si può notare come ci sia un abbattimento medio nell'intorno del 15% per il PM_{2.5} e nell'intorno del 25% per il PM₁₀ in condizioni di pioggia. Si nota quindi una riduzione nella concentrazione di

particolato nel momento in cui si verifichi un fenomeno piovoso. Si tratta comunque di un esempio troppo semplice per comprendere quale sia effettivamente la relazione tra precipitazione e particolato. Ampliando il discorso sia dal punto di vista delle classi dimensionali di particolato e sia della durata del fenomeno, si riporta il seguente grafico:

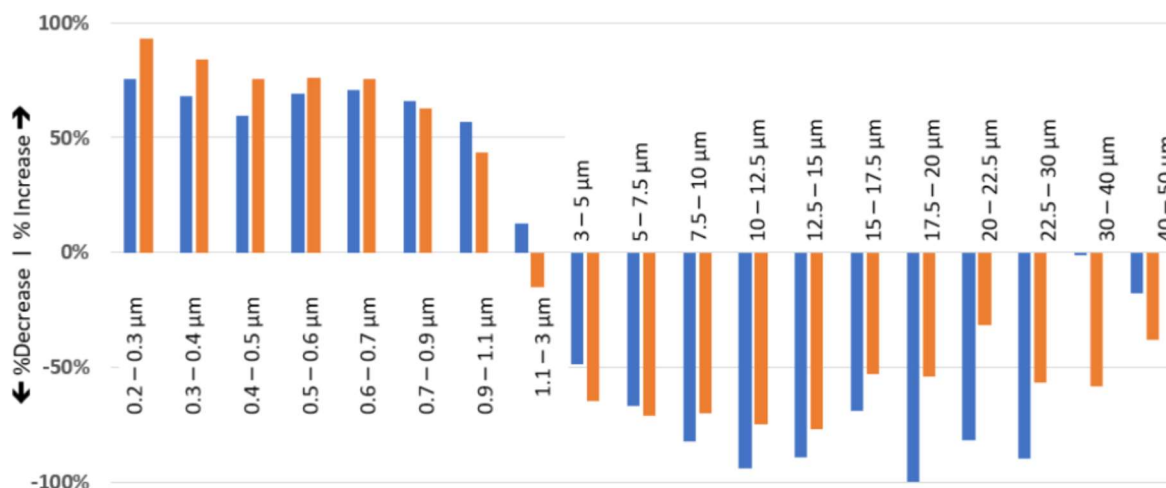


Figura estratta da **“Impact of Rain Precipitation on Urban Atmospheric Particle Matter Measured at Three Locations in France between 2013 and 2019”**

Nell’articolo da cui è stato estratto questo grafico, sono stati analizzati circa 154 eventi di pioggia differenti e le variazioni nella concentrazione di particolato all’interno di essi. Esso non fa riferimento esclusivamente a PM_{2.5} e al PM₁₀, ma va ad analizzare come l’evento piovoso influenzi una classe di particolato definita da un certo range dimensionale. Il colore blu indica la variazione nella concentrazione da un’ora prima del fenomeno ad un’ora dopo, mentre il colore arancione indica la variazione da un’ora prima a 15 ore dopo. Come è possibile osservare, per il particolato con dimensione inferiore a circa 1.1 micron la pioggia non produce nessun tipo di abbattimento, anzi si può notare un incremento nella concentrazione. Invece, per il particolato con dimensioni superiori a 1.1 micron si nota un decremento. Nel seguente studio non è stata comunque effettuata una separazione tra i fenomeni, quindi, non è possibile asserire che la pioggia abbia sempre questo tipo di effetto sul particolato. In ogni caso, l’aumento della concentrazione per le particelle più fini potrebbe essere spiegato in due modi. La prima teoria è legata alla dinamica delle particelle d’acqua. Più piccola è la goccia e più è lenta la velocità di caduta. Così facendo le particelle che interagiscono con le micro-goccioline d’acqua non risentono del fenomeno come fanno invece le particelle più grandi. La seconda teoria invece è legata all’influenza dell’umidità sulla misurazione delle concentrazioni di particolato attraverso metodi di diffusione della luce. Infatti un valore elevato di umidità giustificerebbe una permanenza duratura di micro-

goccioline in atmosfera. Questa differenza nel dilavamento del particolato in funzione della dimensione è stata riscontrata in più articoli ed il risultato è sempre lo stesso: una maggiore efficienza nel PM10 rispetto al PM2.5 (Zhen Liu et al., 2020).

A questo punto bisognerà inserire all'interno dell'analisi anche i parametri intensità e durata. Tali parametri ci serviranno per capire se l'abbattimento di particolato è in qualche modo influenzato dalla dinamica del fenomeno piovoso. La risposta a questo problema non è per nulla scontata poiché in letteratura si trovano risultati che non forniscono una spiegazione ben precisa, tale da comprendere questa relazione.

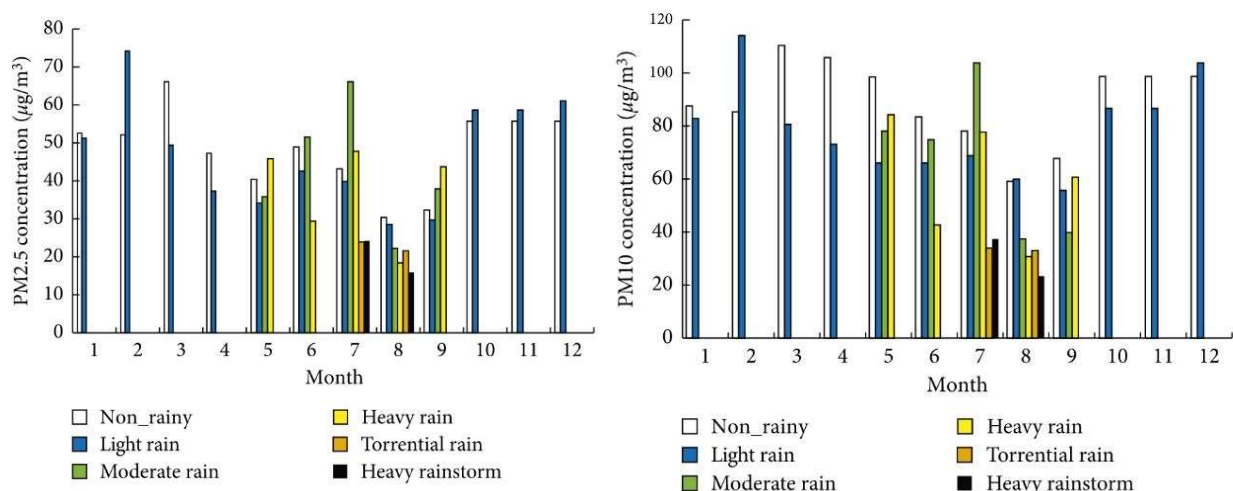


Figura estratta da “[Analysis of the Influence of Precipitation and Wind on PM2.5 and PM10 in the Atmosphere](#)”

Come si può osservare dai grafici estratti da questo articolo (Zhen Liu et al., 2020, Qinhuangdao) non esiste una relazione univoca tra variazione di concentrazione di particolato e intensità della pioggia. È possibile notare come per il PM2.5, ad esempio, durante le piogge si hanno concentrazioni maggiori rispetto a quando non piove nei mesi di febbraio, ottobre, novembre e dicembre. Per il PM10 invece questo accade nei mesi di febbraio e dicembre. Si può comunque notare come le piogge di bassa intensità producano un effetto di abbattimento nel PM2.5 in primavera e in estate. Per il PM10 questo accade anche per le piogge autunnali. Ci si rende conto come in questo caso il periodo influisca sul risultato. Nel seguente studio, così come in altri, si è discusso anche del legame tra il valore di concentrazione di particolato all'inizio del fenomeno e l'effettivo abbattimento che ne consegue (Zhen Liu et al., 2020).

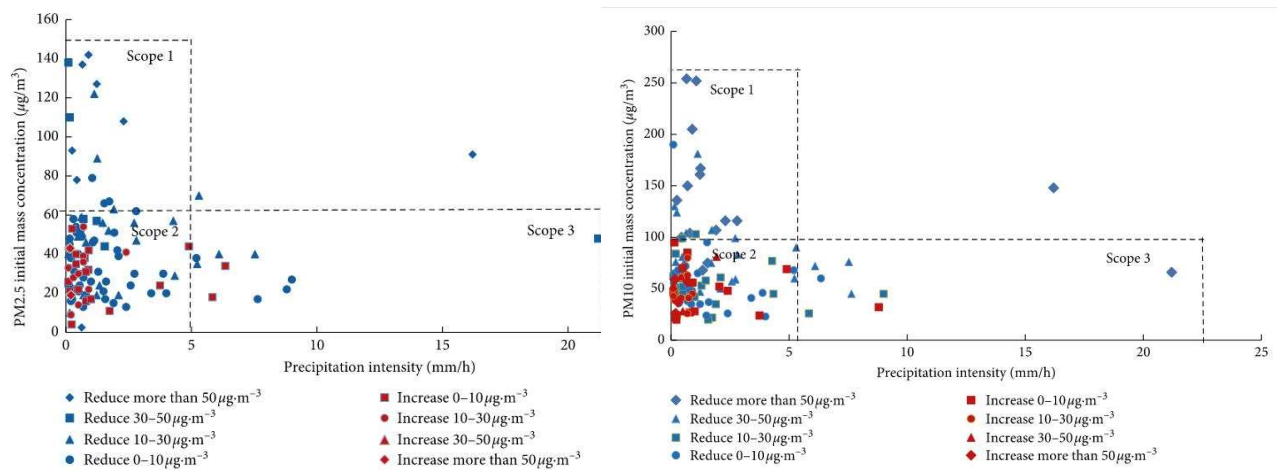


Figura estratta da “**Analysis of the Influence of Precipitation and Wind on PM2.5 and PM10 in the Atmosphere**”

Senza entrare troppo nel merito di questo studio, verranno riportate alcune considerazioni fatte all'interno di esso. Per quanto riguarda il PM2.5, quando la pioggia è inferiore a 1 mm/h e la concentrazione iniziale è inferiore a $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ c'è un'elevata incertezza nella variazione di concentrazione in funzione del valore iniziale. Lo stesso vale per il PM10 al di sotto di $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ di concentrazione iniziale. Al di sopra delle rispettive soglie si può notare un abbattimento del particolato per entrambe le classi. In particolare per il PM10, maggiore è la concentrazione iniziale al di sopra di questa soglia e più importante sarà l'abbattimento.

2.6. Obiettivo della ricerca

Negli ultimi due paragrafi si è potuto osservare quanto sia difficile dare un'interpretazione univoca sulle relazioni tra concentrazione di particolato e fenomeno meteorologico. Si tratta di un'analisi molto complessa poiché le variabili in gioco sono molteplici. Si è visto inoltre che sebbene spesso avvengano in sovrapposizione, è necessario differenziare i fenomeni per poter investigare singolarmente su come ciascuno effettivamente incida sull'andamento del particolato. Inoltre, sarà necessario tener conto di altri parametri come la temperatura o l'umidità. Anche se fin qui non sono stati considerati sarebbe giusto investigare anche su di un loro possibile legame con il fenomeno. L'obiettivo è quindi trovare delle relazioni quanto più robuste che possano essere spiegate in termini fisici, ricercando eventuali analogie con gli esempi riportati in precedenza. A tale scopo verrà utilizzato un database contenente dati di concentrazione di particolato (PM1, PM2.5, PM4 e PM10) e parametri meteoclimatici come la velocità e la direzione del vento, l'intensità di pioggia, la temperatura, l'umidità relativa e la radiazione solare. Si procederà per gradi, partendo da un'analisi integrata dei fenomeni per poi differenziarli. Anche le tecniche di analisi subiranno un'evoluzione durante il lavoro, partendo da metodi statistici (box-plot, variazioni percentuali, scatter-plot, ecc.) per poi passare alla modellistica dei fenomeni (MLR, GAM e ANN).

3. Metodi

Adesso sarà molto importante valutare quelle che sono le metodologie utilizzate in fase di misura e in fase di elaborazione dei dati. Per quanto riguarda la fase di misura, verranno illustrati quelli che sono i componenti della stazione e ne verranno descritte le caratteristiche, dato che il seguente lavoro non è incentrato sulle modalità di acquisizione dei dati, bensì sull'elaborazione degli stessi. Successivamente verranno descritte le tecniche utilizzate per la manipolazione del dataset, ai fini di estrarre considerazioni e conclusioni.

3.1. Stazione di misura

La stazione di misura da cui sono stati acquisiti i dati utilizzati si trova sul tetto del Politecnico di Torino, in prossimità dell'ingresso di c.so Castelfidardo, sopra la segreteria studenti. Tale stazione è composta dai seguenti moduli:

- Comde Derenda APM2: installato nell'ottobre del 2018;
- Palas Fidas 200S: installato nel dicembre del 2019;
- Davis Vantage Pro 2: installato nell'ottobre del 2018.

In accordo con le specifiche introdotte nel D.lgs. 155/2010 la seguente stazione è definita “a fondo urbano”. Si tratta di quella categoria di stazione per cui il livello di inquinamento che essa misura non è influenzato in maniera preferenziale da una specifica fonte, bensì dalla somma di più contributi (traffico veicolare, fabbriche, ecc.).

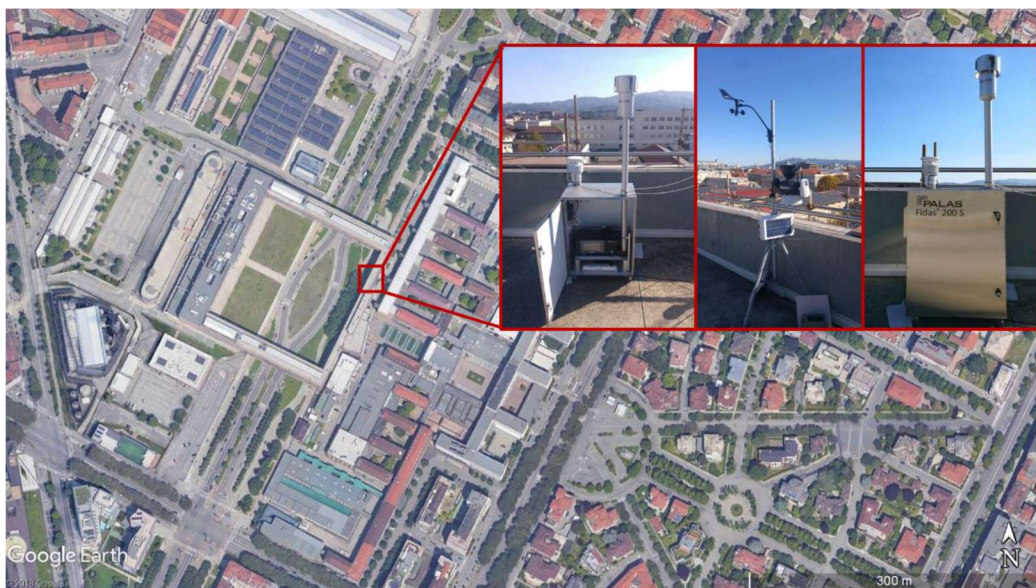


Figura: Posizione degli strumenti presso il Politecnico di Torino

3.1.1 Comde Derenda APM2

L'analizzatore APM2 (Air Pollution Monitor 2) consente di misurare la concentrazione di particelle solide sospese quali PM2.5 e PM10. Il principio di misurazione si basa su tecniche di misurazione fotometriche che sfruttano la diffusione della luce e della sua interazione con le particelle di inquinante. L'APM2 è costituito da un fotometro che emette radiazioni luminose. Quest'ultime, una volta interagite con le particelle di particolato subiscono un

fenomeno di diffusione o di scattering, e successivamente vengono rilevate da un foto detector. Il fotometro viene tenuto all'interno di un ambiente controllato, per far sì che eventuali oscillazioni termiche non influenzino il segnale rilevato. Il fascio di luce utilizzato possiede una lunghezza d'onda di 680 nm. A tale lunghezza corrisponde una maggiore sensibilità per le particelle di dimensioni inferiori al micrometro rispetto a quelle superiori. Ciò comporta una sottostima nel contenuto di PM10. Per ovviare a tale problema, la stazione è dotata di un impattatore virtuale (Comde Derenda) posto a monte del fotometro. Esso rappresenta una delle componenti più delicate e con maggiore sensibilità. Un altro elemento fondamentale è la testa di campionamento dotata di una portata pari a 3.3 l/min. Una volta aspirata, l'aria viene ripartita lungo due flussi. Con il flusso principale si misura la concentrazione di PM2.5, mentre con quello ausiliario il PM10. Un blocco ad elettrovalvole consente il passaggio di un solo flusso per volta, in modo da evitare una sovrapposizione tra i due. Lo switch avviene con una certa periodicità. È inoltre fondamentale, immettere una portata d'aria filtrata ad una certa frequenza, in modo da azzerare lo strumento ed evitare errori di sovra campionamento. Il range di acquisizione dell'APM2 copre uno spettro che va da 0 a 1000 $\mu\text{m}/\text{m}^3$. La frequenza di campionamento è pari a due minuti, questo vuol dire che ad ogni misurazione di PM2.5 o PM10, corrisponderà la misurazione effettuata al minuto precedente.



Figura: Come Derenda APM2

3.1.2 Palas Fidas 200S

In combinazione all'APM2, la stazione di misura si avvale anche di un analizzatore Palas Fidas

200S. Si tratta di uno strumento più performante, in grado di acquisire e monitorare la concentrazione di particelle solide sospese coprendo uno spettro che va da 180 nm a 18 µm. Le classi di particolato registrate sono PM1, PM2.5, PM4, PM10 e PTS. Con il Palas Fidas è possibile valutare anche la concentrazione in numero di particelle e la distribuzione dimensionale. Per quanto riguarda il funzionamento, il principio di misurazione è basato sullo scattering di un'emissione luminosa ad alta intensità ed alta stabilità, prodotta da una sorgente a LED. Attraverso uno spettrometro ottico di aerosol è possibile determinare il numero di particelle e la loro dimensione. Come per l'APM2, lo scattering tra luce e particella genererà un impulso luminoso che verrà captato dallo spettrometro. La proporzionalità tra numero di impulsi luminosi e il numero di particelle e tra l'intensità degli impulsi e il diametro delle particelle, permette l'acquisizione di queste informazioni. La testa di campionamento permette di campionare con una portata pari a 0.3 m³/h, anche in condizioni di forte vento. Inoltre, la testa comprende una linea di essiccazione in grado di eliminare l'umidità presente nell'aria campionata, fondamentale nell'ottenere una misura coerente. La temperatura all'interno della linea di essiccazione viene regolata in funzione della temperatura esterna, della pressione e dell'umidità relativa, dato che dovrà essere maggiore della temperatura di rugiada.

La presenza di due stazioni di misura del particolato non è affatto un'inutile ridondanza. Tale scelta è pienamente giustificata dalla possibilità di un riferimento incrociato, in modo da poter saltuariamente verificare il corretto funzionamento di entrambi e la validazione dei dati.

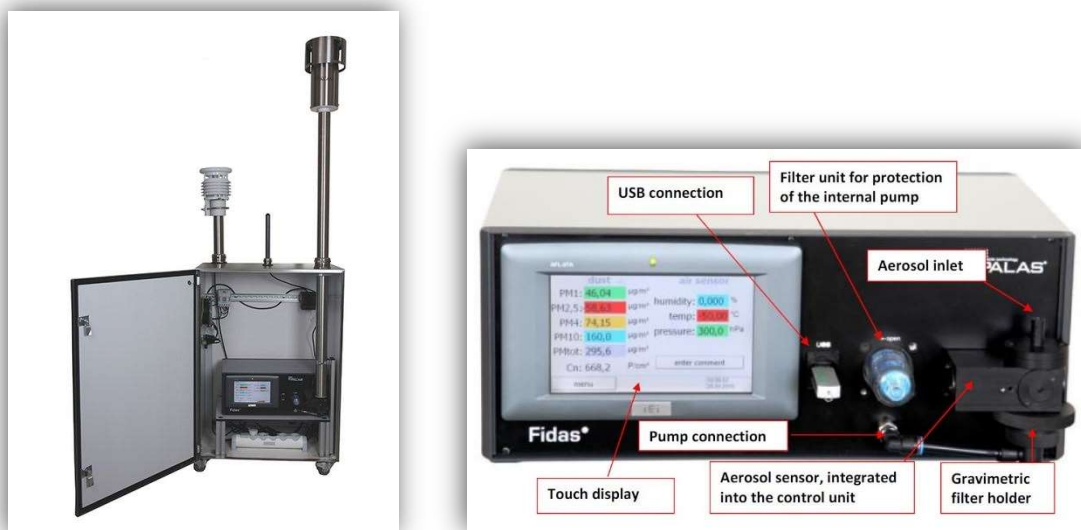


Figura: Fidas 200S (sinistra) e Fidas Control Unit (destra)

3.1.3 Davis Vantage Pro 2

Fin qui sono stati introdotti i soli due strumenti che permettono di misurare in parallelo le concentrazioni di particolato. Per quanto riguarda invece il monitoraggio dei parametri meteorologici, la configurazione è dotata di una stazione meteo Davis Vantage Pro 2, che permette la registrazione di temperatura, pressione, umidità, velocità del vento, direzione del vento, tasso di pioggia, contenuto radiativo del sole e radiazioni ultraviolette con una risoluzione oraria. Tra questi, i parametri fondamentali vengono acquisiti in termini di valore massimo, minimo e medio. Inoltre, la stazione, avvalendosi di tali parametri, va a stimare diversi indici come quello di calore o di umidità. Gli elementi che compongono la stazione sono dunque:

- Anemometro: registra velocità e direzione del vento.
- Sensore di pressione;
- Sensore di temperatura;
- Sensore di umidità;
- Sensore per la radiazione solare;
- Sensore per i raggi UV;
- Pluviometro: permette di raccogliere la pioggia e rapportarla all'unità di superficie.
- Pannello solare per ricarica e autosufficienza energetica della consolle.



Figura: componenti Davis Vantage Pro 2 separati ed assemblati

Nella seguente tabella sono riportati i range di rilevamento per ciascun parametro misurabile attraverso la stazione meteo.

	UM	Range	Risoluzione	Accuratezza
Pressione Atmosferica	hPa	540 ÷ 1100	0.1	±1
	mmHg	410 ÷ 820	0.1	±0.8
Temperatura Esterna	°C	-45 ÷ 60	0.1	±0.5
Temperatura Interna	°C	0 ÷ 60	0.1	±0.5
Temperatura Terreno	°C	-45 ÷ 65	0.5	±0.5
Umidità Esterna	%	0 ÷ 100	0.1	±5%
Umidità Interna	%	0 ÷ 100	0.1	±5%
Umidità Terreno	cb	0 ÷ 200	1	±4%
Direzione Vento	°	0 ÷ 359	1	±2
Velocità Vento	Km/h	0 ÷ 241	1	±3
	m/s	0 ÷ 67	0.5	±1
	kt	0 ÷ 130	1	±2
Pluviometro	mm/h	0 ÷ 999	0.2	±5%
	mm/d	0 ÷ 999.8	0.2	±5%
	mm/y	0 ÷ 9999	0.2	±5%
Radiazione Solare	W/m2	0 ÷ 1800	1	±5%
Radiazione UV	-	0 ÷ 16	0.1	±5%
Bagnatura fogliare	-	0 ÷ 15	1	±0.5
Evapotraspirazione	mm	0 ÷ 1999	0.1	±0.25

Ognuno degli strumenti visti possiede un'apposita porta USB, in modo da poter scaricare i dati registrati dalle stazioni. Inoltre, se connesso alla rete, lo strumento permette il download dei dati da remoto.

3.2. Caso studio

Dopo aver visto le varie componenti della stazione di misura per l'acquisizione dei dati, si passa alla fase di analisi in cui verranno mostrate le procedure di trattamento dati utilizzate. Nel seguente lavoro si è fatto uso dei dati di concentrazione di PM_{2.5} e PM₁₀ acquisiti con gli strumenti Comde Derenda APM2 e Palas Fidas 200S e dei parametri meteorologici acquisiti con il Davis Vantage Pro 2. Si è scelto di dare priorità ai dati acquisiti con l'APM2 riuscendo così a coprire un intervallo temporale maggiore e di utilizzare i dati Fidas per coprire quelle finestre temporali in cui l'APM2 è stato impiegato in campagne esterne.

Una volta acquisito il database, si è scelto di articolare il lavoro in tre fasi diverse:

- **Analisi integrata sulla concentrazione (1);**
- **Analisi integrata sull'abbattimento di concentrazione (2);**
- **Analisi differenziata sull'abbattimento di concentrazione (3).**

Nelle prime due fasi di analisi non si è fatta nessuna distinzione tra fenomeni di vento e fenomeni di pioggia, andando ad analizzare nel complesso quella che è l'influenza dei parametri meteorologici sul particolato. In particolar modo, nella prima analisi si fa riferimento alla concentrazione di particolato in generale, mentre nella seconda alla variazione di concentrazione all'interno del fenomeno meteorologico. In questa seconda analisi è stata utilizzata la pioggia come discriminante, andando ad individuare tutti gli eventi piovosi con durata superiore alla singola ora. Nella terza analisi si è deciso di differenziare i fenomeni, andando questa volta ad utilizzare come discriminante la velocità del vento, individuando tutte quelle serie temporali caratterizzate da velocità del vento non nulla e intensità di pioggia nulla.

Si è deciso di non svolgere l'analisi opposta, ovvero quella riguardante i fenomeni di pioggia in cui non fosse presente l'azione del vento poiché il numero di eventi con tali caratteristiche risultava essere poco rappresentativo.

3.2.1. Analisi integrata sulla concentrazione

In questa prima fase si è scelto di analizzare il database nel suo complesso, senza soffermarsi ai singoli fenomeni di vento o di pioggia o alle loro caratteristiche. La fase di trattamento dati per questo percorso è stata la più semplice possibile, poiché è stato sufficiente leggere il database e depurarlo dalle righe affette da mancanza di dati. L'obiettivo di questa fase è quello di ricercare una relazione tra concentrazione di particolato e parametri meteorologici al di

fuori dei singoli eventi, senza soffermarsi su come elementi quali la durata o l'intensità complessiva di un fenomeno, possano influenzare la concentrazione di particolato.

Ciò è stato fatto sia per il PM2.5 che per il PM10. I parametri utilizzati sono stati:

- Concentrazione di PM2.5 e PM10;
- Direzione del vento;
- Velocità del vento;
- Intensità di pioggia;
- Temperatura;
- Umidità relativa;
- Giorno.

Una volta acquisiti i dati, si vedrà al capitolo successivo **Risultati (4.1.)** come sono stati trattati ai fini di estrarre delle relazioni quanto più robuste tra concentrazione di particolato e parametri meteoroclimatici.

3.2.2. Analisi integrata sull'abbattimento di concentrazione

In questa seconda fase si è passato all'analisi non più della concentrazione di particolato, bensì alla variazione che si verifica all'interno di un fenomeno di vento o di pioggia. In particolare si è fatto riferimento ai fenomeni di pioggia, tenendo comunque conto dell'azione del vento presente all'interno di essi. Si è scelto di non considerare gli eventi con durata pari ad una sola ora poiché difficile determinare una differenza rilevante di concentrazione. Si è scelto anche di accorpare gli eventi separati da una sola ora con intensità di pioggia nulla, considerando l'intero evento come unico. Una volta individuate tutte le serie, per ognuna di esse sono stati calcolati i seguenti parametri (mediati sulla durata del fenomeno):

- Abbattimento di PM2.5 e PM10;
- Durata del fenomeno;
- Velocità del vento;
- Distanza percorsa dal vento;
- Intensità di pioggia;
- Cumulata di pioggia;
- Temperatura;
- Umidità relativa;

- Primo valore di PM2.5 e PM10 della serie;
- Giorno in cui inizia il fenomeno;
- Mese.

Nel valutare l'abbattimento, sono state scelte diverse strade, dato che non esiste una variazione lineare all'interno del fenomeno meteorologico. Le seguenti valutazioni sono state utilizzate anche per l'analisi seguente. Sono qui riportate le modalità utilizzate per la valutazione della variazione di concentrazione di particolato aerodisperso:

- Differenza tra il valore iniziale e l'ultimo valore di concentrazione della serie;
- Differenza tra il massimo e l'ultimo valore di concentrazione della serie;
- Differenza percentuale tra il massimo e l'ultimo valore di concentrazione della serie.

Una volta acquisiti i dati, si vedrà al paragrafo successivo (**Risultati**) come sono stati trattati ai fini di estrarre delle relazioni concrete tra variazione nella concentrazione di particolato e parametri meteoroclimatici.

3.2.3. Analisi differenziata sull'abbattimento di concentrazione

Dato che nell'analisi precedente non è stata fatta nessuna distinzione tra fenomeni di pioggia e azione del vento, in quest'ultima fase si andrà a considerare i soli fenomeni di vento senza tener conto della pioggia. Per far ciò sono state individuate tutte quelle serie temporali caratterizzate da velocità del vento non nulla ed intensità di pioggia nulla. Così facendo, nel caso dovessimo trovare una relazione tra vento e variazione nella concentrazione di particolato, essa non sarà influenzata in alcun modo dalla compresenza del fenomeno piovoso. Le variabili considerate sono le seguenti:

- Abbattimento di PM2.5 e PM10;
- Durata del fenomeno;
- Velocità del vento;
- Distanza percorsa dal vento;
- Temperatura;
- Umidità relativa;
- Primo valore di PM2.5 e PM10 della serie;
- Giorno dell'anno in cui inizia il fenomeno;

- Mese.

Attraverso la definizione di queste tre fasi si riesce così ad analizzare l'influenza dei parametri meteorologici sul particolato in generale (analisi 1), l'abbattimento che si verifica all'interno dei fenomeni di pioggia tenendo conto anche del contributo del vento (analisi 2) e l'abbattimento che si verifica all'interno dei fenomeni di vento in assenza di precipitazioni (analisi 3).

Sarebbe stato interessante implementare l'analisi opposta, ovvero quella in cui prendere in considerazione i fenomeni di pioggia caratterizzati dall'assenza di vento. Tuttavia ciò non è stato possibile a causa della bassa numerosità di tali fenomeni poiché l'azione del vento rispetto alla pioggia risulta essere molto più costante nel tempo.

A questo punto è possibile introdurre gli strumenti utilizzati in fase di elaborazione dei dati.

3.3. Strumenti statistici

In ogni fase di analisi prima di utilizzare i modelli veri e propri si è iniziato ad inquadrare il problema attraverso dei metodi statistici di base. In questa fase preliminare gli strumenti utilizzati sono stati i box-plot, le variazioni percentuali, i diagrammi a barre e gli scatter-plot. Si tratta di strumenti molto semplici che non hanno bisogno di spiegazioni, ma che si sono rivelati di fondamentale importanza nell'approccio al problema e nell'inquadrare meglio ciascuna fase di analisi.

3.4. Modellistica

Una volta superata la fase di analisi preliminare, aver acquisito i dati e trattato in modo da ottenere tutte le variabili fondamentali per il nostro studio, si passa all'implementazione vera e propria dei modelli utili a determinare l'azione di pioggia e vento sulle concentrazioni di particolato. Sono state utilizzate tre diverse tecniche per ricercare una correlazione quanto più marcata tra concentrazione di particolato prima e abbattimento poi, nei confronti dei parametri meteorologici. Le tecniche, elencate in ordine crescente di complessità, sono:

- Regressione lineare e polinomiale multivariata;
- Generalized Additive Model (GAM);
- Artificial Neural Network (ANN).

Prima di implementare le seguenti tecniche è stata fatta un'analisi preliminare, per ognuno degli scenari, in cui si è calcolato l'indice di correlazione di Pearson tra tutte le componenti del sistema (variabile dipendente e variabili indipendenti). Ciò è stato necessario per verificare in prima battuta se esistesse già una correlazione elevata tra variabile dipendente e le variabili indipendenti o tra due diverse variabili indipendenti, ai fini di semplificare quanto fatto in seguito. Dopo essersi accertati di ciò si passa a quello che è lo scopo principale del lavoro.

Lo scopo primo sarebbe quello di ottenere una relazione che possa adattarsi ai nostri dati, descrivendo una proporzionalità diretta tra variabile dipendente e variabili indipendenti. Per questo si è scelto di iniziare dalla regressione multivariata. L'assenza di risultati soddisfacenti ci ha indotto all'utilizzo di tecniche più complesse di machine learning.

Una volta implementati i seguenti modelli, si è passato ad una convalida incrociata degli stessi. Avendo a disposizione tre anni di dati, sono state fatte diverse prove, addestrando i modelli su di una parte del database e utilizzando la restante come verifica. Nel prossimo capitolo si andrà a vedere quali sono i risultati ottenuti dai diversi approcci.

Indice di correlazione di Pearson

L'indice di correlazione di Pearson rappresenta un elemento molto importante che definisce una possibile proporzionalità tra due variabili statistiche. Secondo la disuguaglianza di Cauchy-Schwarz, l'indice di Pearson può assumere dei valori compresi tra -1 e +1. I tre casi limite sono i seguenti:

- Indice pari a -1: si tratta di una perfetta correlazione lineare negativa;
- Indice pari a 0: si tratta di assenza di correlazione tra le variabili;
- Indice pari a +1: si tratta di una perfetta correlazione lineare positiva.

L'indice non è altro che il rapporto tra covarianza delle due variabili statistiche considerate (X e Y) e il prodotto delle deviazioni standard delle due variabili:

$$\rho_{XY} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y}$$

Al solo scopo di alleggerire la trattazione, le tabelle contenenti gli indici di Pearson sono state riportate in appendice.

3.4.1. Regressione Lineare Multivariata (MLR)

La regressione lineare è una tecnica statistica molto usata nella ricerca di una relazione tra una variabile dipendente (o di risposta) e una o più variabili indipendenti. Nel caso in cui utilizzassimo una sola variabile indipendente parleremmo di regressione lineare semplice. Nel nostro caso, avendo verificato in via preliminare la correlazione tra variabile dipendente e le variabili indipendenti, mediante coefficiente di correlazione di Pearson, si capisce subito di non potersi accontentare di una tecnica regressiva semplice. Dovendo quindi utilizzare più di una variabile indipendente, si parlerà di regressione lineare multipla o multivariata. In termini matematici, la regressione multivariata è rappresentabile dal seguente modello:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n$$

Dove:

- $\hat{y}$ è la variabile dipendente che nel nostro caso sarà rappresentata dalla concentrazione di particolato o dall'abbattimento;
- β_0 è l'intercetta, ossia il valore della variabile dipendente quando le variabili indipendenti assumono valore nullo;
- β_n è il coefficiente di x_n (n-esima variabile indipendente);
- x_n è l'n-esima variabile indipendente.

A differenza della regressione lineare, in questo modello si ha una relazione lineare solamente tra coefficienti β e la variabile dipendente. Questo vuol dire che tra variabile dipendente e indipendente potrebbe anche esserci un legame di tipo non lineare.

Alla seguente equazione andrebbe aggiunto un ulteriore parametro ε che descrive la componente accidentale del modello. I termini descritti in precedenza rappresentano, invece, la componente sistematica del modello.

Nel caso di una regressione lineare semplice, l'equazione rappresenta una retta nel piano X, Y. Invece, per quanto riguarda la regressione lineare multipla, l'equazione descrive un iperpiano nello spazio k-dimensionale delle variabili indipendenti. È possibile, inoltre, definire il modello utilizzando una notazione matriciale:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1k} \\ 1 & X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nk} \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

Gli elementi sono uguali a quelli visti in precedenza. La matrice X rappresenta tutti i valori che possono assumere le variabili indipendenti.

Per valutare l'adattamento del modello al set di dati si utilizza il coefficiente di determinazione R² e l'errore standard. Il coefficiente di determinazione è un indice che valuta il legame tra la variabilità dei dati e la correttezza del modello. Si può calcolare attraverso la seguente formula:

$$R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS}$$

Dove:

- RSS è la devianza totale, ovvero la sommatoria delle differenze al quadrato tra dati osservati e la loro media. Si compone della parte di devianza legata e spiegata dal modello e di una non spiegata (TSS).
- TSS è la devianza residua, ovvero la sommatoria delle differenze al quadrato tra dati osservati e il corrispettivo stimato dal modello. Si tratta della parte della devianza totale non spiegata dal modello.

Nelle regressioni semplici, questo termine non è altro che il quadrato dell'indice di correlazione di Pearson.

All'R² è preferibile considerare l'R²-adjusted. Si tratta di un coefficiente che dipende non solo dal coefficiente di determinazione, ma anche dalla numerosità campionaria e dal numero di variabili indipendenti considerate.

Un valore prossimo all'unità per il coefficiente di determinazione significa sicuramente un buon fitting da parte del modello di regressione. Tuttavia, bisogna comunque valutare la significatività della regressione, poiché potrebbero esserci problemi di overfitting o underfitting.

L'overfitting si verifica quando si spinge troppo il modello nell'adattarsi ad un certo set di

dati. Questo vuol dire che il modello restituirà degli ottimi valori per quanto riguarda il fitting operato sul set di addestramento, mentre pessimi valori o comunque valori molto più bassi considerando un altro set di dati, esterno a quello di addestramento, ma proveniente dalla stessa sorgente.

L'underfitting, invece, si verifica nel caso in cui non si abbia una quantità sufficiente di dati per costruire un modello significativo o quando si prova a definire un modello lineare con dati legati da relazioni non lineari.

3.4.2. Regressione Polinomiale Multivariata

Oltre alla regressione lineare sono stati utilizzati dei modelli polinomiali. La regressione polinomiale non è altro che un'estensione della regressione lineare, in quanto non sarà più una retta la funzione che descrive l'andamento dei dati, bensì un polinomio. Nel caso in cui i descrittori fossero più di uno, come si è visto per la regressione lineare anche in questo caso si parlerà di regressione multivariata. In questo caso la funzione di adattamento non sarà un iperpiano nelle k-dimensioni, ma una superficie più complessa. Questi modelli sono indicati qualora il legame tra una variabile dipendente e una o più descrittori non sia lineare, bensì curvilineo. Anche in questo caso sarà importante scegliere un numero adeguato di descrittori e un ordine polinomiale non molto elevato al fine di evitare problemi di overfitting. Nelle analisi effettuate ci si è fermati al terzo ordine poiché si è osservato un notevole decremento nella significatività dei modelli in fase di convalida per ordini polinomiali superiori.

3.4.3. Regressioni in Python

In ambiente Python è stata utilizzata la libreria Scikit-learn, una delle principali librerie di algoritmi e strumenti matematici a disposizione per questo linguaggio di programmazione. Il codice utilizzato per l'esecuzione del metodo è:

```
polynomial_features= PolynomialFeatures(degree=j) #j = ordine polinomiale
x_poly = polynomial_features.fit_transform(xdata)

model = LinearRegression()
model.fit(x_poly, y)
y_poly_pred = model.predict(x_poly) #predizione utilizzando il modello ottenuto

rmse = np.sqrt(mean_squared_error(y,y_poly_pred)) #errore quadratico medio
r2 = r2_score(y,y_poly_pred) #coefficiente di determinazione
```

3.4.4. Generalized Additive Model (GAM)

Per introdurre le caratteristiche proprie di questo modello è necessario fare un passo indietro, parlando prima di “Generalized Linear Model (GLM)”. I modelli lineari generalizzati non sono altro che una generalizzazione del modello di regressione lineare. Se nella regressione lineare si suppone che le variabili indipendenti siano distribuite in modo normale, nei modelli lineari generalizzati non è così. Infatti, oltre alla distribuzione normale delle variabili indipendenti, è possibile utilizzare anche le seguenti distribuzioni: binomiale, poissoniana, gamma, normale inversa e altre. Facendo un’ulteriore generalizzazione, è possibile incorporare forme non lineari all’interno del modello. Si parlerà in questo caso di modello additivo generalizzato. I modelli additivi generalizzati sono un’estensione dei modelli lineari generalizzati che permettono di fittare relazioni non lineari in maniera flessibile. Un modello generalizzato è molto simile al modello di regressione multipla visto al paragrafo precedente. La differenza principale sta nel fatto che non si ha più un coefficiente β per ogni variabile indipendente, bensì una vera e propria funzione non lineare dipendente dal parametro stesso:

$$y = \beta_0 + f(x_1) + f(x_2) + f(x_3) + \varepsilon$$

Le funzioni non lineari possono essere Spline, Polynomial e Step Function. La funzione più utilizzata è sicuramente la Smoothing Spline. Con un modello di tipo GAM è possibile utilizzare anche delle funzioni che descrivono l’interazione tra due variabili indipendenti. Si otterranno in questo caso delle funzioni rappresentante da vere e proprie superfici che definiscono il legame tra due variabili indipendenti:

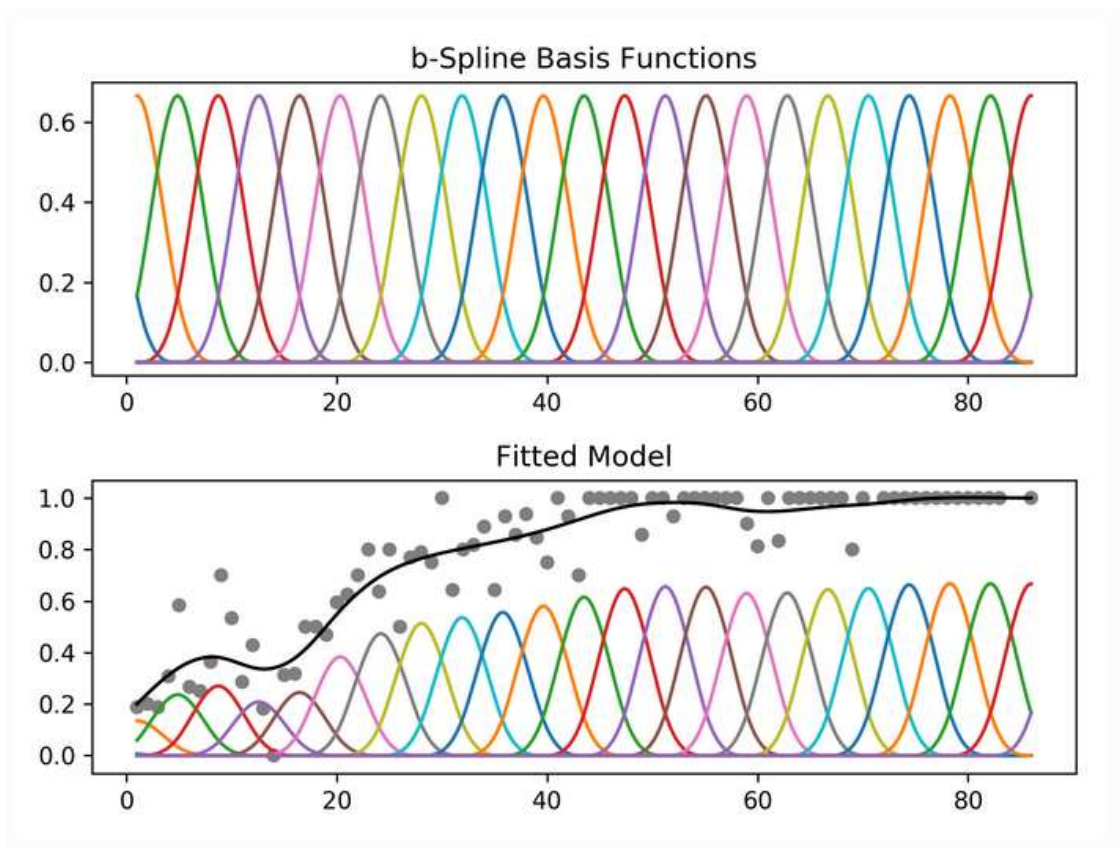
$$y = \beta_0 + f(x_1) + f(x_2, x_3) + f(x_4) + \varepsilon$$

Come detto prima, la funzione più utilizzata è lo Smoothing Spline. L’obiettivo di questa funzione è fittare una curva liscia $f(x)$ che sia rappresentativa della dipendenza della variabile dipendente da quella indipendente. Per ottenere una curva liscia interpolante, il modello GAM ricerca una funzione che minimizza:

$$\sum (y_i - f(x_i))^2 + \lambda \int f''(x)^2 dx$$

Dove λ è un parametro di penalizzazione positivo legato alla rugosità della curva $f(x)$, compreso tra 0 e 1. Si tratta di un parametro molto utile nell’evitare problemi di overfitting e

underfitting. In realtà, le Smoothing Spline sono funzioni costituite da molte funzioni più piccole, ovvero le cosiddette funzioni di base.



Ogni funzione di base (b-Spline Basis Function) viene moltiplicata per un coefficiente (parametro del modello). La somma di ciascuna funzione di base genera la Spline che va a fittare i dati.

$$f(x) = \sum_{j=1}^n N_j(x) \beta_j$$

In questa formula il termine N_j rappresenta la funzione di base j-esima e β_j il coefficiente del modello j-esimo. In definitiva, non è solo il parametro di livellamento ad influenzare $f(x)$, ma anche le funzioni di base. Un numero elevato di funzioni di base permette di adattarsi meglio a serie di dati più complesse. Un numero troppo basso, invece, restituisce un modello certamente limitato. Bisogna fare comunque attenzione nell'utilizzare un numero troppo elevato di funzioni di base poiché potrebbero presentarsi problemi di overfitting.

3.4.5. GAM in Python

In ambiente Python è stato utilizzato il pacchetto pyGAM per utilizzare i modelli additivi generalizzati. Per descriverne le potenzialità è necessario partire dalle 3 componenti del GAM:

- `distribution;`
- `link function;`
- `functional form;`

Per quanto riguarda la distribuzione, definita da `GAM(distribution='...')` è possibile scegliere tra:

- `normal;`
- `binomial;`
- `poisson;`
- `gamma;`
- `inv_gauss.`

Per quanto riguarda la funzione di collegamento, definita da `GAM(link='...')` è possibile scegliere tra:

- `identity;`
- `logit;`
- `inverse;`
- `log;`
- `inverse-squared.`

Per quanto riguarda la forma funzionale, definita da `GAM(terms='...')` è possibile scegliere tra:

- `l()` : termine lineare (come per una semplice regressione lineare);
- `s()` : termine spline;
- `f()` : termine fattoriale;
- `te()` : termine tensoriale;
- `intercept` : intercetta.

Attraverso questa sintassi è possibile costruire modelli personalizzati oppure scegliere tra modelli comuni, quali:

- `LinearGAM`: `link = identity` e `distribution = normal`;
- `LogisticGAM`: `link = logit` e `distribution = binomial`;
- `PoissonGAM`: `link = log` e `distribution = poisson`;
- `GammaGAM`: `link = log` e `distribution = gamma`;
- `InvGauss`: `link = log` e `distribution = inv_gauss`.

Nel seguente lavoro, il modello che ha restituito i risultati migliore è stato senza dubbio il `PoissonGAM`, ma questo verrà approfondito nel capitolo **Risultati**.

3.4.6. Artificial Neural Network

Una rete neurale artificiale può essere considerata come una funzione che da un certo input o più input (variabili indipendenti) produce un output desiderato. Si tratta di modelli matematici che cercano di emulare il funzionamento del cervello umano. Infatti, le reti neurali sono concepite come riproduzione del sistema nervoso formato dai neuroni umani, che in questo caso prenderanno il nome di layer. Le componenti di questo sistema sono:

- Input layer o più input layer;
- n hidden layer (layer nascosti);
- Output layer.

Oltre questi tre comparti fondamentali è necessario definire altri due elementi, ovvero dei pesi (weight) per ciascun collegamento tra due diversi layer, e una funzione di attivazione per ciascun layer (bias).

Il primo o i primi layer hanno il compito di ricevere le informazioni provenienti dall'esterno. Il secondo strato, ovvero quello dei layer nascosti, è quello in cui avviene l'elaborazione vera e propria. Infine, l'ultimo layer ha il compito di restituire il risultato dell'elaborazione. Possono esserci diversi sistemi collegati in serie, facendo sì che l'output layer del primo sistema diventi l'input layer del sistema successivo, andando così a creare delle reti quanto più complesse.

Come per i metodi visti in precedenza, anche il modello neurale utilizzato necessita di una fase di addestramento. Nel nostro caso si tratterà dunque di apprendimento supervisionato poiché fornendo al sistema sia gli input che gli output, si riuscirà a fargli comprendere quali sono i nessi causali tra i due layer.

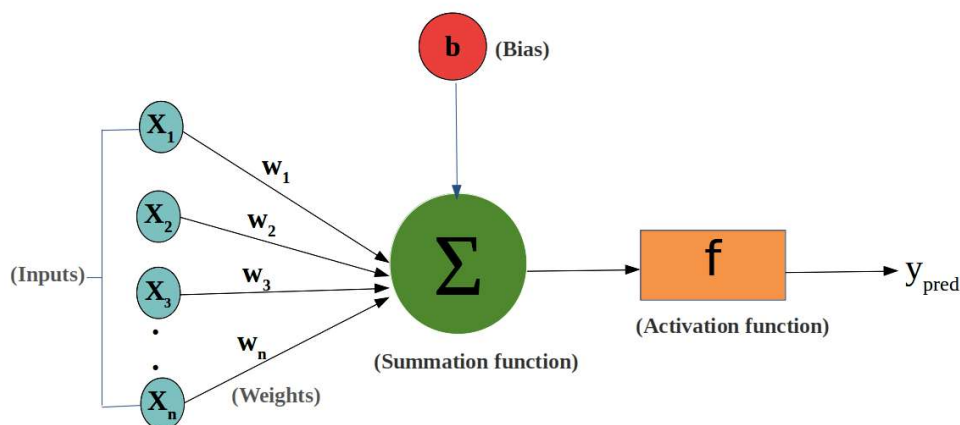


Figura: schema esemplificativo di rete neurale con n input

In questa immagine si può vedere come si presenta la struttura di una rete neurale artificiale. Esistono diversi modelli di reti. In questo lavoro è stata utilizzata la rete di Elman, ovvero una rete a tre layer con l'aggiunta di un ulteriore layer di neuroni contestuali descritti con la lettera "u".

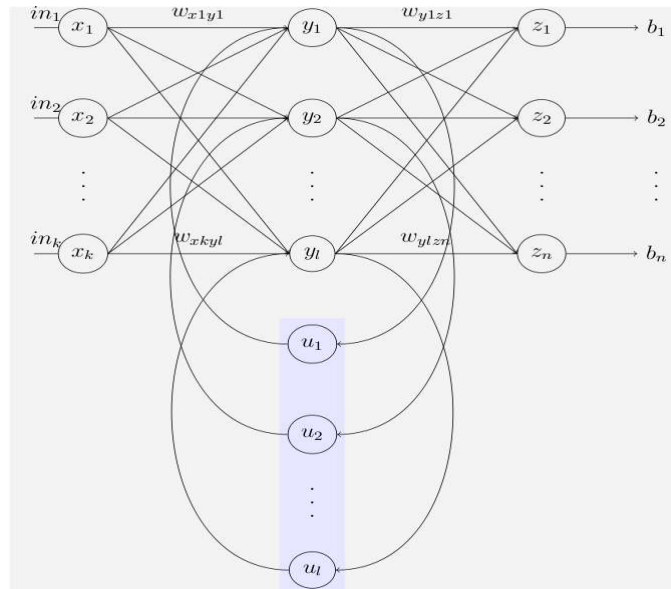


Figura: schema esemplificativo della rete di Elman

Quello delle reti neurali rappresenta un metodo molto interessante nel settore della modellistica. In questo lavoro si è deciso di non approfondire più dello stretto necessario tale argomento dato che rientra negli sviluppi futuri della presente ricerca.

3.4.7. ANN in Python

In ambiente Python è stato utilizzato il pacchetto pyrenn. Tra tutte le librerie disponibili per quanto riguarda le reti neurali artificiali, la scelta è ricaduta su questa per diversi motivi, in primis, per la facilità nel creare, addestrare ed utilizzare una rete neurale. In secondo luogo, questa libreria utilizza l'algoritmo di Levenberg-Marquardt che risulta molto più veloce del metodo del gradiente decrescente per l'addestramento del modello. Il codice utilizzato è il seguente:

```
net = prn.CreateNN([4,10,1]) #creazione della struttura della rete neurale

net = prn.train_LM(input,target,net,verbose=True,k_max=500,E_stop=1e-5)
#fase di addestramento dell'algoritmo

y = prn.NNOut(input,net) #predizione utilizzando il modello ottenuto
```

Con il codice riportato in questo esempio si crea una rete neurale formata da 4 diversi input layers(variabili indipendenti), 10 hidden layers e un output layer.

3.5. Ricerca del best-fitting

Avendo come obiettivo quello di ricercare una correlazione tra più variabili indipendenti (parametri meteorologici) e la variabile dipendente (concentrazione o abbattimento nella concentrazione) diventa oneroso in termini di tempo provare ogni combinazione possibile. Questo discorso si complica ulteriormente nel caso in cui si va ad applicare il GAM. Avendo a disposizione diversi operatori (Smoothing Spline, Tensor, Linear Term) diventa difficile ipotizzare quale struttura del modello possa dare i migliori risultati in termini di adattamento, ovvero restituire il coefficiente di determinazione minore tra i dati osservati e quelli calcolati dal modello. Grazie a Python e alla sua versatilità è stato possibile ottimizzare il processo, andando ad implementare in automatico quanto più combinazioni possibili, sia in termini di set di variabili indipendenti e sia di operatori, per quanto riguarda, appunto, il metodo GAM. Per ottenere le diverse combinazioni è stata utilizzata la libreria `ipertools` contenente il comando `combinations`. Viene qui riportato un estratto del codice che mostra quanto detto in questo paragrafo:

```
from itertools import combinations

y = diffPM25w
x0 = dur
x1 = meanwindv
x2 = meanT
x3 = firstPM25w

ind = np.vstack((x0,x1,x2,x3)).T

input = [0,1,2,3]
output = sum([list(map(list, combinations(input, i))) for i in range(len(input) + 1)],
[])
del output[0]

obj = [None] * len(output)
for i in range(0,len(output),1):
    obj[i] = [np.zeros((len(Nw),i)))]

for i in range(len(output)):
    for j in range(len(output[i])):
        if j == 0:
            p = ind[:,output[i][j]]
            obj[i] = p
        elif j == len(output)-1:
            p = np.column_stack((p,ind[:,output[i][j]]))
            obj[i] = p
            p = np.zeros(len(Nw))
        else:
            p = np.column_stack((p,ind[:,output[i][j]]))
            obj[i] = p

rsqj = [None] * len(output)
for i in range(0,len(output),1):
    rsqj[i] = np.zeros(4)
```

```

for i in range(len(output)):
    try:
        if len(output[i]) == 2:
            gam1 = PoissonGAM(s(0) + s(1)).gridsearch(np.array(obj[i]),y)
            gam2 = PoissonGAM(s(0) + l(1)).gridsearch(np.array(obj[i]),y)
            prd1 = gam1.predict(np.array(obj[i]), exposure=None)
            prd2 = gam2.predict(np.array(obj[i]), exposure=None)
            slope1, intercept1, r_value1, p_value1, std_err1 = stats.linregress(y, prd1)
            slope2, intercept2, r_value2, p_value2, std_err2 = stats.linregress(y, prd2)
            rsqj[i][0] = r_value1**2
            rsqj[i][1] = r_value2**2
        elif len(output[i]) == 3:
            gam1 = PoissonGAM(s(0) + s(1) + s(2)).gridsearch(np.array(obj[i]),y)
            gam3 = PoissonGAM(s(0) + l(1) + s(2)).gridsearch(np.array(obj[i]),y)
            prd1 = gam1.predict(np.array(obj[i]), exposure=None)
            prd2 = gam3.predict(np.array(obj[i]), exposure=None)
            slope1, intercept1, r_value1, p_value1, std_err1 = stats.linregress(y, prd1)
            slope2, intercept2, r_value2, p_value2, std_err2 = stats.linregress(y, prd2)
            rsqj[i][0] = r_value1**2
            rsqj[i][1] = r_value2**2
        elif len(output[i]) == 4:
            gam1 = PoissonGAM(s(0) + s(1) + s(2) + s(3)).gridsearch(np.array(obj[i]),y)
            gam2 = PoissonGAM(s(0) + l(1) + s(2) + l(3)).gridsearch(np.array(obj[i]),y)
            prd1 = gam1.predict(np.array(obj[i]), exposure=None)
            prd2 = gam2.predict(np.array(obj[i]), exposure=None)
            slope1, intercept1, r_value1, p_value1, std_err1 = stats.linregress(y, prd1)
            slope2, intercept2, r_value2, p_value2, std_err2 = stats.linregress(y, prd2)
            rsqj[i][1] = r_value2**2
            rsqj[i][2] = r_value3**2
        else:
            rsqj[i][0] = 'nan'
            rsqj[i][1] = 'nan'
    except:
        continue

```

Con il seguente codice si definisce una lista contenente tutte le combinazioni possibili che è possibile ottenere da un certo set di variabili indipendenti (in questo caso particolare 5). Dopodiché ad ogni combinazione si applica una specifica configurazione del modello GAM in funzione del numero di variabili. In questo caso semplificato sono riportati solamente due modelli: il primo utilizza delle Smoothing Spline per ogni termine; il secondo utilizza Smoothing Spline accoppiate a Linear Term. Una volta applicato il modello, l'algoritmo in automatico lo va ad applicare sullo stesso set di addestramento, andando a calcolare una predizione con gli stessi dati di addestramento. Attraverso una semplice regressione lineare tra output della predizione e dati osservati si calcola il coefficiente di determinazione R^2 per ogni modello, potendo così ricercare in maniera veloce quale combinazione restituisca l'adattamento migliore. Naturalmente, il seguente metodo è applicabile sia alla sola regressione lineare multivariata che al metodo delle reti neurali artificiali.

3.6. Convalida incrociata K-Fold

Si è parlato in precedenza di significatività del modello e di overfitting e underfitting. Non basta quindi avere un modello che restituisca un buon adattamento al set di addestramento. Il modello dovrà essere in grado di “generalizzare” quanto appreso in fase di training. Su **developers.google.com** si trova la seguente definizione:

“ Con generalizzazione si intende la capacità di un modello di adattarsi correttamente a nuovi dati mai visti in precedenza, tratti dalla stessa serie utilizzata per creare il modello”.

Per capire quanto un modello sia in grado di generalizzare è possibile utilizzare diverse tecniche. In questo lavoro di tesi è stata utilizzata quella della convalida incrociata K-Fold. Avendo a disposizione un importante quantitativo di dati è stato possibile applicare questa tecnica. Essa consiste nel suddividere casualmente il set di dati in k gruppi di dimensioni uguali. Ogni gruppo verrà utilizzato progressivamente come set di verifica, addestrando il modello con i dati che rimangono fuori dal suddetto gruppo. Si otterranno così k parametri per ogni modello, ad esempio k errori quadratici medi o k coefficienti di determinazione. Facendo la media per ogni parametro si ottiene un valore realmente indicativo della bontà del modello, tenendo così conto di un eventuale overfitting.

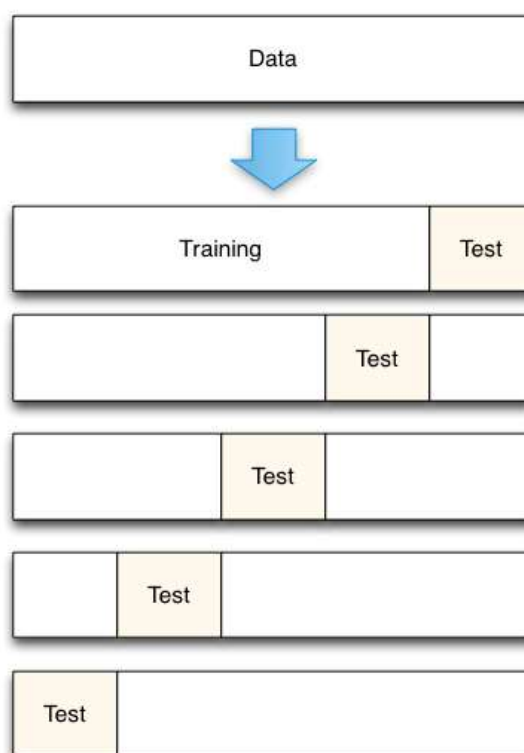


Figura : schema esemplificativo di convalida incrociata con $k=5$

4. Risultati

In questo capitolo saranno vagliati tutti i risultati ottenuti utilizzando i modelli visti al capitolo precedente. L'ordine utilizzato nell'esposizione dei risultati, per una maggiore chiarezza, sarà uguale a quello utilizzato nel capitolo **Caso studio (3.2.)**, ovvero:

- Analisi integrata sulla concentrazione;
- Analisi integrata sull'abbattimento di concentrazione;
- Analisi differenziata sull'abbattimento di concentrazione.

Per ognuno di questi tre scenari, come prima cosa verranno analizzati i risultati statistici, in modo da avere un inquadramento dell'analisi. Dopodiché si passerà a considerare i risultati dei modelli veri e propri iniziando dalla regressione multivariata per passare al modello additivo generalizzato prima e alle reti neurali artificiali poi. Verrà fatta una discussione per ogni risultato ottenuto, tenendo presente la bontà di adattamento e la significatività che ogni modello possiede. Tali discussioni faranno da premessa a quanto poi verrà discusso nel capitolo successivo **Conclusioni (5.)**.

4.1. Analisi integrata sulla concentrazione

Come già detto in precedenza in questa fase di analisi non verrà valutato l'abbattimento nel singolo fenomeno, ma si farà una generalizzazione statistica. Non si farà quindi diretto riferimento ai fenomeni meteorologici, ma alla singola misurazione oraria. L'obiettivo è quello di ricercare una relazione tra parametri meteoclimatici (velocità del vento, intensità di pioggia, etc.) e concentrazione di particolato senza tener conto delle caratteristiche dell'evento meteorologico quali, per esempio, durata ed intensità cumulata.

Per ogni caso verrà riportato il box-plot e la variazione percentuale rispetto ad una classe di riferimento.

Per il vento si considereranno direzione e velocità, mentre per la pioggia verranno valutati due scenari; nel primo verrà fatto un semplice confronto tra la concentrazione di particolato in assenza di pioggia e durante un fenomeno piovoso, mentre nel secondo scenario verrà fatta una classificazione in funzione dell'intensità di pioggia.

Dopo aver analizzato la situazione da un punto di vista statistico si passa nel valutare attraverso i modelli il legame tra la variabile dipendente del nostro studio (concentrazione di PM_{2.5} e PM₁₀) e le variabili indipendenti. In questo caso non si terrà conto soltanto di vento

e pioggia, ma anche di altri parametri quali la temperatura, l'umidità relativa, il mese ed il giorno.

PM2.5 e direzione del vento

Come visto nel capitolo **Metodi (3.1.3.)**, la stazione meteorologica è in grado di misurare oltre alla velocità del vento, anche la direzione. Si è deciso di individuare otto classi differenti in funzione di tale parametro:

- Classe N: da 337,5° fino a 22.5° (NNW-N-NNE);
- Classe E: da 67.5° fino a 112.5° (ENE-E-ESE);
- Classe S: da 157.5° fino a 202.5° (SSE-S-SSW);
- Classe W: da 247.5° fino a 292.5° (WSW-W-WNW);
- Classe NE: da 22.6° fino a 67.4°;
- Classe SE: da 112.6° fino a 157.4°;
- Classe SW: da 202.6° fino a 247.4°;
- Classe NW: da 292.6° fino a 337.4°.

Per le variazioni percentuali è stata scelta la classe E come classe di riferimento poiché la più frequente.

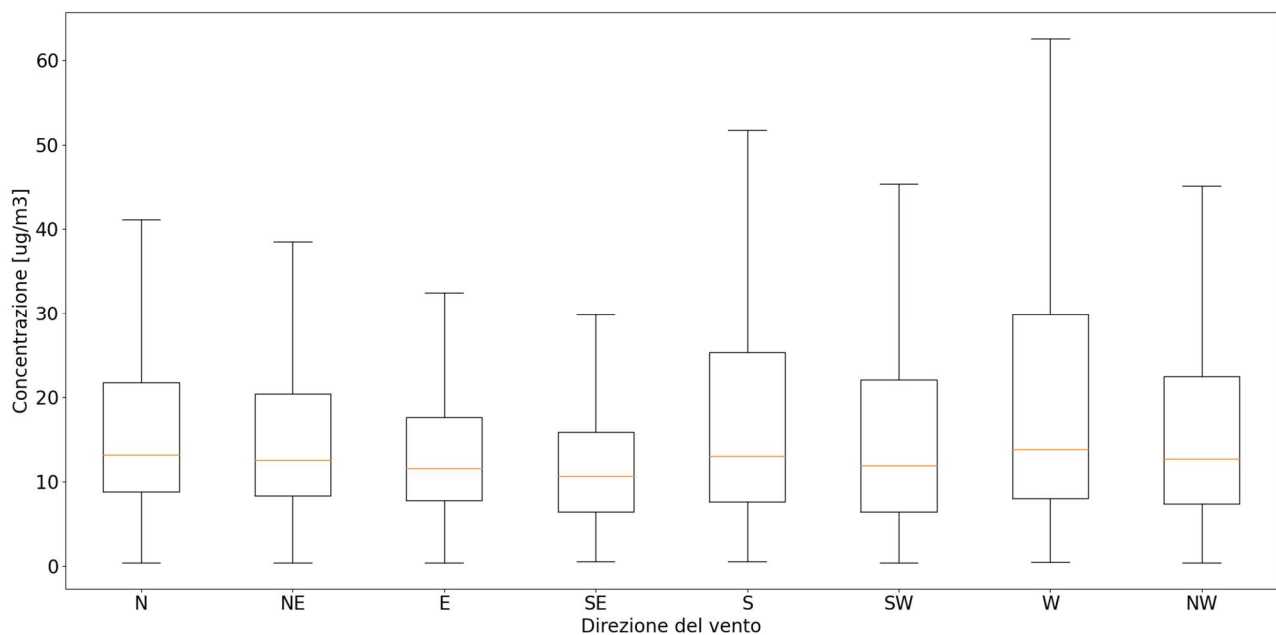


Figura : box-plot della concentrazione di PM2.5 in funzione della direzione del vento

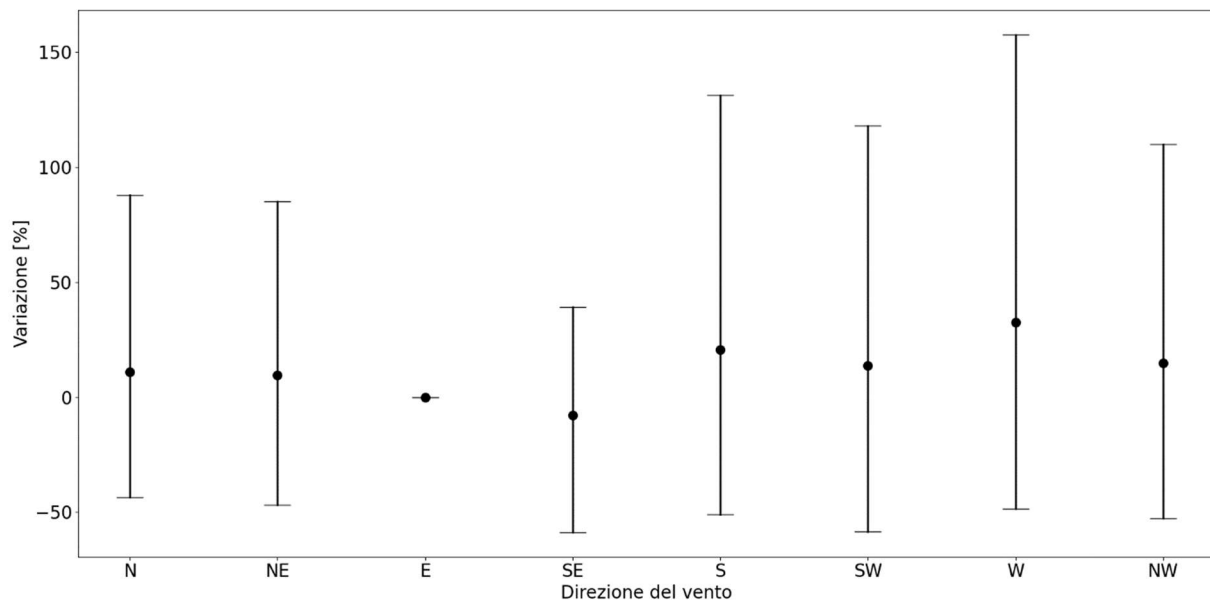


Figura : variazione percentuale della concentrazione di PM2.5 in funzione della direzione del vento

Come è possibile notare da entrambi i grafici non esiste una classe che sovrasta le altre. Si può notare infatti un certo equilibrio, soprattutto se si osserva il valor medio di ognuna di esse. Se proprio si vuol trovare una direzione preferenziale percorsa dal particolato si può notare come la classe W sia quella contenente i valori più alti, cosa che si può osservare anche dalle variazioni percentuali. Oltre alla classe W, è possibile riscontrare valori alti anche nelle classi S ed SW. Ciò potrebbe essere causato dalle concentrazioni di polveri provenienti dalla regione sahariana. Mentre le basse concentrazioni osservabili per le classi E e SE sono il risultato della presenza della collina che funge da barriera.

PM10 e direzione del vento

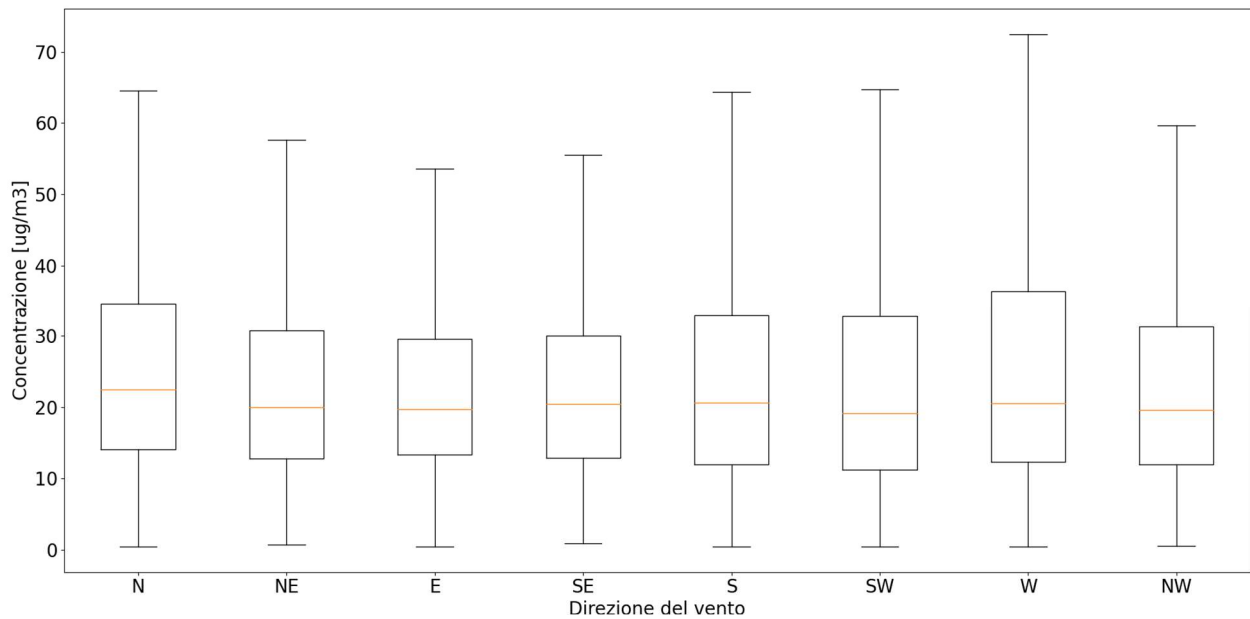


Figura : box-plot della concentrazione di PM10 in funzione della direzione del vento

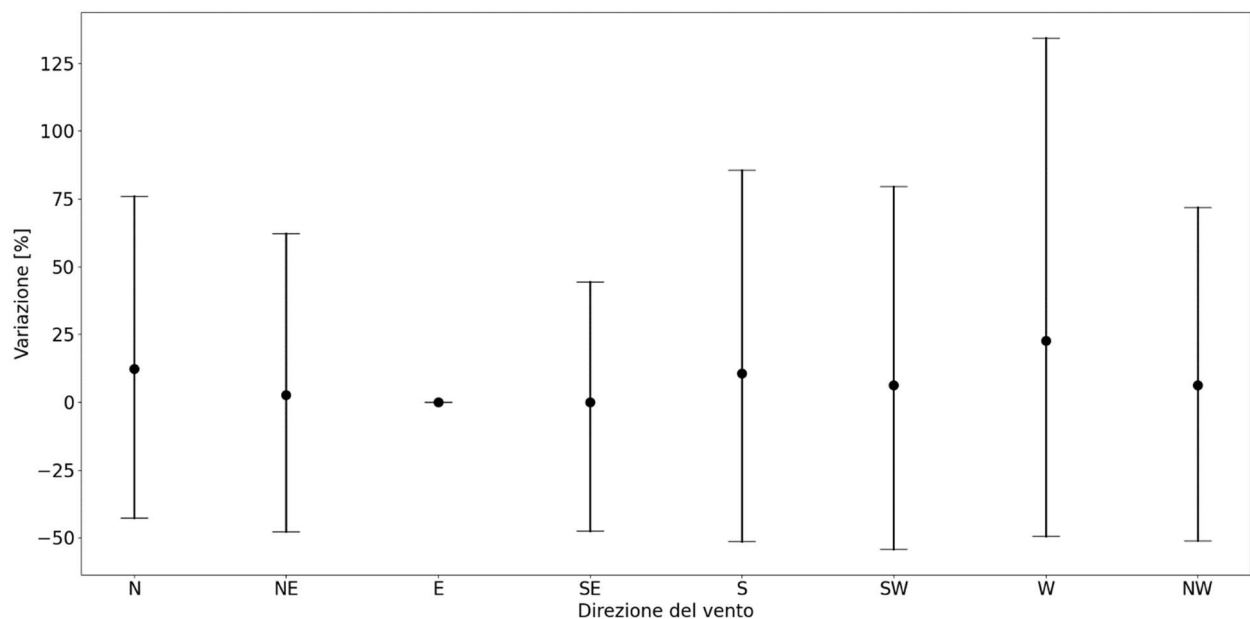


Figura : variazione percentuale della concentrazione di PM10 in funzione della direzione del vento

Stesso identico discorso per il PM10 dove la classe in cui si nota una variazione positiva maggiore è la classe W, per le stesse ragioni discusse prima. Negli studi visti in precedenza si è visto quanto sia aleatorio il legame tra direzione del vento e particolato, relazione fortemente influenzata dalle caratteristiche del sito in cui è stata posizionata la stazione di misura e dalla distribuzione delle sorgenti.

PM2.5 e velocità del vento

Per quanto riguarda la velocità sono state definite tante classi quanto sono gli intervalli di velocità misurati. Partendo dal PM2.5 nella seguente tabella sono riportati i valori e la relativa numerosità per ognuno di essi. Dopodiché si riporteranno i box-plot e variazioni percentuali. Non sono state riportate le classi di velocità superiori a 4.9 m/s poiché la bassa numerosità le rende poco rappresentative. Come classe di riferimento è stata presa la 0.4 m/s poiché la più numerosa.

Wind Speed [m/s]	0.4	0.9	0	1.3	1.8	2.2	2.7	3.1	4	3.6	4.5	4.9
N	7459	4835	4404	1828	490	167	89	67	55	52	42	20

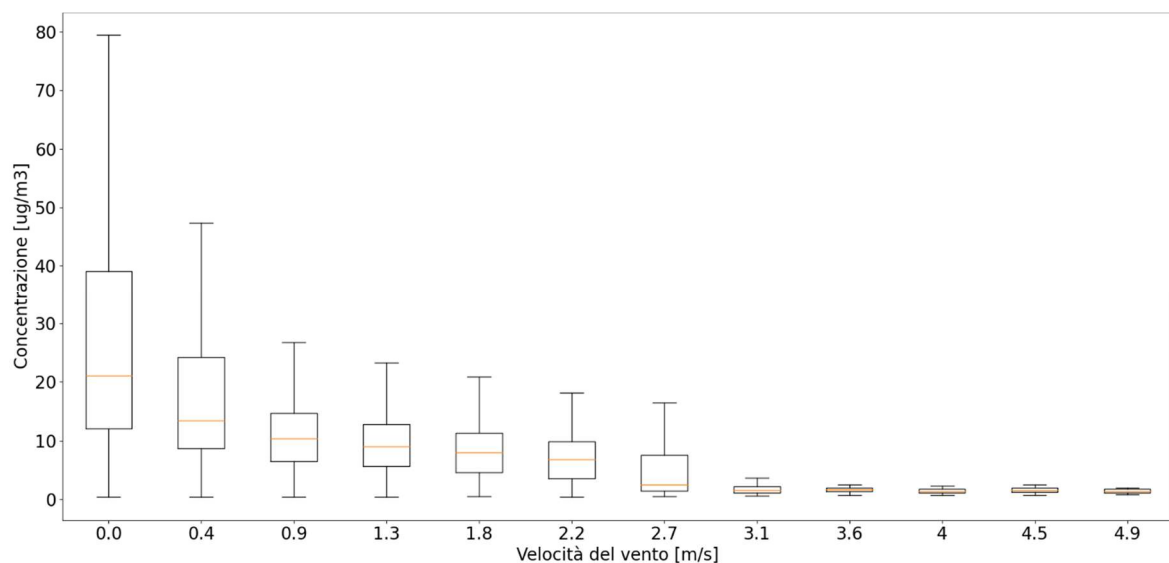


Figura : box-plot della concentrazione di PM2.5 in funzione della velocità del vento

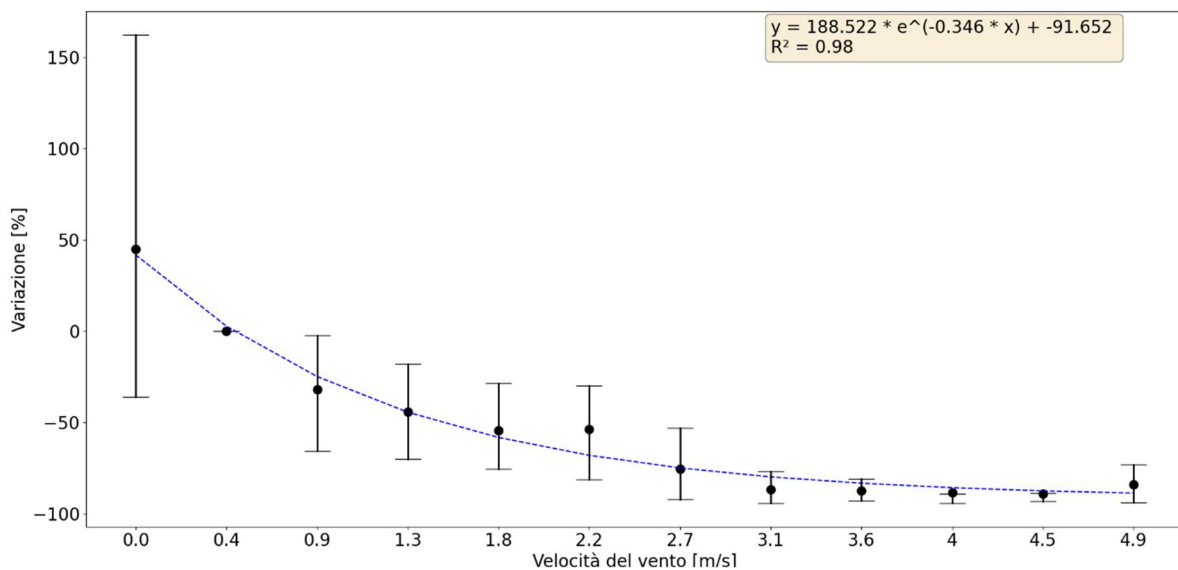


Figura : variazioni percentuali della concentrazione di PM2.5 in funzione della velocità del vento

Dal grafico si può notare come, per il PM2.5, ci sia una decrescita esponenziale all'aumentare

della velocità del vento. Tale riduzione si stabilizza per velocità superiori a 3 m/s poiché si sono raggiunti valori praticamente nulli nella concentrazione di inquinante. Infatti, al disopra di tale valore l'azione del vento riesce a disperdere le concentrazioni di particolato e a favorire la diluizione atmosferica. È necessario fare un commento a riguardo della classe 4.9 dove si può notare un leggero incremento, sia in termini di media che di ampiezza. Ciò potrebbe essere legato ad un'anomalia nei dati.

Nel grafico è anche riportata l'equazione ottenuta mediante regressione esponenziale che fa vedere quanto fitta la relazione delle variazioni medie percentuali da una classe all'altra.

PM10 e velocità del vento

Wind Speed [m/s]	0.4	0.9	0	1.3	1.8	2.2	2.7	3.1	4	3.6	4.5	4.9
N	5711	4114	3345	1634	445	152	85	58	49	46	36	16

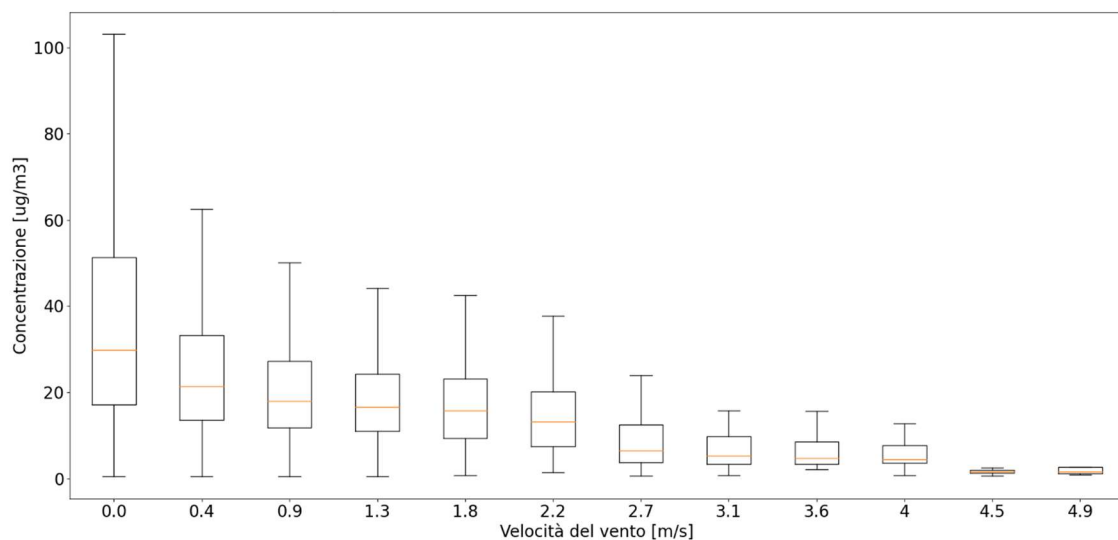


Figura : box-plot della concentrazione di PM10 in funzione della velocità del vento

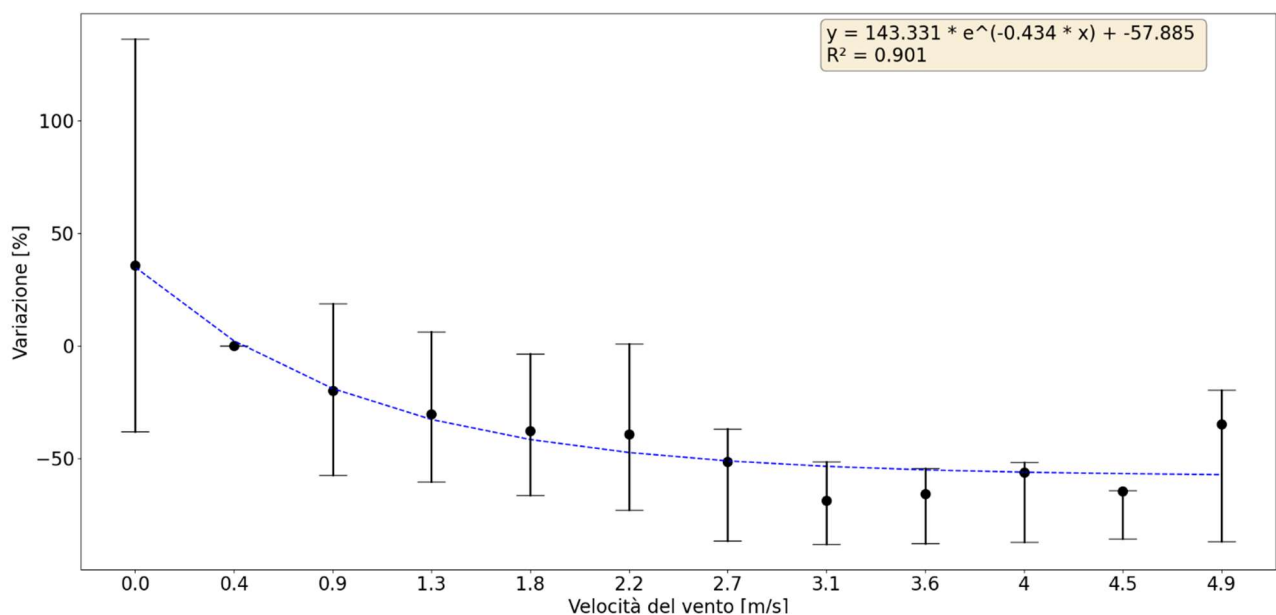


Figura : variazioni percentuali della concentrazione di PM2.5 in funzione della velocità del vento

Anche per il PM10 si ottiene una buona relazione nel descrivere questo fenomeno. Tuttavia, per velocità del vento superiori a 4 m/s si può notare una risalita nella concentrazione, osservabile non tanto dalla curva di regressione, quanto dalle rappresentazioni delle singole classi. Si è visto in precedenza come in altri studi si era verificato lo stesso scenario per il PM10. Questo aumento è infatti giustificabile dalla risospensione in atmosfera del particolato a causa dell'elevato potere erosivo del vento a velocità elevate. Si tratta di un fenomeno che influenza maggiormente le particelle grossolane come il PM10 che quelle fini come il PM2.5. Un'altra spiegazione più semplice potrebbe essere quella di un'anomalia verificatasi durante l'acquisizione dei dati.

PM2.5 e pioggia



Figura : box-plot della concentrazione di PM2.5 in funzione della presenza/assenza di pioggia



Figura : variazione percentuale della concentrazione di PM2.5 in funzione della presenza/assenza di pioggia

Da questa semplice analisi è possibile notare come ci sia sicuramente un abbattimento nelle concentrazioni di PM_{2.5} quando piove. Si tratta comunque di un risultato povero di significato poiché nella classe Rain vengono raggruppati fenomeni di diversa entità, durata ed intensità, considerandoli tutti allo stesso modo. Nella fase successiva verrà fatta una distinzione attraverso l'uso di classi per intensità di pioggia crescente.

PM10 e pioggia

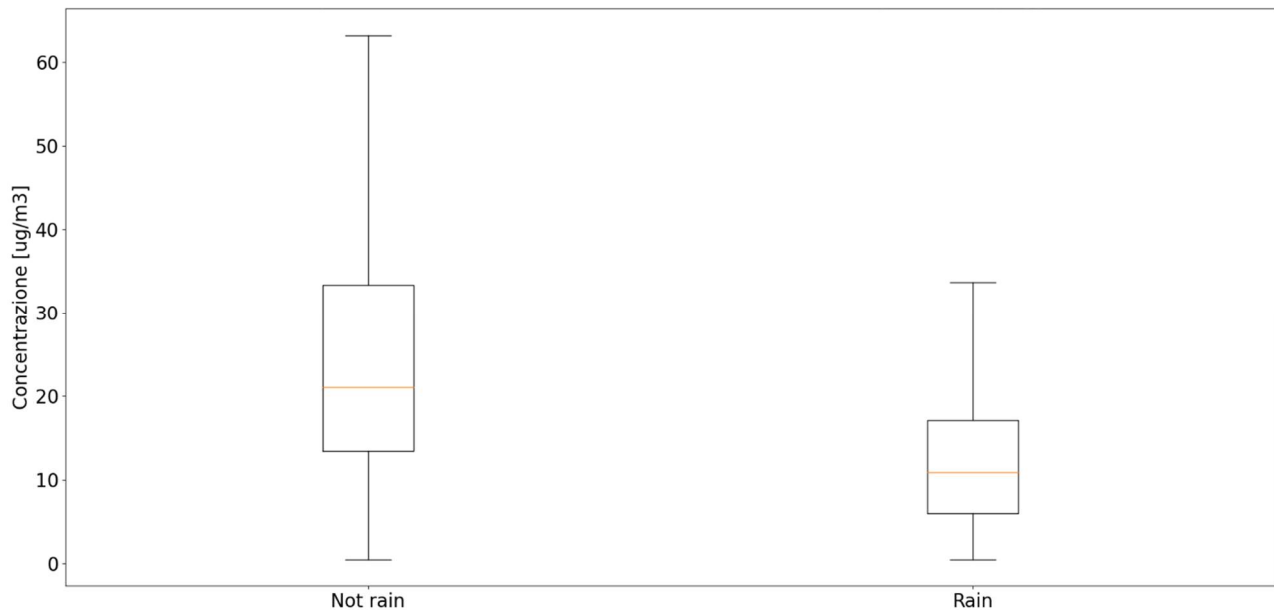


Figura : box-plot della concentrazione di PM10 in funzione della presenza/assenza di pioggia

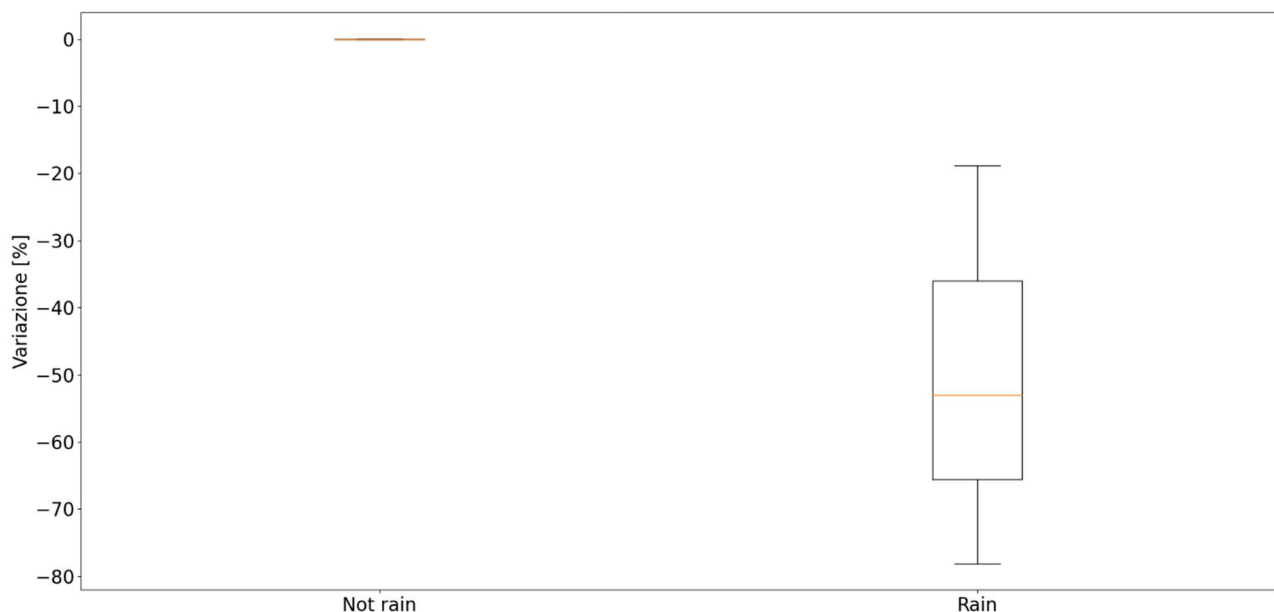


Figura : variazione percentuale della concentrazione di PM10 in funzione della presenza/assenza di pioggia

Anche per il PM10 è facile notare come le concentrazioni siano minori durante un fenomeno piovoso. Sarà necessario anche in questo caso differenziare in funzione dell'intensità di pioggia.

PM2.5 e intensità di pioggia

Si passa adesso a differenziare meglio il fenomeno piovoso individuando diversi range in funzione dell'intensità. A tale scopo sono state definite 6 classi:

- Not Rain: assenza di pioggia;
- Classe 1: inferiore a 0.2 mm/h;
- Classe 2: tra 0.2 mm/h e 0.6 mm/h;
- Classe 3: tra 0.6 mm/h e 1.4 mm/h;
- Classe 4: tra 1.4 mm/h e 2.8 mm/h;
- Classe 5: superiore a 2.8 mm/h.

È stata scelta questa suddivisione in modo tale da individuare un numero adeguato di classi con una numerosità pressochè uguale e che allo stesso tempo sia rappresentativa.

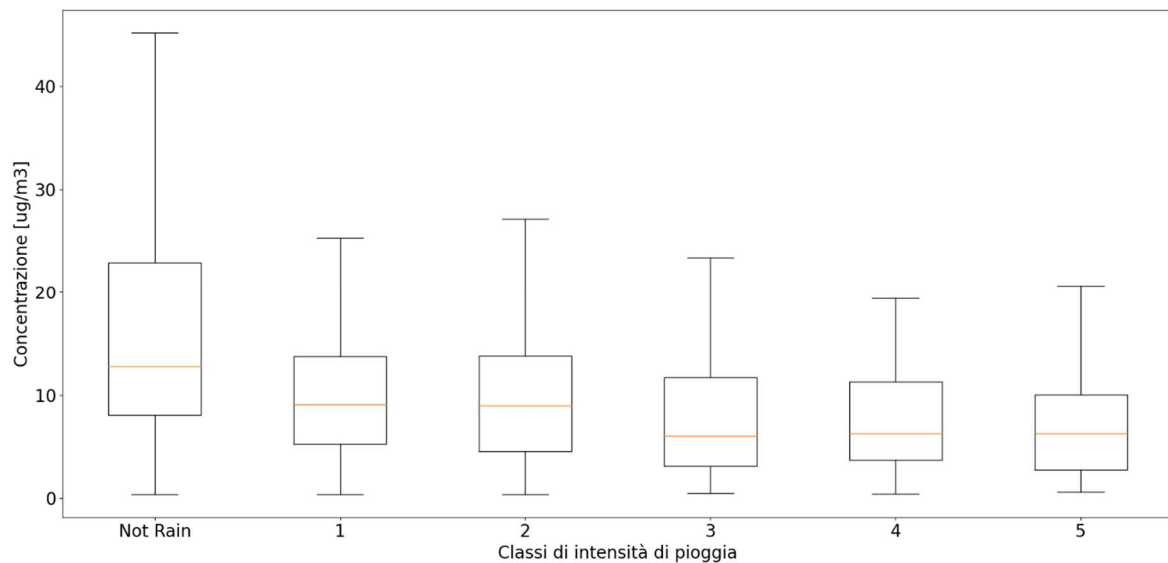


Figura : box-plot della concentrazione di PM2.5 in funzione dell'intensità di pioggia

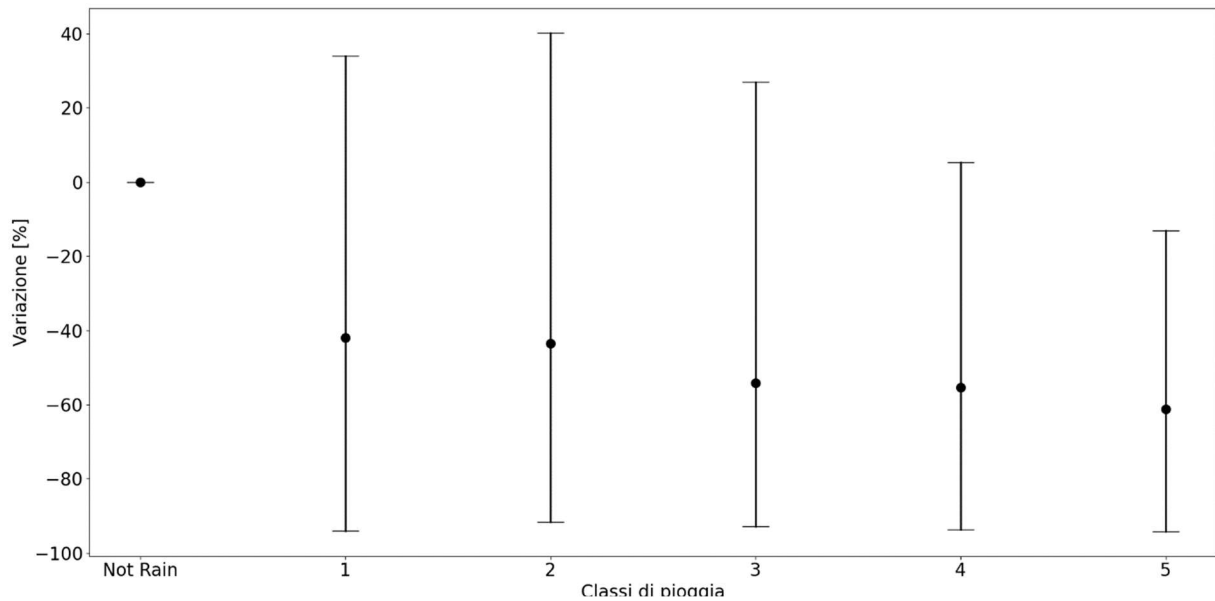


Figura : variazione percentuale della concentrazione di PM2.5 in funzione dell'intensità di pioggia

Come si può notare dal grafico, da quando non piove alla prima classe di intensità di pioggia (0-0.2 mm/h) si nota subito un abbattimento di circa il 40%. Variazione che in termini di media rimane pressoché costante anche nelle altre classi, subendo un leggero decremento per intensità via via più elevate. Se si vanno a vedere gli intervalli di confidenza non si ha una dispersione contenuta come nel caso del vento. Ciò sta a significare che nel caso della pioggia ci si trova di fronte ad un legame più difficile da comprendere. Si era potuto apprezzare come in alcuni articoli, soprattutto per le particelle più fini ($<PM_{10}$), l'azione della pioggia non produca effetti significativi.

Quindi è possibile affermare come sia importante la presenza della pioggia ai fini della riduzione di particolato, ma come la differenza d'intensità non sia un elemento preponderante in termini di abbattimento.

PM10 e intensità di pioggia

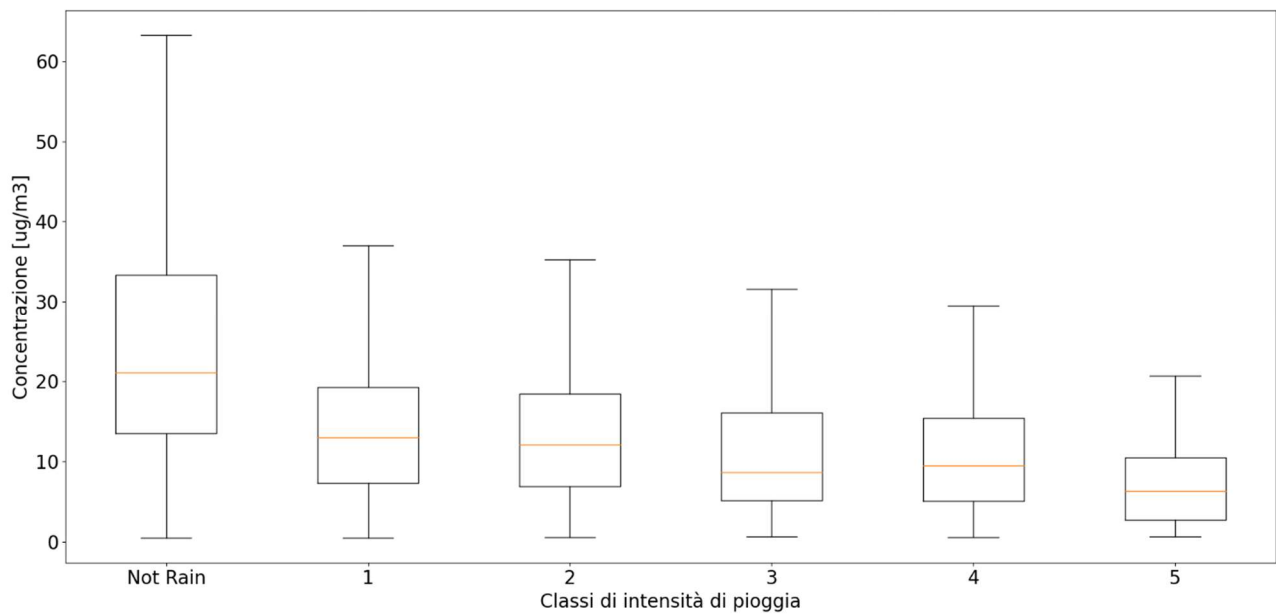


Figura : box-plot della concentrazione di PM10 in funzione dell'intensità di pioggia

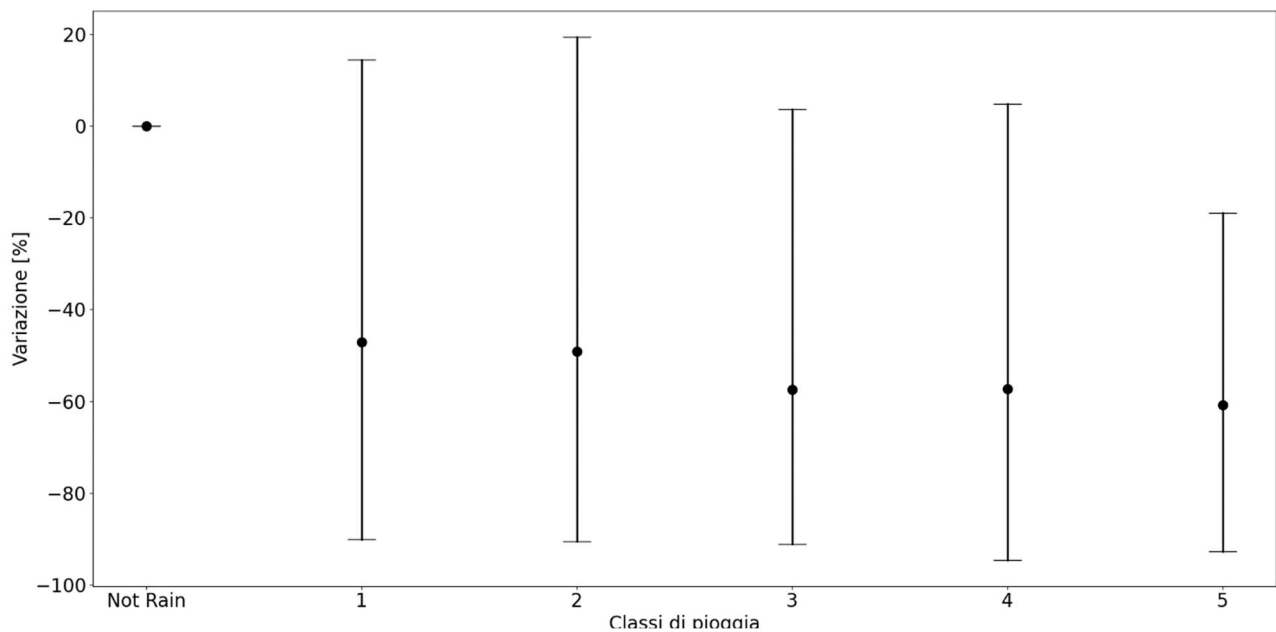


Figura : variazione percentuale della concentrazione di PM10 in funzione dell'intensità di pioggia

Riduzione che è possibile notare anche per il PM10. Per quanto riguarda gli estremi superiori non si hanno delle variazioni positive così ampie come nel caso del PM2.5. Questo conferma come per il particolato grossolano l'azione di rimozione della pioggia sia maggiormente efficace.

Regressione multivariata

Fin qui, attraverso l'uso di metodi statistici e di alcune semplificazioni si è osservato come vento e pioggia agiscano mediamente sulla concentrazione di particolato, senza indagare su quale sia effettivamente la correlazione tra i parametri meteorologici e il particolato aerodisperso. Con l'utilizzo dei modelli, partendo da quelli regressivi, si affronta la ricerca di tale correlazione.

È possibile vedere adesso quali risultati si ottengono da modelli di regressione applicati ai seguenti dati. Dato che si stanno considerando più variabili indipendenti diventa importante trovare un modo per individuare quale combinazione ci dia il risultato migliore in termini di adattamento. Attraverso Python è possibile iterare tale procedura in modo da provare tutte le combinazioni disponibili tra i vari parametri, sia nel valutare l'adattamento che nel valutare la significatività. Con adattamento ci si riferisce alla capacità che un modello possiede nel descrivere la serie di dati utilizzata come set di addestramento. Con significatività invece ci si riferisce alla capacità del modello di descrivere una serie di esterne al set di addestramento, ma proveniente dalla stessa sorgente di dati.

Come già detto, oltre alla semplice regressione lineare si è fatto uso della regressione polinomiale multivariata, fino al terzo grado.

PM2.5 (Adattamento)

n.	Variabili	Adattamento			Convalida		
		Lineare	Grado 2	Grado 3	Lineare	Grado 2	Grado 3
1	Direzione Vento, Velocità Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.246468	0.422846	0.495903	0.105276	0.204663	0.229214
2	Direzione Vento, Velocità Vento, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.244775	0.417826	0.489086	0.104643	0.203204	0.234338
3	Velocità Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.246328	0.419389	0.487695	0.105219	0.206395	0.23066
4	Velocità Vento, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.244643	0.414688	0.480603	0.104632	0.205854	0.239053
5	Direzione Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.202112	0.386282	0.458812	0.082444	0.177528	0.201816
6	Intensità Pioggia, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.200884	0.385039	0.449066	0.082816	0.181596	0.207361
7	Direzione Vento, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.195969	0.378527	0.447801	0.087373	0.173472	0.197863
8	Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.194682	0.377277	0.437793	0.088353	0.176824	0.202658
9	Direzione Vento, Velocità Vento, Intensità Pioggia, Umidità Relativa, Giorno	0.159662	0.400601	0.428607	0.095518	0.193717	0.165045
10	Direzione Vento, Velocità Vento, Umidità Relativa, Giorno	0.156923	0.398801	0.420077	0.09166	0.194321	0.164405
11	Velocità Vento, Intensità Pioggia, Umidità Relativa, Giorno	0.156044	0.39572	0.419739	0.097077	0.197094	0.173197
12	Velocità Vento, Umidità Relativa, Giorno	0.15332	0.3938	0.411208	0.093167	0.196814	0.175217
13	Direzione Vento, Velocità Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Giorno	0.245935	0.376645	0.401629	0.108919	0.179972	0.151365
14	Direzione Vento, Intensità Pioggia, Umidità Relativa, Giorno	0.098945	0.371565	0.394739	0.052135	0.169185	0.156514
15	Velocità Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Giorno	0.245711	0.37164	0.391119	0.108844	0.178309	0.149708
16	Direzione Vento, Velocità Vento, Temperatura, Giorno	0.243783	0.367839	0.386118	0.108135	0.175715	0.150255
17	Intensità Pioggia, Umidità Relativa, Giorno	0.090288	0.369659	0.385755	0.053875	0.171901	0.170365
18	Direzione Vento, Velocità Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Umidità Relativa	0.238142	0.319535	0.3837	0.118442	0.147749	0.193266
19	Direzione Vento, Velocità Vento, Intensità Pioggia, Giorno	0.139346	0.355975	0.383563	0.085212	0.187824	0.160456
20	Direzione Vento, Umidità Relativa, Giorno	0.089442	0.368559	0.380994	0.045059	0.16402	0.14615

PM2.5 (Convalida)

n.	Variabili	Adattamento			Convalida		
		Lineare	Grado 2	Grado 3	Lineare	Grado 2	Grado 3
1	Velocità Vento, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.244643	0.414688	0.480603	0.104632	0.205854	0.239053
2	Direzione Vento, Velocità Vento, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.244775	0.417826	0.489086	0.104643	0.203204	0.234338
3	Velocità Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.246328	0.419389	0.487695	0.105219	0.206395	0.23066
4	Direzione Vento, Velocità Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.246468	0.422846	0.495903	0.105276	0.204663	0.229214
5	Intensità Pioggia, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.200884	0.385039	0.449066	0.082816	0.181596	0.207361
6	Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.194682	0.377277	0.437793	0.088353	0.176824	0.202658
7	Direzione Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.202112	0.386282	0.458812	0.082444	0.177528	0.201816
8	Direzione Vento, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.195969	0.378527	0.447801	0.087373	0.173472	0.197863
9	Velocità Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Umidità Relativa	0.238081	0.316579	0.376777	0.118281	0.148658	0.193591
10	Direzione Vento, Velocità Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Umidità Relativa	0.238142	0.319535	0.3837	0.118442	0.147749	0.193266
11	Direzione Vento, Velocità Vento, Temperatura, Umidità Relativa	0.23675	0.314323	0.377208	0.118443	0.144066	0.192499
12	Velocità Vento, Temperatura, Umidità Relativa	0.236693	0.311192	0.370008	0.118326	0.144572	0.19166
13	Velocità Vento, Umidità Relativa, Giorno	0.15332	0.3938	0.411208	0.093167	0.196814	0.175217
14	Direzione Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Umidità Relativa	0.19478	0.283019	0.349911	0.099867	0.12706	0.173445
15	Velocità Vento, Intensità Pioggia, Umidità Relativa, Giorno	0.156044	0.39572	0.419739	0.097077	0.197094	0.173197
16	Intensità Pioggia, Temperatura, Umidità Relativa	0.193821	0.280091	0.344098	0.100036	0.125803	0.172161
17	Velocità Vento, Intensità Pioggia, Giorno	0.136635	0.35079	0.377718	0.08824	0.188903	0.171935
18	Intensità Pioggia, Umidità Relativa, Giorno	0.090288	0.369659	0.385755	0.053875	0.171901	0.170365
19	Temperatura, Umidità Relativa	0.188229	0.270363	0.333374	0.106967	0.125009	0.169188
20	Velocità Vento, Giorno	0.136006	0.346315	0.362013	0.086842	0.185828	0.168486

Figura: R2 da regressione e convalida k-fold (k=10) su PM2.5

Dalla prima tabella è possibile osservare i migliori 20 modelli che hanno restituito gli R2 più elevati; modelli ottenuti da ogni possibile combinazione attraverso modelli regressivi multivariati e non, di diverso ordine. Come si può notare, l'aumento del numero delle variabili e del grado della regressione produce un incremento nell'adattamento del modello alla serie. Tuttavia, questo risultato non è significativo poiché bisogna verificare la singificativà di ogni modello. Per far ciò si utilizzerà il metodo della convalida incrociata, suddividendo il database in 10 parti ed utilizzando ciascuna di esse come set di verifica, addestrando il database con i rimanenti dati. Si otterranno per ogni modello 10 R2 differenti. Nella seconda tabella sono riportate le medie di questi R2 riuscendo così a capire qual è effettivamente la capacità di generalizzare da parte di ogni modello. Dai risultati è possibile vedere come effettivamente nessun modello sia in grado di descrivere in modo opportuno i seguenti dati e proprio per questo motivo si è andati oltre utilizzando altri modelli. Verranno riportati qui di seguito i risultati per il PM10.

PM10 (adattamento)

n.	Variabili	Adattamento			Convalida		
		Lineare	Grado 2	Grado 3	Lineare	Grado 2	Grado 3
1	Direzione Vento, Velocità Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.247242	0.482963	0.522586	0.091526	0.202748	0.191292
2	Direzione Vento, Velocità Vento, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.245183	0.480023	0.517392	0.090268	0.204487	0.202038
3	Velocità Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.247235	0.473606	0.506975	0.092789	0.201174	0.195853
4	Velocità Vento, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.245173	0.471116	0.502135	0.091455	0.205376	0.196636
5	Direzione Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.209797	0.456177	0.497966	0.06513	0.170993	0.190707
6	Direzione Vento, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.203658	0.451911	0.49164	0.073415	0.175023	0.193217
7	Intensità Pioggia, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.209549	0.448198	0.484677	0.064932	0.171808	0.185427
8	Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.203405	0.444315	0.47918	0.072851	0.17868	0.196158
9	Direzione Vento, Velocità Vento, Intensità Pioggia, Umidità Relativa, Giorno	0.226349	0.428905	0.466887	0.104513	0.139902	0.123119
10	Direzione Vento, Velocità Vento, Umidità Relativa, Giorno	0.223846	0.427388	0.461544	0.101501	0.141847	0.122325
11	Velocità Vento, Intensità Pioggia, Umidità Relativa, Giorno	0.22624	0.418262	0.452849	0.106838	0.132442	0.11785
12	Velocità Vento, Umidità Relativa, Giorno	0.223748	0.416656	0.448086	0.10369	0.133713	0.117908
13	Direzione Vento, Intensità Pioggia, Umidità Relativa, Giorno	0.182517	0.408063	0.446201	0.070165	0.128995	0.11615
14	Direzione Vento, Velocità Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Giorno	0.247099	0.42838	0.445928	0.095301	0.169661	0.142332
15	Direzione Vento, Umidità Relativa, Giorno	0.175002	0.405847	0.438406	0.066108	0.127071	0.113758
16	Direzione Vento, Velocità Vento, Temperatura, Giorno	0.244746	0.422323	0.436927	0.093447	0.168891	0.142533
17	Intensità Pioggia, Umidità Relativa, Giorno	0.181454	0.399219	0.433303	0.071604	0.124958	0.119036
18	Velocità Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Giorno	0.247097	0.413646	0.426939	0.096391	0.155007	0.124767
19	Umidità Relativa, Giorno	0.173898	0.396959	0.426919	0.066912	0.122836	0.118374
20	Direzione Vento, Velocità Vento, Intensità Pioggia, Giorno	0.22035	0.375269	0.421325	0.116805	0.130692	0.119092

PM10(Convalida)

n.	Variabili	Adattamento			Convalida		
		Lineare	Grado 2	Grado 3	Lineare	Grado 2	Grado 3
1	Direzione Vento, Velocità Vento, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.245183	0.480023	0.517392	0.090268	0.204487	0.202038
2	Velocità Vento, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.245173	0.471116	0.502135	0.091455	0.205376	0.196636
3	Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.203405	0.444315	0.47918	0.072851	0.17868	0.196158
4	Velocità Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.247235	0.473606	0.506975	0.092789	0.201174	0.195853
5	Direzione Vento, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.203658	0.451911	0.49164	0.073415	0.175023	0.193217
6	Direzione Vento, Velocità Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.247242	0.482963	0.522586	0.091526	0.202748	0.191292
7	Direzione Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.209797	0.456177	0.497966	0.06513	0.170993	0.190707
8	Intensità Pioggia, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.209549	0.448198	0.484677	0.064932	0.171808	0.185427
9	Direzione Vento, Velocità Vento, Temperatura, Giorno	0.244746	0.422323	0.436927	0.093447	0.168891	0.142533
10	Direzione Vento, Velocità Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Giorno	0.247099	0.42838	0.445928	0.095301	0.169661	0.142332
11	Velocità Vento, Temperatura, Umidità Relativa	0.172015	0.274261	0.33073	0.062347	0.077576	0.132555
12	Direzione Vento, Velocità Vento, Temperatura, Umidità Relativa	0.172053	0.277465	0.339221	0.061829	0.077029	0.132525
13	Direzione Vento, Velocità Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Umidità Relativa	0.173388	0.280805	0.344306	0.059492	0.078761	0.127101
14	Velocità Vento, Temperatura, Giorno	0.244744	0.408749	0.418354	0.094496	0.155424	0.12699
15	Velocità Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Giorno	0.247097	0.413646	0.426939	0.096391	0.155007	0.124767
16	Velocità Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Umidità Relativa	0.173343	0.277614	0.335356	0.060046	0.079438	0.124536
17	Direzione Vento, Velocità Vento, Intensità Pioggia, Umidità Relativa, Giorno	0.226349	0.428905	0.466887	0.104513	0.139902	0.123119
18	Direzione Vento, Velocità Vento, Umidità Relativa, Giorno	0.223846	0.427388	0.461544	0.101501	0.141847	0.122325
19	Temperatura, Umidità Relativa	0.131359	0.2442	0.307444	0.065873	0.057985	0.120337
20	Direzione Vento, Temperatura, Umidità Relativa	0.131985	0.247279	0.315399	0.066286	0.057893	0.11922

Figura: R2 da regressione e convalida k-fold (k=10) su PM10

Anche per il PM10 il discorso non cambia. Si ottengono interessanti risultati in termini di adattamento del modello, ma pessimi per quanto riguarda la significatività, anche per quanto riguarda gradi superiori poiché evidentemente l'utilizzo di tali tecniche non fa altro che spingere il modello ad adattarsi in maniera forzata al set di dati, provocando un inevitabile overfitting.

Modelli generalizzati additivi

Dato che non è stato possibile trovare nessun buon risultato con la regressione sarà opportuno salire di livello ed utilizzare modelli più complessi, iniziando con quelli generalizzati additivi. Anche in questo caso si utilizzerà una procedura iterativa per computare più modelli contemporaneamente per tutte le possibili combinazioni di

descrittori.

Per descrivere le variabili all'interno del modello si è scelto di utilizzare la distribuzione di Poisson, mentre per quanto riguarda la funzione di collegamento è stata utilizzata la funzione logaritmo. Si è scelto di utilizzare tale configurazione facendo riferimento a quanto osservato nell'articolo Zhang et al. (2018).

I modelli utilizzati variano in base al numero di variabili indipendenti impiegate. Sono qui elencati in ordine crescente per numero di parametri.

2 parametri:

- Spline(p1) + Spline(p2);
- Spline(p1) + Lineare(p2);
- Lineare(p1) + Spline(p2).

3 parametri:

- Spline(p1) + Spline(p2) + Spline(p3);
- Spline(p1) + Spline(p2) + Lineare(p3);
- Spline(p1) + Lineare(p2) + Spline(p3).

4 parametri:

- Spline(p1) + Spline(p2) + Spline(p3) + Spline(p4);
- Spline(p1) + Spline(p2) + Lineare(p3) + Spline(p4);
- Spline(p1) + Lineare(p2) + Spline(p3) + Lineare(p4).

Qui di seguito verranno riportati i risultati relativi all'adattamento e alla convalida per ogni modello. Si partirà come sempre dal PM2.5 per poi passare al PM10, riportando come nel caso della regressione multivariata solamente i migliori 20 modelli.

Inoltre, per ciascuna tipologia di particolato si analizzeranno le dipendenze parziali in modo da evidenziare quale sia l'influenza di ogni singolo descrittore sulla variabile dipendente. Si tratta di uno strumento molto importante poiché, una volta individuato un modello con una buona capacità di adattamento, riesce a fornire risultati significativi.

PM2.5 (Adattamento)

n.	Variabili	Adattamento			Convalida		
		Spline	Spline+Linear 1	Spline+Linear 2	Spline	Spline+Linear 1	Spline+Linear 2
1	Velocità Vento, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.546754	0.360913191	0.324828486	0.244864	0.136723	0.128513
2	Velocità Vento, Intensità Pioggia, Umidità Relativa, Giorno	0.527122	0.226699172	0.216338597	0.163176	0.130435462	0.129729549
3	Intensità Pioggia, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.524117	0.344737041	0.311189756	0.212171	0.125287225	0.121582769
4	Direzione Vento, Velocità Vento, Umidità Relativa, Giorno	0.521378	0.22491887	0.224162203	0.162179	0.116971051	0.12085998
5	Velocità Vento, Umidità Relativa, Giorno	0.518754	0.210713825	0.451414833	0.165249	0.125351152	0.133763525
6	Direzione Vento, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.517822	0.335020031	0.301814876	0.20028	0.1070136	0.114775633
7	Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.515374	0.325146017	0.401117656	0.202687	0.108676561	0.131062938
8	Direzione Vento, Intensità Pioggia, Umidità Relativa, Giorno	0.507078	0.182334075	0.168625206	0.145618	0.104291931	0.096399776
9	Intensità Pioggia, Umidità Relativa, Giorno	0.504072	0.16003427	0.430440845	0.146966	0.111964483	0.108418095
10	Direzione Vento, Umidità Relativa, Giorno	0.496692	0.154499237	0.396982889	0.13837	0.088522827	0.095236319
11	Umidità Relativa, Giorno	0.493566	0.129768102	0.393865074	0.139668	0.10054	0.0969007
12	Velocità Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Giorno	0.468931	0.335754497	0.31754233	0.1371	0.123512617	0.118137886
13	Direzione Vento, Velocità Vento, Intensità Pioggia, Giorno	0.466792	0.196089558	0.194962364	0.136861	0.092662578	0.095143969
14	Velocità Vento, Intensità Pioggia, Giorno	0.464527	0.185018181	0.452299658	0.138583	0.101011596	0.139003013
15	Direzione Vento, Velocità Vento, Temperatura, Giorno	0.452601	0.310930325	0.310595479	0.147489	0.107854471	0.110316407
16	Velocità Vento, Temperatura, Giorno	0.451052	0.304124791	0.446035338	0.146474	0.112114019	0.142661259
17	Direzione Vento, Velocità Vento, Umidità Relativa, Giorno	0.447652	0.182104999	0.446022792	0.13133	0.081086636	0.130122077
18	Velocità Vento, Giorno	0.445956	0.170931267	0.444507253	0.134101	0.0901011	0.132894
19	Direzione Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Giorno	0.399603	0.283805959	0.265213949	0.08224	0.082776823	0.07847992
20	Intensità Pioggia, Temperatura, Giorno	0.397135	0.278946864	0.390247529	0.083289	0.084747273	0.086676526

PM2.5 (Convalida)

n.	Variabili	Adattamento			Convalida		
		Spline	Spline+Linear 1	Spline+Linear 2	Spline	Spline+Linear 1	Spline+Linear 2
1	Velocità Vento, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.546754	0.360913191	0.324828486	0.244864	0.136723	0.128513
2	Intensità Pioggia, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.524117	0.344737041	0.311189756	0.212171	0.125287225	0.121582769
3	Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.515374	0.325146017	0.401117656	0.202687	0.108676561	0.131062938
4	Direzione Vento, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.517822	0.335020031	0.301814876	0.20028	0.1070136	0.114775633
5	Velocità Vento, Umidità Relativa, Giorno	0.518754	0.210713825	0.451414833	0.165249	0.125351152	0.133763525
6	Velocità Vento, Intensità Pioggia, Umidità Relativa, Giorno	0.527122	0.226699172	0.216338597	0.163176	0.130435462	0.129729549
7	Direzione Vento, Velocità Vento, Umidità Relativa, Giorno	0.521378	0.22491887	0.224162203	0.162179	0.116971051	0.12085998
8	Direzione Vento, Velocità Vento, Temperatura, Giorno	0.452601	0.310930325	0.310595479	0.147489	0.107854471	0.110316407
9	Intensità Pioggia, Umidità Relativa, Giorno	0.504072	0.16003427	0.430440845	0.146966	0.111964483	0.108418095
10	Velocità Vento, Temperatura, Giorno	0.451052	0.304124791	0.446035338	0.146474	0.112114019	0.142661259
11	Direzione Vento, Intensità Pioggia, Umidità Relativa, Giorno	0.507078	0.182334075	0.168625206	0.145618	0.104291931	0.096399776
12	Velocità Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Umidità Relativa	0.362795	0.321014557	0.301895379	0.142697	0.133328099	0.122157452
13	Velocità Vento, Intensità Pioggia, Umidità Relativa	0.174018	0.156584511	0.166841545	0.1423	0.129806087	0.138987751
14	Velocità Vento, Temperatura, Umidità Relativa	0.350135	0.290113047	0.317810904	0.140637	0.115136651	0.140539142
15	Umidità Relativa, Giorno	0.493566	0.129768102	0.393865074	0.139668	0.10054	0.0969007
16	Velocità Vento, Intensità Pioggia, Giorno	0.464527	0.185018181	0.452299658	0.138583	0.101011596	0.139003013
17	Direzione Vento, Umidità Relativa, Giorno	0.496692	0.154499237	0.396982889	0.13837	0.088522827	0.095236319
18	Direzione Vento, Velocità Vento, Temperatura, Umidità Relativa	0.358767	0.297041595	0.296657727	0.137683	0.112334722	0.114716767
19	Velocità Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Giorno	0.468931	0.335754497	0.31754233	0.1371	0.123512617	0.118137886
20	Direzione Vento, Velocità Vento, Intensità Pioggia, Giorno	0.466792	0.196089558	0.194962364	0.136861	0.092662578	0.095143969

Figura: R2 da gam e convalida k-fold (k=10) su PM2.5

Da questa prima tabella si può vedere come l'uso esclusivo delle spline restituisca i risultati migliori in termini di adattamento. Per quanto riguarda la significatività anche con il modello GAM non si va oltre lo 0.24, stesso valore trovato con i modelli regressivi polinomiali. Ciò fa capire come ogni modello provato finora resituisca un risultato affetto da overfitting.

Attraverso gli strumenti utilizzati in Python è possibile inoltre osservare le dipendenze parziali del modello da ogni singolo descrittore utilizzato. Pertanto è possibile verificare il singolo contributo di ogni variabile indipendente all'interno del modello. Tale procedura è stata applicata non solo in questa analisi, ma anche nelle due successive.

Si riportano adesso le dipendenze parziali in merito a direzione del vento, velocità del vento, intensità di pioggia e giorno (modello 1).

Modello:

$$\log(y) = \beta_o + s(windir) + s(windv) + s(intrain) + s(day)$$

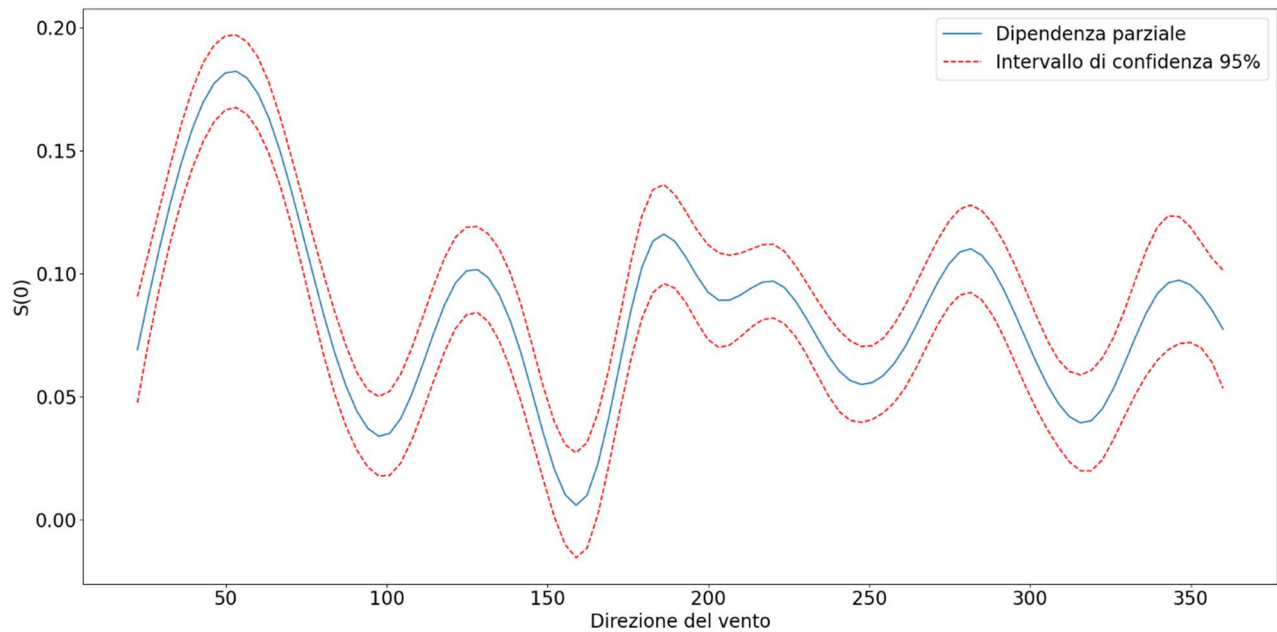


Figura : dipendenza parziale del modello dalla direzione del vento (PM2.5)

Attraverso la dipendenza parziale relativa alla direzione del vento è possibile vedere quali siano le direzioni preferenziali del particolato, potendo inoltre apprezzare l'aleatorietà nella relazione con tale parametro.

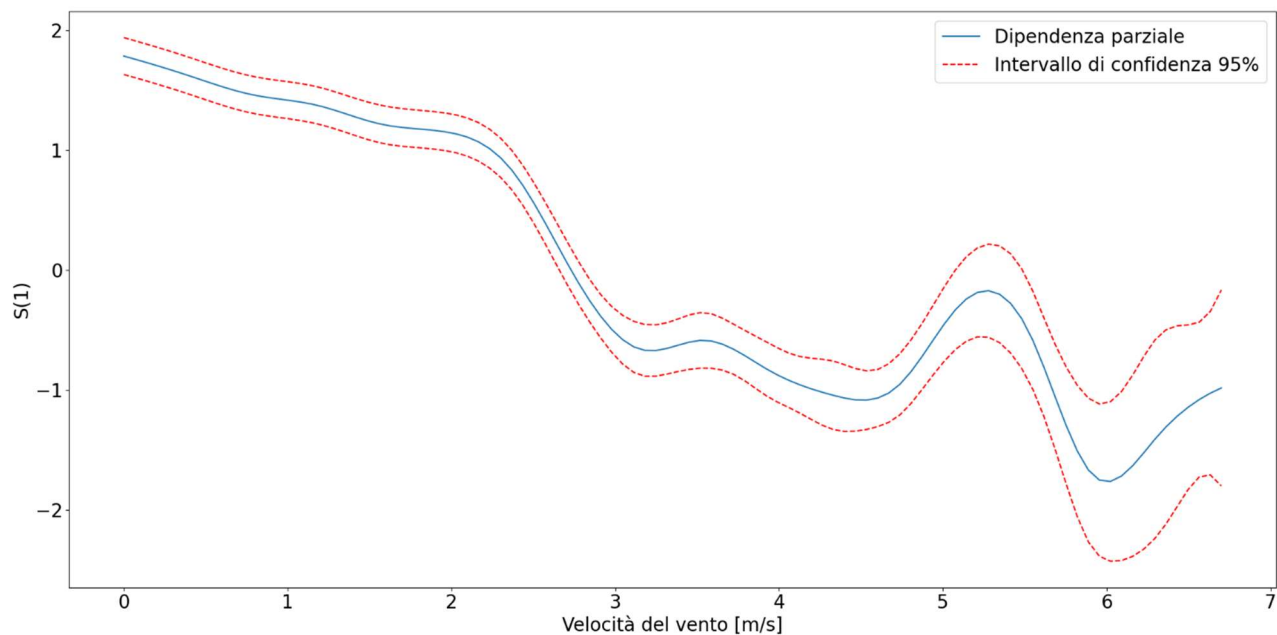


Figura : dipendenza parziale del modello dalla velocità del vento (PM2.5)

Si nota come all'aumentare della velocità del vento ci sia una diminuzione della concentrazione. Tale diminuzione si interrompe in prossimità dei 5 m/s dove è possibile invece notare un leggero reincremento. Per velocità superiori a 6 m/s si nota una diminuzione nella confidenza poiché il numero di dati si riduce drasticamente.

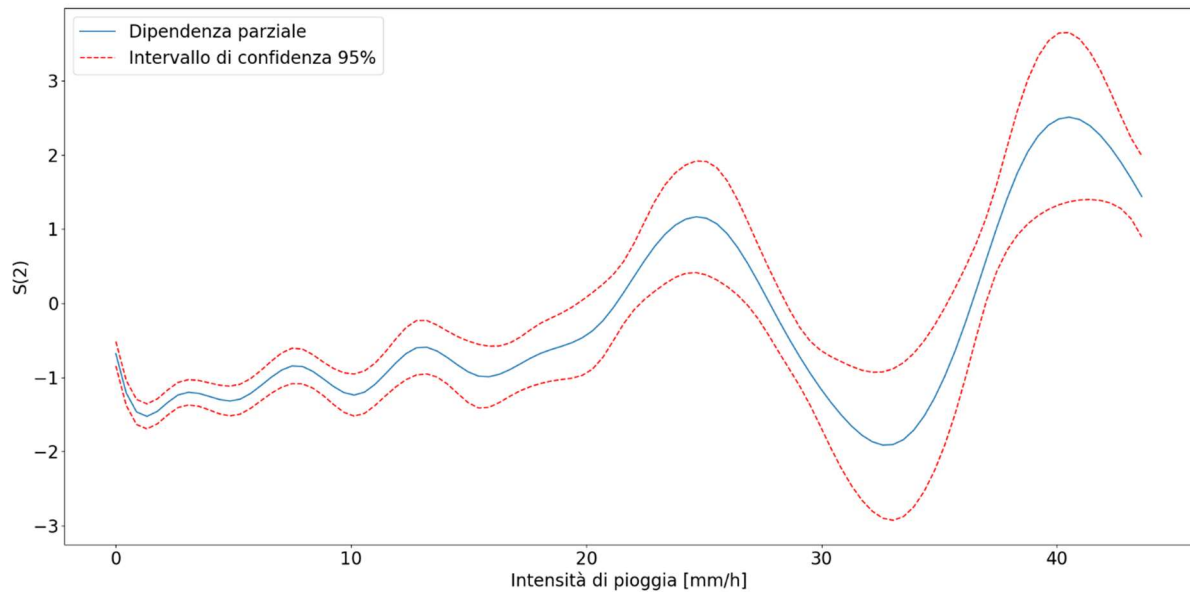


Figura : dipendenza parziale del modello dall'intensità di pioggia (PM2.5)

Per l'intensità di pioggia si è osservato in precedenza come l'impatto sia sempre negativo. Dal seguente grafico è possibile apprezzare come ciò sia vero fino a 20 mm/h. Al di là di tale soglia si può notare un'oscillazione caratterizzata da un aumento nell'intervallo di confidenza, a dimostrazione del numero ridotto di fenomeni con questo livello di intensità, ovvero fenomeni di tipo temporalesco.

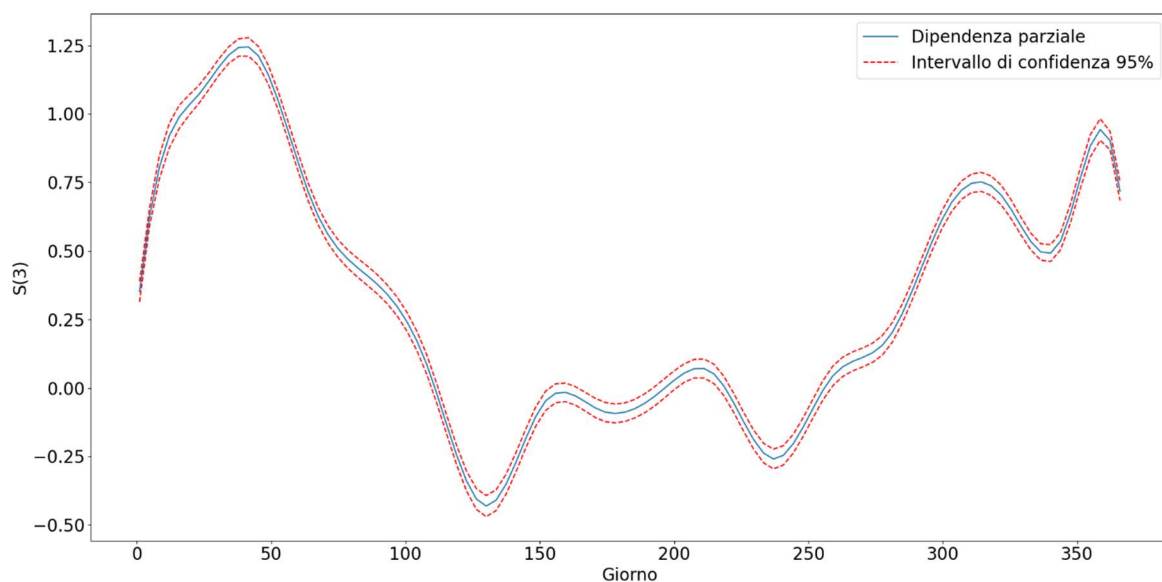


Figura : dipendenza parziale del modello dal giorno (PM2.5)

Da quest'ultimo grafico invece si può osservare il trend medio della concentrazione di particolato in funzione del giorno dell'anno. È possibile notare come i valori maggiori si trovino orientativamente nei mesi invernali e quelli più bassi nel periodo primaverile/estivo.

PM10 (Adattamento)

n.	Variabili	Adattamento			Convalida		
		Spline	Spline+Linear 1	Spline+Linear 2	Spline	Spline+Linear 1	Spline+Linear 2
1	Velocità Vento, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.550127	0.362414283	0.335693802	0.177122	0.106213	0.112754
2	Direzione Vento, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.537711	0.346430117	0.320524252	0.155685	0.0788795	0.0895815
3	Intensità Pioggia, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.53761	0.351605439	0.325787838	0.163873	0.0968827	0.103426
4	Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.532373	0.338186482	0.45702728	0.154777	0.0849159	0.116823
5	Velocità Vento, Intensità Pioggia, Umidità Relativa, Giorno	0.520865	0.333082067	0.325427693	0.136404	0.141998	0.136154
6	Direzione Vento, Velocità Vento, Umidità Relativa, Giorno	0.518105	0.326375594	0.327311374	0.129505	0.127294	0.130435
7	Velocità Vento, Umidità Relativa, Giorno	0.515256	0.320978709	0.467377634	0.133199	0.1326	0.116652
8	Direzione Vento, Intensità Pioggia, Umidità Relativa, Giorno	0.511409	0.315618442	0.307294161	0.119964	0.120987	0.112014
9	Intensità Pioggia, Umidità Relativa, Giorno	0.506723	0.304434961	0.454969156	0.120045	0.123785	0.0938897
10	Direzione Vento, Umidità Relativa, Giorno	0.504809	0.299391878	0.436978873	0.114136	0.104998	0.0838608
11	Umidità Relativa, Giorno	0.499992	0.287611663	0.431613324	0.115163	0.10772	0.083975
12	Velocità Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Giorno	0.485882	0.34249933	0.330831261	0.129111	0.0926009	0.0915162
13	Direzione Vento, Velocità Vento, Intensità Pioggia, Giorno	0.478232	0.300506659	0.300249765	0.125854	0.132148	0.137645
14	Velocità Vento, Intensità Pioggia, Giorno	0.477196	0.296575277	0.469848565	0.126733	0.13557	0.123693
15	Direzione Vento, Velocità Vento, Temperatura, Giorno	0.476856	0.32498548	0.324363191	0.127285	0.085208	0.0876535
16	Velocità Vento, Temperatura, Giorno	0.47614	0.321945558	0.468300425	0.124732	0.0888362	0.135098
17	Direzione Vento, Velocità Vento, Giorno	0.466651	0.285334999	0.463233811	0.117115	0.115337	0.116345
18	Velocità Vento, Giorno	0.465466	0.281135967	0.46273642	0.119521	0.120403	0.119088
19	Direzione Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Giorno	0.440327	0.302887326	0.291402935	0.086673	0.0560954	0.0564101
20	Intensità Pioggia, Temperatura, Giorno	0.437874	0.297583578	0.42505539	0.090161	0.0575941	0.0913522

PM10 (Convalida)

n.	Variabili	Adattamento			Convalida		
		Spline	Spline+Linear 1	Spline+Linear 2	Spline	Spline+Linear 1	Spline+Linear 2
1	Velocità Vento, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.550127	0.362414283	0.335693802	0.177122	0.106213	0.112754
2	Intensità Pioggia, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.53761	0.351605439	0.325787838	0.163873	0.0968827	0.103426
3	Direzione Vento, Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.537711	0.346430117	0.320524252	0.155685	0.0788795	0.0895815
4	Temperatura, Umidità Relativa, Giorno	0.532373	0.338186482	0.45702728	0.154777	0.0849159	0.116823
5	Velocità Vento, Intensità Pioggia, Umidità Relativa, Giorno	0.520865	0.333082067	0.325427693	0.136404	0.141998	0.136154
6	Velocità Vento, Umidità Relativa, Giorno	0.515256	0.320978709	0.467377634	0.133199	0.1326	0.116652
7	Direzione Vento, Velocità Vento, Umidità Relativa, Giorno	0.518105	0.326375594	0.327311374	0.129505	0.127294	0.130435
8	Velocità Vento, Intensità Pioggia, Temperatura, Giorno	0.485882	0.34249933	0.330831261	0.129111	0.0926009	0.0915162
9	Direzione Vento, Velocità Vento, Temperatura, Giorno	0.476856	0.32498548	0.324363191	0.127285	0.085208	0.0876535
10	Velocità Vento, Intensità Pioggia, Giorno	0.477196	0.296575277	0.469848565	0.126733	0.13557	0.123693
11	Direzione Vento, Velocità Vento, Intensità Pioggia, Giorno	0.478232	0.300506659	0.300249765	0.125854	0.132148	0.137645
12	Velocità Vento, Temperatura, Giorno	0.47614	0.321945558	0.468300425	0.124732	0.0888362	0.135098
13	Intensità Pioggia, Umidità Relativa, Giorno	0.506723	0.304434961	0.454969156	0.120045	0.123785	0.0938897
14	Direzione Vento, Intensità Pioggia, Umidità Relativa, Giorno	0.511409	0.315618442	0.307294161	0.119964	0.120987	0.112014
15	Velocità Vento, Giorno	0.465466	0.281135967	0.46273642	0.119521	0.120403	0.119088
16	Direzione Vento, Velocità Vento, Giorno	0.466651	0.285334999	0.463233811	0.117115	0.115337	0.116345
17	Umidità Relativa, Giorno	0.499992	0.287611663	0.431613324	0.115163	0.10772	0.083975
18	Direzione Vento, Umidità Relativa, Giorno	0.504809	0.299391878	0.436978873	0.114136	0.104998	0.0838608
19	Velocità Vento, Intensità Pioggia, Umidità Relativa	0.125635	0.101129799	0.120605027	0.095596	0.0776634	0.0886933
20	Direzione Vento, Intensità Pioggia, Giorno	0.429376	0.229540786	0.422700235	0.093269	0.0918772	0.088755

Figura: R2 da gam e convalida k-fold (k=10) su PM10

È sempre il modello articolato da sole Smoothing Spline a restituire i risultati migliori in termini di adattamento. Per quanto riguarda i risultati della convalida incrociata, anche in questo caso non si ottengono dei buoni risultati.

Si riportano adesso le dipendenze parziali in merito a direzione del vento, velocità del vento, intensità di pioggia e giorno (modello 1).

Modello:

$$\log(y) = \beta_o + s(windir) + s(windv) + s(intrain) + s(day)$$

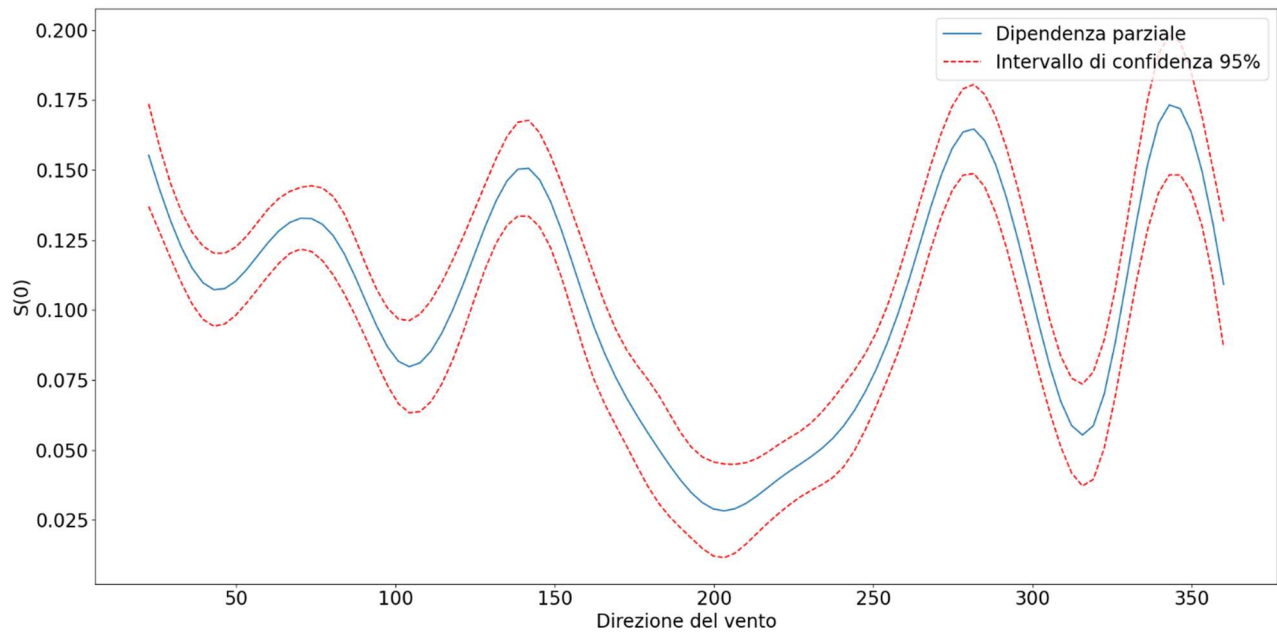


Figura : dipendenza parziale del modello dalla direzione del vento (PM10)

Dalle analisi precedenti si era potuto osservare come la direzione preferenziale per il PM10 fosse la W. In questo grafico è possibile notare come i massimi ricadano tra 250° e 300° (classe W) e in prossimità di 350° (Classe N).

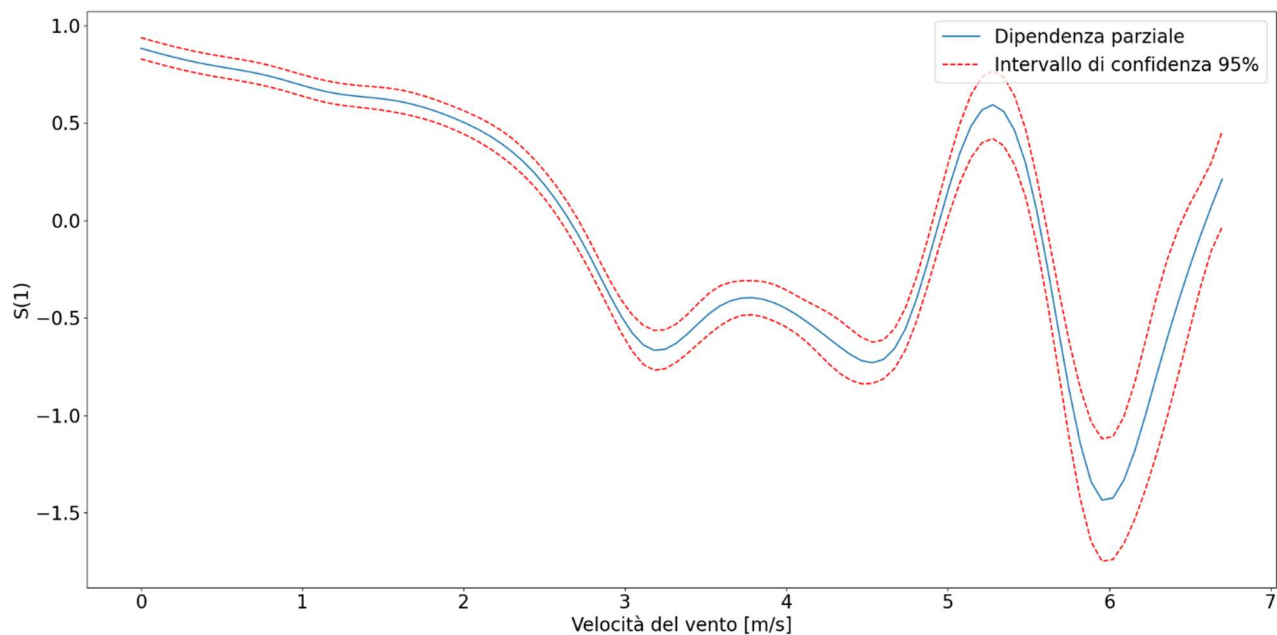


Figura : dipendenza parziale del modello dalla velocità del vento (PM10)

Il trend è molto simile a quanto visto per il PM2.5. Tuttavia l'aumento che si verifica in prossimità dei 4.5 m/s è molto più accentuato, tipico comportamento del PM10 al raggiungimento di una certa velocità di soglia (incremento nell'efficienza del potere erosivo del vento).

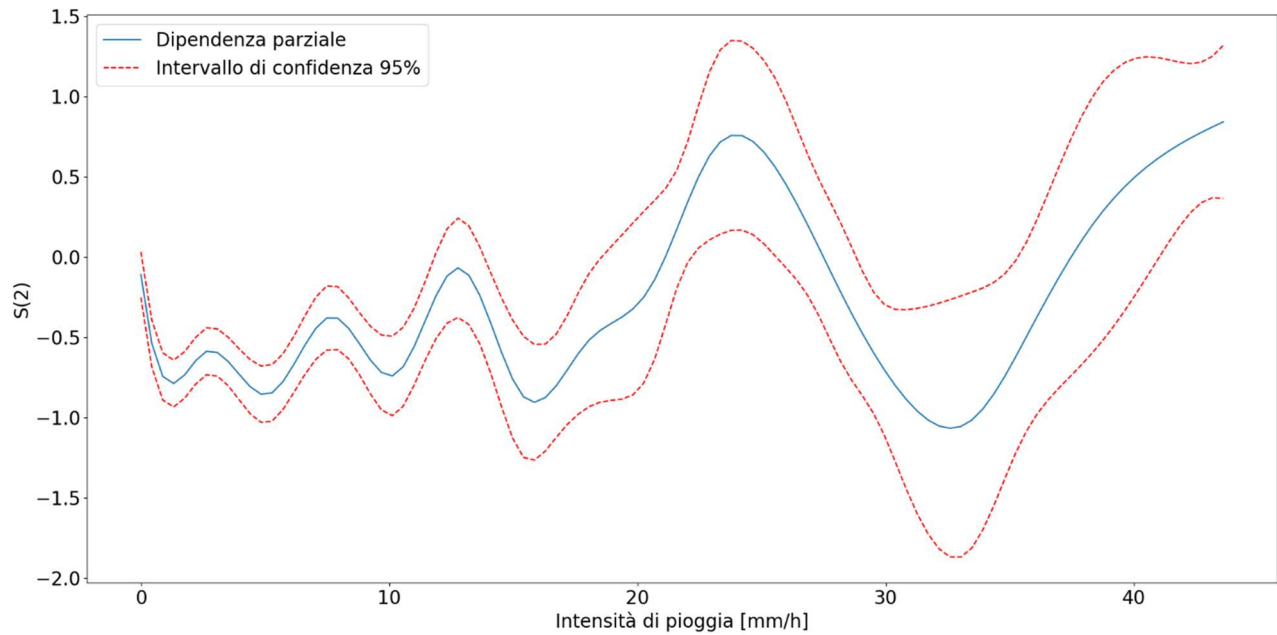


Figura : dipendenza parziale del modello dall'intensità di pioggia (PM10)

Anche per il PM10 il trend in funzione dell'intensità di pioggia è molto altalenante. Tuttavia non si nota un incremento medio come visto per il PM2.5. Si nota invece un amplificazione nelle variazioni di concentrazione all'aumentare dell'intensità di pioggia che come visto in precedenza è il risultato della perdita di significatività a causa del numero ridotto di fenomeni con tale intensità.

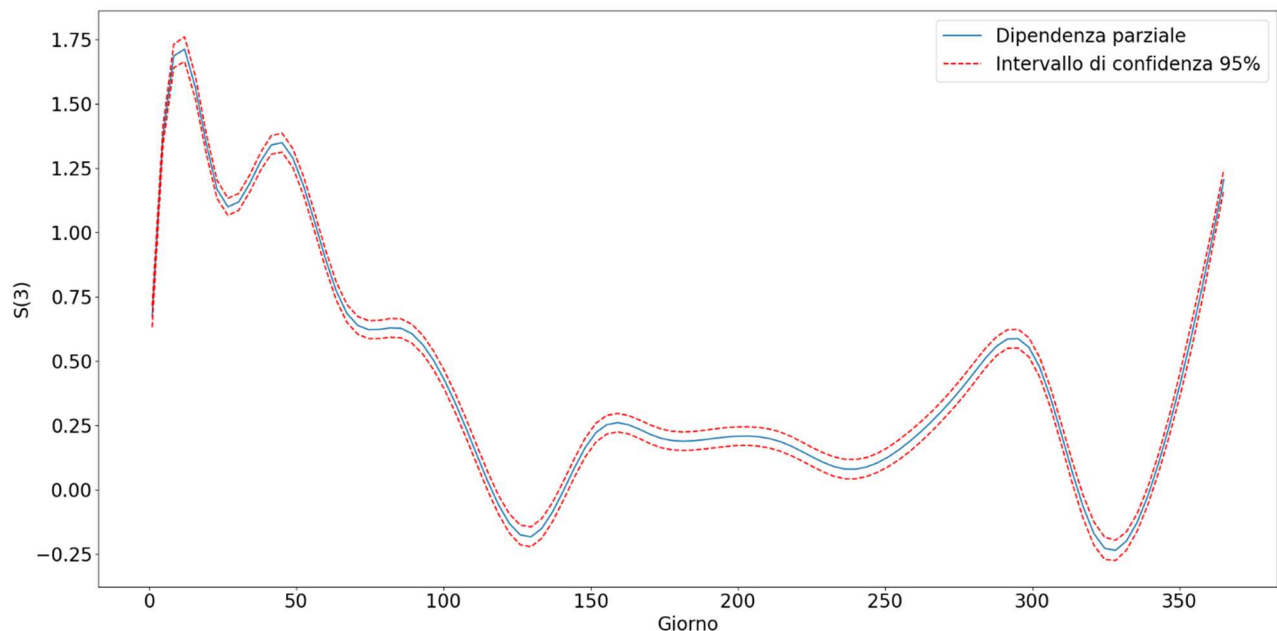


Figura : dipendenza parziale del modello dal giorno (PM10)

Infine, per quanto riguarda i giorni è possibile notare come i mesi di dicembre, gennaio e febbraio siano quelli contraddistinti dalle concentrazioni maggiori.

Reti neurali artificiali

Attraverso l'uso dei modelli additivi generalizzati, in particolar modo grazie alle dipendenze parziali, è stato possibile fare alcune importanti osservazioni. Tuttavia, dal punto di vista della modellistica non si è riusciti a trovare un modello in grado non solo di adattarsi, ma anche di generalizzare. Di conseguenza, in questo paragrafo vengono riportati i risultati prodotti dall'applicazione di una rete neurale artificiale, allo scopo di ricercare un modello che sia anche in grado di generalizzare. A causa dell'estensione del dataset e del costo computazionale di tali modelli non è stato possibile implementare la procedura iterata vista fin qui. Si è scelto così di apportare una semplificazione, addestrando il modello per un periodo limitato di tempo, come ad esempio l'intero anno 2019 e provando a generalizzare per l'intero 2020.

Come detto in precedenza è stato utilizzato il modello di Elman con quattro input layer (velocità del vento, temperatura, umidità e giorno) e 10 hidden layer. Verranno riportati adesso i risultati relativi all'adattamento (anno 2019) e alla predizione (anno 2020), prima per il PM2.5 e poi per il PM10.

È stata scelta la combinazione di parametri che ha restituito i risultati migliori in termini di convalida incrociata, ovvero velocità del vento, temperatura, umidità e giorno.

Nei seguenti grafici verrà mostrato lo scatter-plot ottenuto tra valori di PM2.5 e PM10 misurati (asse x) e valori di PM2.5 e PM10 ottenuti dal modello (asse y). Inoltre verrà mostrata la retta interpolante con relativo intervallo di confidenza al 95%.

PM2.5 (Adattamento – 2019)

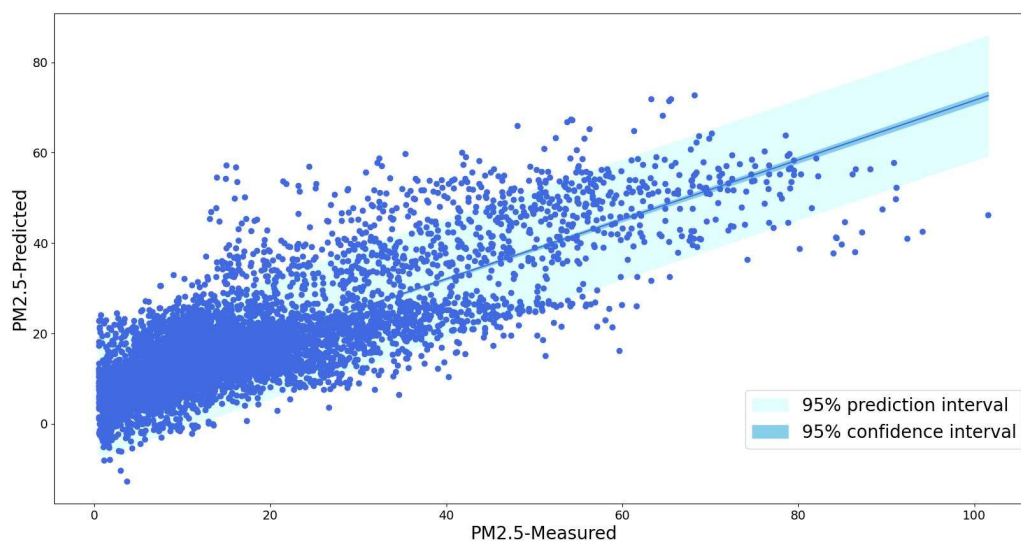


Figura : modello velocità del vento, temperatura, umidità, giorno (PM2.5 – 2019)

PM2.5 (Predizione – 2020)

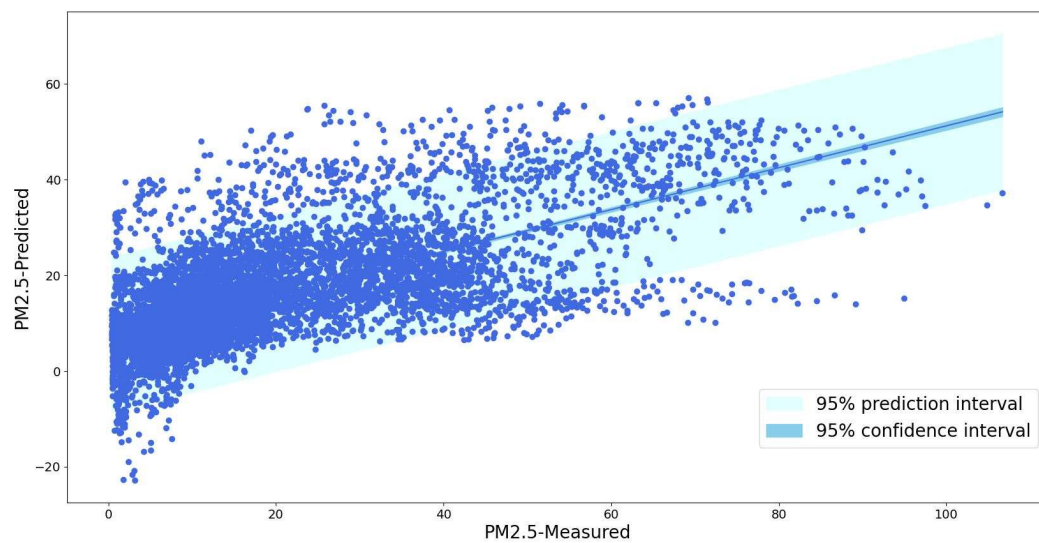


Figura : modello velocità del vento, temperatura, umidità, giorno (PM2.5 – 2020)

PM10 (Adattamento – 2019)

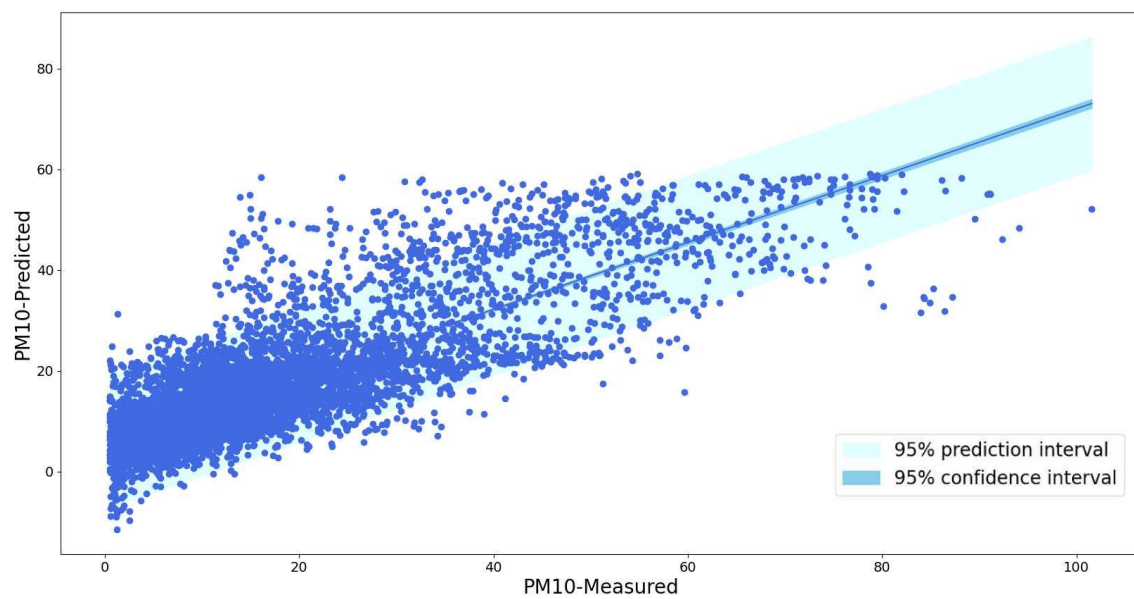


Figura : modello velocità del vento, temperatura, umidità, giorno (PM10 – 2019)

PM10 (Predizione – 2020)

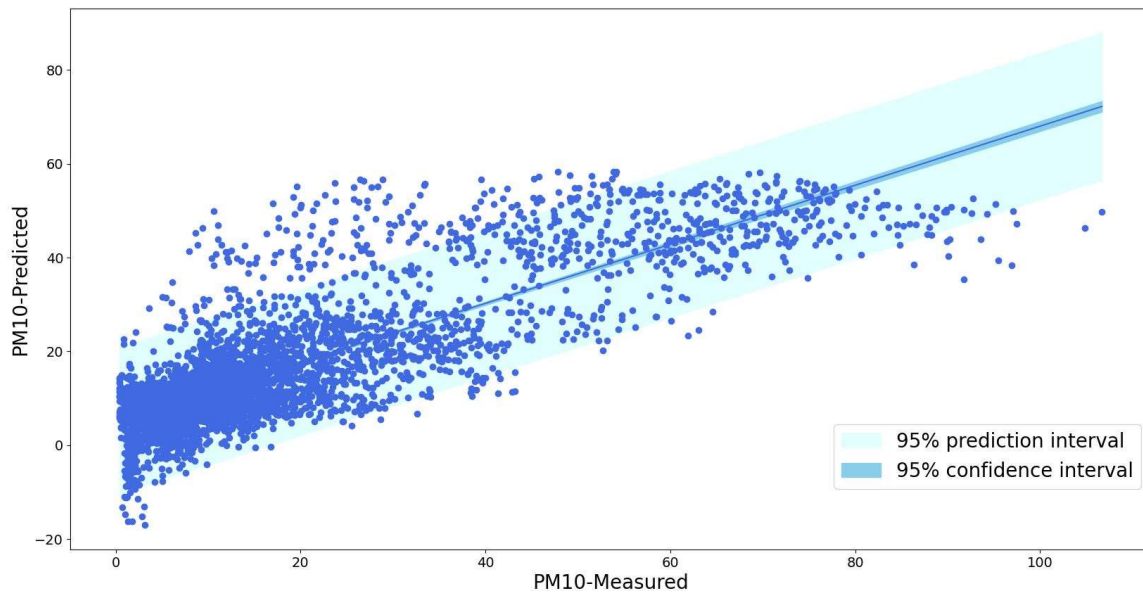


Figura : modello velocità del vento, temperatura, umidità, giorno (PM10 – 2019)

Da questi grafici si può notare come i risultati siano buoni sia per il PM2.5 che per il PM10, con dei coefficienti di determinazione superiori a 0.7 in fase di adattamento e superiori a 0.6 in fase di predizione. Si tratta comunque di un risultato ottenuto attraverso una convalida semplificata. Sarebbe opportuno investigare su quale sia effettivamente la capacità di generalizzare di tale modello.

Non aver trovato nessun modello in grado di generalizzare ribadisce l'importanza di cambiare prospettiva , provando per prima cosa a ragionare in termini di evento e non di singola misurazione oraria, ed in secondo luogo differenziando i fenomeni.

4.2. Analisi integrata sull'abbattimento di concentrazione

Dopo aver visto quanto sia complicato trovare un modello che si adatti ai dati in possesso, si passa ad illustrare i risultati e le considerazioni fatte in merito alla seconda tipologia di analisi svolta. Come detto in precedenza, nella seconda e nella terza fase di analisi non si ragionerà più in termini di concentrazione assoluta, ma di abbattimento all'interno degli eventi di vento o di pioggia. È importante ricordare che nell'analisi integrata non verrà fatta nessuna separazione dei due fenomeni, tenendo conto del vento all'interno degli eventi piovosi.

Prendendo spunto da quanto visto negli studi presenti in letteratura, sono di seguito analizzate le variazioni di concentrazione mese per mese. Nel seguente grafico è stata riportata la concentrazione media di particolato un'ora prima e un'ora dopo un certo fenomeno piovoso, da mese a mese, senza fare distinzione alcuna. Inoltre, è possibile apprezzare come cambi la variazione in funzione di una diversa concentrazione di partenza.

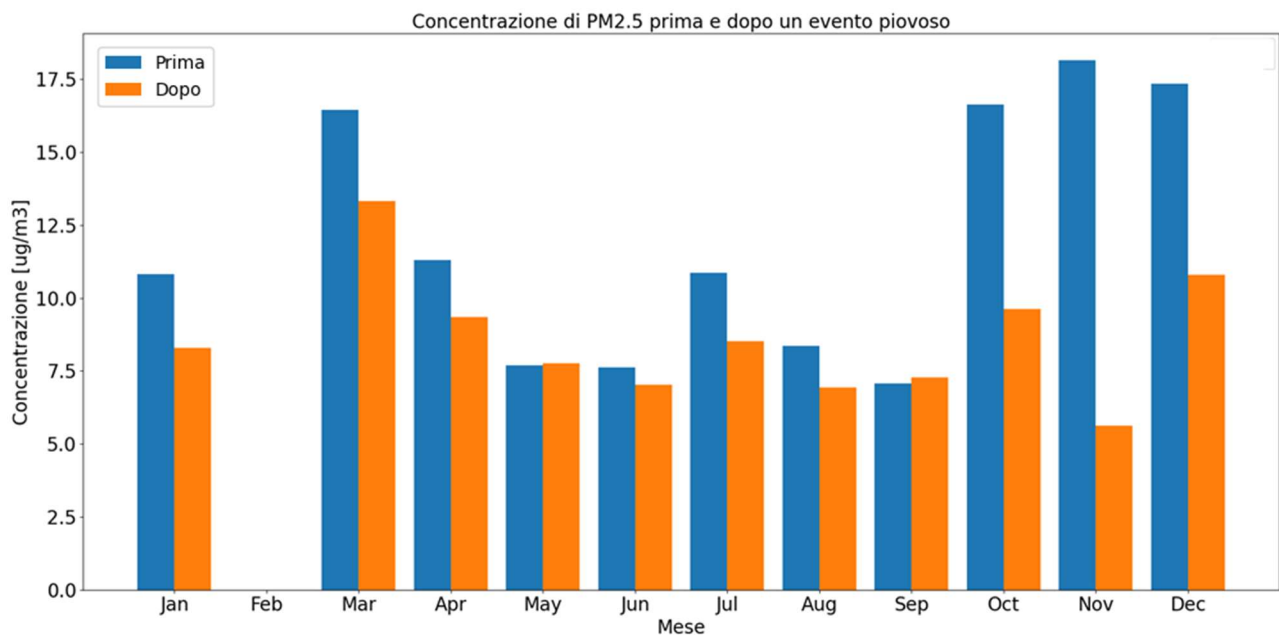


Figura : concentrazione di PM2.5 prima e dopo un evento piovoso in generale

Sono stati analizzati 134 eventi in totale. Si può notare come mediamente da mese a mese si noti quasi sempre un abbattimento dopo una pioggia. È possibile vedere come esso sia decisamente netto nei mesi di invernali. Invece, nei mesi primaverili/estivi si notano o delle variazioni più contenute o una stabilità tra ora iniziale e ora finale (maggio, settembre).

Adesso sarà importante fare una prima distinzione considerando diversi range di durata di tali eventi. Si è scelto di differenziare i fenomeni suddividendoli in due diversi range di durata di ugual numerosità. Si parte dal considerare gli eventi del primo insieme, ovvero quelli con una durata minore, più precisamente compresa tra 2 e 6 ore.

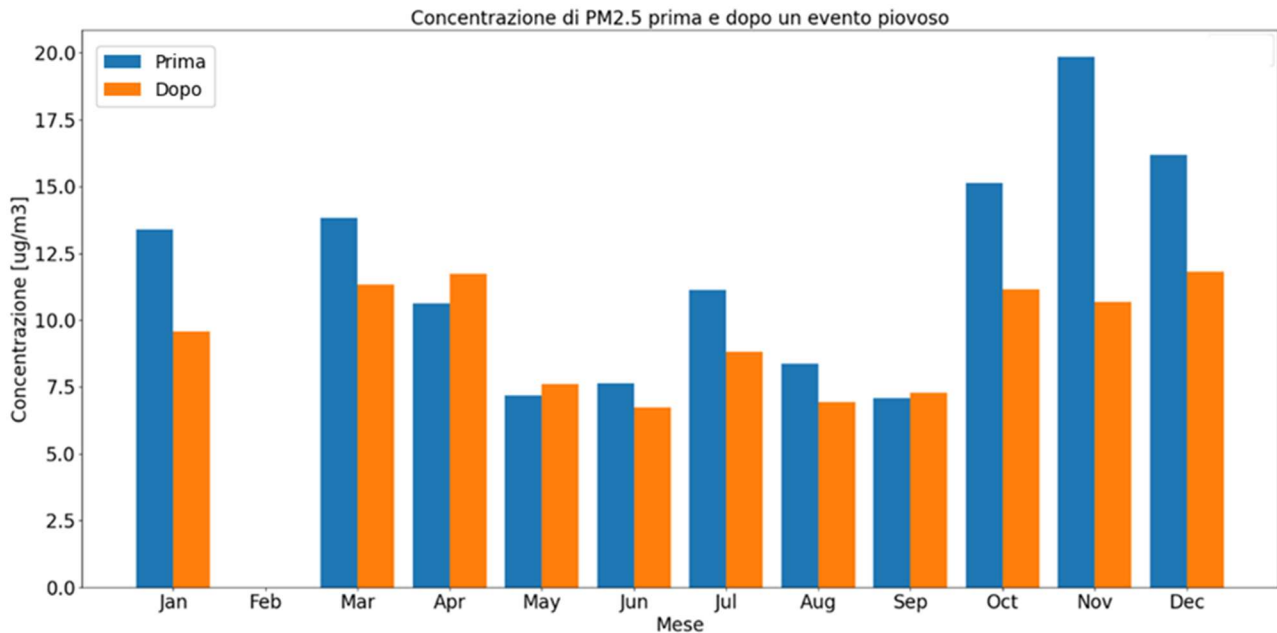


Figura : concentrazione di PM2.5 prima e dopo un evento piovoso di durata compresa tra 2 e 6 ore

È possibile notare che in generale le concentrazioni sono più alte rispetto all'esempio precedente. Oltre ai mesi di maggio e settembre si nota un incremento medio anche nel mese di aprile.

Verranno valutati adesso i fenomeni di durata compresa tra 7 e 15 ore.

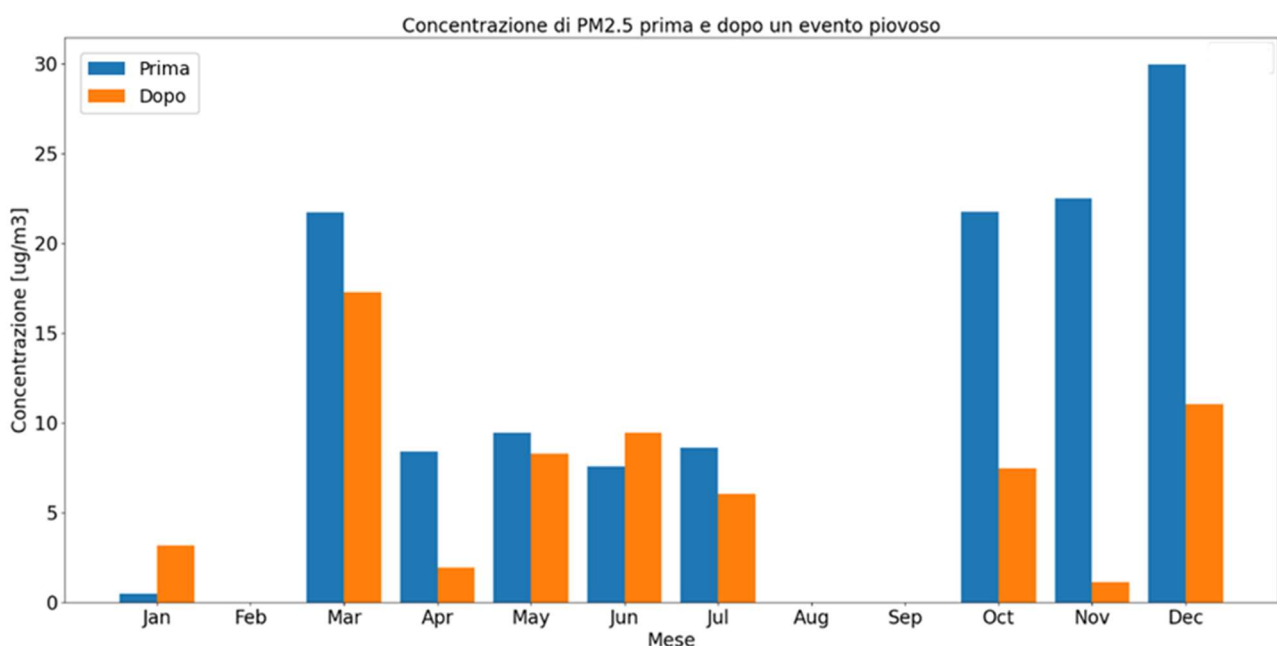


Figura : concentrazione di PM2.5 prima e dopo un evento piovoso di durata compresa tra 7 e 15 ore

È possibile osservare come per i mesi invernali le piogge di durata maggiore producano un abbattimento consistente. Quindi in conclusione, gli eventi con una durata maggiore ed una concentrazione iniziale maggiore di PM_{2.5} sono quelli in cui sembrano verificarsi gli abbattimenti maggiori.

Passando al PM₁₀ è importante ricordare come l'azione della pioggia sia teoricamente più efficace. Si parte dal valutare tutti gli eventi senza nessuna distinzione.

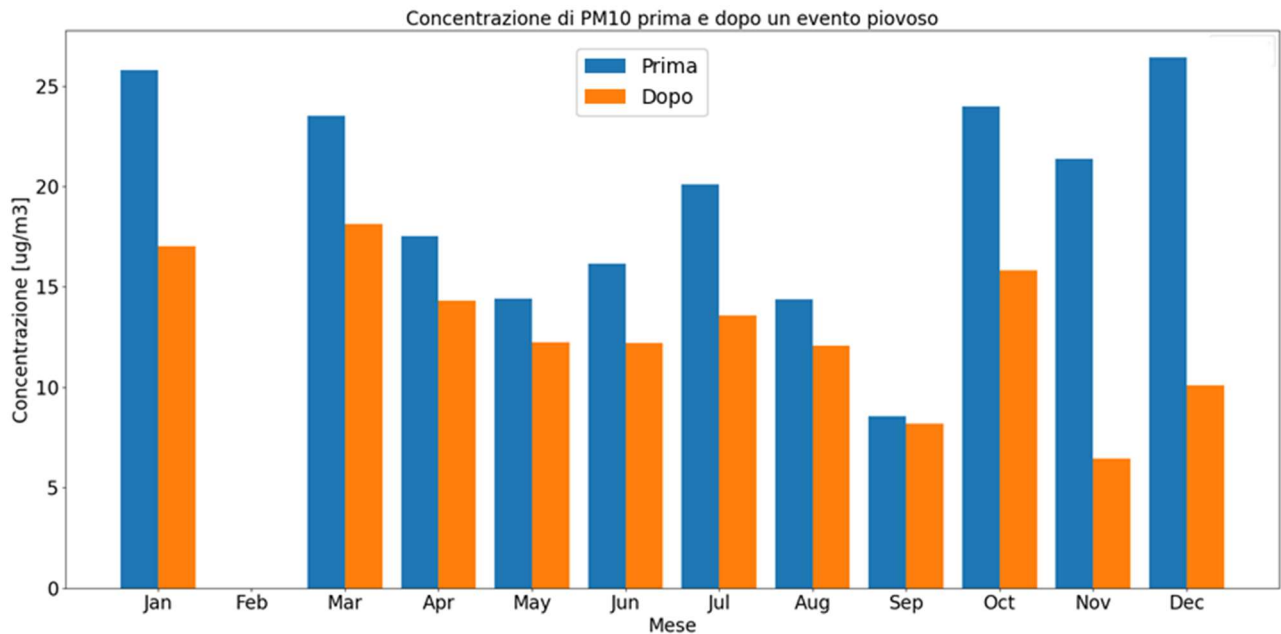


Figura : concentrazione di PM₁₀ prima e dopo un evento piovoso in generale

È possibile notare come ci sia sempre un abbattimento medio in ogni mese, più accentuato nei mesi invernali che nei mesi estivi. Da questo primo grafico si capisce subito come la rimozione di particolato da parte della pioggia sia più efficace per particelle di dimensioni maggiori.

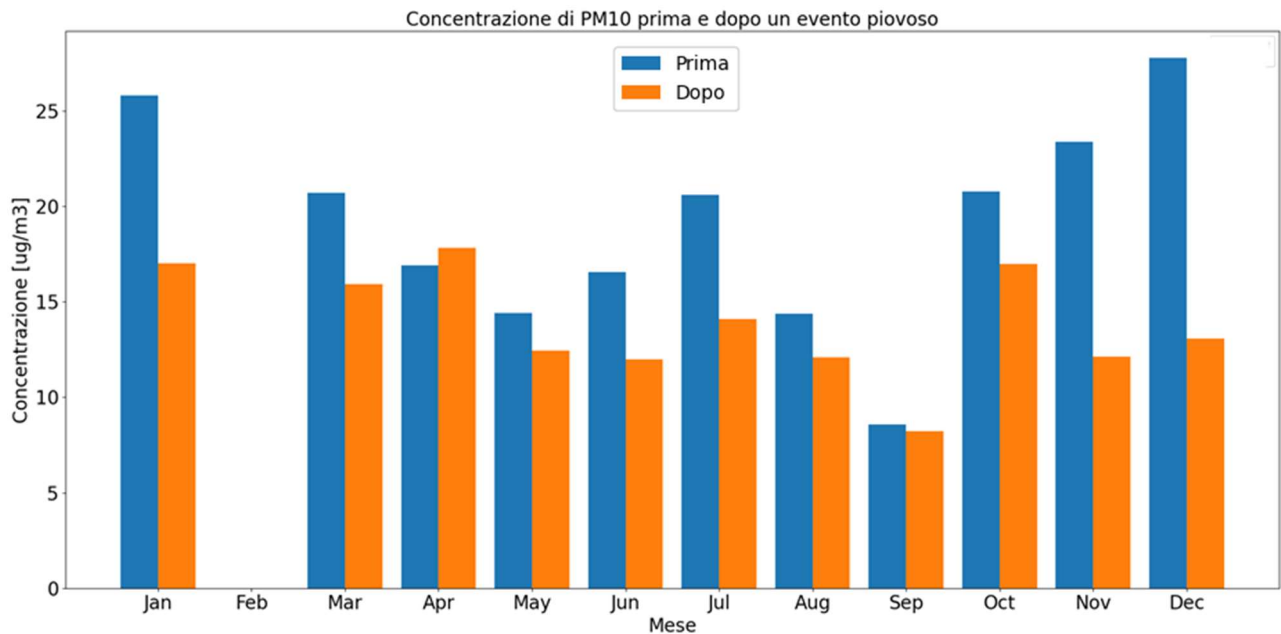


Figura : concentrazione di PM10 prima e dopo un evento piovoso di durata compresa tra 2 e 6 ore

Anche per gli eventi di breve durata si nota come il risultato sia uguale, a parte il mese di aprile in cui nota un leggero incremento nella concentrazione.

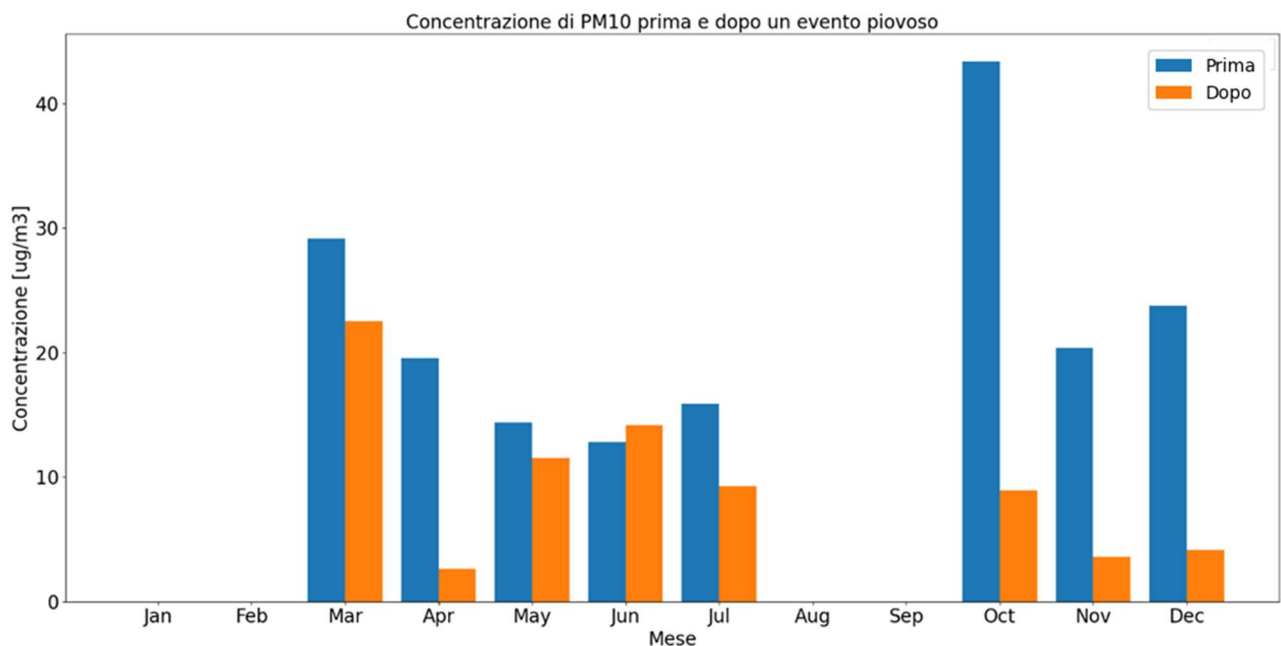


Figura : concentrazione di PM10 prima e dopo un evento piovoso di durata compresa tra 7 e 15 ore

Per durate superiori a 6 ore si notano degli abbattimenti molto elevati nei mesi di ottobre, novembre e dicembre, analogamente a quanto visto per il PM2.5. Anche nel mese di aprile si nota un importante abbattimento medio delle concentrazioni, a differenza di quanto visto prima (durate inferiori a 6 ore) in cui invece si registrava un incremento. Ciò implica come in certi casi anche la durata dell'evento svolga una certa influenza sul fenomeno di

abbattimento. Quindi, come per il PM2.5, gli abbattimenti maggiori si verificano negli eventi di maggiore durata ed elevata concentrazione iniziale.

Si passa adesso a differenziare i fenomeni in funzione dell'intensità di pioggia media all'interno dell'evento. Per far ciò verrà utilizzata la stessa rappresentazione grafica vista fin qui riportando quello che accade per diversi range di intensità di pioggia media all'interno dell'evento, senza tener conto della durata.

Anche in questo caso si è scelto di suddividere gli eventi in due classi di ugual numerosità, differenziandoli in eventi con intensità media minore di 1 mm/h ed eventi con intensità media maggiore di 1 mm/h.

Per prima cosa si considerano solo quegli eventi in cui si registra un'intensità media di pioggia inferiore a 1 mm/h. Si parte come sempre dal PM2.5.

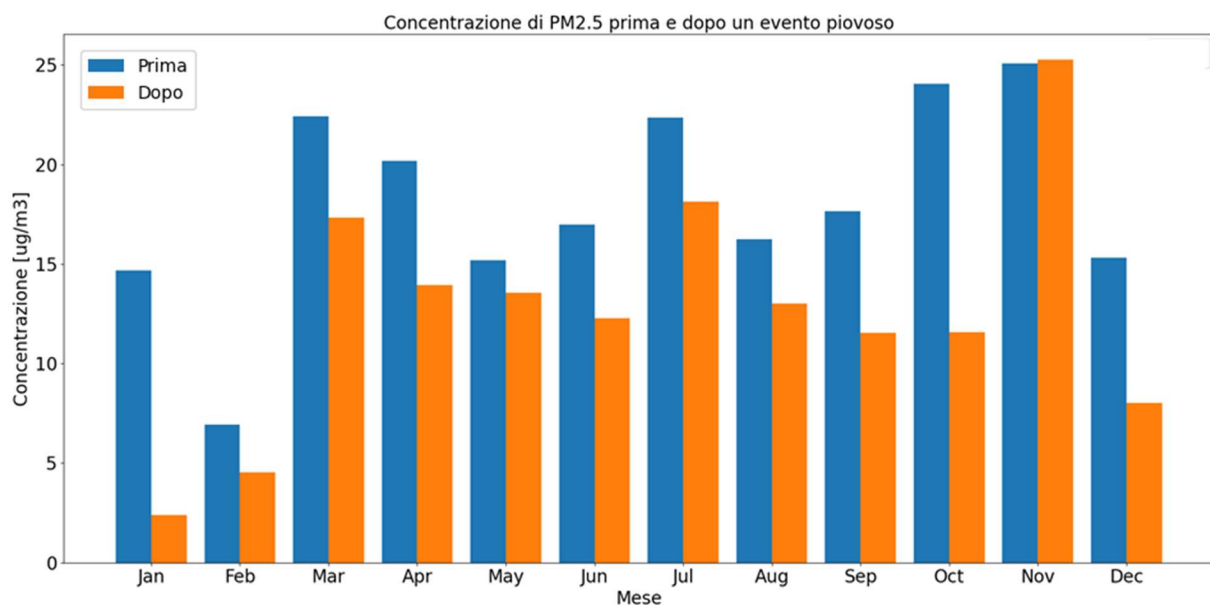


Figura : concentrazione di PM2.5 prima e dopo un evento piovoso con intensità media inferiore a 1 mm/h

Per il particolato fine si può osservare come le piogge di bassa intensità siano mediamente efficaci nell'abbattere la sua concentrazione. L'unico mese in cui non si registra un decremento è il mese di novembre. Tale risultato potrebbe essere la conseguenza di un'anomalia verificatasi durante l'acquisizione dei dati.

Infatti se si va a considerare le piogge di intensità superiore a 1 mm/h si nota quanto detto.

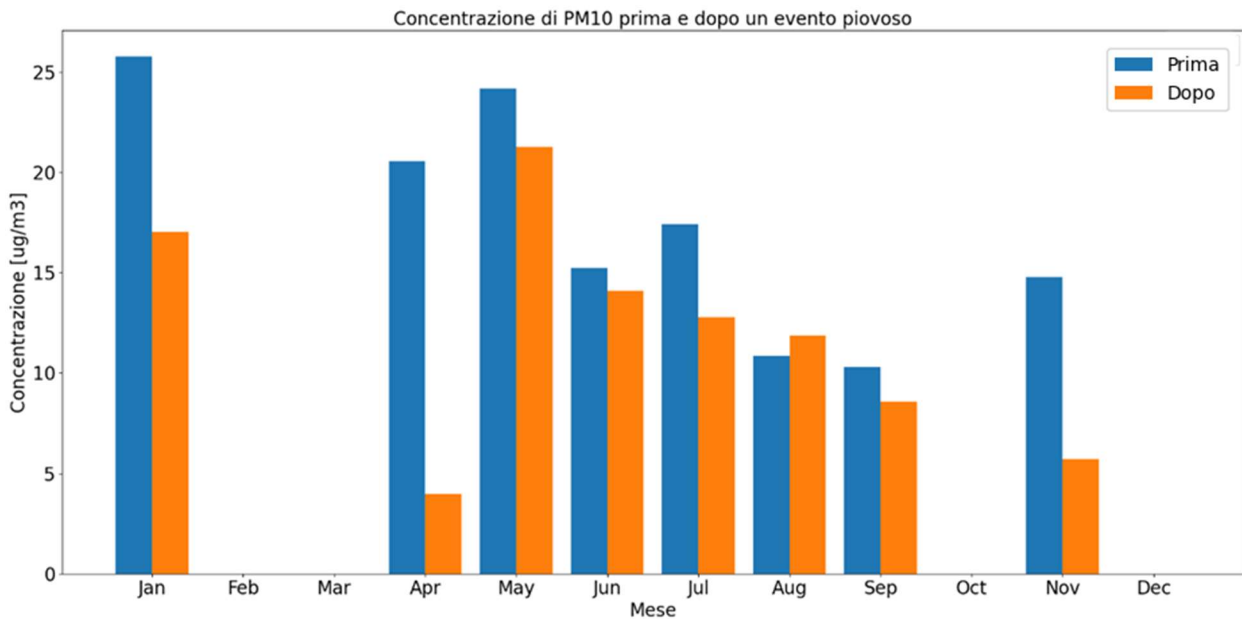


Figura : concentrazione di PM2.5 prima e dopo un evento piovoso con intensità media superiore a 2 mm/h

Per piogge di questo tipo l'unico mese in cui non si registra un abbattimento è agosto, mese caratterizzato per lo più da piogge di breve durata.

Di seguito sono riportati i risultati per il PM10.

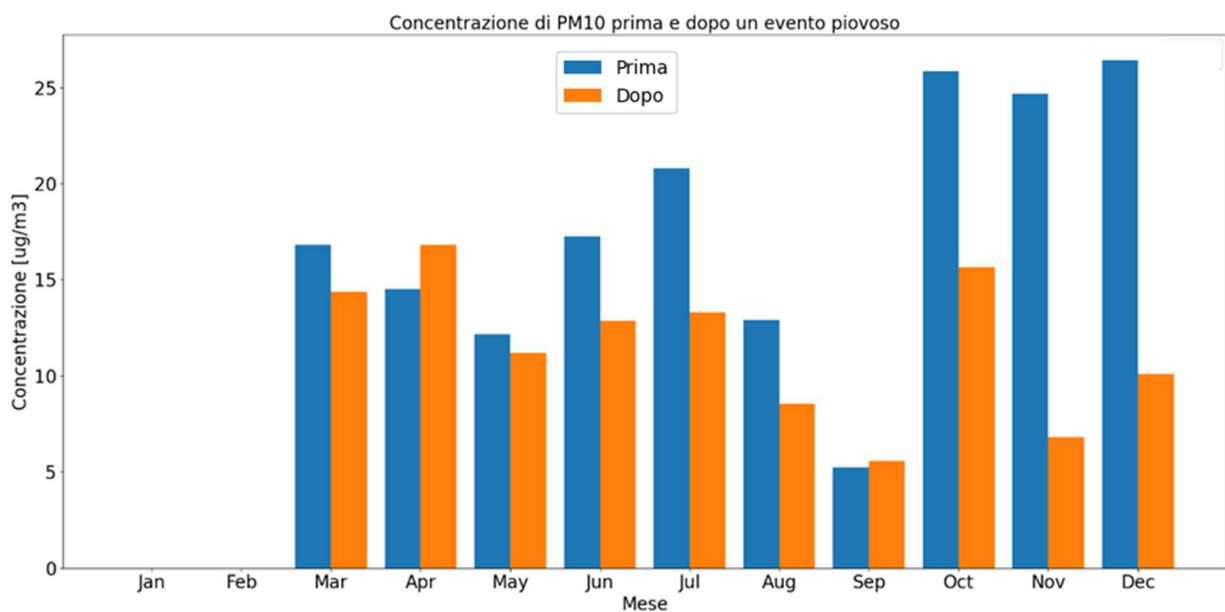


Figura : concentrazione di PM10 prima e dopo un evento piovoso con intensità media inferiore a 1 mm/h

Si può notare come le elevate riduzioni di concentrazione dei mesi invernali siano legate per lo più a fenomeni di bassa intensità (<1 mm/h). A parte nei mesi di aprile e settembre si nota sempre una diminuzione nelle concentrazioni per piogge di bassa intensità.

Considerando invece i soli eventi con intensità medie comprese tra 1 e 2 mm/h si ottengono i seguenti risultati.

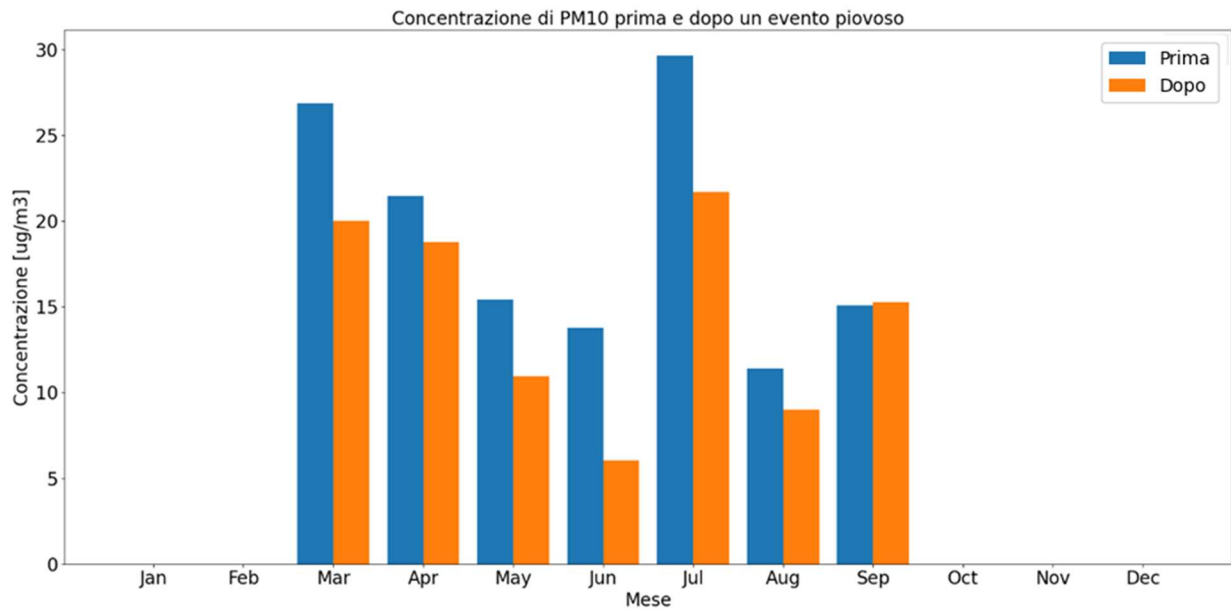


Figura : concentrazione di PM10 prima e dopo un evento piovoso con intensità media compresa tra 1 e 2 mm/h

Si tratta di tutti quegli eventi che occorrono nei mesi primaverili ed estivi. Per questa tipologia di fenomeni si registra sempre un abbattimento, a parte settembre dove sussiste un certo equilibrio.

Per piogge che invece superano in media i 2 mm/h si ottiene il seguente risultato:

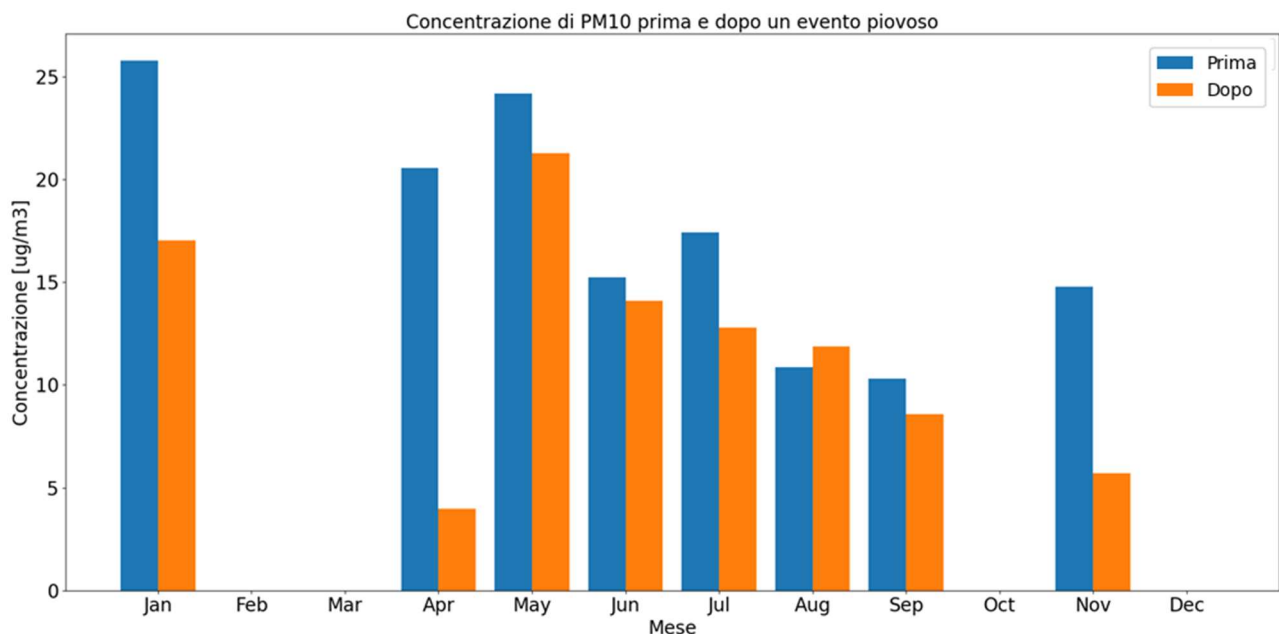


Figura : concentrazione di PM10 prima e dopo un evento piovoso con intensità media superiore a 1 mm/h

Adesso attraverso uno scatter-plot sono stati messi insieme durata del fenomeno ed intensità media di pioggia, differenziano abbattimenti ed incrementi in funzione di diversi range.

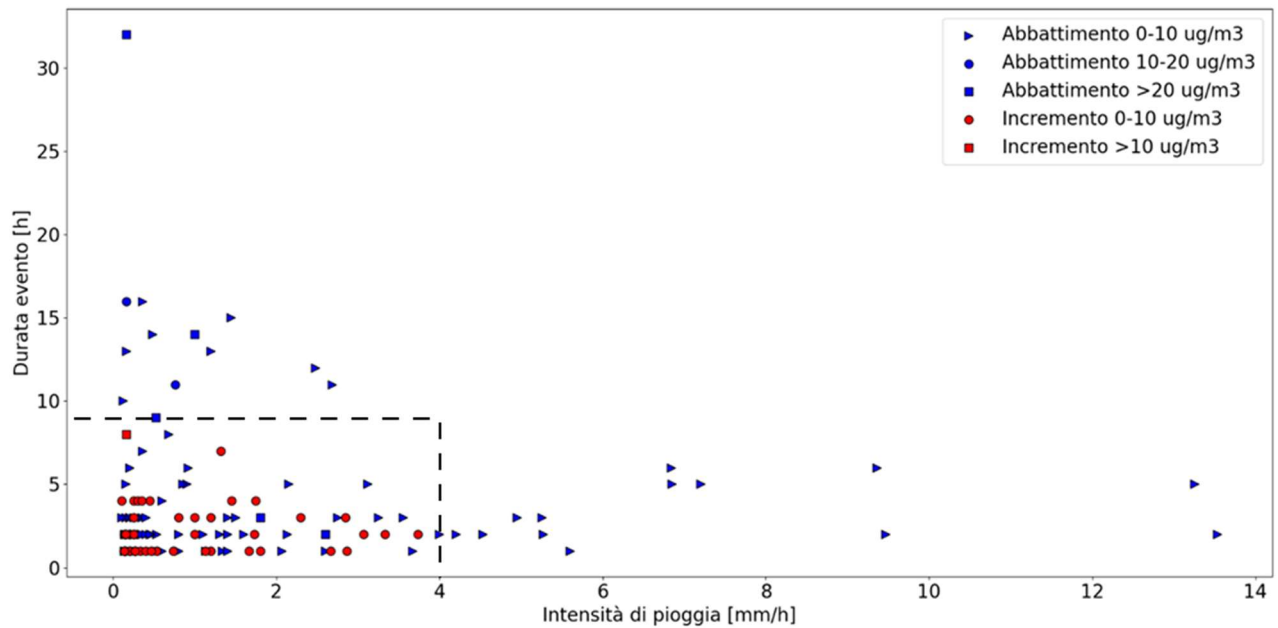


Figura : scatter-plot intensità di pioggia-durata con riferimento a diversi range di abbattimento ed incremento per il PM2.5

Dal seguente grafico si può notare come al di là di certe soglie si ottiene solo abbattimento, sia per quanto riguarda l'intensità e sia per quanto riguarda la durata. Per quegli eventi la cui intensità è maggiore a 4 mm/h oppure la durata è superiore a 9 ore si notano soltanto degli abbattimenti nella concentrazione di PM2.5. Invece al di sotto di queste due soglie quello che accade è fortemente aleatorio. Inoltre, è possibile osservare come per intensità maggiori a 4 mm/h l'abbattimento rimanga sempre all'interno del range 0-10 ug/m³, mentre per basse intensità, ma durate elevate l'abbattimento in certi casi riesca a superare tale soglia.

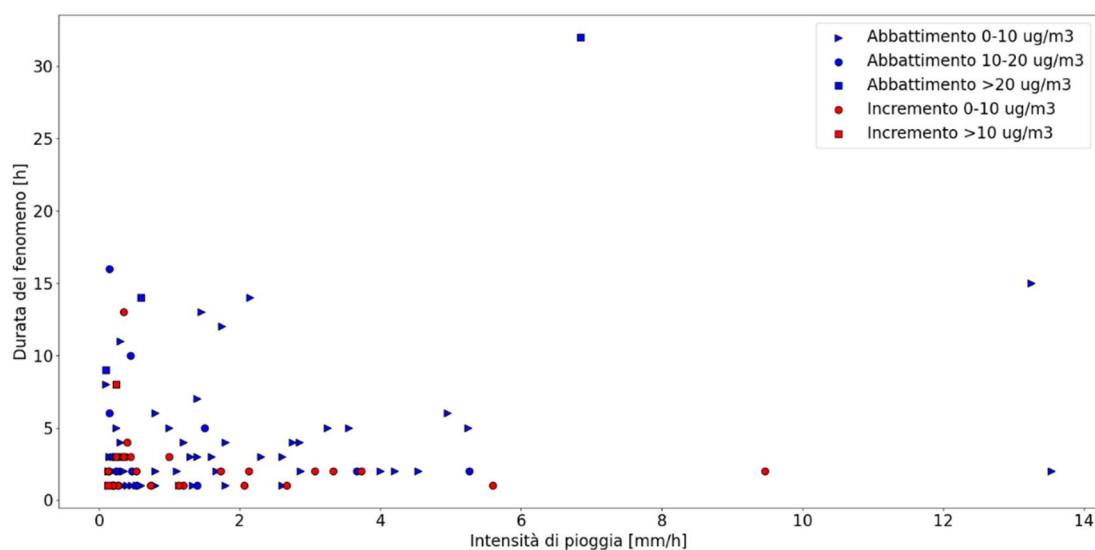


Figura : scatter-plot intensità di pioggia-durata con riferimento a diversi range di abbattimento ed incremento per il PM10

Per il PM10 è possibile notare la stessa aleatorietà per intensità contenute e durate basse. In generale, rispetto al PM2.5 si hanno meno incrementi di concentrazione. Questo conferma ulteriormente come il potere di rimozione della pioggia sia maggiormente efficace nelle particelle grossolane rispetto a quelle fini.

Dato che in questa fase non è stata fatta alcuna distinzione tra i fenomeni, sarà interessante vedere cosa accade quando si considera anche la velocità del vento misurata all'interno del fenomeno piovoso. Si utilizzerà lo stesso metodo grafico visto in precedenza, correlando tale parametro all'intensità di pioggia.

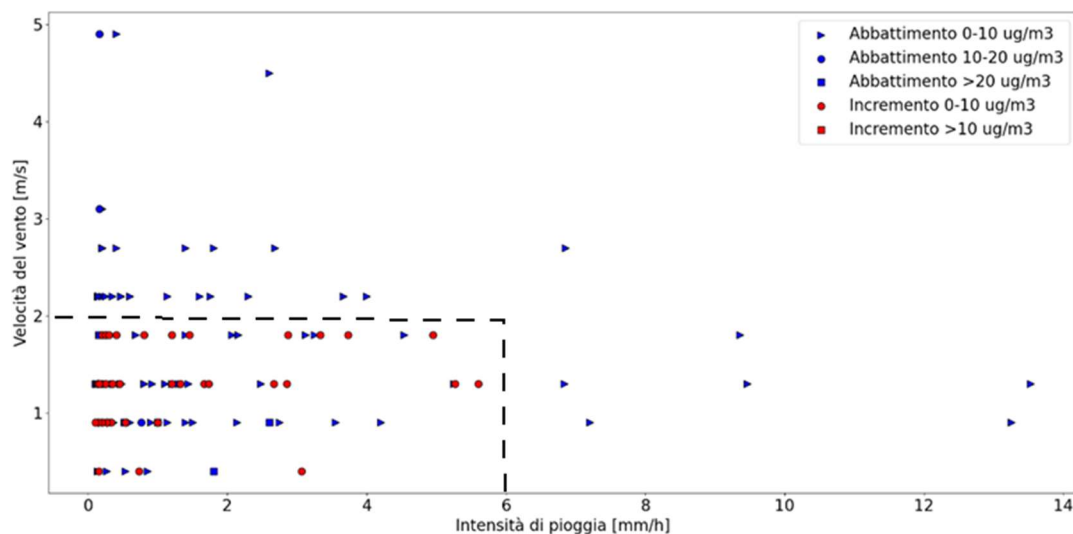


Figura : scatter-plot intensità di pioggia-velocità del vento con riferimento a diversi range di abbattimento ed incremento per il PM2.5

Si è visto dall'analisi precedente come la velocità del vento sia un parametro molto importante nel descrivere la riduzione di particolato. Dal grafico si può notare come per intensità di pioggia molto basse e velocità del vento inferiori a 2 m/s ci siano anche degli incrementi nella concentrazione di PM2.5. Al di sotto di 2 m/s si notano diversi incrementi per eventi piovosi di intensità non superiore a 6 mm/h. È possibile individuare questi due valori come soglie sopra il quale si registrano solo abbattimenti. Al di là di questa porzione l'abbattimento è pressoché stabile.

Analizzando lo stesso caso per il PM10 si ottiene il seguente grafico.

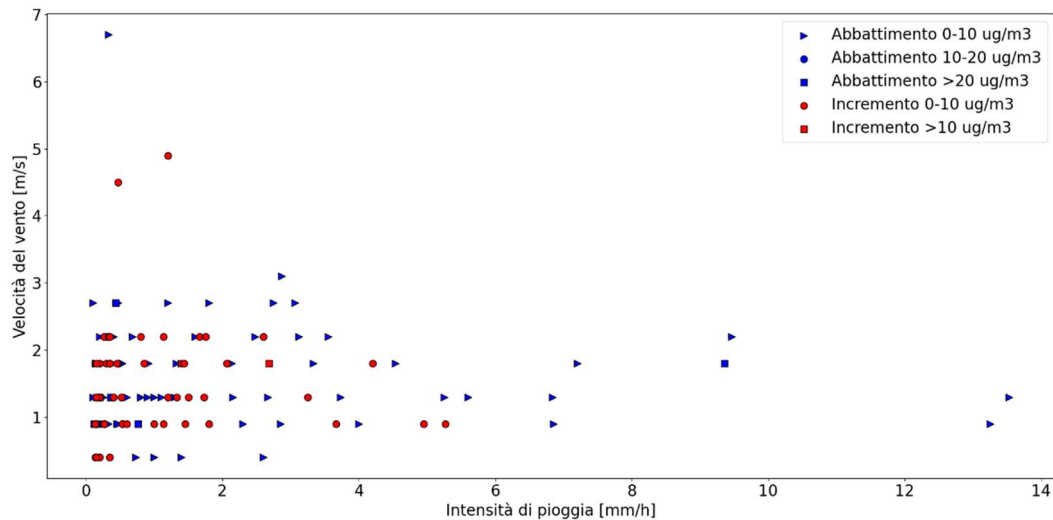


Figura : scatter-plot intensità di pioggia-velocità del vento con riferimento a diversi range di abbattimento ed incremento per il PM10

Come ci si aspettava i fenomeni corrispondenti ad un incremento sono diminuiti. È noto come per il PM10 l'azione del vento produca un effetto di risospensione per velocità maggiori ad una certa soglia. Dall'analisi completa si è visto come tale soglia più o meno ricadeva intorno ad un valore di 4 m/s. Di fatti è possibile notare come ci siano due incrementi nel range di velocità che va da 4 a 5 m/s.

In conclusione di questa analisi statistica preliminare si è deciso di evidenziare attraverso la medesima rappresentazione vista in precedenza come varia il rapporto tra PM_{2.5} e PM₁₀ da un'ora prima ad un'ora dopo l'evento piovoso. In questo modo è possibile farsi un'idea generale su quale frazione sia più efficace l'effetto di abbattimento prodotto dalla pioggia.

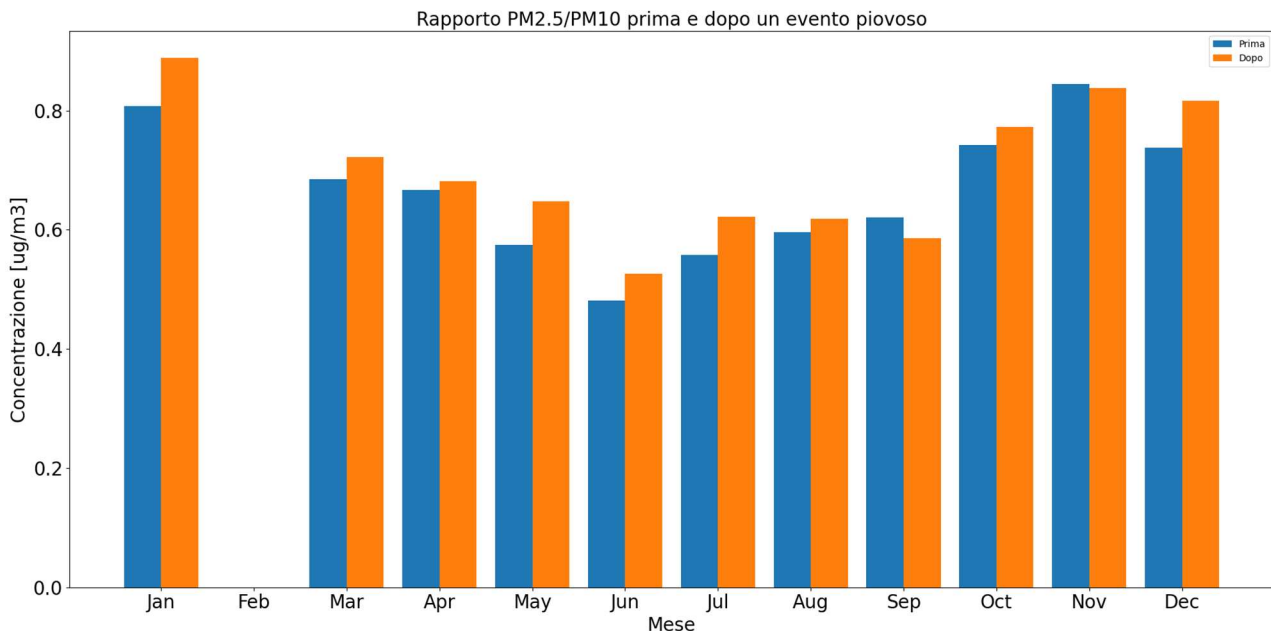


Figura : rapporto medio tra concentrazione PM_{2.5}/PM₁₀ prima e dopo un evento piovoso

Dal seguente grafico è possibile osservare come mediamente tale rapporto aumenta dopo l'evento piovoso. Questo risultato conferma quanto già affermato in precedenza, ovvero la maggiore efficacia di abbattimento della pioggia sul particolato grossolano rispetto al particolato più fine.

Si passerà adesso alla fase di modellistica per questa specifica analisi. Come prima cosa si opererà una semplificazione sulla variabile dipendente, calcolandola con i metodi visti al capitolo precedente.

Si partirà dal considerare la variazione di particolato all'interno dell'evento come la differenza tra il massimo valore di concentrazione, generalmente all'inizio, e il valore alla fine dell'evento. In questo modo si otterranno solo valori positivi o nulli, nel caso in cui il massimo coincida proprio con l'ultimo valore. Si partirà come sempre dalla regressione, passando poi al modello additivo generalizzato e concludendo con le reti neurali artificiali.

Regressione multivariata

Anche in questo verrà utilizzata sempre la stessa procedura iterativa per valutare l'adattamento di ogni modello. Sono qui riportate le 10 migliori combinazioni di variabili sia per quanto riguarda l'adattamento e sia per quanto riguarda la convalida incrociata, disposte in ordine decrescente per coefficiente di determinazione.

Abbattimento assoluto

PM2.5 (Adattamento)

n.	Variabili	Adattamento		Convalida incrociata	
		Lineare	Poly (n=2)	Lineare	Poly (n=2)
1	Durata, Umidità, Primo valore, Giorno	0.643921	0.766267	0.392238	0.295415
2	Durata, Umidità, Primo valore, Mese	0.645839	0.764912	0.39332	0.280597
3	Durata, Temperatura, Primo valore, Mese	0.650471	0.760608	0.382192	0.295308
4	Durata, Primo valore, Mese, Giorno	0.64912	0.758524	0.398397	0.29396
5	Cumulata vento, Primo valore, Mese, Giorno	0.583941	0.757996	0.401091	0.417312
6	Durata, Temperatura, Primo valore, Giorno	0.648865	0.756534	0.382374	0.294218
7	Durata, Velocità vento, Primo valore, Giorno	0.644265	0.756338	0.38993	0.301586
8	Durata, Velocità vento, Primo valore, Mese	0.646142	0.755662	0.390552	0.286368
9	Durata, Cumulata vento, Umidità, Primo valore	0.636281	0.754646	0.393854	0.327231
10	Durata, Cumulata pioggia, Primo valore, Giorno	0.64355	0.753865	0.391024	0.344138

PM2.5 (Convalida)

n.	Variabili	Adattamento		Convalida incrociata	
		Lineare	Poly (n=2)	Lineare	Poly (n=2)
1	Cumulata vento, Primo valore	0.560345	0.722111	0.406927	0.462804
2	Durata, Cumulata vento, Cumulata pioggia, Primo valore	0.636075	0.746396	0.39466	0.452758
3	Cumulata vento, Primo valore, Giorno	0.572283	0.741638	0.402059	0.452172
4	Cumulata vento, Intensità pioggia, Primo valore	0.560721	0.725096	0.403532	0.450997
5	Cumulata vento, Primo valore, Mese	0.575228	0.741345	0.402491	0.450972
6	Durata, Primo valore	0.63291	0.729786	0.401823	0.447388
7	Durata, Cumulata pioggia, Primo valore	0.632918	0.733779	0.397639	0.446413
8	Cumulata vento, Cumulata pioggia, Primo valore	0.56166	0.725448	0.401154	0.444229
9	Durata, Intensità pioggia, Primo valore	0.632946	0.734342	0.398373	0.441147
10	Velocità vento, Cumulata vento, Primo valore	0.561442	0.734032	0.400343	0.430109

Figura: R2 da regressione e convalida k-fold (k=5) su PM2.5

Si può notare come i modelli migliori siano quelli che tengono conto fondamentalmente del primo valore di concentrazione di PM2.5 della serie. Ciò sta a dimostrare come l'eventuale abbattimento che si verifica all'interno dell'evento sia effettivamente correlato con il valore di concentrazione iniziale. I modelli che descrivono meglio i dati sono quelli polinomiali di secondo grado.

PM10 (Adattamento)

		Adattamento		Convalida incrociata	
n.	Variabili	Lineare	Poly (n=2)	Lineare	Poly (n=2)
1	Cumulata vento, Primo valore, Mese, Giorno	0.57868	0.746794	0.444185	0.366787
2	Durata, Primo valore, Mese, Giorno	0.65274	0.742871	0.419764	0.406499
3	Durata, Umidità, Primo valore, Mese	0.626141	0.739856	0.353074	0.317706
4	Durata, Cumulata pioggia, Primo valore, Mese	0.647149	0.734242	0.385078	0.296565
5	Durata, Intensità pioggia, Primo valore, Mese	0.646146	0.733957	0.381075	0.286172
7	Cumulata vento, Intensità pioggia, Primo valore, Mese	0.56654	0.733397	0.410299	0.371102
4	Cumulata vento, Cumulata pioggia, Primo valore, Mese	0.563327	0.732311	0.413172	0.383118
8	Durata, Velocità vento, Primo valore, Mese	0.624744	0.731784	0.351641	0.174963
9	Durata, Cumulata pioggia, Primo valore, Giorno	0.642297	0.73171	0.375757	0.240795
10	Durata, Velocità vento, Primo valore, Giorno	0.619919	0.731684	0.343592	0.164545

PM10 (Convalida)

		Adattamento		Convalida incrociata	
n.	Variabili	Lineare	Poly (n=2)	Lineare	Poly (n=2)
1	Cumulata vento, Primo valore, Mese, Giorno	0.57868	0.746794	0.444185	0.366787
2	Durata, Primo valore, Mese, Giorno	0.65274	0.742871	0.419764	0.406499
3	Intensità pioggia, Primo valore, Mese, Giorno	0.431049	0.538996	0.41335	0.220666
4	Cumulata vento, Cumulata pioggia, Primo valore, Mese	0.563327	0.732311	0.413172	0.383118
5	Primo valore, Mese, Giorno	0.428509	0.506668	0.412832	0.40391
6	Velocità vento, Primo valore, Mese, Giorno	0.429505	0.542658	0.411048	0.290559
7	Cumulata vento, Intensità pioggia, Primo valore, Mese	0.56654	0.733397	0.410299	0.371102
8	Cumulata pioggia, Primo valore, Mese, Giorno	0.428554	0.543698	0.406695	0.212013
9	Cumulata vento, Cumulata pioggia, Primo valore, Giorno	0.55708	0.729006	0.400539	0.292043
10	Cumulata vento, Primo valore, Mese	0.548476	0.711587	0.399408	0.371276

Figura: R2 da regressione e convalida k-fold (k=5) su PM10

Per il PM10 i modelli migliori in termini di significatività sono quelli lineari. Come per il PM2.5 il primo valore è presente in tutti i migliori 10, così come il mese ed il giorno. Un altro parametro importante è la cumulata del vento.

Modelli additivi generalizzati

Si passerà adesso ad applicare i modelli GAM già visti nell'analisi completa. Dopo aver individuato le migliori combinazioni di parametri e i relativi modelli si valuteranno le dipendenze parziali per ogni variabile indipendente.

Abbattimento assoluto

PM2.5 (Adattamento)

n.	Variabili	Adattamento			Convalida incrociata		
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2	Model 3
1	Durata, Velocità vento, Primo valore, Mese	0.72368	0.843566	0.808817	0.424088	0.196259	0.289963
2	Durata, Velocità vento, Primo valore, Giorno	0.723253	0.841744	0.808022	0.377868	0.201838	0.250035
3	Durata, Cumulata vento, Primo valore, Mese	0.729689	0.832479	0.805781	0.429893	0.150543	0.275851
4	Durata, Cumulata vento, Primo valore, Giorno	0.726725	0.831366	0.805147	0.336099	0.156755	0.292329
5	Cumulata vento, Temperatura, Primo valore, Giorno	0.836944	0.819297	0.797921	0.151336	0.087313	0.170193
6	Cumulata vento, Temperatura, Primo valore, Mese	0.832276	0.819037	0.798259	0.168452	0.075065	0.17624
7	Durata, Temperatura, Primo valore, Mese	0.802999	0.816799	0.801671	0.305468	0.197817	0.392935
8	Velocità vento, Temperatura, Primo valore, Mese	0.842025	0.816597	0.756447	0.335335	0.357406	0.287292
9	Durata, Temperatura, Primo valore, Giorno	0.850733	0.816542	0.730142	0.289621	0.214217	0.399318
10	Velocità vento, Temperatura, Primo valore, Giorno	0.84726	0.815374	0.755407	0.321731	0.35874	0.288999

PM2.5 (Convalida)

n.	Variabili	Adattamento			Convalida incrociata		
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2	Model 3
1	Durata, Cumulata vento, Intensità pioggia, Primo valore	0.724553	0.722442	0.721283	0.438815	0.339781	0.467226
2	Durata, Velocità vento, Cumulata vento, Primo valore	0.726722	0.806317	0.724238	0.438445	0.303875	0.465653
3	Durata, Intensità pioggia, Primo valore	0.720358	0.717854	0.733659	0.430649	0.453985	0.454123
4	Durata, Velocità vento, Intensità pioggia, Primo valore	0.720069	0.71796	0.718474	0.415506	0.438821	0.453987
5	Durata, Velocità vento, Cumulata pioggia, Primo valore	0.721723	0.719385	0.719704	0.413984	0.412973	0.451206
6	Durata, Intensità pioggia, Cumulata pioggia, Primo valore	0.722101	0.719207	0.719005	0.398739	0.436906	0.451079
7	Durata, Primo valore, Mese	0.726861	0.802031	0.723584	0.43414	0.304955	0.45021
8	Durata, Cumulata pioggia, Primo valore	0.721668	0.719011	0.733613	0.430457	0.451678	0.448386
9	Durata, Primo valore, Giorno	0.724667	0.801297	0.72181	0.421861	0.324246	0.444192
10	Durata, Primo valore, Mese, Giorno	0.789427	0.721616	0.719346	0.339561	0.237013	0.443977

Figura: R2 da gam e convalida k-fold (k=5) su PM2.5

Cumulata del vento e primo valore rappresentano due dei parametri più significativi. Questa volta però aggiungendo durata del fenomeno e intensità media di pioggia si ottiene un modello ancora più accurato. Il modello scelto per le dipendenze parziali tiene conto di durata, distanza percorsa dal vento, primo valore e mese (modello 2). La scelta è ricaduta su questa combinazione poiché, anche non rappresentando la migliore, fornisce ottimi risultati sia per il PM2.5 e sia, come si vedrà in seguito, per il PM10, potendo così confrontare le curve ottenute per le due differenti frazioni.

Modello:

$$\log(y) = \beta_o + s(dur) + s(cumwindv) + l(firstvalue) + s(mounth)$$

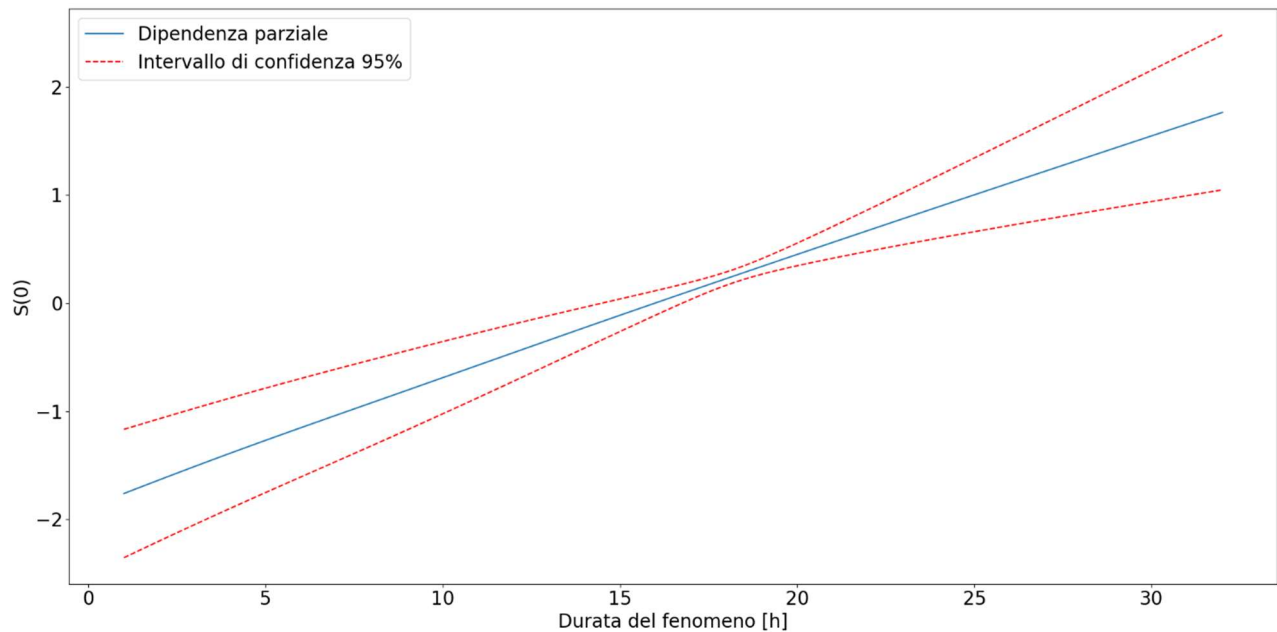


Figura : dipendenza parziale del modello dalla durata del fenomeno (PM2.5)

Si nota come all'aumentare della durata del fenomeno si verifichi un aumento nell'abbattimento assoluto. L'intervallo di confidenza decresce da 0 fino a 20 ore, in cui si nota una dispersione molto bassa intorno al valor medio, per poi ritornare a crescere.

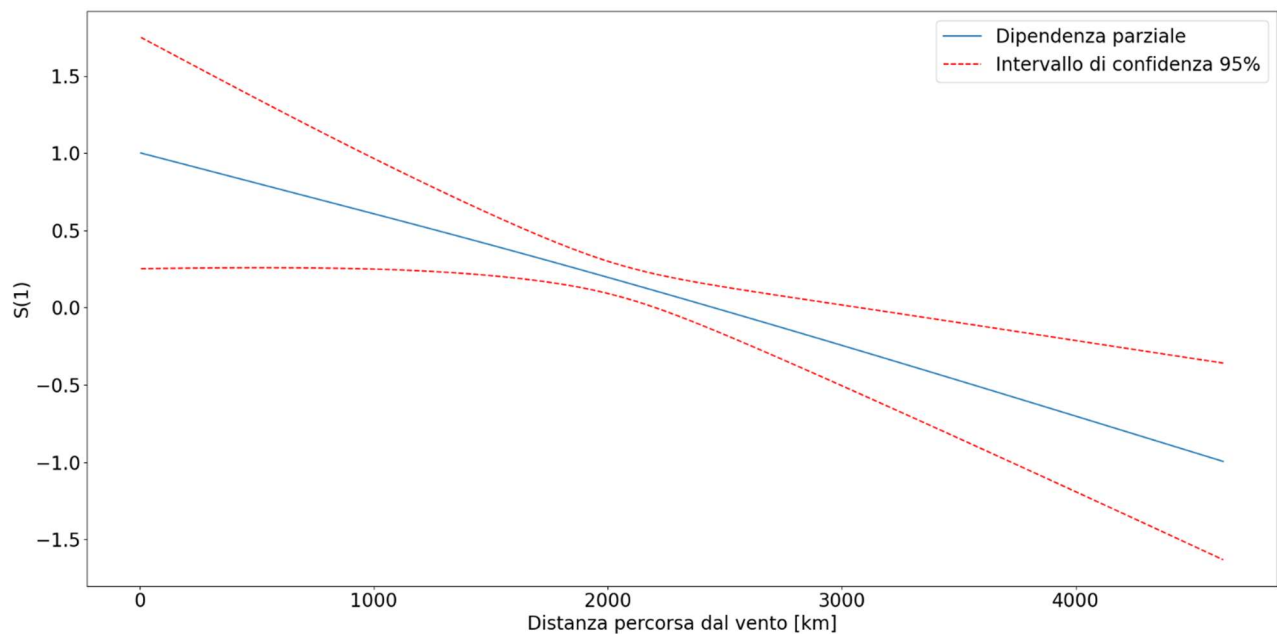


Figura : dipendenza parziale del modello dalla distanza percorsa dal vento (PM2.5)

Per quanto riguarda invece la cumulata del vento si nota una decrescita nell'abbattimento all'aumentare di questo parametro. Inoltre per distanze piccole o elevate cresce anche l'intervallo di confidenza, il cui minimo si trova in prossimità dei 2000 km.

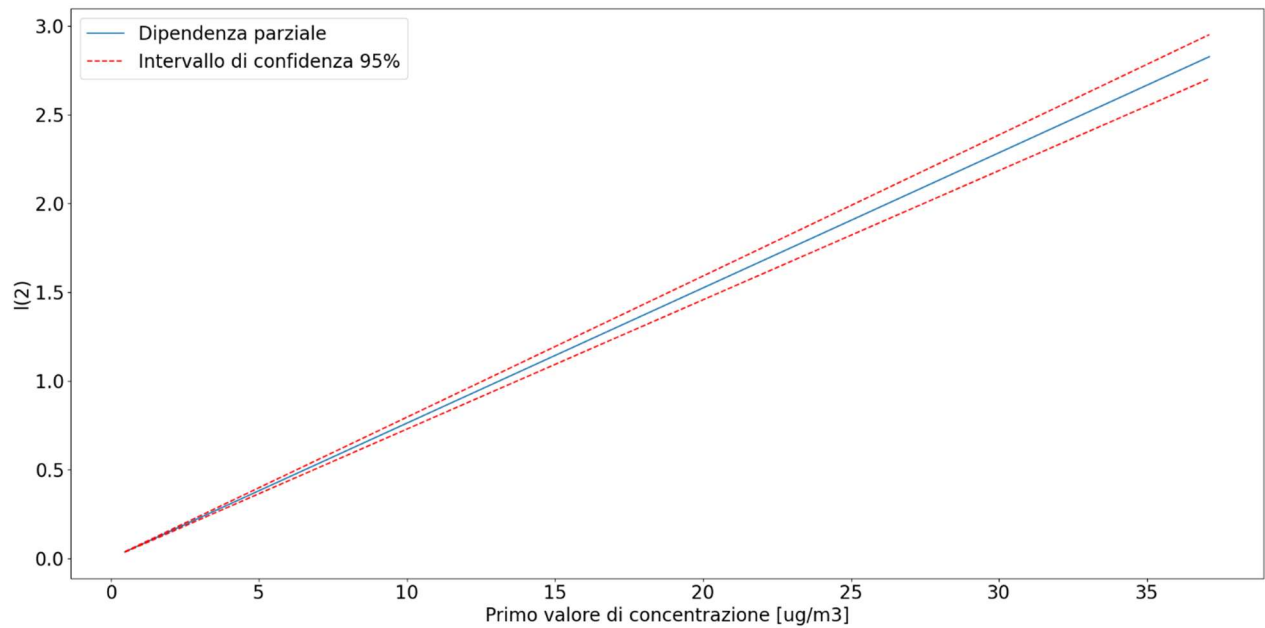


Figura : dipendenza parziale del modello dal primo valore di concentrazione (PM2.5)

Da questo grafico invece si può osservare come all'aumentare del primo valore di concentrazione di PM2.5 aumenti anche il valore di abbattimento assoluto all'interno dell'evento.

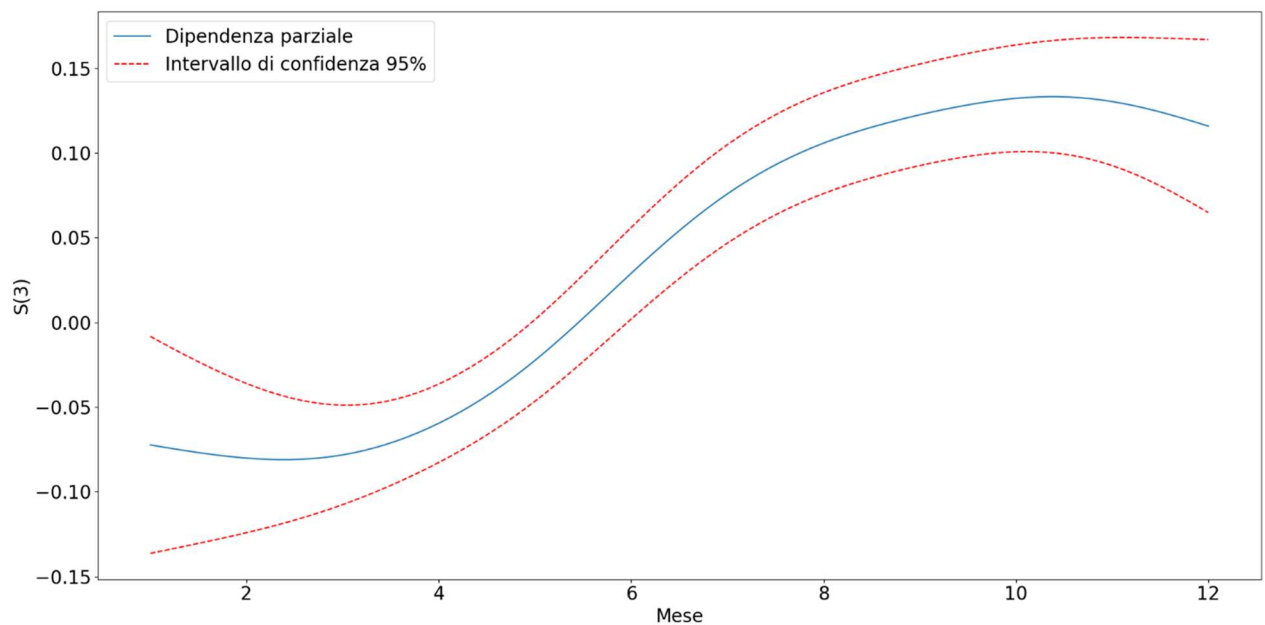


Figura : dipendenza parziale del modello dal mese (PM2.5)

Da quest'ultimo grafico si può notare come durante l'anno ci sia mediamente un incremento nell'abbattimento di PM2.5. Tuttavia, se si va ad osservare i valori presenti sull'asse delle y, questo parametro influenza l'abbattimento in maniera molto più ridotta rispetto agli altri descrittori.

PM10 (Adattamento)

n.	Variabili	Adattamento			Convalida incrociata		
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2	Model 3
1	Durata, Intensità pioggia, Temperatura, Primo valore	0.911212	0.773097	0.678902	0.093025	0.191525	0.291306
2	Cumulata pioggia, Primo valore, Mese, Giorno	0.89937	0.789362	0.642939	0.099606	0.117565	0.158899
3	Cumulata pioggia, Umidità, Primo valore, Giorno	0.891683	0.737744	0.692741	0.040138	0.064694	0.089583
4	Intensità pioggia, Primo valore, Mese, Giorno	0.889407	0.791432	0.650783	0.129505	0.125853	0.324354
5	Intensità pioggia, Umidità, Primo valore, Giorno	0.88768	0.751812	0.698965	0.019952	0.09342	0.1132
6	Intensità pioggia, Temperatura, Primo valore, Giorno	0.883738	0.788311	0.707967	0.072005	0.044021	0.09676
7	Cumulata pioggia, Temperatura, Primo valore, Giorno	0.880467	0.798258	0.702664	0.039433	0.003717	0.085465
8	Durata, Temperatura, Umidità, Primo valore	0.879566	0.797147	0.781815	0.07477	0.091496	0.246375
9	Cumulata vento, Umidità, Primo valore, Giorno	0.878314	0.807416	0.732798	0.053205	0.145483	0.247978
10	Velocità vento, Umidità, Primo valore, Giorno	0.873231	0.694737	0.640564	0.046426	0.151196	0.119414

PM10 (Convalida)

n.	Variabili	Adattamento			Convalida incrociata		
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2	Model 3
1	Durata, Primo valore	0.745175	0.687046	0.727674	0.324624	0.377917	0.313061
2	Durata, Velocità vento, Primo valore, Mese	0.822788	0.802109	0.759837	0.194213	0.358205	0.325245
3	Durata, Velocità vento, Primo valore, Giorno	0.824487	0.798728	0.755433	0.150644	0.344297	0.307606
4	Durata, Velocità vento, Primo valore	0.795284	0.714414	0.780883	0.329041	0.343611	0.326117
5	Durata, Primo valore, Mese	0.77699	0.75669	0.734243	0.311381	0.326395	0.385628
6	Durata, Intensità pioggia, Primo valore	0.803621	0.693482	0.785711	0.161583	0.311131	0.300589
7	Durata, Primo valore, Giorno	0.777513	0.751951	0.67635	0.173255	0.308355	0.292247
8	Durata, Velocità vento, Intensità pioggia, Primo valore	0.837196	0.721275	0.690675	0.200413	0.300289	0.201242
9	Durata, Cumulata vento, Primo valore, Mese	0.782268	0.794851	0.75677	0.251544	0.298704	0.198305
10	Durata, Cumulata pioggia, Primo valore	0.795795	0.696515	0.785226	0.253612	0.297737	0.296891

Figura: R2 da gam e convalida k-fold (k=5) su PM10

Dal modello 1 (solo spline) si ottengono dei risultati molto alti in termini di adattamento, tuttavia tali risultati sono affetti da distorsione. Se si vanno a vedere i migliori modelli in termini di convalida incrociata è possibile notare come i valori siano più bassi rispetto al PM2.5.

Si riportano adesso le dipendenze parziali prendendo in considerazione lo stesso modello visto per il PM2.5, poiché anche in questo caso restituisce buoni risultati in termini di adattamento.

Modello:

$$\log(y) = \beta_0 + s(dur) + s(cumwindv) + l(firstvalue) + s(mounth)$$

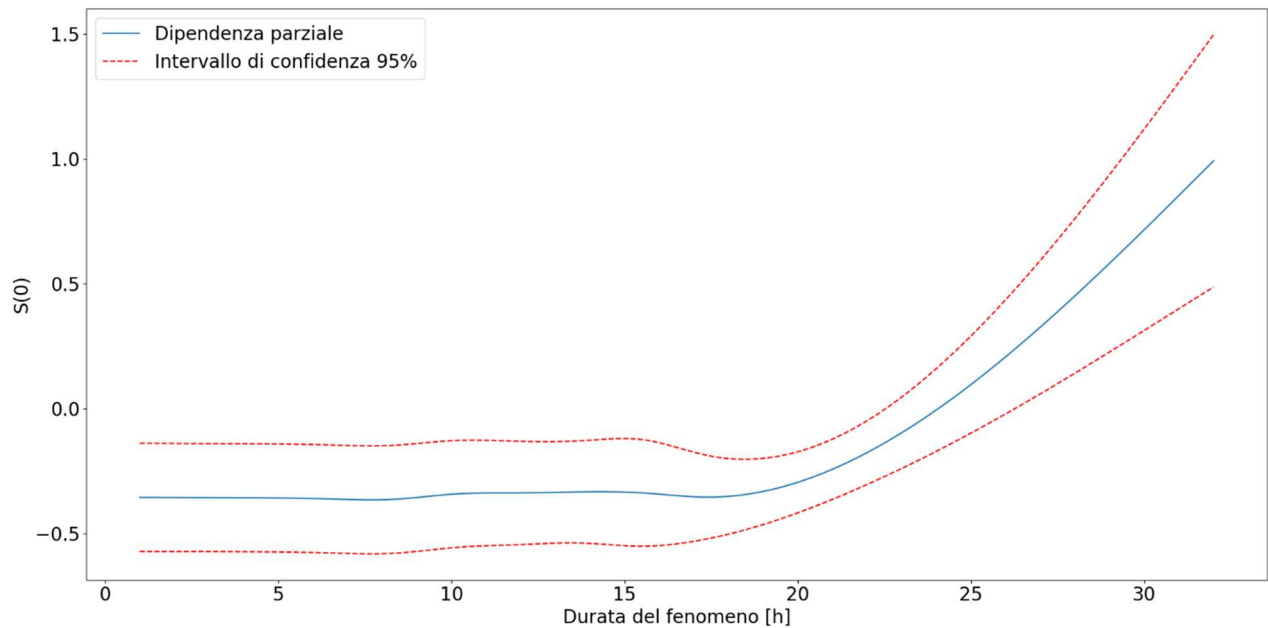


Figura : dipendenza parziale del modello dalla durata del fenomeno (PM10)

Per quanto riguarda la durata si può notare una leggera differenza rispetto al PM2.5, dove l'abbattimento cresceva linearmente in funzione dell'aumento della durata. In questo caso è possibile osservare un trend decisamente costante fino a 20 ore, dopodiché, anche in questo caso si ha un'aumento nell'abbattimento.

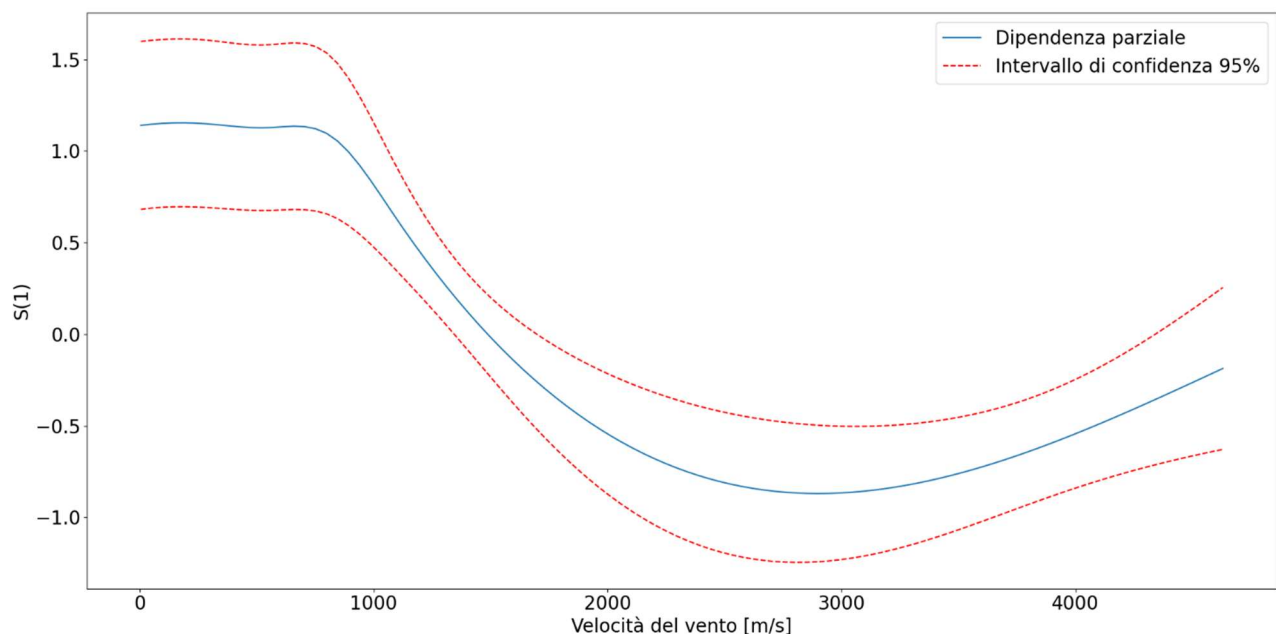


Figura : dipendenza parziale del modello dalla distanza percorsa dal vento (PM10)

Anche in questo caso si può notare un trend meno chiaro rispetto al PM2.5, ma nel complesso è possibile fare le stesse valutazioni. Si nota infatti una diminuzione nel valore di abbattimento assoluto con l'aumentare della distanza percorsa dal vento.

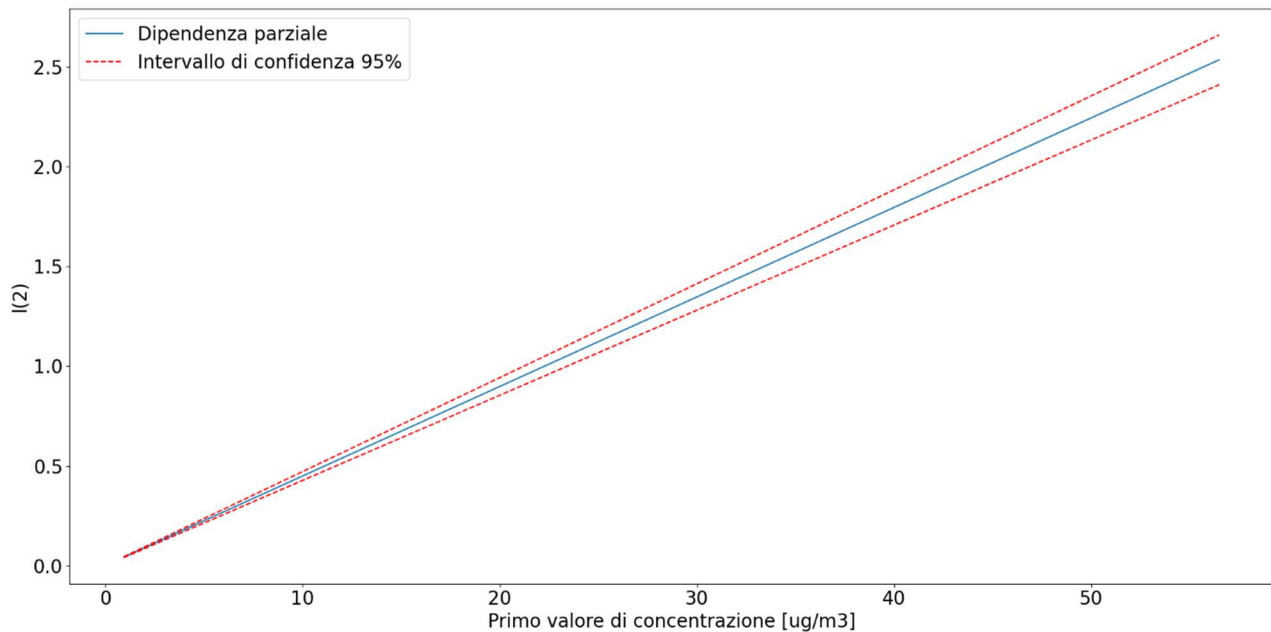


Figura : dipendenza parziale del modello dal primo valore di concentrazione (PM10)

Anche per il PM10 appare chiaro come l'abbattimento cresca in funzione del valore iniziale di concentrazione della serie.

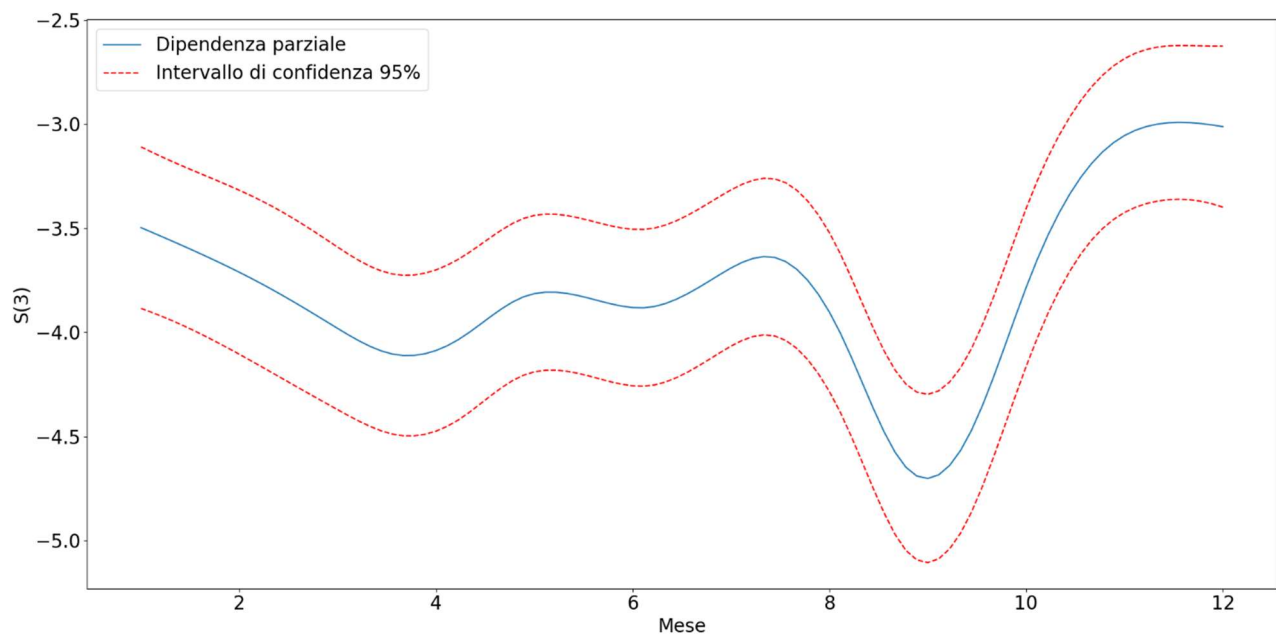


Figura : dipendenza parziale del modello dal mese (PM10)

Infine per quanto riguarda il mese si può notare come i valori più elevati si collochino tra novembre e dicembre, ovvero quei mesi in cui le concentrazioni iniziali sono più elevate e di conseguenza anche l'abbattimento assoluto è più rilevante.

Reti neurali artificiali

Adesso gli stessi parametri individuati dai risultati del GAM verranno utilizzati come input layer per il modello di Elman. La struttura della rete non sarà più uguale a quella vista per l'analisi precedente, bensì verranno utilizzati due strati di hidden layer, il primo di dimensione 8 ed il secondo di dimensione 12.

Si vedrà per entrambe le tipologie di particolato come il modello si adatta con e senza il contributo del valore iniziale di concentrazione, che in precedenza è risultato essere strettamente correlato al risultato di abbattimento assoluto.

Come nel caso precedente, nei seguenti grafici verranno riportati i valori di abbattimento assoluto di PM2.5 e PM10 misurati (asse x) e i valori di abbattimento assoluti di PM2.5 e PM10 ottenuti dal modello (asse y), oltre che la retta di interpolazione e l'intervallo di confidenza al 95%.

PM2.5 (Adattamento con valore iniziale di concentrazione)

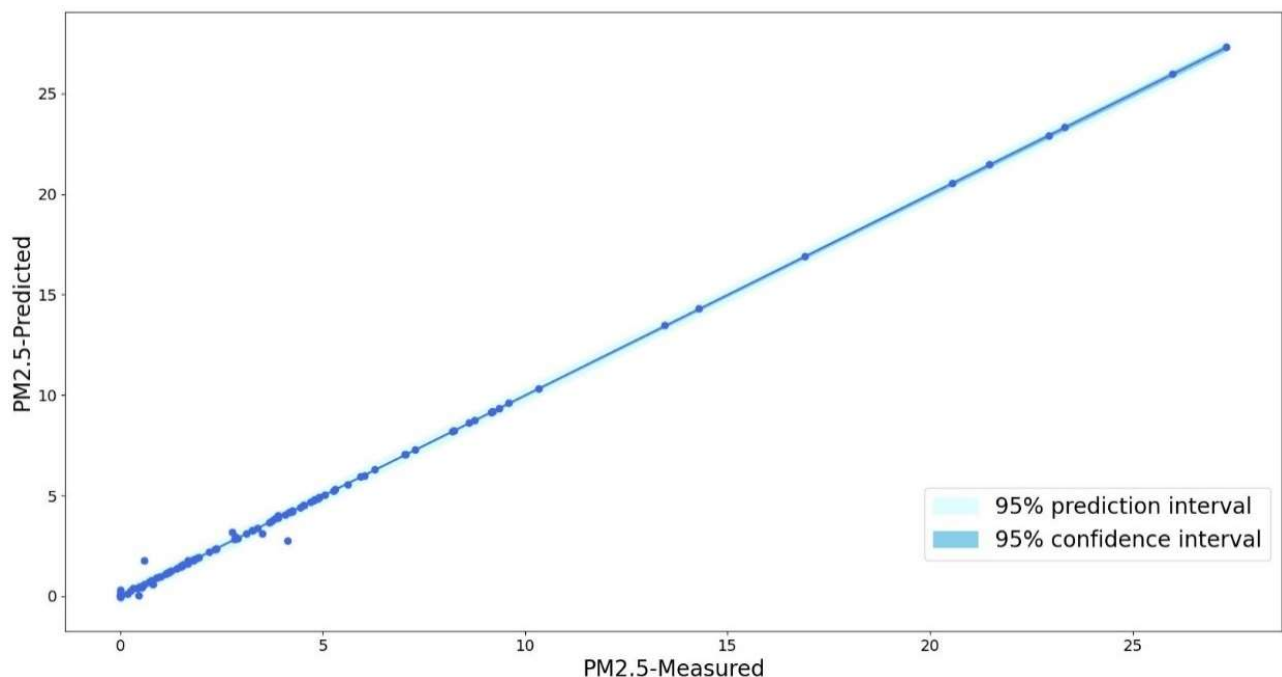


Figura : modello durata, cumulata vento, intensità pioggia, primo valore (PM2.5)

PM2.5 (Adattamento senza valore iniziale di concentrazione)

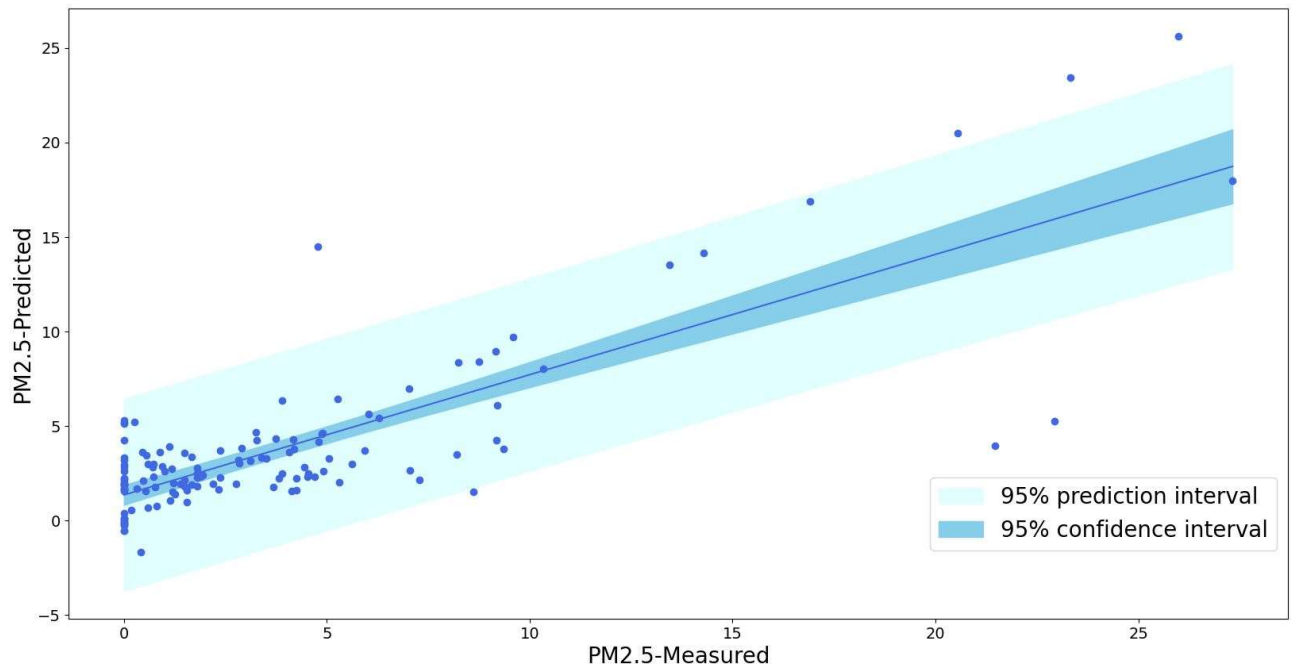


Figura : modello durata, cumulata vento, intensità pioggia (PM2.5)

PM10 (Adattamento con valore iniziale di concentrazione)

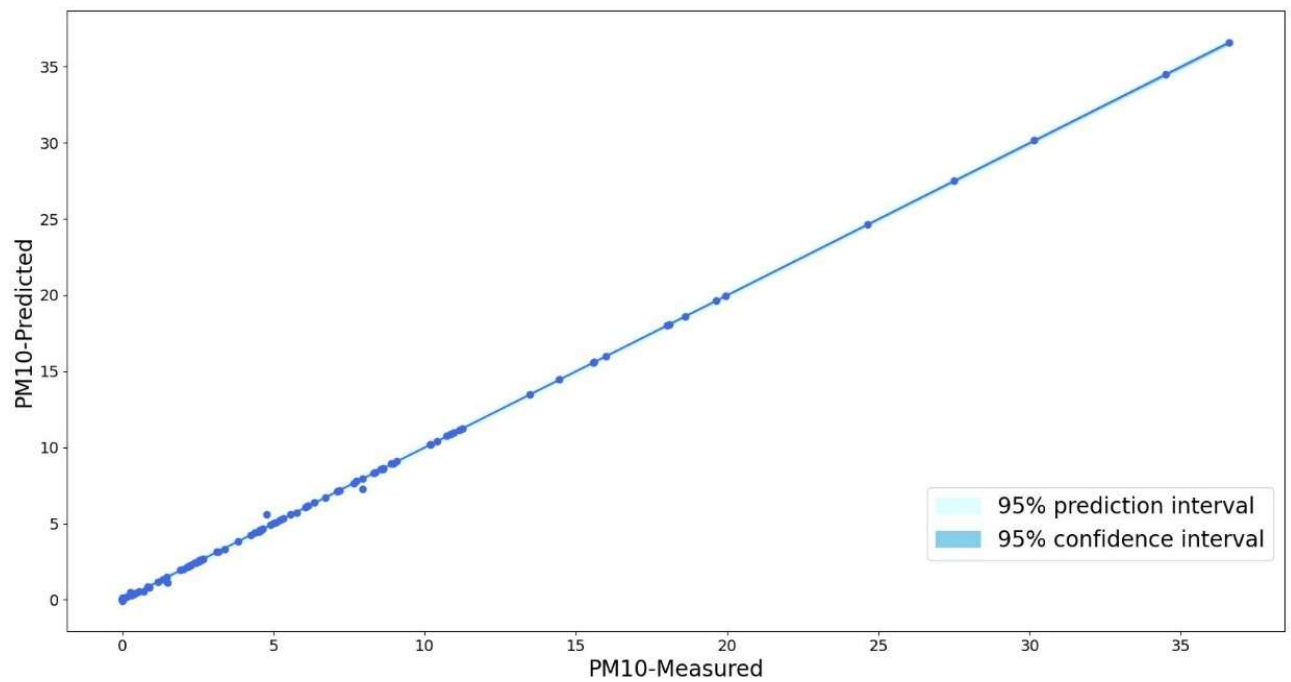


Figura : modello durata, cumulata vento, intensità pioggia, primo valore (PM10)

PM10 (Adattamento senza valore iniziale di concentrazione)

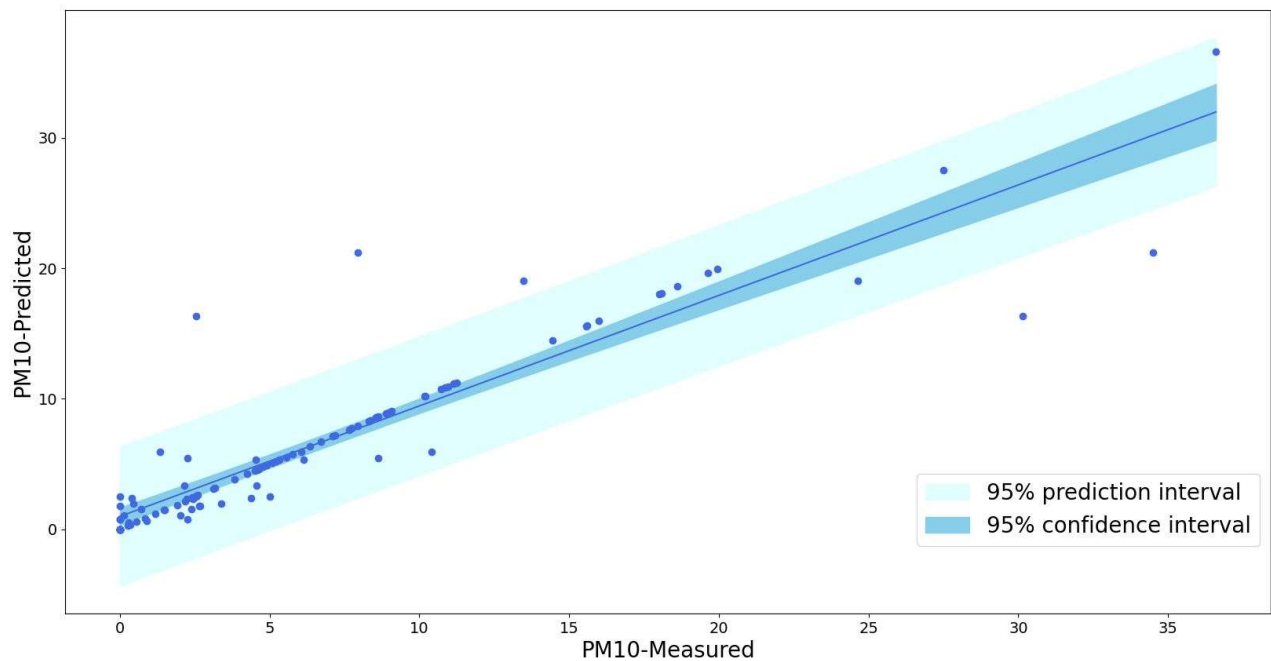


Figura : modello durata, cumulata vento, intensità pioggia (PM10)

Dai seguenti grafici si può vedere come tale modello sia in grado di adattarsi alla perfezione ai dati utilizzando il valore di concentrazione all'inizio del fenomeno (R^2 prossimi all'unità). Togliendo il valore iniziale si ottengono dei risultati più bassi ma comunque migliori rispetto ai modelli visti in precedenza.

Inoltre c'è da dire che il numero di eventi considerati e quindi di conseguenza il numero di variabili in gioco non è abbastanza elevato. Di fatti un eventuale modello ricavato potrebbe essere affetto da distorsione (underfitting).

Abbattimento percentuale

Per quanto riguarda l'abbattimento calcolato con la seconda formula, ovvero l'abbattimento normalizzato rispetto al valore massimo di concentrazione dell'evento ed espresso in termini percentuali, non sono stati ottenuti dei buoni risultati in fase di modellistica. Pertanto, al solo scopo di velocizzare la trattazione, non verranno riportati i risultati.

4.3. Analisi differenziata sull'abbattimento di concentrazione

In quest'analisi si è deciso di analizzare i soli fenomeni di vento privi della presenza di pioggia. Lo scopo è quello di differenziare i fenomeni, cosa che ci permette di valutare singolarmente gli effetti del vento sulla variazione di concentrazione di particolato. La stessa cosa poteva essere fatta per gli eventi di pioggia, tuttavia sono veramente poche le serie temporali a disposizione in cui fosse presente un'intensità di pioggia non nulla accompagnata da una velocità del vento nulla. Per questo motivo si è deciso di soffermarsi unicamente sui fenomeni di vento.

Avendo quindi individuato tutti i fenomeni di vento, sono state individuate tutte le concentrazioni medie un'ora prima e un'ora dopo gli eventi per ogni mese dell'anno, analogamente a quanto fatto prima con la pioggia, in modo da poter osservare anche l'influenza del valore iniziale di concentrazione su quella che è la variazione assoluta.

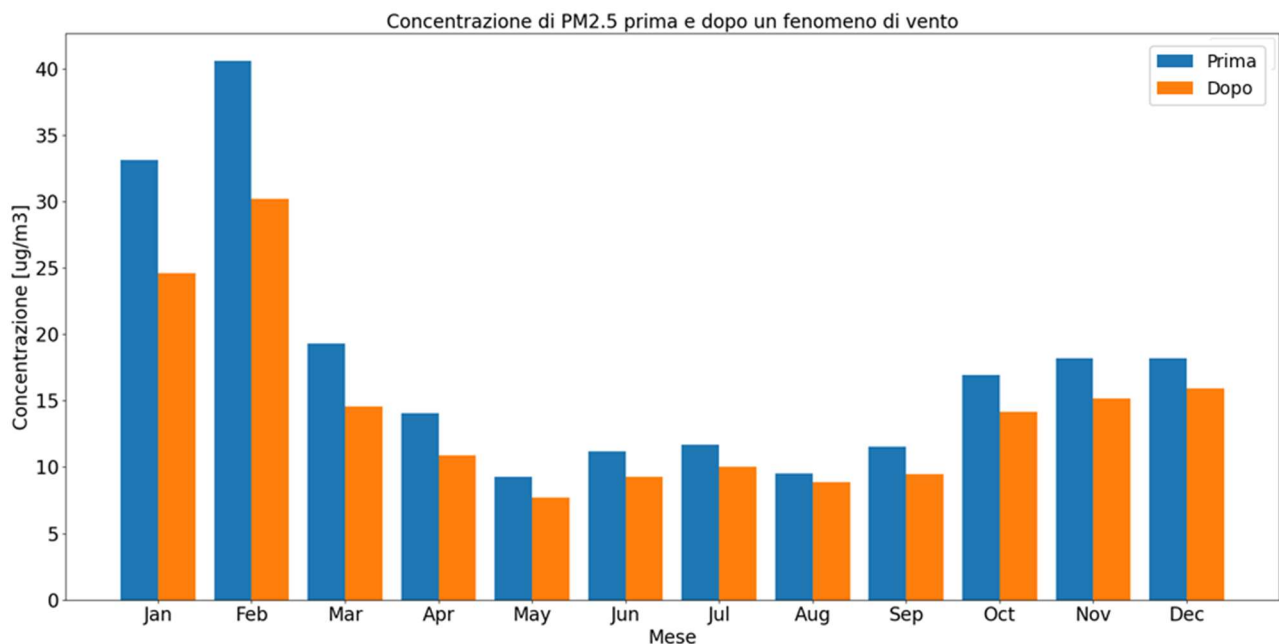


Figura : concentrazione di PM2.5 prima e dopo un fenomeno di vento in generale

In totale sono stati analizzati 835 eventi, ovvero 835 serie temporali in cui è stata misurata una velocità del vento superiore a 0.4 m/s per una durata non inferiore alle 2 ore. Dal grafico si può notare come il vento mediamente produca una riduzione nella concentrazione di PM2.5 per tutti i mesi.

Si passa adesso a differenziare i fenomeni in funzione della durata, utilizzando la stessa suddivisione vista in precedenza, ovvero eventi con durate inferiori (2-6 ore) ed eventi con durate maggiori (> 6 ore). Come prima, la scelta di questi range è stata adottata in modo da individuare due insiemi di ugual numerosità.

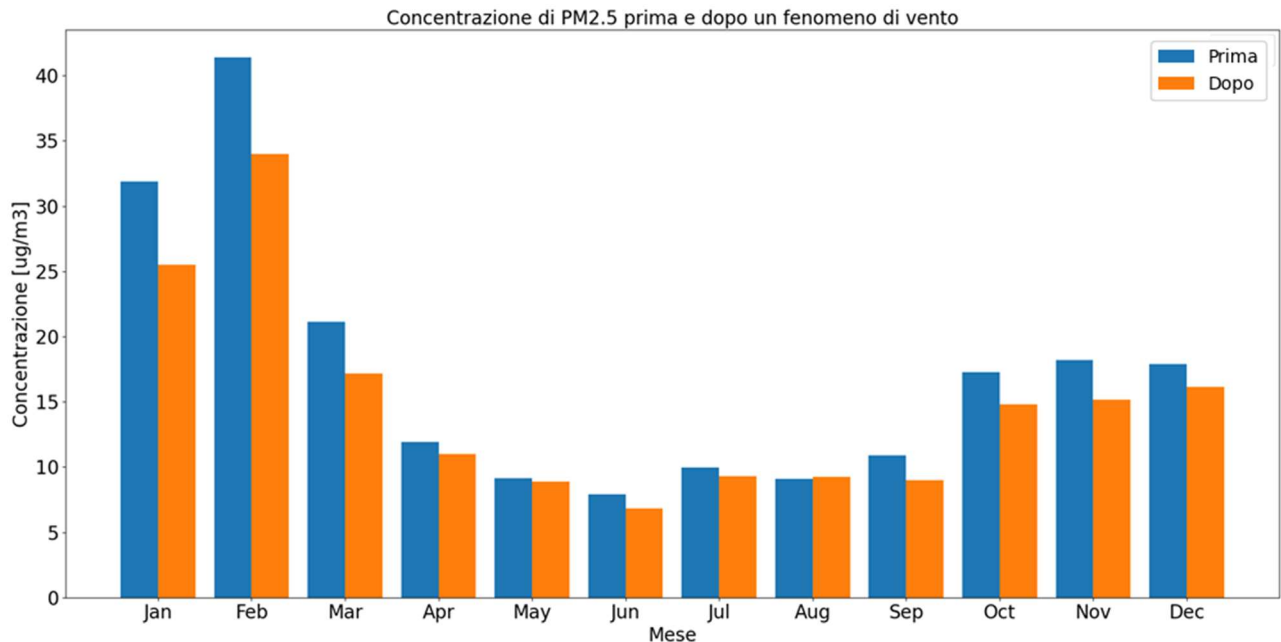


Figura : concentrazione di PM2.5 prima e dopo un fenomeno di vento di durata compresa tra 2 e 6 ore

Si può vedere come non sia cambiato molto rispetto al grafico precedente, a parte nei mesi primaverili/estivi in cui si nota una riduzione nell'abbattimento. Di seguito sono riportati gli eventi con durate superiori a 6 ore.

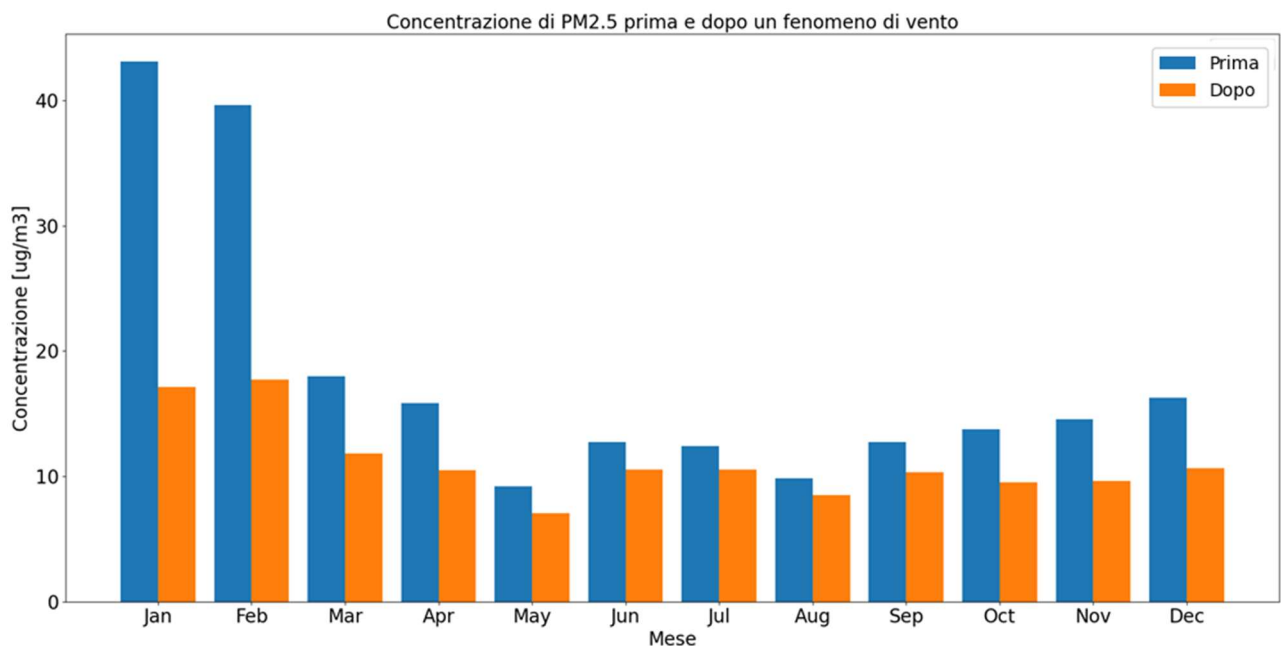


Figura : concentrazione di PM2.5 prima e dopo un fenomeno di vento di durata superiore a 6 ore

Per durate superiori alle 6 ore è possibile riscontrare un elevato abbattimento nei mesi di gennaio e febbraio, mentre negli altri periodi tale abbattimento è ridotto. Già da questo grafico si può vedere come l'abbattimento in termini assoluti sia più consistente laddove ci sia una concentrazione iniziale maggiore.

Analogo trattamento è stato riservato ai dati di PM10.

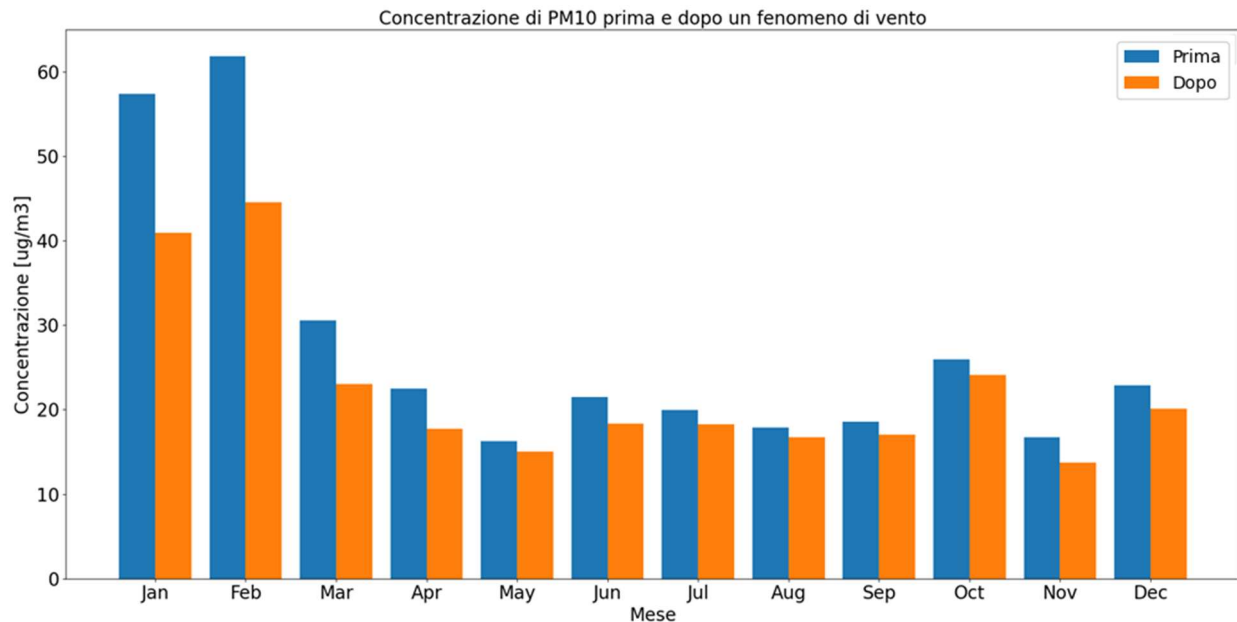


Figura : concentrazione di PM10 prima e dopo un fenomeno di vento in generale

Anche per il PM10 si notano degli abbattimenti più netti nei mesi in cui le concentrazioni all'inizio dell'evento sono più elevate. Come per il PM2.5 mediamente si registra un sempre abbattimento, anche negli altri mesi.

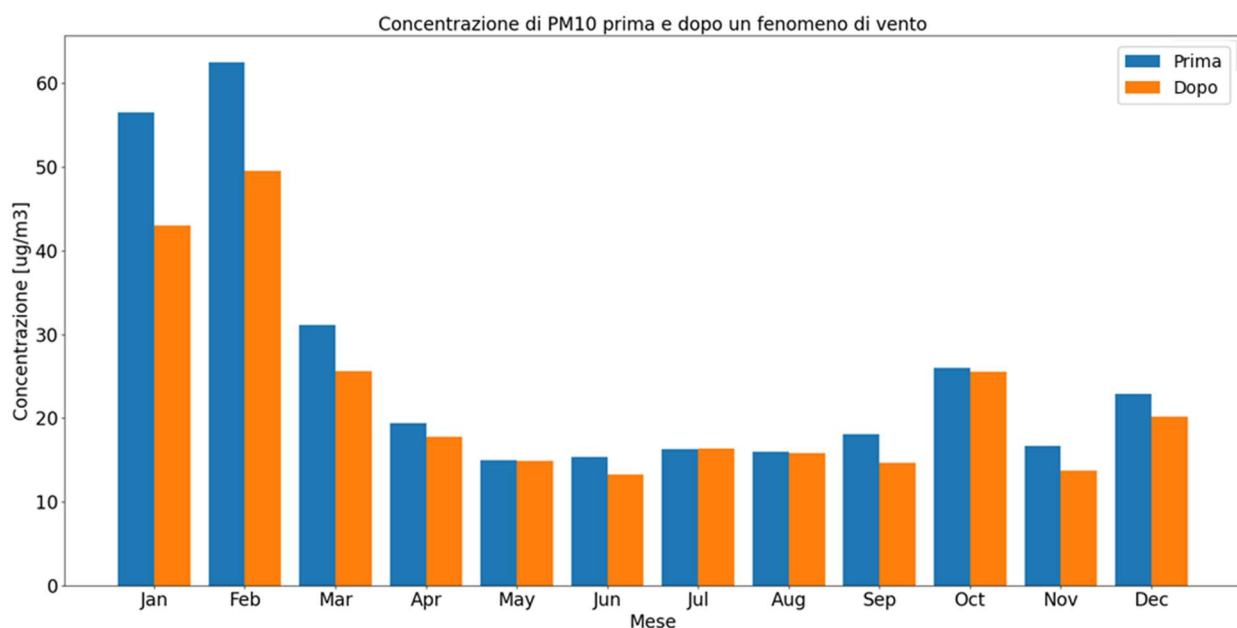


Figura : concentrazione di PM10 prima e dopo un fenomeno di vento di durata compresa tra 2 e 6 ore

Per venti con durate non superiori alle 6 ore si nota il solito equilibrio nei mesi primaverili/estivi. In linea di massima si ha una riduzione nell'abbattimento anche negli altri mesi.

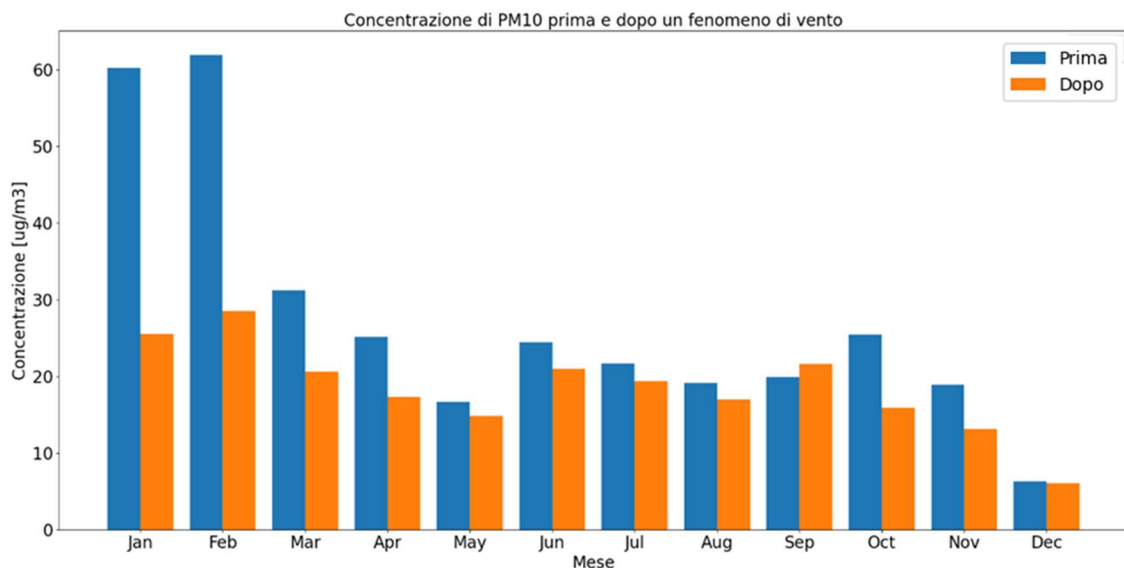


Figura : concentrazione di PM10 prima e dopo un fenomeno di vento di durata superiore a 6 ore

Per gli eventi di durata superiore alle 6 ore si notano degli abbattimenti molto elevati a gennaio e a febbraio, come per il PM2.5. In generale nei mesi primaverili/estivi sussiste sempre il solito equilibrio, a parte a settembre in cui si nota un incremento dopo il fenomeno di vento.

È interessante adesso differenziare non più in termini di durata, ma in termini di velocità del vento. In questo caso si è deciso di suddividere i fenomeni in due categorie, ovvero quelli con velocità inferiore a 1 m/s e quelli con velocità superiore a 1 m/s, in modo da avere sempre due campioni con ugual numerosità.

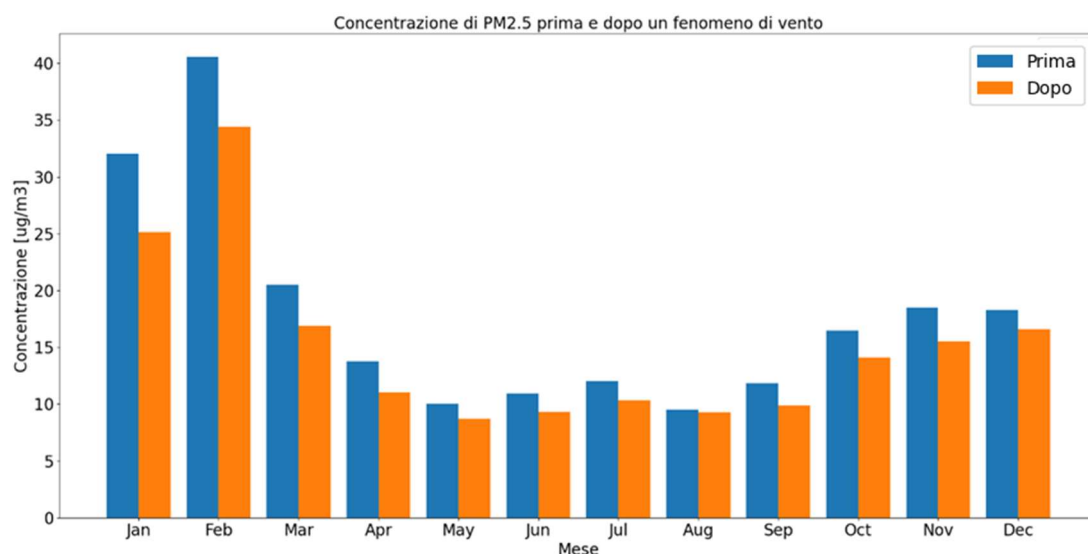


Figura : concentrazione di PM2.5 prima e dopo un fenomeno di vento con velocità media inferiore a 1 m/s

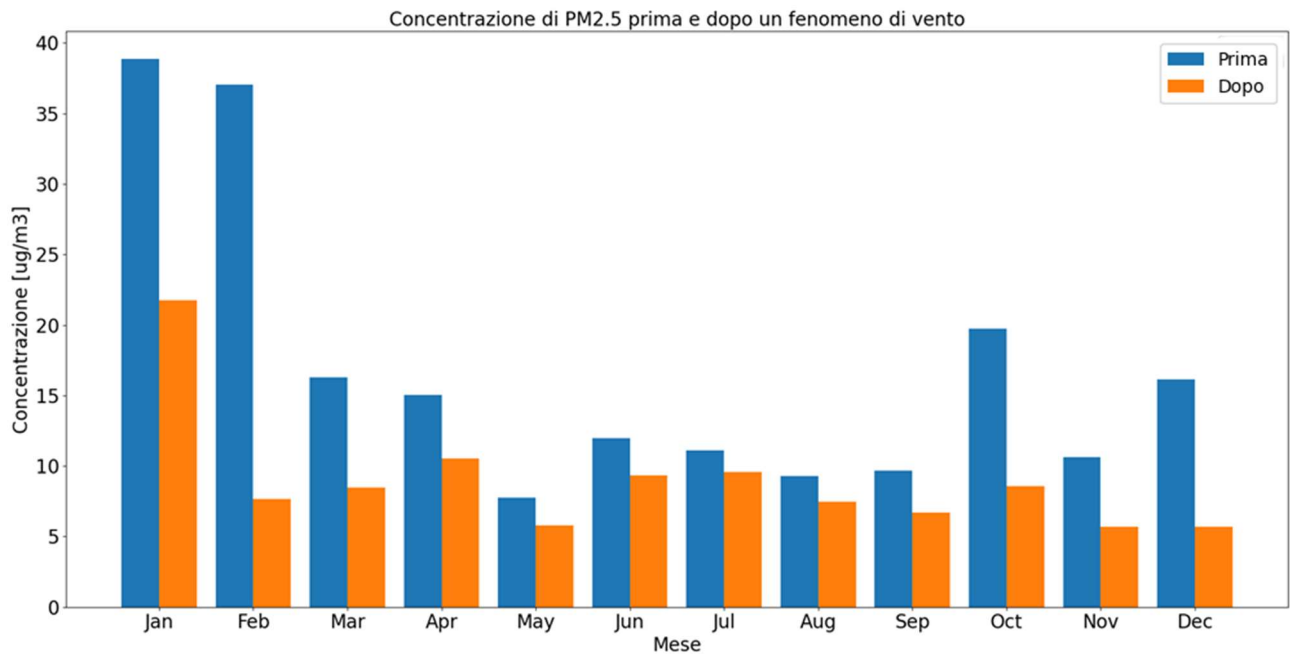


Figura : concentrazione di PM2.5 prima e dopo un fenomeno di vento con velocità media superiore a 1 m/s

Da questi due grafici si può vedere come all'aumentare della velocità l'abbattimento diventi più netto.

Qui di seguito verranno riportati i risultati per il PM10.

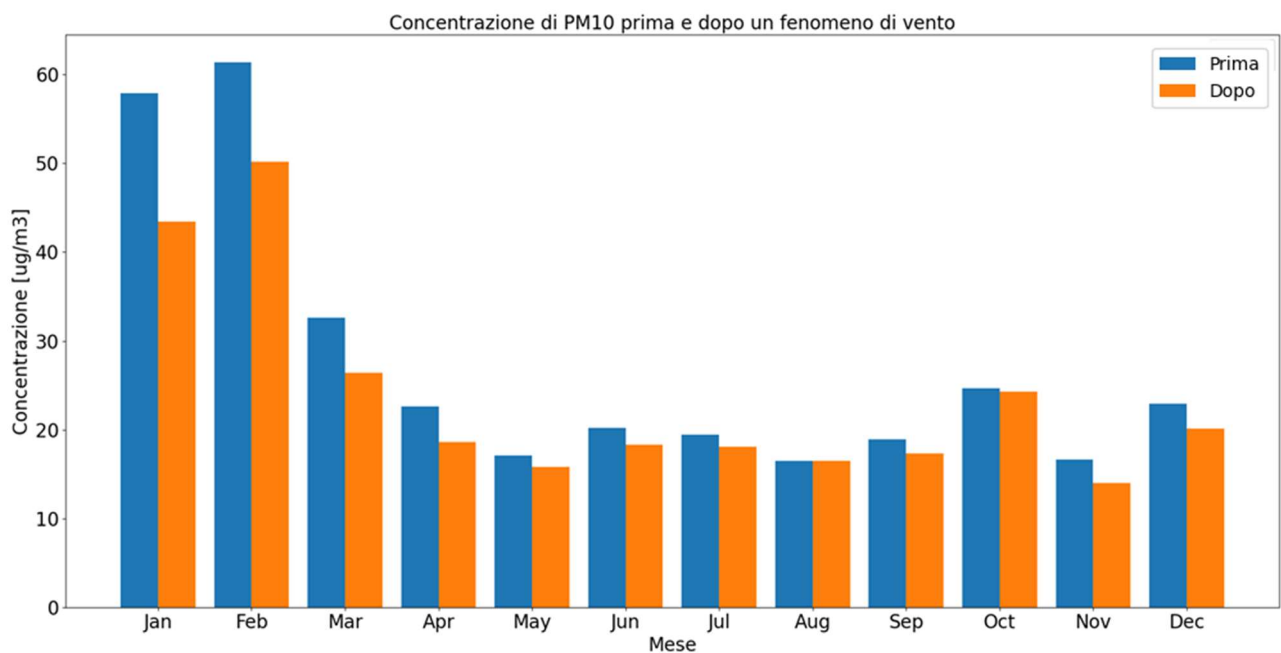


Figura : concentrazione di PM10 prima e dopo un fenomeno di vento con velocità media inferiore a 1 m/s

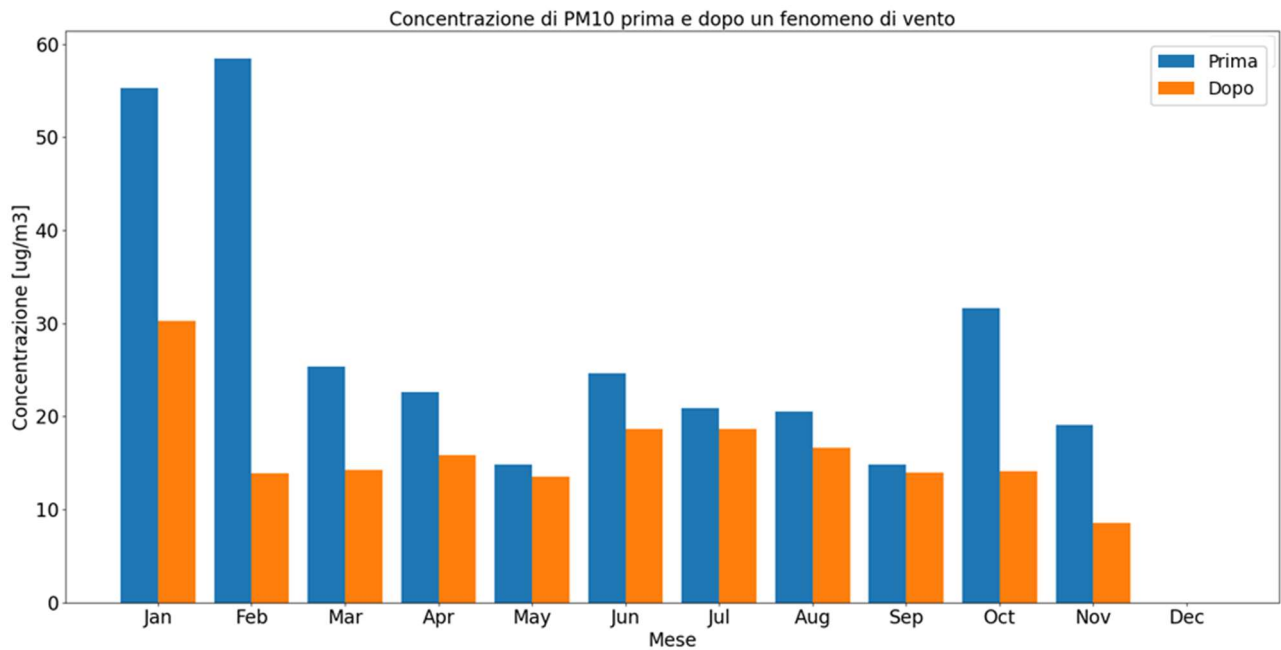


Figura : concentrazione di PM10 prima e dopo un fenomeno di vento con velocità media superiore a 1 m/s

Anche per il PM10 l'abbattimento si amplifica all'aumentare della velocità.

Avendo differenziato i fenomeni in termini di durata e velocità, si utilizzeranno degli scatter-plot per vedere contemporaneamente l'influenza di entrambi i parametri sulla variazione di concentrazione di particolato.

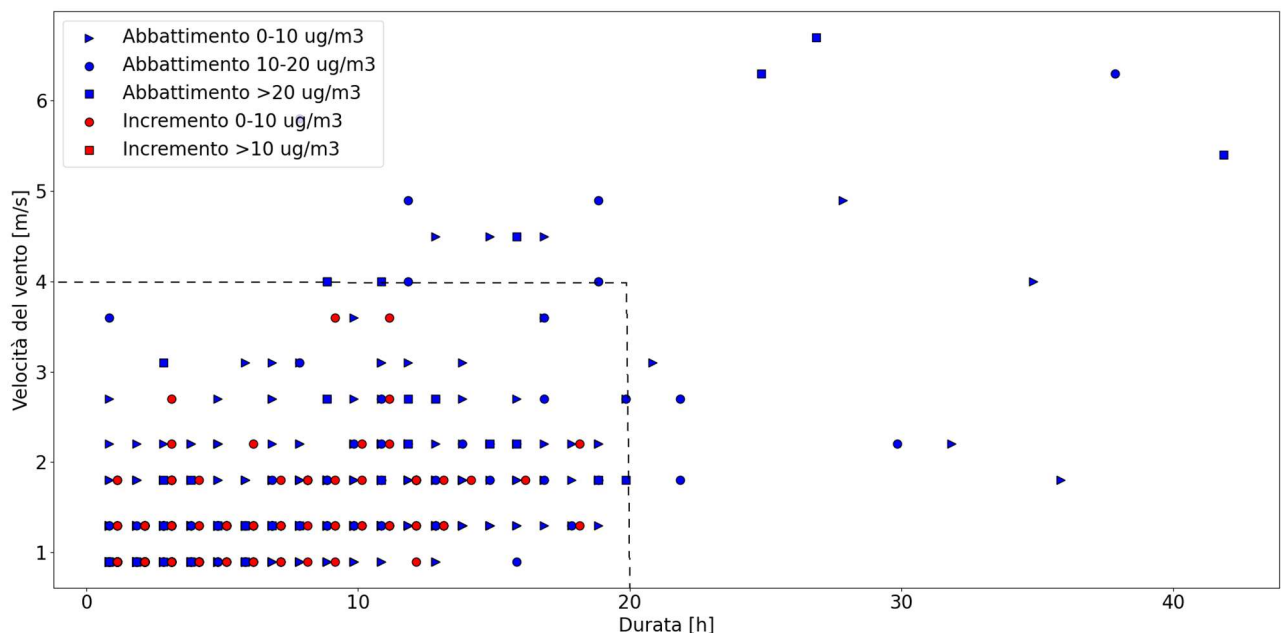


Figura : scatter-plot durata fenomeno-velocità del vento con riferimento a diversi range di abbattimento ed incremento per il PM2.5

Dal seguente grafico si può vedere come tutti gli incrementi nella concentrazione si verifichino per durate inferiori alle 20 ore e velocità inferiori a 4 m/s. Al di là di queste soglie

si registrano solo abbattimenti. Invece, all'interno del box evidenziato in figura è possibile notare un'elevata aleatorietà per fenomeni caratterizzati da uguale durata e velocità del vento.

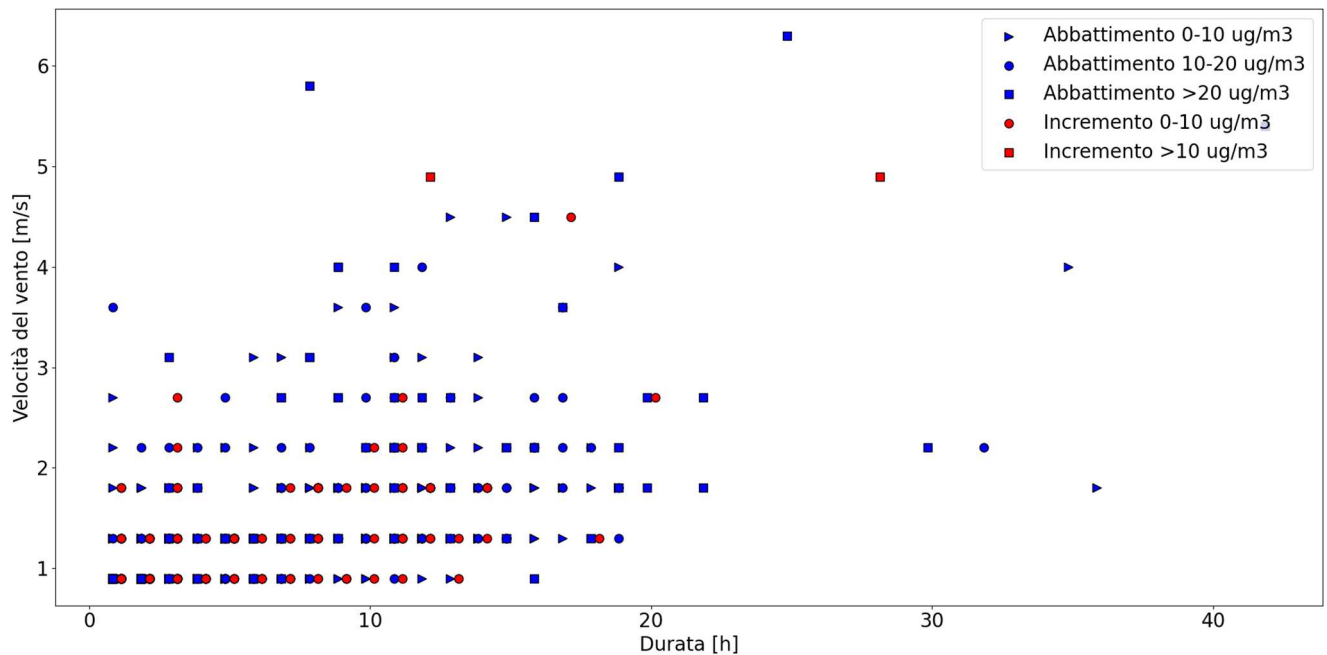


Figura : scatter-plot durata fenomeno-velocità del vento con riferimento a diversi range di abbattimento ed incremento per il PM10

Per il PM10 invece si registrano degli incrementi anche al di sopra dei 4 m/s. Si era già visto in precedenza come per il PM10 il superamento di una certa soglia di velocità comportava una risospensione di particolato in atmosfera. Anche qui per durate e velocità minori si ha una forte aleatorietà, potendo notare come fenomeni con uguale durata e velocità hanno comportamenti opposti.

Analogamente a quanto fatto per l'analisi precedente, si è deciso di evidenziare attraverso la solita rappresentazione a barre come varia il rapporto tra PM2.5 e PM10 da un'ora prima ad un'ora dopo il fenomeno di vento. In questo modo è possibile farsi un'idea generale su quale frazione sia più efficace l'effetto di abbattimento prodotto dal vento.

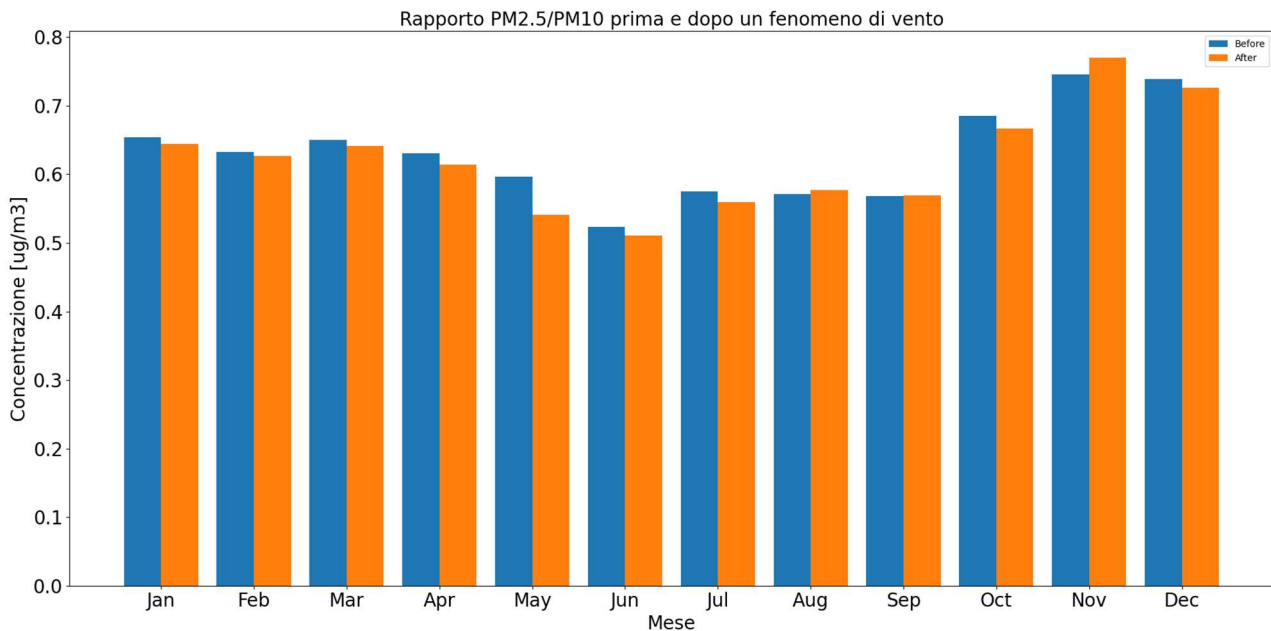


Figura : rapporto medio tra concentrazione PM2.5/PM10 prima e dopo un evento piovoso

Dal seguente grafico è possibile notare un certo equilibrio tra tale rapporto, prima e dopo l'evento. Tendenzialmente si nota un leggero decremento nel rapporto. Ciò potrebbe essere correlato ai fenomeni di vento caratterizzati da velocità elevate, che come visto in precedenza, possono portare ad una risospensione di particolato in atmosfera, fenomeno che interessa maggiormente la frazione grossolana che quella fine.

È possibile passare adesso alla fase di modellistica, ricalcolando la variabile dipendente con la formula già vista in precedenza, ovvero come la differenza tra il valore massimo e l'ultimo valore della serie.

Regressione multivariata

È stata utilizzata sempre la stessa procedura iterativa per valutare l'adattamento di ogni modello. Sono qui riportate le 10 migliori combinazioni di variabili sia per quanto riguarda l'adattamento e sia per quanto riguarda la convalida incrociata, disposte in ordine decrescente per coefficiente di determinazione.

Abbattimento assoluto

PM2.5 (Adattamento)

n.	Variabili	Adattamento		Convalida incrociata	
		Lineare	Poly (n=2)	Lineare	Poly (n=2)
1	Velocità vento, Temperatura, Umidità, Primo valore	0.512484	0.670708	0.478942	0.545003
2	Velocità vento, Cumulata vento, Temperatura, Primo valore	0.505848	0.666877	0.458457	0.379496
3	Durata, Velocità vento, Temperatura, Primo valore	0.513255	0.664995	0.45351	0.527336
4	Velocità vento, Temperatura, Primo valore, Mese	0.505747	0.664862	0.473508	0.544719
5	Velocità vento, Temperatura, Primo valore, Giorno	0.505663	0.66144	0.473293	0.539129
6	Velocità vento, Cumulata vento, Umidità, Primo valore	0.509682	0.659997	0.466186	0.357378
7	Velocità vento, Umidità, Primo valore, Mese	0.509189	0.655493	0.477823	0.52594
8	Velocità vento, Temperatura, Primo valore	0.504883	0.654181	0.47362	0.541733
9	Velocità vento, Umidità, Primo valore, Giorno	0.509166	0.654131	0.477691	0.524205
10	Durata, Velocità vento, Umidità, Primo valore	0.512757	0.652716	0.463803	0.496679

PM2.5 (Convalida)

n.	Variabili	Adattamento		Convalida incrociata	
		Lineare	Poly (n=2)	Lineare	Poly (n=2)
1	Velocità vento, Temperatura, Umidità, Primo valore	0.512484	0.670708	0.478942	0.545003
2	Velocità vento, Temperatura, Primo valore, Mese	0.505747	0.664862	0.473508	0.544719
3	Velocità vento, Temperatura, Primo valore	0.504883	0.654181	0.47362	0.541733
4	Velocità vento, Temperatura, Primo valore, Giorno	0.505663	0.66144	0.473293	0.539129
5	Velocità vento, Umidità, Primo valore	0.509061	0.646692	0.480099	0.527442
6	Durata, Velocità vento, Temperatura, Primo valore	0.513255	0.664995	0.45351	0.527336
7	Velocità vento, Umidità, Primo valore, Mese	0.509189	0.655493	0.477823	0.52594
8	Velocità vento, Umidità, Primo valore, Giorno	0.509166	0.654131	0.477691	0.524205
9	Durata, Temperatura, Primo valore, Mese	0.459731	0.625042	0.428695	0.508938
10	Durata, Temperatura, Primo valore	0.458239	0.611764	0.428308	0.508147

Figura: R2 da regressione e convalida k-fold (k=5) su PM2.5

In questo caso il modello migliore è sicuramente quello che tiene conto della velocità del vento, della temperatura, dell'umidità e naturalmente del primo valore, anche se rispetto agli altri modelli riportati in tabella l'R2 è solo leggermente più alto. Primo valore che rimane un descrittore fondamentale anche in questa fase di analisi.

PM10 (Adattamento)

n.	Variabili	Adattamento		Convalida incrociata	
		Lineare	Poly (n=2)	Lineare	Poly (n=2)
1	Durata, Velocità vento, Temperatura, Primo valore	0.570683	0.708758	0.541866	0.561152
2	Velocità vento, Cumulata vento, Temperatura, Primo valore	0.579249	0.708049	0.516403	0.588058
3	Durata, Velocità vento, Umidità, Primo valore	0.564757	0.706152	0.541946	0.563514
4	Durata, Velocità vento, Cumulata vento, Primo valore	0.577431	0.705086	0.517638	0.54214
5	Durata, Velocità vento, Primo valore, Mese	0.565043	0.70065	0.54401	0.541981
6	Durata, Velocità vento, Primo valore, Giorno	0.564924	0.699669	0.543582	0.542197
7	Velocità vento, Cumulata vento, Umidità, Primo valore	0.578053	0.696283	0.517121	0.591526
8	Durata, Temperatura, Umidità, Primo valore	0.514217	0.694938	0.517865	0.564514
9	Durata, Umidità, Primo valore, Mese	0.501453	0.694486	0.515786	0.571917
10	Durata, Umidità, Primo valore, Giorno	0.501495	0.694104	0.515218	0.570878

PM10 (Convalida)

n.	Variabili	Adattamento		Convalida incrociata	
		Lineare	Poly (n=2)	Lineare	Poly (n=2)
1	Velocità vento, Temperatura, Umidità, Primo valore	0.559683	0.684347	0.532815	0.596114
2	Velocità vento, Cumulata vento, Umidità, Primo valore	0.578053	0.696283	0.517121	0.591526
3	Velocità vento, Umidità, Primo valore, Giorno	0.555967	0.679461	0.530175	0.58829
4	Velocità vento, Umidità, Primo valore, Mese	0.556031	0.678248	0.530328	0.588216
5	Velocità vento, Cumulata vento, Temperatura, Primo valore	0.579249	0.708049	0.516403	0.588058
6	Velocità vento, Temperatura, Primo valore, Mese	0.556014	0.67984	0.528941	0.587745
7	Velocità vento, Umidità, Primo valore	0.555936	0.663811	0.530692	0.585195
8	Velocità vento, Temperatura, Primo valore, Giorno	0.555948	0.678219	0.528541	0.58438
9	Velocità vento, Temperatura, Primo valore	0.555916	0.671233	0.528766	0.582859
10	Durata, Umidità, Primo valore, Mese	0.501453	0.694486	0.515786	0.571917

Figura: R2 da regressione e convalida k-fold (k=5) su PM10

La combinazione migliore rimane quella vista per il PM2.5, ovvero velocità vento, temperatura, umidità e primo valore. Quindi anche per il PM10 i parametri temperatura e umidità giocano un ruolo importante. Rispetto al PM2.5 si può notare una leggera crescita negli R2, sia per quanto riguarda l'adattamento del modello e sia per quanto riguarda la capacità che esso possiede di generalizzare.

Modelli additivi generalizzati

Si passerà adesso ad applicare i modelli GAM già visti nelle due analisi precedenti. Dopo aver individuato le migliori combinazioni di parametri e i relativi modelli verranno valutate le dipendenze parziali per ogni variabile indipendente.

Abbattimento assoluto

PM2.5 (Adattamento)

n.	Variabili	Adattamento			Convalida incrociata		
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2	Model 3
1	Velocità vento, Umidità, Primo valore, Giorno	0.715001	0.688421	0.679306	0.214021	0.332851	0.265995
2	Velocità vento, Umidità, Primo valore, Mese	0.704272	0.688355	0.679338	0.348557	0.331793	0.265235
3	Velocità vento, Primo valore, Mese, Giorno	0.702868	0.679732	0.605952	0.205502	0.312272	0.404487
4	Velocità vento, Temperatura, Primo valore, Giorno	0.702195	0.685337	0.670298	0.189068	0.308286	0.198195
5	Velocità vento, Temperatura, Primo valore, Mese	0.69814	0.685729	0.670713	0.277222	0.307275	0.24772
6	Durata, Velocità vento, Primo valore, Giorno	0.697373	0.668522	0.671266	0.190442	0.319235	0.319821
7	Velocità vento, Cumulata vento, Primo valore, Giorno	0.695714	0.676627	0.669907	0.146431	0.266844	0.151232
8	Velocità vento, Umidità, Primo valore	0.695236	0.593409	0.679283	0.332614	0.374164	0.275161
9	Velocità vento, Temperatura, Umidità, Primo valore	0.695188	0.632206	0.598325	0.331154	0.394875	0.363132
10	Cumulata vento, Umidità, Primo valore, Giorno	0.694978	0.669186	0.649414	0.158589	0.170729	0.210152

PM2.5 (Convalida)

n.	Variabili	Adattamento			Convalida incrociata		
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2	Model 3
1	Umidità, Primo valore	0.541466	0.40413	0.50861	0.297803	0.433496	0.27607
2	Velocità vento, Temperatura, Primo valore	0.684191	0.605614	0.668828	0.311093	0.419696	0.200128
3	Temperatura, Umidità, Primo valore	0.56071	0.442621	0.532091	0.264643	0.416812	0.252838
4	Temperatura, Primo valore	0.489582	0.338737	0.459351	0.256405	0.416487	0.278864
5	Velocità vento, Primo valore	0.669239	0.564914	0.629166	0.258922	0.403464	0.227247
6	Velocità vento, Temperatura, Umidità, Primo valore	0.695188	0.632206	0.598325	0.331154	0.394875	0.363132
7	Velocità vento, Umidità, Primo valore	0.695236	0.593409	0.679283	0.332614	0.374164	0.275161
8	Durata, Velocità vento, Temperatura, Primo valore	0.682157	0.635798	0.59939	0.194362	0.369535	0.304179
9	Velocità vento, Umidità, Primo valore, Giorno	0.715001	0.688421	0.679306	0.214021	0.332851	0.265995
10	Velocità vento, Umidità, Primo valore, Mese	0.704272	0.688355	0.679338	0.348557	0.331793	0.265235

Figura: R2 da gam e convalida k-fold (k=5) su PM2.5

In questo caso il modello 1 (solo spline) garantisce l'adattamento migliore, mentre il modello 2 (spline + linear term) garantisce una maggiore significatività. Se si ripensa ai risultati della regressione polinomiale si può osservare come con questi modelli GAM si raggiungano valori più bassi. Allo scopo di ricercare dei modelli migliori, in questa fase di analisi, sono stati applicati anche dei modelli tensoriali. Infatti, come si è potuto vedere durante l'introduzione dei modelli GAM, mediante i modelli generalizzati additivi è possibile utilizzare degli operatori che tengano conto dell'interazione tra due descrittori all'interno della definizione di un modello. Pertanto è stata scelta la combinazione durata, velocità vento e primo valore, accoppiando a due a due le variabili attraverso operatori tensoriali.

Modello:

$$\log(y) = \beta_0 + te(dur, windv) + te(dur, firstvalue) + te(windv, firstvalue)$$

Le dipendenze parziali non saranno più delle curve come visto in precedenza, bensì delle superfici che descrivono la relazione tra due variabili all'interno del modello.

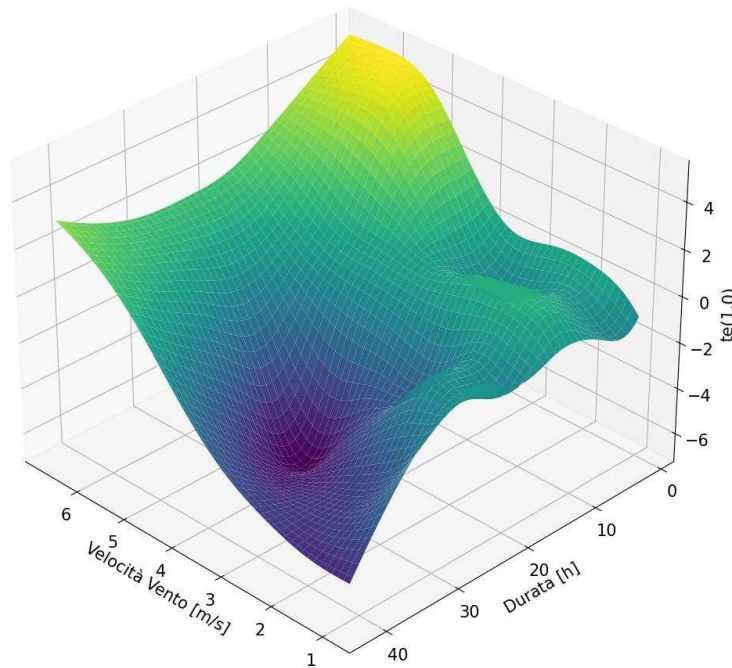


Figura : dipendenza parziale del modello dalla durata del fenomeno e dalla velocità del vento (PM2.5)

Da questa prima superficie si può notare come gli abbattimenti maggiori si verifichino per velocità del vento elevate e durate del fenomeno non superiori alle 10 ore. Gli abbattimenti minori invece si possono osservare per velocità basse e durate superiori alle 30 ore.

Con questa rappresentazione si capisce bene come sia possibile investigare in maniera molto chiara sul legame che sussiste tra due variabili senza dover ricorrere a particolari trattamenti dei dati.

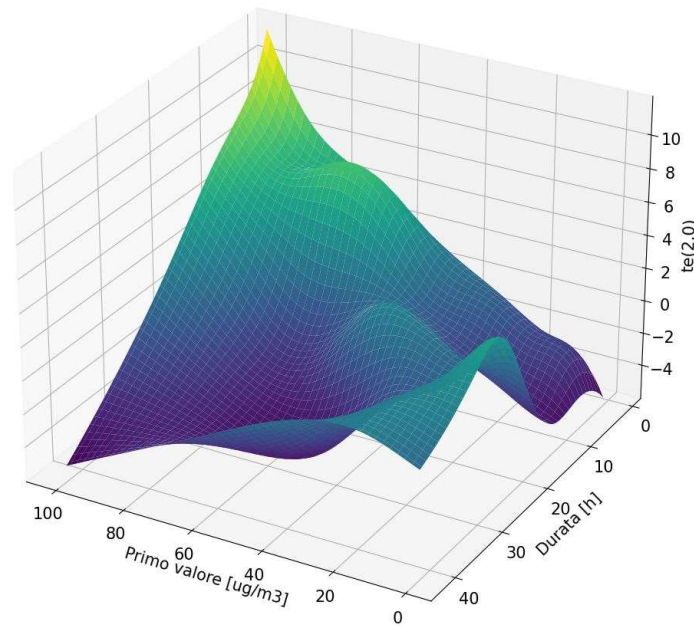


Figura : dipendenza parziale del modello dalla durata del fenomeno e dal primo valore (PM2.5)

Anche dalla seconda superficie si nota come il massimo si trovi in prossimità di durate molto basse e per valori iniziali di concentrazione elevati, tipico delle raffiche di vento in condizioni di elevate concentrazioni di particolato. Questa volta però per durate superiori alle 30 ore è possibile notare un incremento nell'abbattimento, a patto che il primo valore di concentrazione non sia troppo alto.

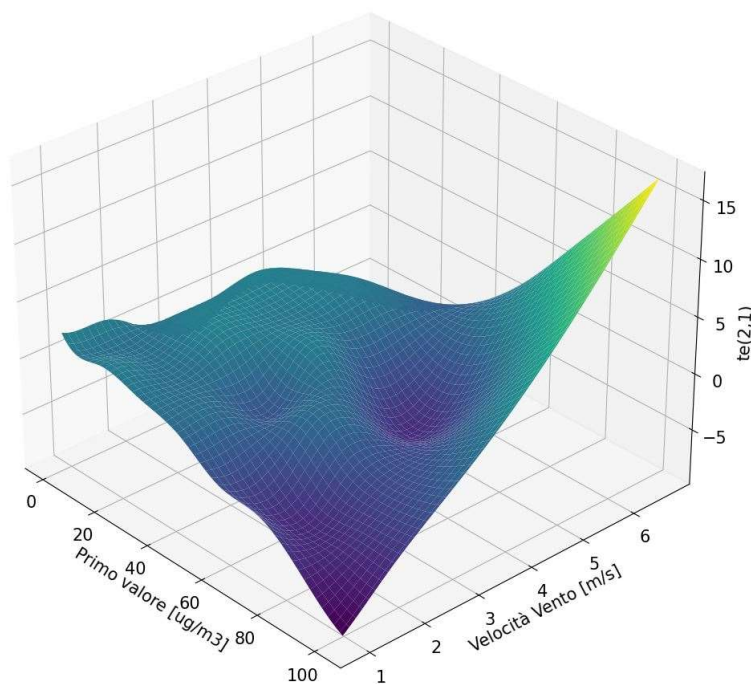


Figura : dipendenza parziale del modello dalla velocità del vento e dal primo valore di concentrazione (PM2.5)

Infine da questa terza superficie si vede come il massimo sia in prossimità di valori alti sia per quanto riguarda il primo valore che per quanto riguarda la velocità del vento.

PM10 (Adattamento)

n.	Variabili	Adattamento			Convalida incrociata		
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2	Model 3
1	Velocità vento, Umidità, Primo valore, Giorno	0.770727	0.750596	0.738776	0.30671	0.325049	0.453885
2	Velocità vento, Temperatura, Umidità, Primo valore	0.76899	0.694278	0.669474	0.287284	0.288655	0.401679
3	Durata, Velocità vento, Temperatura, Primo valore	0.76827	0.690596	0.676798	0.443984	0.343716	0.354422
4	Velocità vento, Temperatura, Primo valore, Giorno	0.766332	0.752313	0.729695	0.414698	0.406871	0.43754
5	Durata, Velocità vento, Umidità, Primo valore	0.764053	0.702841	0.664217	0.353013	0.346959	0.338333
6	Velocità vento, Umidità, Primo valore, Mese	0.763164	0.750762	0.739104	0.323786	0.324671	0.452188
7	Durata, Velocità vento, Primo valore, Giorno	0.762123	0.748863	0.740365	0.411271	0.46166	0.476694
8	Velocità vento, Primo valore, Mese, Giorno	0.761629	0.737076	0.666454	0.387919	0.436678	0.406183
9	Velocità vento, Temperatura, Primo valore, Mese	0.7595	0.752789	0.730274	0.402479	0.407407	0.437312
10	Durata, Cumulata vento, Temperatura, Primo valore	0.759217	0.682758	0.650543	0.377423	0.269086	0.295686

PM10 (Convalida)

n.	Variabili	Adattamento			Convalida incrociata		
		Model 1	Model 2	Model 3	Model 1	Model 2	Model 3
1	Velocità vento, Primo valore	0.72655	0.630119	0.707512	0.457347	0.424249	0.479907
2	Durata, Velocità vento, Primo valore	0.744394	0.671012	0.73426	0.457902	0.397528	0.477382
3	Durata, Velocità vento, Primo valore, Mese	0.757808	0.749416	0.741036	0.457676	0.462199	0.476868
4	Durata, Velocità vento, Primo valore, Giorno	0.762123	0.748863	0.740365	0.411271	0.46166	0.476694
5	Velocità vento, Umidità, Primo valore	0.74981	0.670925	0.737553	0.337807	0.40644	0.466371
6	Primo valore, Mese	0.529775	0.52465	0.371482	0.324078	0.326986	0.457342
7	Umidità, Primo valore, Giorno	0.621306	0.600319	0.486443	0.266612	0.322683	0.454862
8	Velocità vento, Umidità, Primo valore, Giorno	0.770727	0.750596	0.738776	0.30671	0.325049	0.453885
9	Velocità vento, Umidità, Primo valore, Mese	0.763164	0.750762	0.739104	0.323786	0.324671	0.452188
10	Velocità vento, Temperatura, Primo valore	0.750637	0.658352	0.727674	0.405943	0.38847	0.439065

Figura: R2 da gam e convalida k-fold (k=5) su PM10

Per il PM10 il modello 1 (solo spline) garantisce l'adattamento migliore, mentre il modello 3 garantisce una maggiore significatività. Anche in questo caso si hanno valori più bassi rispetto ai modelli regressivi e anche in questo caso è stato utilizzato lo stesso modello tensoriale visto in precedenza, in modo da poter confrontare le stesse superfici per PM2.5 e per PM10.

Modello:

$$\log(y) = \beta_o + te(dur, windv) + te(dur, firstvalue) + te(windv, firstvalue)$$

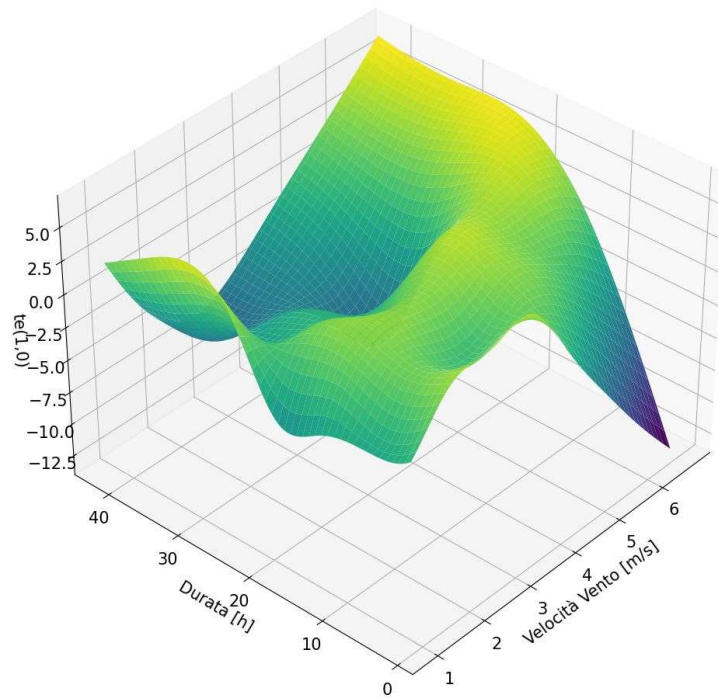


Figura : dipendenza parziale del modello dalla durata del fenomeno e dalla velocità del vento (PM10)

A differenza del PM2.5 il minimo si trova nella porzione di spazio corrispondente a velocità del vento alte e durate basse, mentre il massimo per velocità alte e durate anch'esse elevate. Si può notare infatti come per eventi molto duraturi l'incremento nella velocità produca un incremento nell'abbattimento, mentre per eventi poco duraturi accade l'opposto.

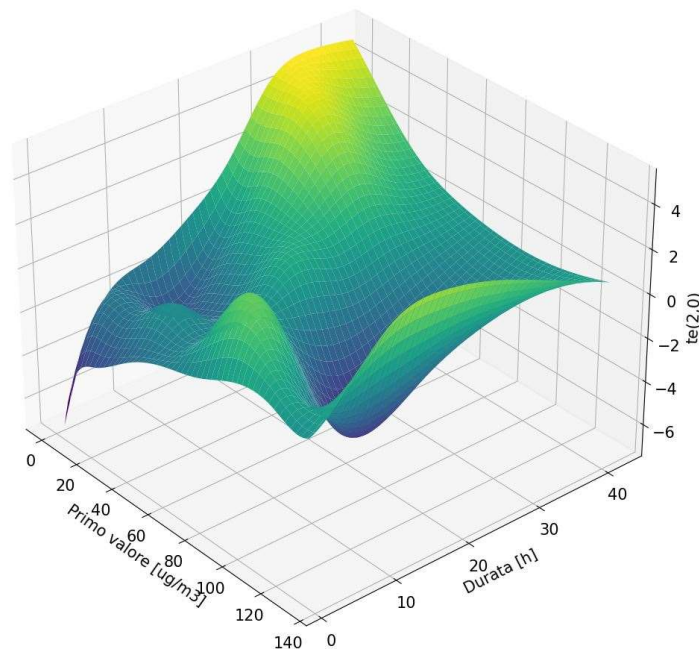


Figura : dipendenza parziale del modello dalla durata del fenomeno e dal primo valore (PM10)

In questo caso la superficie è molto simile a quanto visto per il PM2.5, con l'abbattimento massimo che si può notare per durate basse e primi valori elevati e viceversa. Tale risultato è

interessante poiché, trattandosi dell'unica superficie in cui non figura la velocità del vento, sposta l'attenzione su tale parametro. Di fatti, alla luce di questi risultati, la velocità del vento potrebbe rappresentare il descrittore che spiega le differenze osservate tra PM2.5 e PM10.

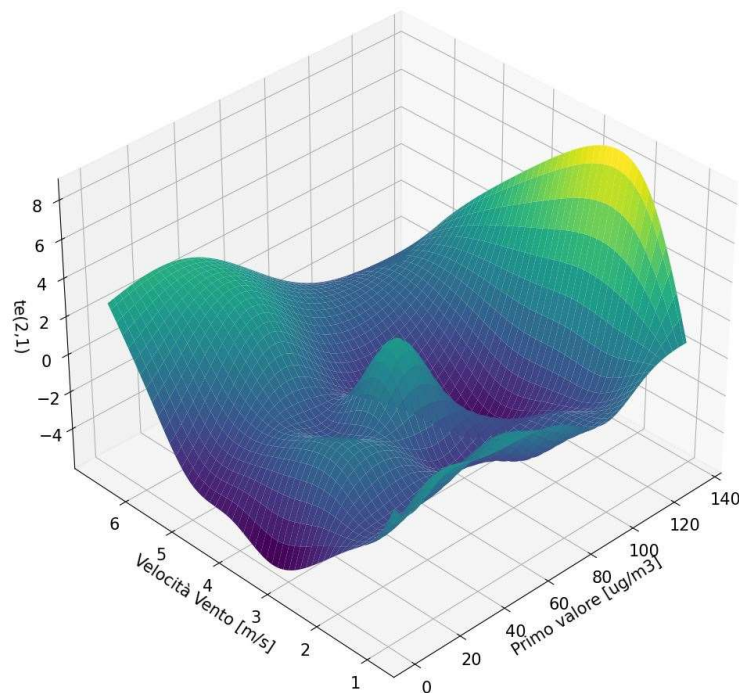


Figura : dipendenza parziale del modello dalla velocità del vento e dal primo valore di concentrazione (PM10)

Per quanto riguarda quest'ultimo grafico si nota come al variare della velocità ci siano dei trend diversi a seconda se il primo valore sia alto o basso. Per valori iniziali di concentrazione bassi si nota una decrescita iniziale (velocità basse) ed una crescita finale (velocità alte). Invece, per valori iniziali alti il trend è invertito con una crescita iniziale (velocità basse) ed una decrescita finale (velocità alte).

Da queste tre superfici ci si rende conto di come il comportamento tra PM2.5 e PM10 in funzione del vento sia diverso. Per il PM2.5 sono state trovate delle superfici più semplici da leggere, mentre per il PM10 le superfici sono più complesse. Ciò potrebbe essere spiegato dalla diversa influenza che l'incremento della velocità del vento esercita su ciascuna frazione. Si è potuto osservare in precedenza come l'aumento della velocità producesse in certi casi un aumento nella concentrazione di PM10 a causa di una risospensione di particelle grossolane in atmosfera.

Reti neurali artificiali

Analogamente a quanto fatto per l'analisi integrata sull'abbattimento, attraverso il modello di Elman si valuta la potenzialità di adattamento del modello con e senza il contributo di uno dei parametri più rappresentativi del fenomeno di abbattimento analizzato, ovvero il valore di concentrazione un'ora prima dell'inizio del fenomeno, in questo caso, di vento. Nei seguenti grafici vengono riportati degli scatter-plot in cui i valori di abbattimento assoluto di PM2.5 e PM10 misurati sono riportati sull'asse delle x, mentre i valori di abbattimento assoluto di PM2.5 e PM10 ottenuti dal modello sono riportati sull'asse delle y.

PM2.5 (Adattamento con valore iniziale di concentrazione)

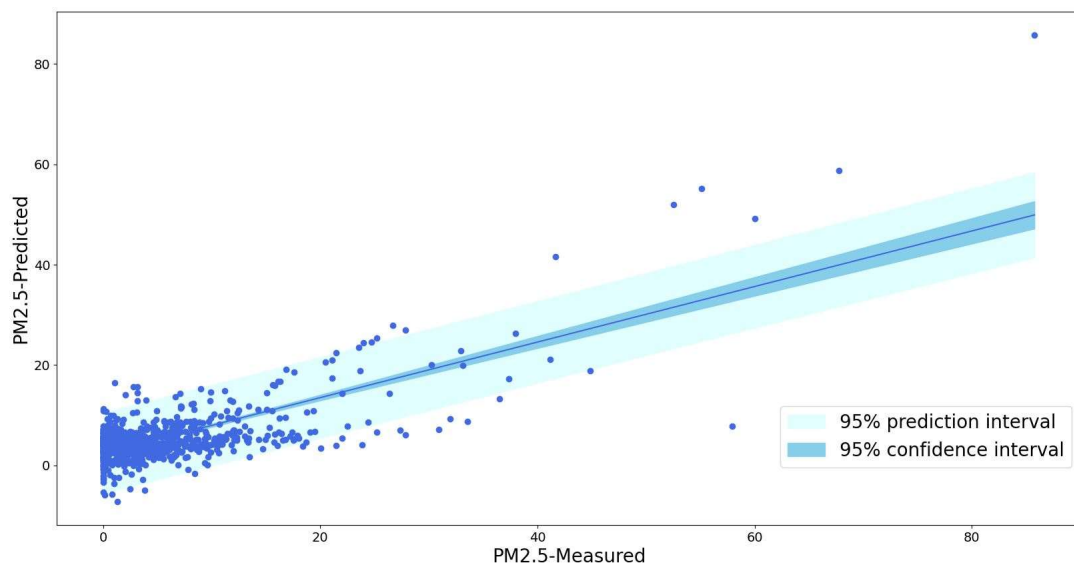


Figura : modello durata, velocità del vento, primo valore (PM2.5)

PM2.5 (Adattamento senza valore iniziale di concentrazione)

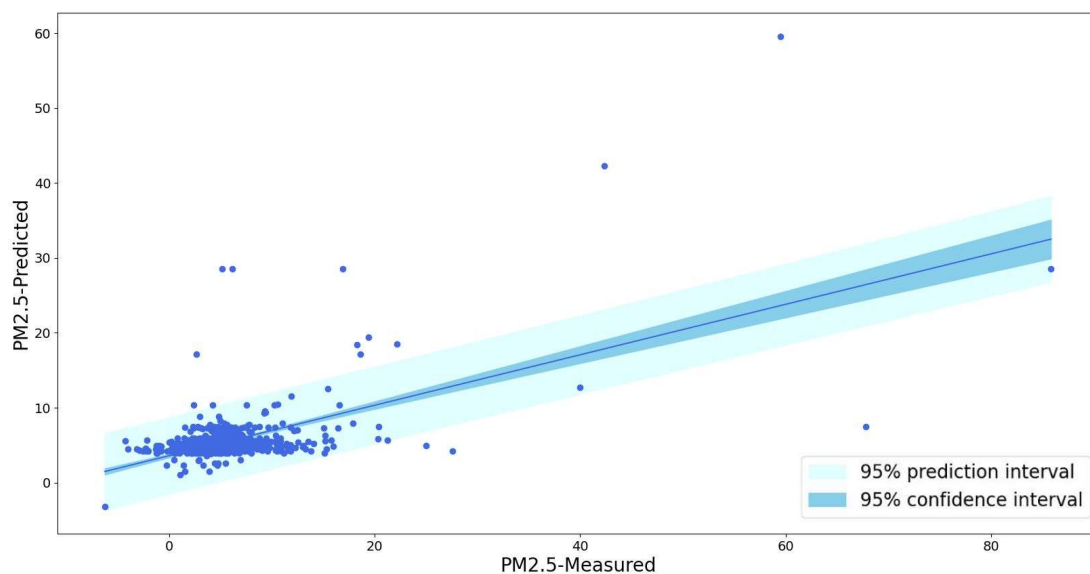


Figura : modello durata, velocità del vento (PM2.5)

PM10 (Adattamento con valore iniziale di concentrazione)

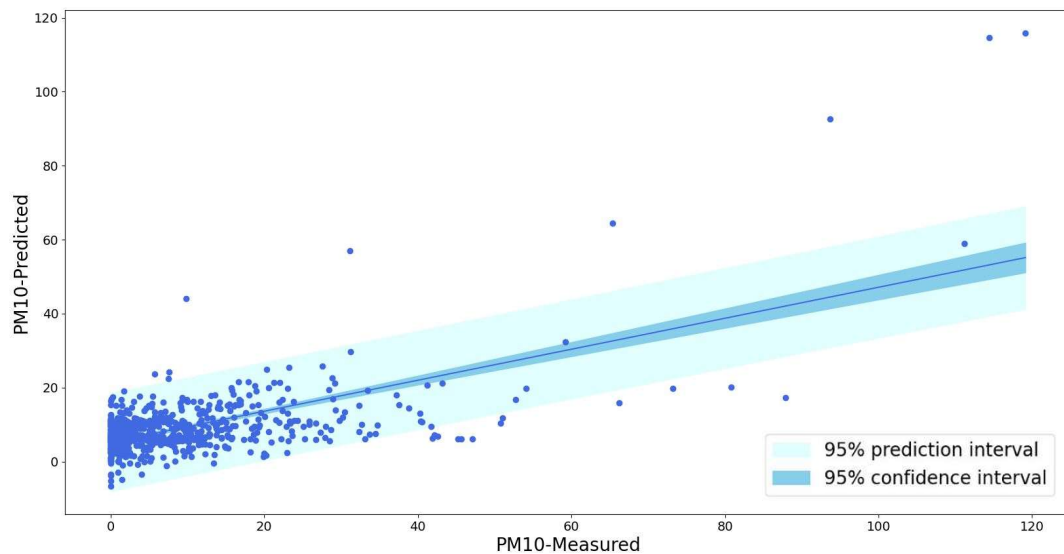


Figura : modello durata, velocità del vento, primo valore (PM10)

PM10 (Adattamento senza valore iniziale di concentrazione)

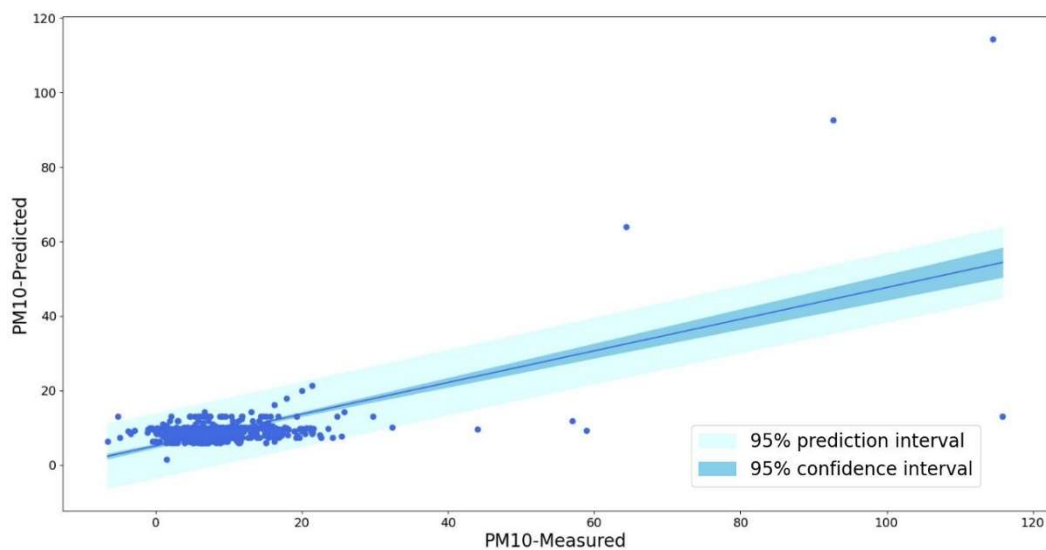


Figura : modello durata, velocità del vento (PM10)

Questa volta non si nota una differenza così elevata tra il modello con e senza il contributo del primo valore di concentrazione come si era potuto osservare nell'analisi integrata sull'abbattimento, anzi il modello "senza primo valore" restituisce dei valori migliori. Tuttavia, anche in questo caso i risultati della convalida incrociata sono peggiori rispetto a modelli GAM e modelli regressivi.

Abbattimento percentuale

Anche in questa fase di analisi l'uso dell'abbattimento percentuale come variabile dipendente non ha fornito buoni risultati, per tanto non verranno riportati all'interno del lavoro.

5. Conclusioni

È possibile adesso mettere insieme tutte le conclusioni a cui si è giunti attraverso le diverse fasi di analisi considerate. Con l'analisi integrata sulle concentrazioni si è potuto osservare come concentrazioni minori di PM_{2.5} e PM₁₀ si registrino in presenza di fenomeni di vento e/o di pioggia. Tuttavia il modo in cui questi due fenomeni meteorologici influenzano il particolato è profondamente diverso, così come è diverso l'impatto nelle due frazioni. Dai primi risultati è stato possibile vedere come all'aumentare della velocità del vento, sia per il PM_{2.5} che per il PM₁₀, la concentrazione diminuisce in modo esponenziale. Tuttavia, la concentrazione di PM₁₀, a differenza del PM_{2.5}, subisce un incremento superando una certa soglia di velocità. Come suggeriscono alcuni studi riportati in tale lavoro, questo potrebbe essere il risultato della risospensione di particolato grossolano a seguito di un incremento dell'efficienza erosiva del vento. Per quanto riguarda, invece, l'intensità di pioggia, quello che si nota è una riduzione media di concentrazione abbastanza netta tra quando non piove e quando inizia a piovere. Tale riduzione rimane poi costante all'aumentare dell'intensità di pioggia.

Risultati simili sono stati ottenuti anche dalle due analisi successive, soprattutto se si ripensa ai grafici relativi alle dipendenze parziali ottenute con l'applicazione dei modelli additivi generalizzati. Se si considerano infatti le dipendenze parziali dalla velocità del vento, in prossimità dei 4 m/s, nel PM₁₀ si nota sempre un incremento per quanto riguarda la concentrazione o una riduzione per quanto riguarda l'abbattimento di concentrazione, a seconda dell'analisi considerata.

Nelle due seguenti analisi, infatti, si è ragionato in termini di evento e di variazione di concentrazione all'interno di esso. Differenziando gli eventi in funzione del mese si è sempre osservato come gli abbattimenti più consistenti si verificano laddove le concentrazioni iniziali sono maggiori.

L'analisi integrata sull'abbattimento ci ha permesso di analizzare anche l'influenza che il vento ha congiuntamente alle piogge sulle variazioni di particolato. Si tratta di relazioni molto complesse caratterizzate da un buon grado di incertezza dovuto alla complessità del fenomeno ed al basso numero di dati disponibili, soprattutto sui fenomeni più estremi. Questo potrebbe significare che i parametri utilizzati in fase di modellistica non bastino a descrivere tali fenomeni o che la risoluzione temporale di tali parametri non sia sufficiente. Si è visto come sia possibile ottenere dei modelli che siano in grado di adattarsi con ottimi risultati. Ciò è stato molto importante, soprattutto per quanto riguarda i modelli GAM poiché ci ha

permesso di evidenziare dipendenze parziali significative della variabile dipendente attraverso curve e superfici. Invece, in termini di significatività, i modelli che hanno raggiunto valori più alti sono quelli che tengono conto del valore iniziale di concentrazione all'interno di un evento, ovvero il valore di concentrazione di particolato prima di subire l'azione del fenomeno meteorologico. Tale parametro è strettamente correlato alla variazione sia per quanto riguarda il PM_{2.5} e sia per quanto riguarda il PM₁₀. Infatti maggiore è il valore iniziale di concentrazione e maggiore sarà l'abbattimento in termini assoluti.

Un ulteriore step a questo lavoro potrebbe essere quello di approfondire l'applicazione delle reti neurali artificiali poiché come si è visto esse riescono a fornire risultati migliori in termini di adattamento ed in certi casi anche in termini di significatività. Tuttavia in questo caso non sarà possibile risalire ad una formulazione matematica, trattandosi di metodi black—box, ovvero metodi per cui si conoscono gli input e gli output, ma non ciò che avviene all'interno del sistema.

La ricerca di un modello che possa essere in grado di fare previsioni circa il comportamento del particolato aerodisperso rappresenta sicuramente un'importante sfida che potrebbe però, come detto prima, richiedere ulteriori parametri o una maggiore risoluzione temporale.

6. Ringraziamenti

Ci tengo a ringraziare la Professoressa Marina Clerico per avermi dato l'opportunità di lavorare su di un argomento così delicato, ma allo stesso tempo stimolante. Un grosso ringraziamento va anche agli ingegneri Chiara Boanini e Domenico Mecca, che grazie ai loro suggerimenti e alla loro disponibilità sono riusciti sempre a mettermi sui binari giusti, mettendo a disposizione la loro conoscenza dell'argomento. Ringrazio la mia famiglia, il cui supporto è stato fondamentale non soltanto durante questi ultimi mesi, ma durante tutto il percorso universitario. Infine ringrazio i miei amici per l'aver reso più leggero e divertente questo lungo e duro periodo.

7. Bibliografia

- [1] Jasper F. Kok, Eric J. R. Parteli, Timothy I. Michaels, and Diana Bou Karam. «The Physics of wind-blown sand and dust». *Reports of Progress in Physics, Volume 75, Number 10*. doi:[10.1088/0034-4885/75/10/106901](https://doi.org/10.1088/0034-4885/75/10/106901)
- [2] Qianqian Yang, Qiangqiang Yuan, Tongwen Li, Huanfeng Shen, and Liangpei Zhang. «The Relationships between PM2.5 and meteorological factors in China: Seasonal and regional variations». *International Journal of Environmental Research and Public Health*. doi:[10.3390/ijerph14121510](https://doi.org/10.3390/ijerph14121510)
- [3] P. Kassomenos, S. Vardoulakis, A. Chaloulakou, G. Grivas, R. Borge, and J. Lumbreras. «Levels, sources and seasonality of coarse particles (PM10-PM2.5) in three European capitals – Implications for particulate pollution control». *Atmospheric Environment, Volume 54, July 2012, Pages 337-347*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.02.051>
- [4] Giovanni Di Virgilio, Melissa Anne Hart, and Ningbo Jiang. «Meteorological controls on atmospheric particulate pollution during hazard reduction burns». *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 6585-6599, 2018. <https://doi.org/10.5194/acp-18-6585-2018>
- [5] Piotr Sekula, Anita Bokwa, Jakub Bartyzel, Bogdan Bochenek, Lukasz Chmura, Michal Galowski, and Miroslaw Zimnoch. «Measurement report: Effect of wind shear on PM10 concentration vertical structure in urban boundary layer in a complex terrain». *Atmospheric Chemistry and Physics*. <https://doi.org/10.5194/acp-2021-93>
- [6] A Afzali, M Rashid, B Sabariah, M Ramli. «PM10 Pollution: Its Prediction and Meteorological Influence in PasirGudang, Johor». *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* doi:[10.1088/1755-1315/18/1/012100](https://doi.org/10.1088/1755-1315/18/1/012100)
- [7] M. Angeles Garcia, M. Luisa Sanchez, Adrian de los Rios, Isidro A. Perez, Nuria Pardo, and Beatriz Fernandez-Duque. «Analysis of PM10 and PM2.5 Concentrations in an Urban Atmosphere in Northern Spain». *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. <https://doi.org/10.1007/s00244-018-0581-3>

- [8] Chengming Li, Zhaoxin Dai, Xiaoli Liu, and Pengda Wu. «Transport Pathways and Potential Source Region Contributions of PM_{2.5} in Weifang: Seasonal Variations». *Applied sciences* 2020, 10(8), 2835. <https://doi.org/10.3390/app10082835>
- [9] Yanling Xu, Wenbo Xue, Yu Lei, Yang Zhao, Shuiyuan Cheng, Zhenhai Ren, and Qing Huang. «Impact of Meteorological Conditions on PM_{2.5} Pollution in China». *Atmosphere* 2018, 9(11), 429. <https://doi.org/10.3390/atmos9110429>
- [10] Minjoong J. Kim. «Changes in the Relationship between Particulate Matter and Surface Temperature in Seoul from 2002-2017». *Atmosphere* 2019, 10(5), 238. <https://doi.org/10.3390/atmos10050238>
- [11] Hanlin Li, Qing He, and Xinchun Liu. «Identification of Long-Range Transport Pathways and Potential Source Regions of PM_{2.5} and PM₁₀ at Akedala Station, Central Asia». *Atmosphere* 2020, 11(11), 1183. <https://doi.org/10.3390/atmos11111183>
- [12] Neal McMullen, Isabella Annesi-Maesano, and Jean-Baptiste Renard. «Impact of Rain Precipitation in Urban Atmospheric Particle Matter Measured at Three Locations in France between 2013 and 2019». *Atmosphere* 2021, 12(6), 769. <https://doi.org/10.3390/atmos12060769>
- [13] I. Barmapadimos, C. Hueglin, J. Keller, S. Henne, and A. S. H. Prevot. «Influence of meteorology on PM₁₀ trends and variability in Switzerland from 1991 to 2008». *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 1813-1835, 2011. doi:[10.5194/acp-11-1813-2011](https://doi.org/10.5194/acp-11-1813-2011)
- [14] Yong Chen, Junling An, Yele Sun, Xiquan Wang, Yu Qu, Jingwei Zhang, Zifa Wang, and Jing Duan. «Nocturnal Low-level Winds and Their Impacts on Particulate Matter over the Beijing Area». *Advances in Atmospheric Sciences*, Vol.35, December 2018, 1455-1468. doi:[10.1007/s00376-018-8022-9](https://doi.org/10.1007/s00376-018-8022-9)
- [15] Ling-Chuan Guo, Yonghui Zhang, Hualiang Lin, Weilin Zeng, Tao Liu, Jianpeng Xiao, Shannon Rutherford, Jing You, and Wenjun Ma. «The washout effects of rainfall on atmospheric particulate pollution in two Chinese cities». *Environmental Pollution*. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.05.003>

- [16] Fangfang Huang, Xia Li, Chao Wang, Qin Xu, and Wei Wang. «PM2.5 Spatiotemporal Variations and The Relationship with Meteorological Factors During 2013-2014 In Beijing, China». *ECU Publications Post 2013*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141642>
- [17] Elzbieta Radzka. «The Effect of Meteorological Conditions on Air Pollution in Siedlce». *Journal of Ecological Engineering, Volume 21, Issue 1, January 2020, pages 97-104*. <https://doi.org/10.12911/22998993/113074>
- [18] Sergio A. Guerra, Dennis D. Lane, Glen A. Marotz, Ray E. Carter, Carrie M. Hohl & Richard W. Baldauf. «Effets of Wind Direction on Coarse and Fine Particulate Matter Concentrations in Southeast Kansas». *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56:11, 1525-1531. doi:[10.1080/10473289.2006.10464559](https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464559)
- [19] Boen Zhang, Limin Jiao, Gang Xu, Suli Zhao, Xin Tang, Yue Zhou, Chen Gong. «Influences of wind and precipitation on different-sized particulate matter concentrations (PM2.5, PM10, PM2.5-10)». *Meteorol. Atmos. Phys (2018) 130:383-392*. <https://doi.org/10.1007/s00703-017-0526-9>
- [20] Cheng, Yu-Hsiang, Zhen-Shu Liu, and Chih-Chieh Chen. «On-Road Measurements of Ultrafine Particle Concentration Profiles and Their Size Distributions inside the Longest Highway Tunnel in Southeast Asia». *Atmospheric Environment 44, n. 6, 763–72*. doi:[10.1016/j.atmosenv.2009.11.040](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.11.040)
- [21] Zhen Liu, Luming Shen, Chengyu Yan, Jianshuang Du, Yang Li, and Hui Zhao. «Analysis of the Influence of Precipitation and Wind on PM2.5 and PM10 in the Atmosphere». *Advances in Meteorology, vol. 2020, 13 pages, 2020*. <https://doi.org/10.1155/2020/5039613>
- [22] Yue Zhou, Yanyu Yue, Yongqing Bai, and Liwen Zhang. «Effects of Rainfall on PM2.5 and PM10 in the Middle Reaches of the Yangtze River». *Advances in Meteorology, vol. 2020, 10 pages, 2020*. <https://doi.org/10.1155/2020/2398146>
- [23] Kyung Hwan Kim, Seung-Bok Lee, Daekwang Woo, Gwi-Nam Bae. «Influence of wind direction and speed on the transport of particle-bound PAHs in a roadway environment». *Atmospheric Pollution Research, Volume 6, Issue 6, November 2015, Pages 1024-1034*. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2015.05.007>

- [24] M. Elias Dueker, Gregory D. O'Mullan, Joaquin Martinez, Andrew R. Juhl, and Kathleen C. Weathers. «Onshore Wind Speed Modulates Microbial Aerosols along an Urban Waterfront». *Atmosphere* 2017, 8(11), 215. <https://doi.org/10.3390/atmos8110215>
- [25] Robert Cichowicz, Grzegorz Wielgosinski, and Wojciech Fetter. «Effect of wind on the level of particulate matter PM10 concentration in atmospheric air during winter season in vicinity of large combustion plant». *Journal of Atmospheric Chemistry*, 77, 35-48 (2020). doi:[10.1007/s10874-020-09401-w](https://doi.org/10.1007/s10874-020-09401-w)
- [26] Shin Araki, Masayuki Shima, and Kouhei Yamamoto. «Estimating historical PM2.5 exposures for three decades (1987-2016) in Japan using measurements of associated air pollutants and land use regression». *Environmental Pollution, Volume 263, Part A, August 2020*, 114476. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114476>
- [27] Rohini Singh, Pratima Gupta, Ashok Jangid, Anshumala Sharma, and Ranjit Kumar. «Assessment of Fractioned Aerosols at a Semiarid Region over the Indo-Gangetic Basin». *CLEAN - Soil Air Water*, 47(4):1800040. doi: [10.1002/clen.201800040](https://doi.org/10.1002/clen.201800040)
- [28] Bin Zhou, Duanyang Liu, and Wenlian Yan. «A Simple New Method for calculating Precipitation Scavenging Effect on Particulate Matter: Based on Five-Year Data in Eastern China». *Atmosphere* 2021, 12(6), 759. <https://doi.org/10.3390/atmos12060759>
- [29] Wei Ouyang, Bobo Guo, Guanqing Cai, Qing Li, Sheng Han, Bin Liu, and Xingang Liu. «The washing effect of precipitation particulate matter and the pollution dynamics of rainwater in downtown Beijing». *Science of The Total Environment, Volume 505, 1 February 2015, Pages 306-314*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.062>
- [30] Ronald Garcia, Jaime E. Hart, Mary E. Davis, Paul Reaser, Jonathan Natkin, Francine Laden, Eric Garshick, and Thomas J. Smith. «Effects of Wind on Background Particle Concentrations at Truck Freight Terminals». *J Occup Environ Hyg*, 2007 Jan; 4(1): 36-48. doi:[10.1080/15459620601070302](https://doi.org/10.1080/15459620601070302)
- [31] Ying Li, Alexis Lau, Agnes Wong, and Jimmy Fung. «Decomposition of the wind and nonwind effects on observed year-to-year air quality variation». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres / Volume 119, Issue 10 / p. 6207-6220*. <https://doi.org/10.1002/2013JD021300>

- [32] Dan Mei, Meng Wen, Xuemei Xu, Yuzheng Zhu, and Futang Xing. «The influence of wind speed on airflow and fine particle transport within different building layouts of an industrial city». *J Air Waste Manag Assoc.* 2018 Oct; 68(10): 1038-1050. doi:[10.1080/10962247.2018.1465487](https://doi.org/10.1080/10962247.2018.1465487)
- [33] Owoade, O.K; Olise, F.S.; Ogundele, L.T.; Fawole, O.G. and Olaniyi, H.B. «Correlation between particulate matter concentrations and meteorological parameters at a site in Ile-Ife, Nigeria». *Ife Journal of Science* vol.14, no. 1(2012).
- [34] Jianhua Wang, Susumu Ogawa. « Effects of Meteorological Conditions on PM2.5 Concentrations in Nagasaki, Japan». *International Journal of Environmental Research and Public Health* 12(8):9089-101. doi:[10.3390/ijerph120809089](https://doi.org/10.3390/ijerph120809089)
- [35] German Hernandez, Terri-Ann Berry, Shannon L. Wallis, and David Poyner. «Temperature and humidity effects on particulate matter concentrations in a sub-tropical climate during winter». *International Proceedings of Chemical, Biological & Environmental Engineering (ICECB 2017)*. doi:[10.7763/IPCBE.2017.V102.10](https://doi.org/10.7763/IPCBE.2017.V102.10)
- [36] Yanling Xu, Wenbo Xue, Yu Lei, Yang Zhao, Shuiyuan Cheng, Zhenhai Ren, and Qing Huang. «Impact of Meteorological Conditions on PM2.5 Pollution in China during Winter». *Atmosphere* 2018, 9(11), 429. <https://doi.org/10.3390/atmos9110429>
- [37] Shahir Masri, Choong-Min Kang, and Petros Koutrakis. « Composition and Sources of Fine and Coarse Particles Collected during 2002-2010 in Boston, MA». *J Air Waste Manag Assoc*, 2015 Mar, 65(3): 287-297. doi:[10.1080/10962247.2014.982307](https://doi.org/10.1080/10962247.2014.982307)
- [38] Francesca Dominici, Yun Wang, Andrew W. Correia, Majid Ezzati, C. Arden Pope III, and Douglas W. Dockery. «Chemical Composition of Fine Particulate Matter and Life Expectancy». *Epidemiology*, 2015 Jul; 26(4); 556-564. doi:[10.1097/EDE.0000000000000297](https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000297)
- [39] Bahadar Zeb, Khan Alam, Armin Sorooshian, Thomas Blaschke, Ifthikhar Ahmad, and Imran Shahid. «On the Morphology and Composition of Particulate Matter in an Urban Environment». *Aerosol Air Qual Ews.* 2018 Sep 28; 18(6): 1431-1447. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.09.0340>
- [40] Nuria Galindo, Montse Varea, Juan Gil-Moltò, Eduardo Yubero. «The Influence of Meteorology on Particulate Matter Concentrations at an Urban Mediterranean Location». *Water Air and Soil Pollution* 215(1):365-372. doi:[10.1007/s11270-010-0484-z](https://doi.org/10.1007/s11270-010-0484-z)

8. Sitografia

<https://www.eea.europa.eu/it/segnali/segnali-2013/articoli/aria-e-cambiamenti-climatici>

<https://www.farbas.it/wp-content/uploads/2021/02/Quadro-di-riferimento-normativo-QualitO-ARIA-.pdf>

<https://www.altalex.com/documents/news/2012/09/26/codice-dell-ambiente-parte-v-tutela-dell-aria-e-riduzione-delle-emissioni>

<https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/aria/cosa-dice-la-normativa>

<https://it.wikipedia.org/wiki/Particolato>

<https://www.arpa.vda.it/it/aria/l-inquinamento-atmosferico/2536-il-particolato-atmosferico>

<https://va.minambiente.it/File/Documento/64928>

<https://courses.lumenlearning.com/geophysical/chapter/transport-of-particles-by-wind/>

<https://ichi.pro/it/modelli-additivi-generalizzati-con-r-104461270065289>

https://pygam.readthedocs.io/en/latest/notebooks/tour_of_pygam.html

<https://www.lorenzogovoni.com/overfitting-e-underfitting-machine-learning/>

https://www.inail.it/cs/internet/docs/documento_di_linee_guida_per_la_valutazione_dell_esposizi_pdf.pdf?section=attivita

<https://pyrenn.readthedocs.io/en/latest/>

<https://xearpro.it/aerosol-inquinante-atmosferico/>

<https://www.lenntech.it/faq-inquinamento-aria.htm>

http://rsaonline.arpa.piemonte.it/rsa2010/index6667.html?option=com_content&view=article&id=257&Itemid=19

<https://www.snpambiente.it/2020/12/01/la-qualita-dellaria-in-italia-edizione-2020/>

<https://www.snpambiente.it/2021/01/15/in-anteprima-i-dati-snpa-sulla-qualita-dellaria->

[in-italia-nel-2020/](#)

<https://www.ecotech.com/wp-content/uploads/2015/03/Manual-Fidas-Fine-Dust-Monitor-System-V0020312.pdf>

<https://www.davisinstruments.com/products/vantage-pro2-weatherlink-live-bundle-with-console>

<https://www.snpambiente.it/wp-content/uploads/2020/12/QUALITA-ARIA-ITALIA.pdf>

https://www.isprambiente.gov.it/files2019/pubblicazioni/rapporti/R_302_18_TREND_ARIA.pdf

https://support.ptc.com/help/mathcad/r7.0/it/PTC_Mathcad_Help/multivariate_polynomial_regression.html

<https://codeburst.io/pygam-getting-started-with-generalized-additive-models-in-python-457df5b4705f>

<https://medium.com/luca-chuangsbapm-notes/build-a-neural-network-in-python-binary-classification-49596d7dcabf>

<https://www.lorenzogovoni.com/5-tecniche-di-cross-validation/>

https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/cat05/0506061415_Fine_PM25_and_Coarse4.pdf

<https://svs.gsfc.nasa.gov/20010>

<https://www.nature.com/articles/nphys1340>

<https://www.nature.com/articles/s41598-020-65391-5>

<https://ro.ecu.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=2426&context=ecuworkspost2013>

<https://it.euronews.com/next/2020/10/19/europe-horizon-come-l-europa-si-prepara-alla-sfida-dei-cambiamenti-climatici>

<https://www.isprambiente.gov.it/it/archivio/notizie-e-novita-normative/notizie->

[ispra/2020/09/affrontare-linquinamento-e-il-cambiamento-climatico-in-europa-per-migliorare-salute-e-benessere-dei-piu-vulnerabili](#)

https://www.ambientesicurezzaweb.it/emissioni-in-atmosfera-analisi-del-quadro-legislativo/#_ftn24

<https://www.apiverona.it/emissioni-in-atmosfera-modifiche-al-d-lgs-1522006-testo-unico-ambientale-impianti-medi-di-combustione-nuovi-obblighi/>

<https://www.snpambiente.it/wp-content/uploads/2021/01/SUPERAMENTI-PM10-2015-2019-STAZIONI-1.pdf>

<https://www.snpambiente.it/temi/polveri-pm10-e-pm25/>

<https://www.isprambiente.gov.it/files2020/pubblicazioni/stato-ambiente/annuario-2020/07Atmosfera2019.pdf>

https://www.isprambiente.gov.it/files2017/pubblicazioni/stato-ambiente/rau-2017/5_Qualita%20dellaria.pdf

<https://www.snpambiente.it/wp-content/uploads/2020/12/QUALITA-DELLARIA-E-LOCKDOWN.pdf>

<https://www.arpa.vda.it/it/aria/la-qualita%20dellaria/stazioni-di-monitoraggio>

https://www.salute.gov.it/imgs/C_17_opuscoliPoster_283_ulterioriallegati_ulterioreallegato_7_alleg.pdf

https://www.salute.gov.it/imgs/C_17_pubblicazioni_2945_allegato.pdf

https://www.ambientediritto.it/dottrina/Politiche%20energetiche%20ambientali/politiche%20e%20modellistica_buonauro.htm

<https://va.minambiente.it/File/Documento/4015>

https://www.comune.bolzano.it/UploadDocs/4805_particolato_atmosferico.pdf

<https://www.andreaminini.com/ai/reti-neurali/neuroni-artificiali>

<https://www.irceline.be/en/documentation/faq/what-are-the-causes-of-particulate-matter>

<https://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/testi/10155dl.htm>

<https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/aria/file-e-allegati/normativa/qualita-dellaria/DLgs-155-del-13-08-2010.pdf>

<https://www.apotecanatura.it/siamo-benefit/inquinamento-atmosferico-gli-effetti-sulla-nostra-salute/>

https://www.isprambiente.gov.it/files2018/pubblicazioni/stato-ambiente/ambiente-urbano/5_Inquinamentodellariaecambiamenticlimatici.pdf

<https://towardsdatascience.com/weight-initialization-in-neural-networks-a-journey-from-the-basics-to-kaiming-954fb9b47c79>

<https://www.data-blogger.com/2017/05/17/elman-rnn-implementation-in-tensorflow/>

<https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/AIR99/AIR99091FU.pdf>

<https://www.ajol.info/index.php/ijs/article/download/131321/120916>

<http://www.arpat.toscana.it/temi-ambientali/aria/qualita-aria/limiti>

<https://aria.ambiente.piemonte.it/#/>

<http://www.sistemapiemonte.it/ambiente/srqa/consultadati.shtml>

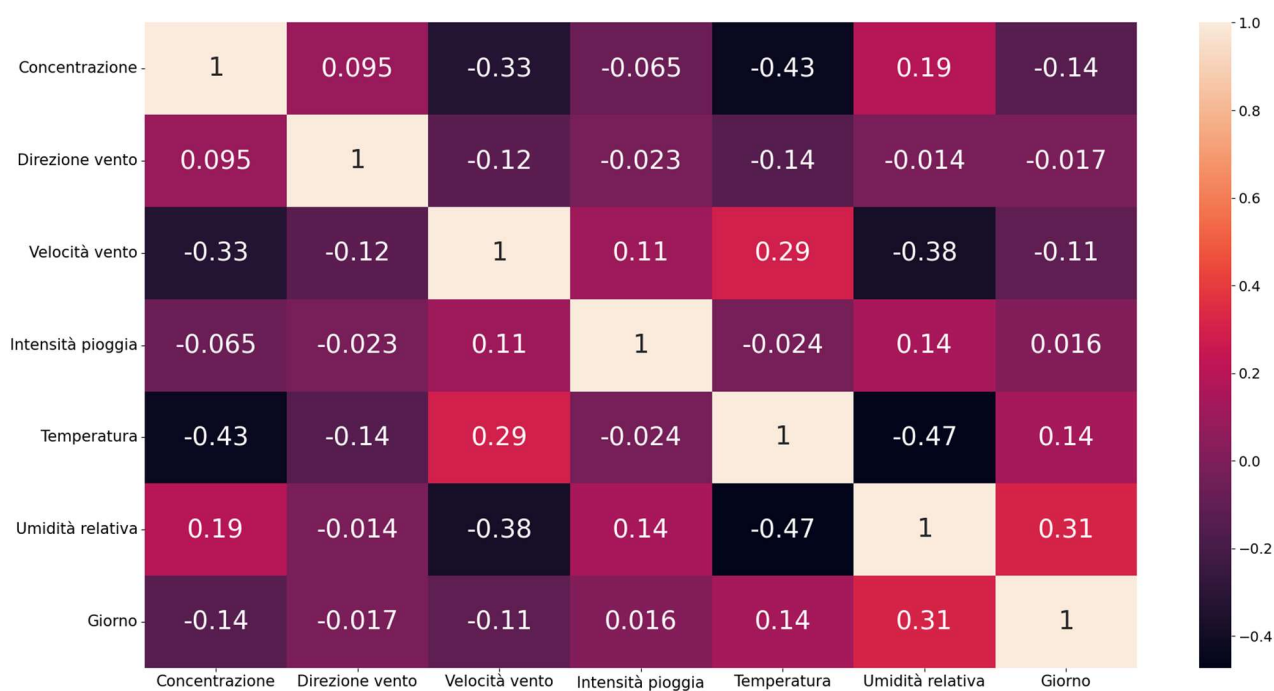
<https://www.arpa.vda.it/it/aria/la-qualit%C3%A0-dell-aria/bollettini>

https://it.wikipedia.org/wiki/Modello_lineare_generalizzato

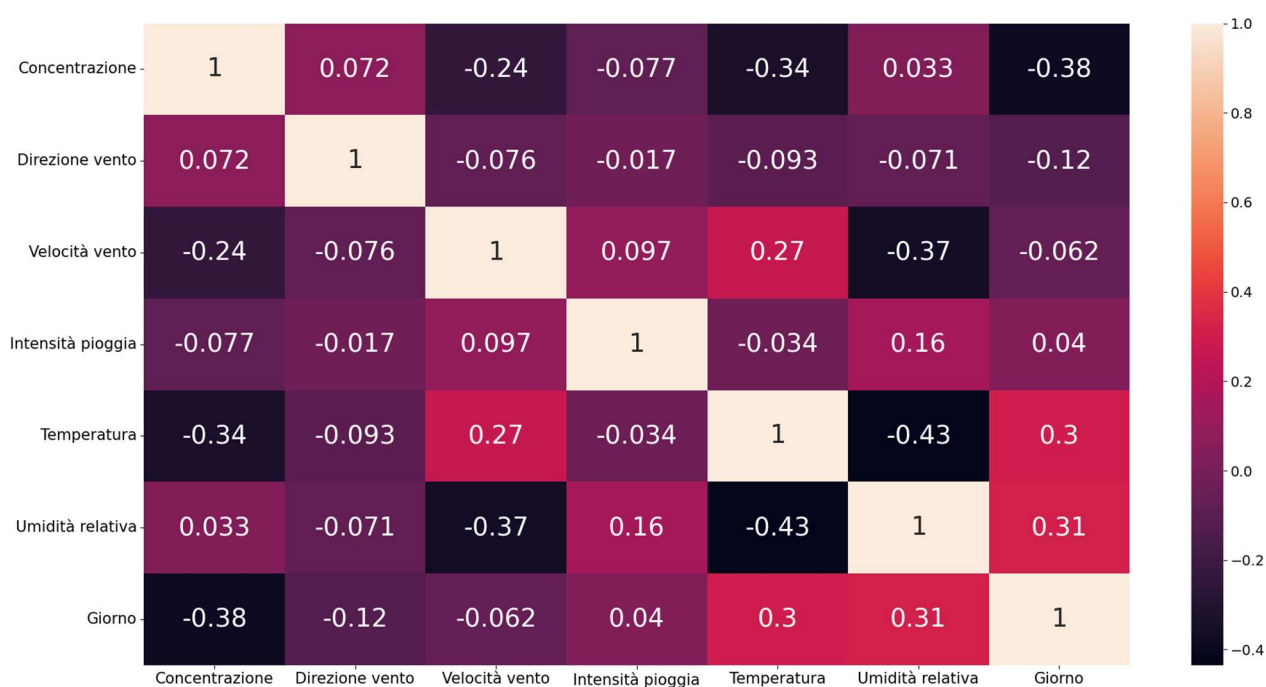
9. Appendice

Qui di seguito verranno riportate le tabelle contenenti gli indici di correlazione di Pearson relativi alle tre analisi effettuate.

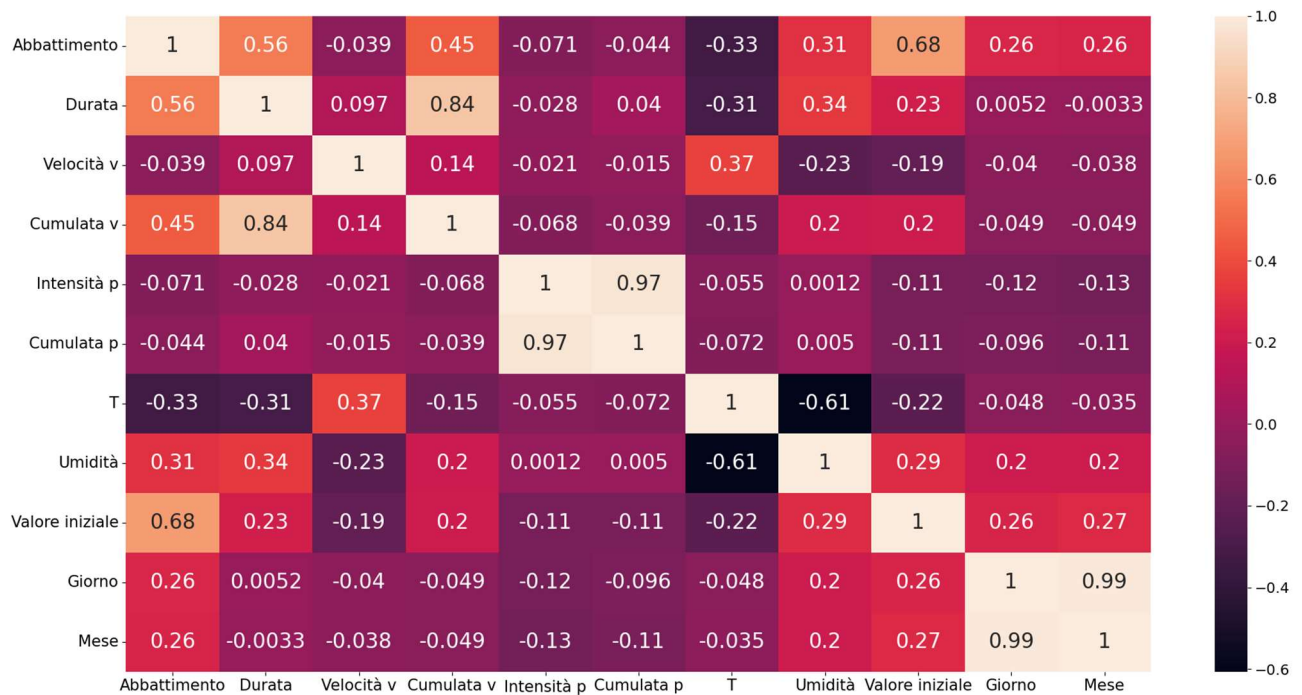
Analisi 1 – PM2.5



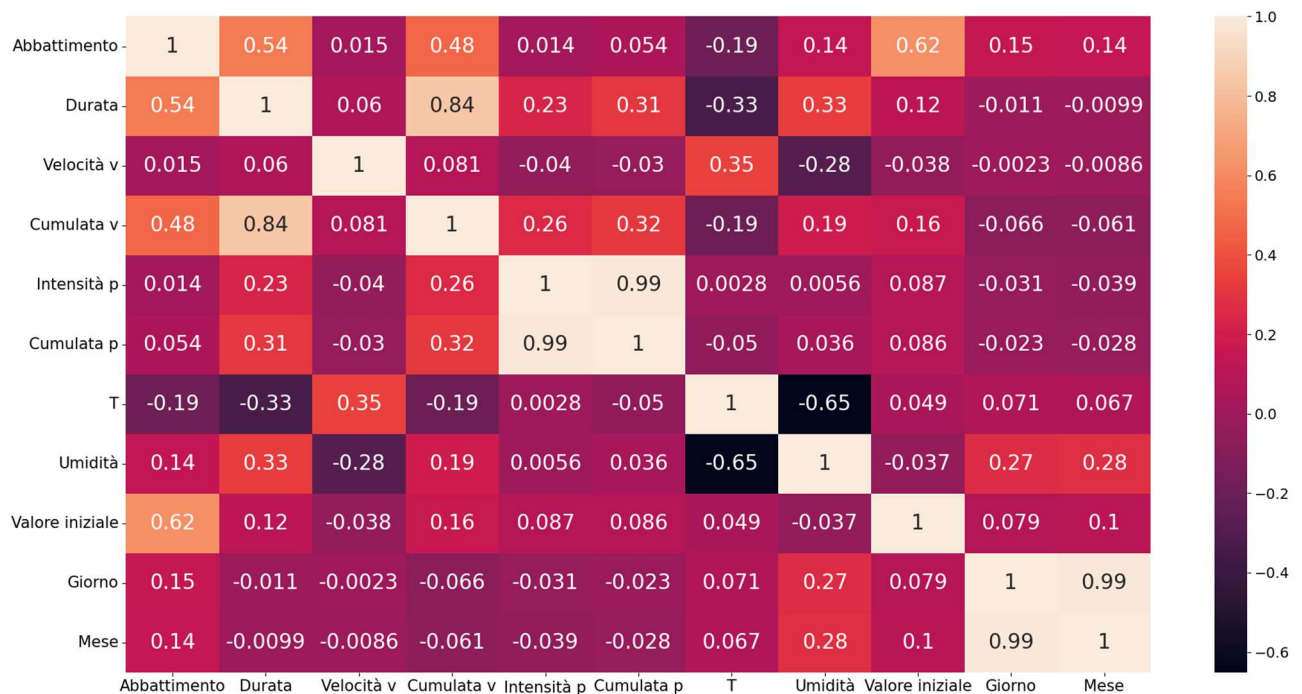
Analisi 1 – PM10



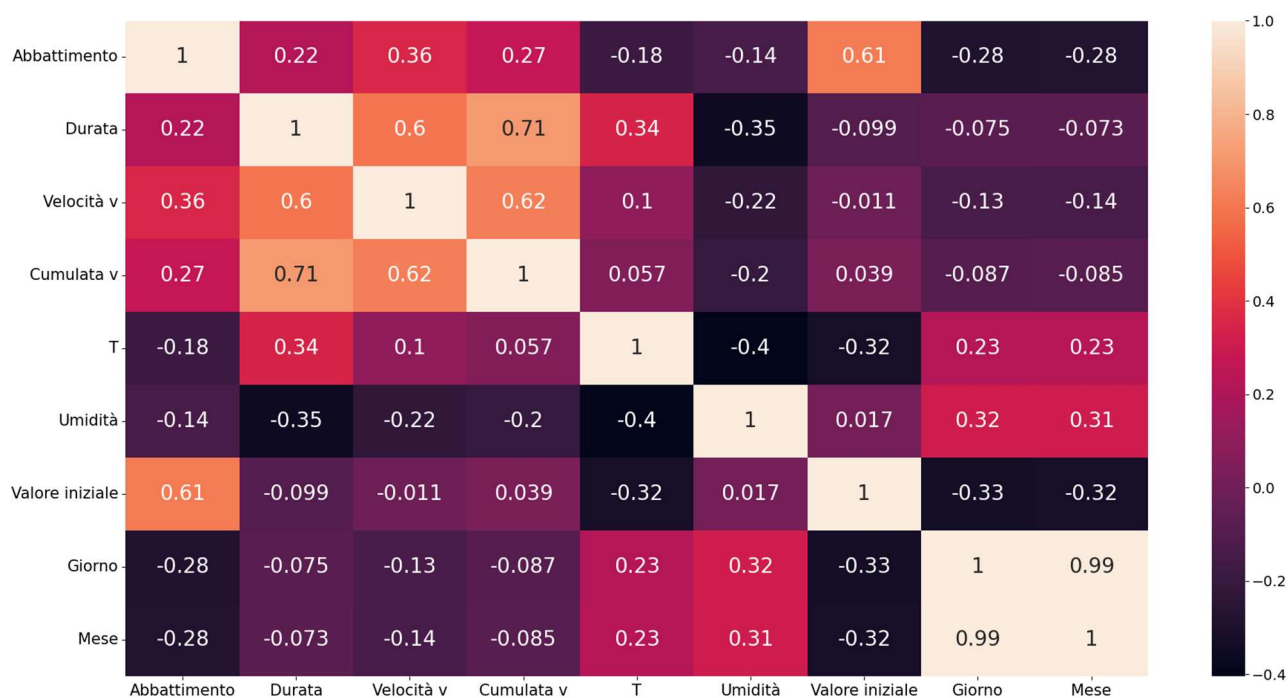
Analisi 2 – PM2.5



Analisi 2 – PM10



Analisi 3 – PM2.5



Analisi 3 – PM10

