



## **LA QUALITÀ DELL'ARIA IN VALLE D'AOSTA NEL 2020**

### **APPROFONDIMENTO SUGLI EFFETTI PRODOTTI DALLE MISURE DI CONFINAMENTO ADOTTATE PER LIMITARE LA DIFFUSIONE DEL VIRUS SARS-CoV-2**

## 1. PREMESSA

La diffusione del virus nei primi mesi del 2020 ha comportato l'adozione progressiva, in Italia e in VdA, di misure di contenimento per ridurre i rischi di contagio, che hanno fortemente inciso sulle abitudini di vita e di lavoro. Molti settori produttivi hanno ridotto o addirittura interrotto l'attività. La modalità dello smart-working è stata estensivamente adottata, sia dal pubblico che dal privato, quale mezzo di distanziamento sociale. L'insieme di tali misure di confinamento ha comportato una drastica e repentina riduzione delle emissioni di inquinanti in atmosfera, e segnatamente quelle rilasciate dai comparti del traffico e dell'industria. La particolare situazione, pur nella sua drammaticità, ha configurato, un "caso studio" che in condizioni normali non si sarebbe mai potuto ottenere e che permette di studiare quali possono essere le conseguenze sulla qualità dell'aria dovute alla riduzione delle emissioni di determinati settori emissivi.

Il presente documento riporta una valutazione degli effetti del confinamento sulle emissioni di inquinanti in atmosfera e sullo stato della qualità dell'aria, riferito al 2020, sulla base dei dati rilevati dalle stazioni di misura della qualità dell'aria in Valle d'Aosta, dei risultati di simulazioni modellistiche con modelli di chimica e trasporto e con modelli machine learning.

### 1.1. Sintesi delle misure di contenimento

Il primo focolaio di SARS-CoV-2 è stato ufficialmente segnalato in alcuni comuni del nord Italia a fine febbraio 2020. A seguito di questo evento, sono stati emanati regolamenti, a livello nazionale e regionale, per contenere i contagi e la pressione sulle strutture ospedaliere. In particolare, dal 9 marzo, una rapida successione di decreti-legge ha portato alla chiusura di scuole, spazi pubblici, uffici, servizi di ristorazione, commercio al dettaglio e attività industriali, definendo così l'inizio del rigoroso periodo di "lockdown". Ovviamente, questo ha avuto un impatto sulle attività non essenziali anche in Valle d'Aosta: ad esempio, l'acciaieria in prossimità di Aosta è rimasta completamente chiusa fino al 14 aprile. In risposta al calo delle infezioni, è stata attivata la cosiddetta "fase 2", che prevede una progressiva revoca delle misure di contenimento, consentendo gli spostamenti all'interno del territorio regionale, avviati all'inizio di maggio. Da giugno è stata nuovamente consentita la circolazione sul territorio nazionale. Nuove restrizioni, come le chiusure e il coprifuoco notturno, si sono rivelate inevitabili da novembre, a causa dell'inizio della seconda "ondata" pandemica, ovvero un secondo e rapido aumento dei casi di COVID-19, ed è durato tutto l'inverno 2020-2021. Per una meta di turismo invernale come la Valle d'Aosta, questo ha significato la completa assenza del flusso di visitatori stagionale e il relativo calo del traffico. Sulla base della suddetta sequenza di eventi, abbiamo identificato sei periodi rappresentativi per le varie fasi di lockdown e il loro conseguente impatto sulla qualità dell'aria:

- P1: 1° gennaio – 8 marzo (situazione normale)
- P2: 9 marzo – 13 aprile (lockdown)
- P3: 14 aprile – 4 maggio (lockdown con riapertura acciaieria in Aosta)
- P4: 5 maggio – 3 giugno (fase 2 – riapertura attività e mobilità locale)
- P5: 4 giugno – 31 ottobre (allentamento delle misure, mobilità tra regioni, apertura delle scuole)
- P6: 1° novembre - 31 dicembre (parziale chiusura delle scuole, ulteriori limitazioni, soprattutto sulla mobilità inter-regionale)

## 1.2. Metodologia

Per valutare gli effetti del confinamento sulle emissioni di inquinanti in atmosfera e sullo stato della qualità dell'aria sono stati analizzati i fattori di pressione per la qualità dell'aria, cioè le emissioni di inquinanti in aria (dovute principalmente a traffico, riscaldamento ed attività produttive) e il contesto meteorologico, che influenza sensibilmente i valori di concentrazione degli inquinanti in aria (capitolo 2).

In seguito sono stati confrontati i dati delle misure di inquinanti nell'anno 2020 con quelli degli anni precedenti (capitolo 3).

Sono state realizzate delle simulazioni di dispersione di inquinanti, con una catena modellistica che utilizza come modello di chimica e trasporto il modello FARM, per determinare l'influenza delle emissioni ridotte per le misure di contenimento sulle concentrazioni, confrontando i risultati con una simulazione condotta in condizioni emissive "normali" (capitolo 4.1).

È stato anche applicato un metodo Machine Learning che consente di "eliminare" l'effetto della meteorologia: il modello viene "addestrato" considerando i dati meteorologici e chimici del passato e poi viene usato per prevedere quali valori di concentrazione si avrebbero con le condizioni meteorologiche reali (capitolo 4.2). Dal confronto tra i valori realmente misurati e quelli previsti si ottengono delle percentuali di riduzione, imputabili a tutto quanto non è meteorologia e cioè principalmente alla variazione delle emissioni.

Infine, per rendere l'analisi ancora più completa, sono stati considerati i fenomeni di trasporto di inquinanti dall'esterno del territorio regionale (capitolo 6.1), cioè le situazioni di avvezione di masse d'aria dalla vicina pianura padana e di trasporto di polveri desertiche, principalmente dal Sahara. Questo perché tali fenomeni possono avere un impatto notevole sui valori di concentrazione di particolato misurati sul territorio regionale.

Gli inquinanti considerati sono i principali macroinquinanti (particolato, ossidi di azoto, ozono) e alcuni microinquinanti (benzo(a)pirene, arsenico, cadmio, cromo, nichel, piombo).

## 2. FATTORI DI PRESSIONE

I fattori di pressione sono quei fattori che determinano lo stato della qualità dell'aria, cioè le emissioni di inquinanti e le condizioni meteorologiche.

### 2.1. Emissioni di inquinanti in atmosfera

ARPA Valle d'Aosta gestisce ed aggiorna l'Inventario Regionale delle emissioni di inquinanti in atmosfera per il territorio valdostano, dettagliato nelle 11 categorie SNAP relative alle tipologie delle sorgenti emissive locali previste dalla metodica europea CORINAIR<sup>1</sup>.

#### Sorgenti di emissione

Per analizzare gli effetti delle misure adottate nel 2020, sono stati reperiti dati dettagliati per le seguenti sorgenti di emissioni:

- riscaldamento domestico
- industria ed attività produttive
- trasporto su strada (internazionale e locale)

#### Riscaldamento domestico

L'utilizzo degli impianti di riscaldamento domestico, una rilevante sorgente di emissioni di particolato soprattutto nelle regioni alpine, non ha rilevato una variazione significativa rispetto agli anni precedenti. A titolo di esempio, di seguito sono presentati due grafici con i dati di produzione di energia termica dell'impianto di teleriscaldamento TELCHA di Aosta negli anni 2019-2020 (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) e di consumo di metano dal 2015 al 2020 per il riscaldamento domestico (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

Si vede chiaramente che per l'anno 2020 i consumi di energia per riscaldamento domestico sono in linea con gli anni precedenti.

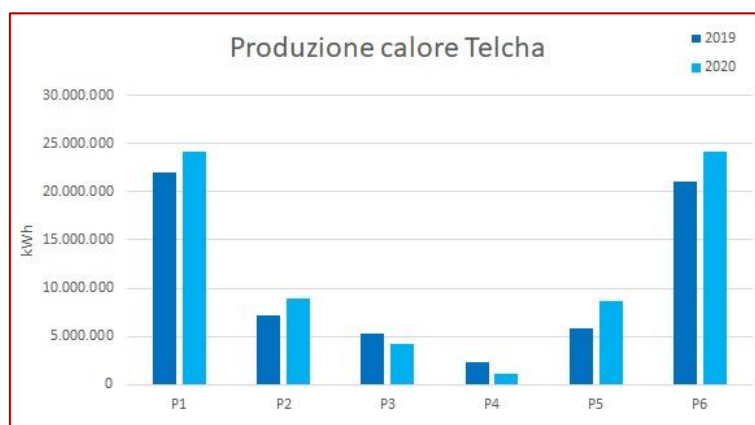


Figura 1: Produzione di energia termica (kW/h) dell'impianto TELCHA di Aosta (confronto 2019 – 2020)

1 <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>

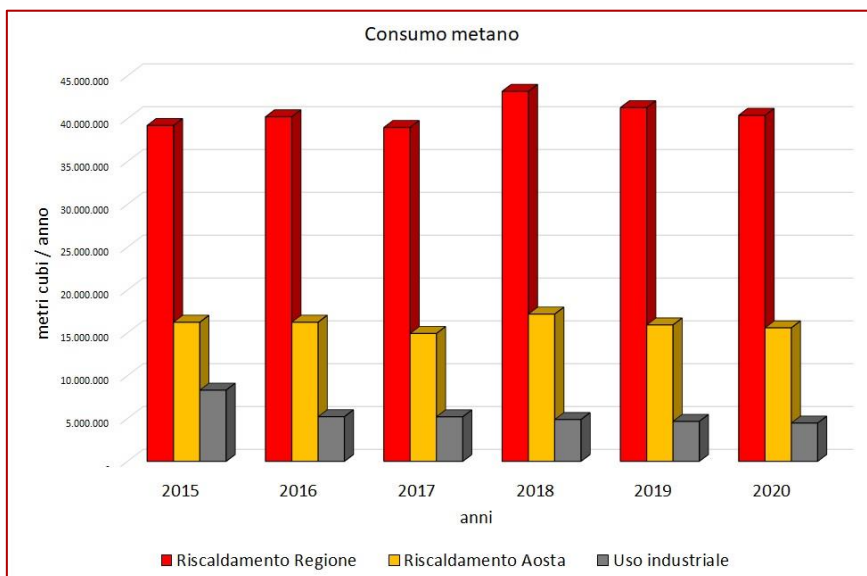


Figura 2: Dati di consumo di metano in Valle d'Aosta dal 2015 al 2020 (fonte ITALGAS)

### Industria ed attività produttive

Per modulare le emissioni del comparto industriale, si sono considerati i dati dei giorni di funzionamento e della portata dei fumi al camino principale dell'acciaieria Cogne Acciai Speciali di Aosta, il maggiore stabilimento industriale presente in Valle d'Aosta.

Confrontando lo stesso dato di giorni di funzionamento e di portata dei fumi per gli anni 2019 ed il 2020, si osserva come le attività sono state bloccate nella prima chiusura di marzo 2020 (P2) per poi riprendere senza importanti interruzioni per il resto dell'anno.

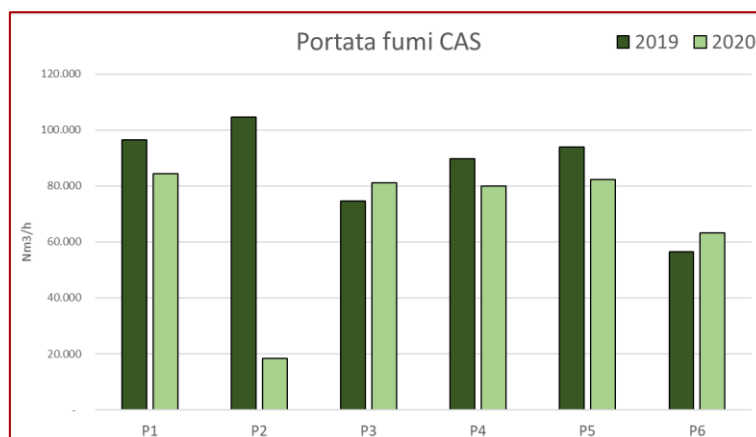


Figura 3: Portata (Nm³/h) dei fumi a camino dello stabilimento siderurgico di Aosta (confronto 2019 – 2020)

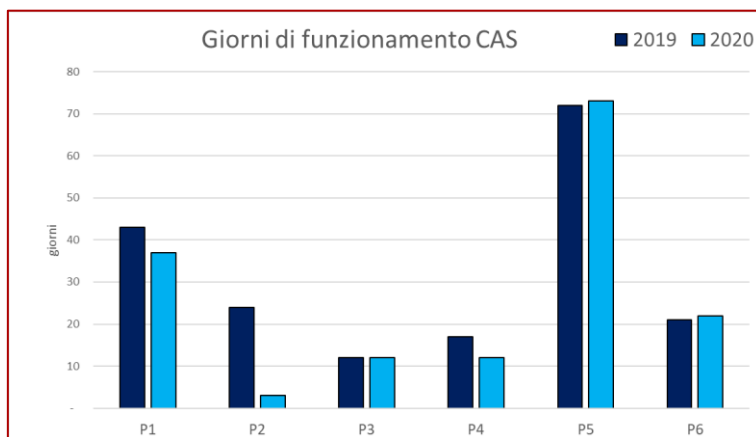


Figura 4: Giorni di funzionamento del reparto altoforno dello stabilimento siderurgico di Aosta (confronto 2019 – 2020)

### Trasporto su strada

Molto differente risulta l'effetto delle misure di contenimento sul traffico stradale.

### Traffico internazionale

Dai dati forniti dai gestori dei trafori del Monte Bianco e del Gran San Bernardo, dal sistema di video-conteggio Infomobilità (<http://infomobilita.regione.vda.it/sito/index.php>) emergono forti riduzioni dei flussi di traffico da marzo a giugno e da novembre a fine anno. L'unica ripresa si è registrata nella pausa estiva tra giugno e settembre (P5).

Per il traffico internazionale si rileva per i veicoli leggeri una forte riduzione dei flussi in corrispondenza del primo lockdown (periodo P2-P4, da marzo a giugno) e a fine anno (periodo P6, da novembre a dicembre); per i veicoli pesanti le riduzioni si hanno negli stessi periodi, ma sono più contenute.

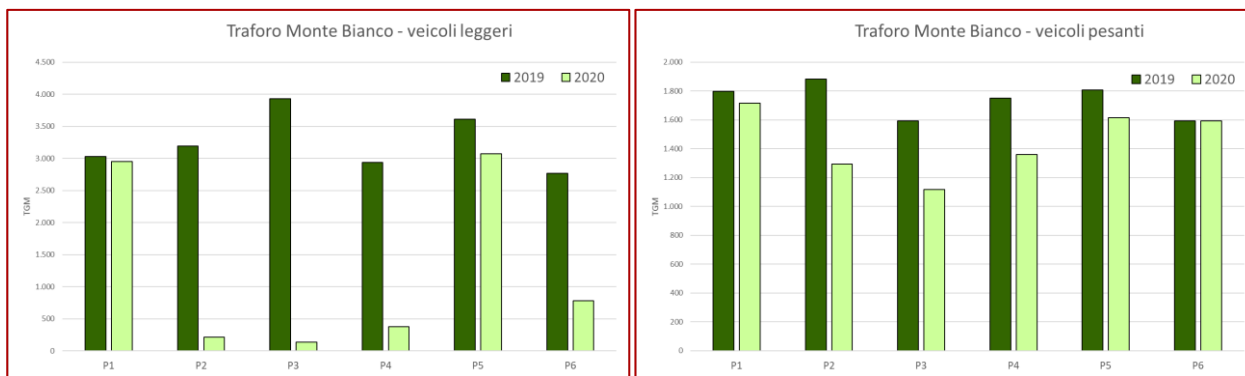


Figura 5: Traffico giornaliero medio di veicoli leggeri e pesanti al Traforo del Monte Bianco (confronto 2019 – 2020)

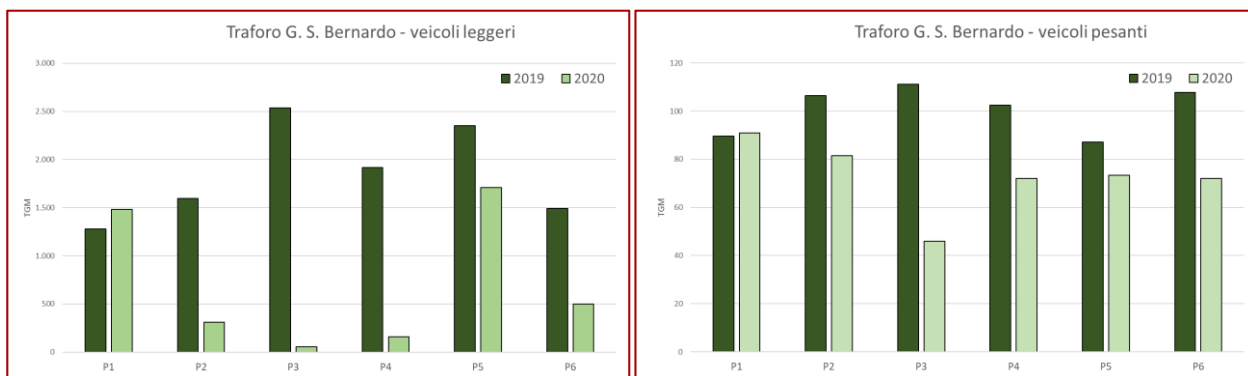


Figura 6: Traffico giornaliero medio di veicoli leggeri e pesanti al Traforo del Gran San Bernardo (confronto 2019 – 2020)

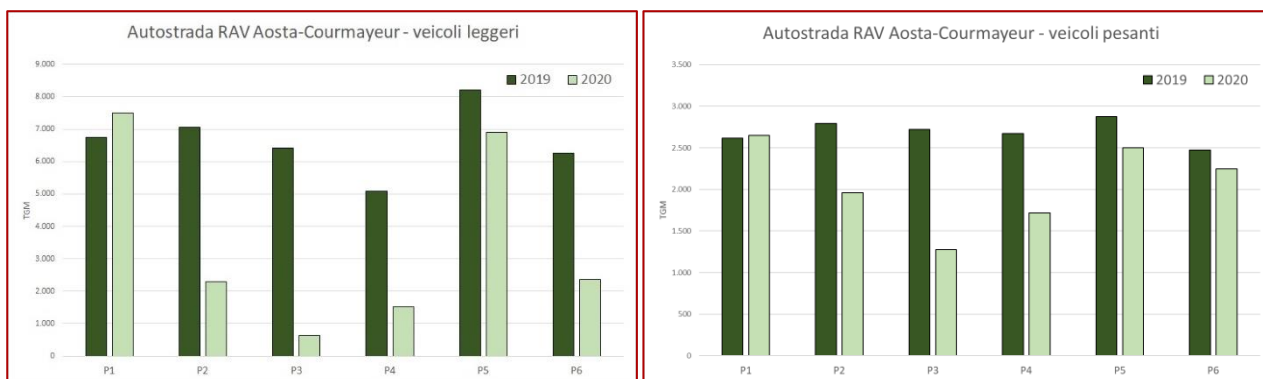


Figura 7: Traffico giornaliero medio di veicoli leggeri e pesanti nel tratto autostradale Aosta - Courmayeur (confronto 2019 – 2020)

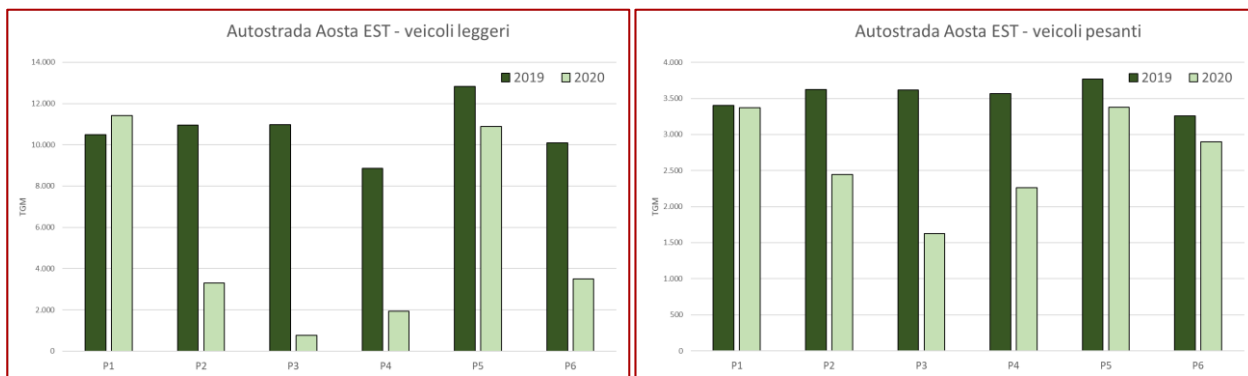


Figura 8: Traffico giornaliero medio di veicoli leggeri e pesanti nel tratto autostradale Nus – Aosta EST (confronto 2019 – 2020)

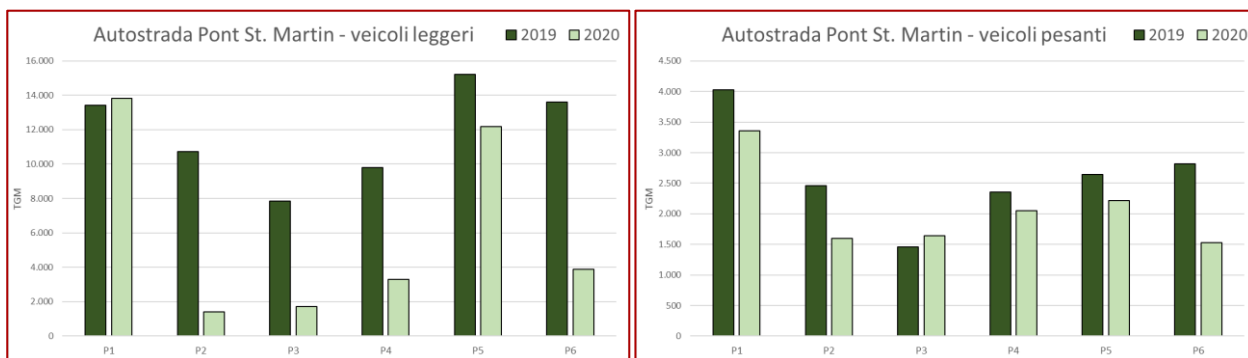


Figura 9: Traffico giornaliero medio di veicoli leggeri e pesanti nel tratto autostradale di Pont-St-Martin (confronto 2019 – 2020)

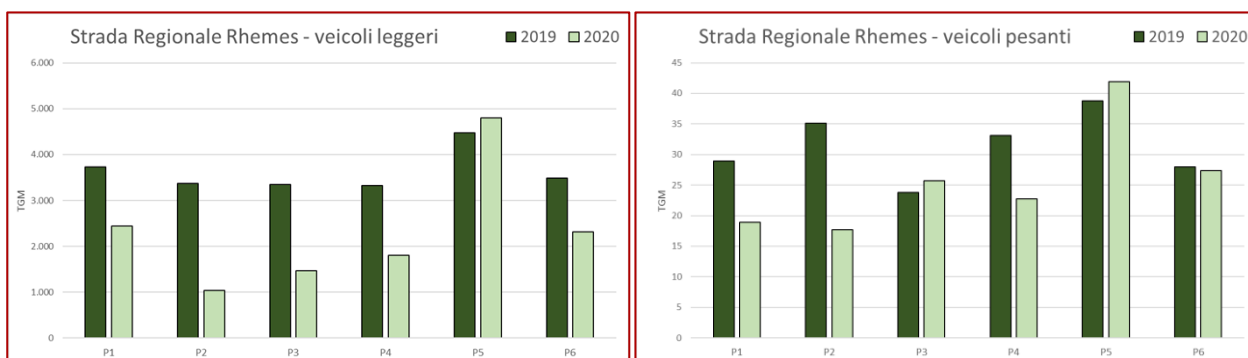
### Traffico locale

Per valutare gli effetti delle misure restrittive sul traffico stradale locale si sono utilizzati i dati di “Infomobilità” per la strada statale 26 del fondovalle principale e per le strade regionali delle valli laterali monitorate (Valle di Gressoney, Valle di Ayas, Valtournenche, Valle di Cogne, Valle di Rhêmes) e quelli delle campagne con contatraffico a palo realizzate in Aosta da ARPA VdA.

Per la SS26 la riduzione dei flussi di traffico è evidente da marzo fino a fine anno (P2-P6), mentre per le strade regionali delle vallate a forte richiamo turistico si è registrata una ripresa dei flussi da maggio a ottobre (P4-P5). Gli andamenti dei flussi di veicoli pesanti risultano meno correlati ai periodi delle chiusure per la pandemia in quanto sono flussi molto bassi di poche decine di veicoli/giorno.



Figura 10: Traffico giornaliero medio di veicoli leggeri e pesanti nel tratto della SS26 a Pont-St-Martin (confronto 2019 – 2020)





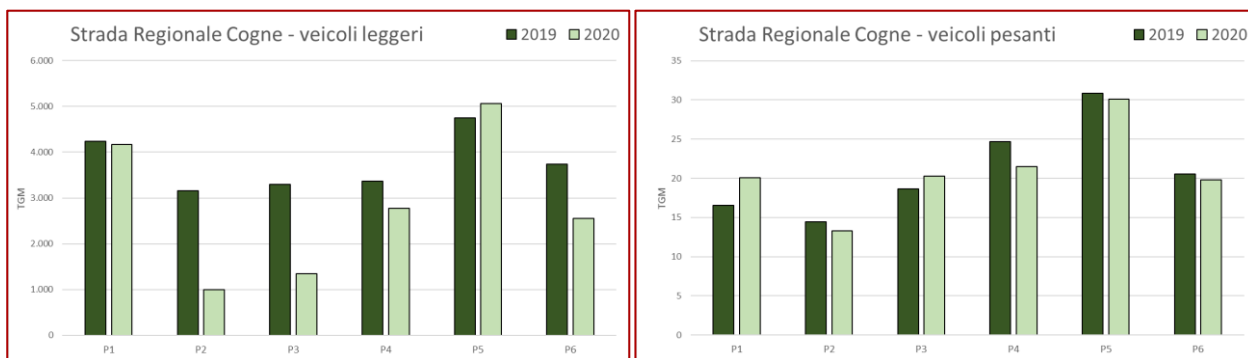


Figura 11: Traffico giornaliero medio di veicoli leggeri e pesanti all'imbocco della SR per la Valle di Cogne (confronto 2019 – 2020)

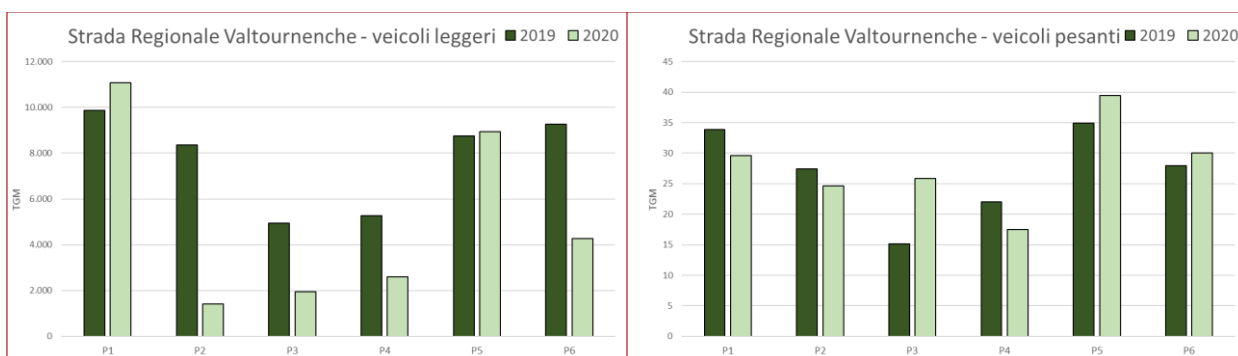


Figura 12: Traffico giornaliero medio di veicoli leggeri e pesanti all'imbocco della SR per la Valtournenche (confronto 2019 – 2020)

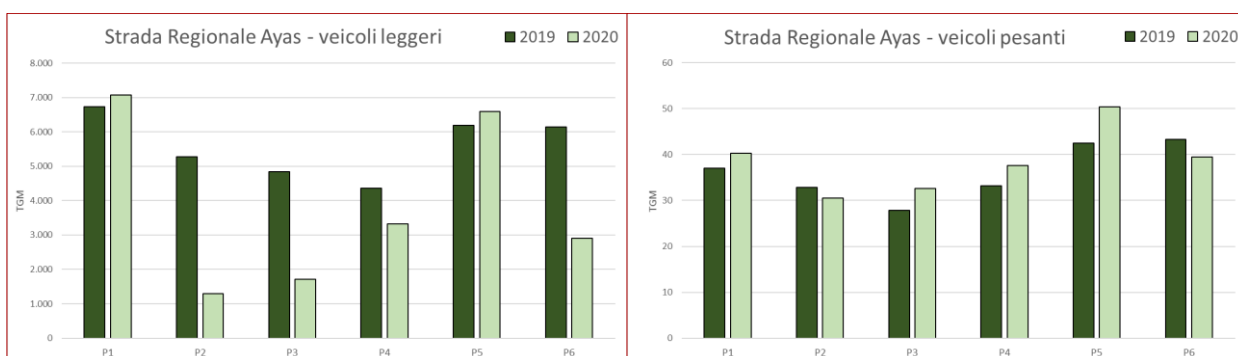


Figura 13: Traffico giornaliero medio di veicoli leggeri e pesanti all'imbocco della SR per la Valle d'Ayas (confronto 2019 – 2020)

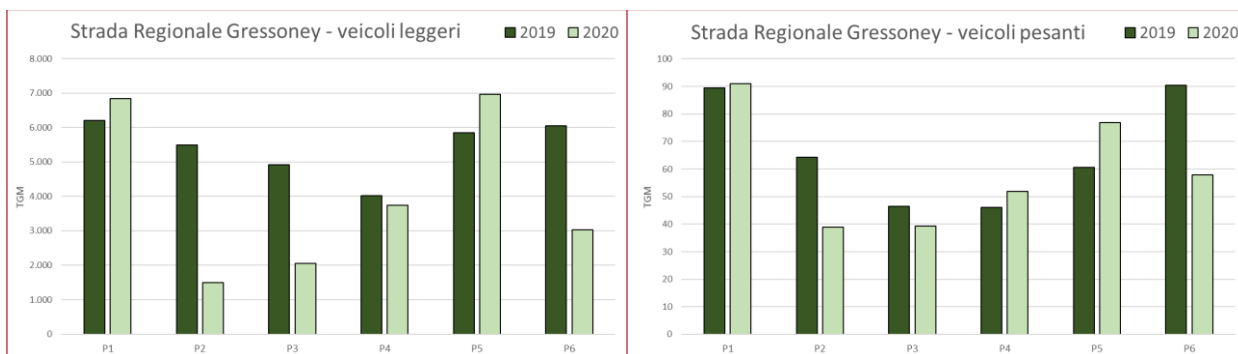


Figura 14: Traffico giornaliero medio di veicoli leggeri e pesanti all'imbocco della Valle di Gressoney (confronto 2019 – 2020)

Sezione Aria e Atmosfera

## Traffico urbano (Aosta)

I dati delle campagne con contatraffico del 2017 e del 2020 indicano forti riduzioni nei periodi P2, P3, P4 e P6.



Figura 15: Traffico giornaliero medio veicolare in Aosta (confronto campagne con contatraffico 2017 e 2020)

Con l'utilizzo del modello di calcolo dei flussi di traffico CARUSO (basato sul metodo origine-destinazione), è possibile ricostruire i flussi di traffico per la rete stradale di Aosta. Nelle mappe seguenti si nota la forte riduzione dei flussi di traffico nel primo lockdown del periodo P2 rispetto alla situazione registrata con la campagna di conta-traffico del 2017.

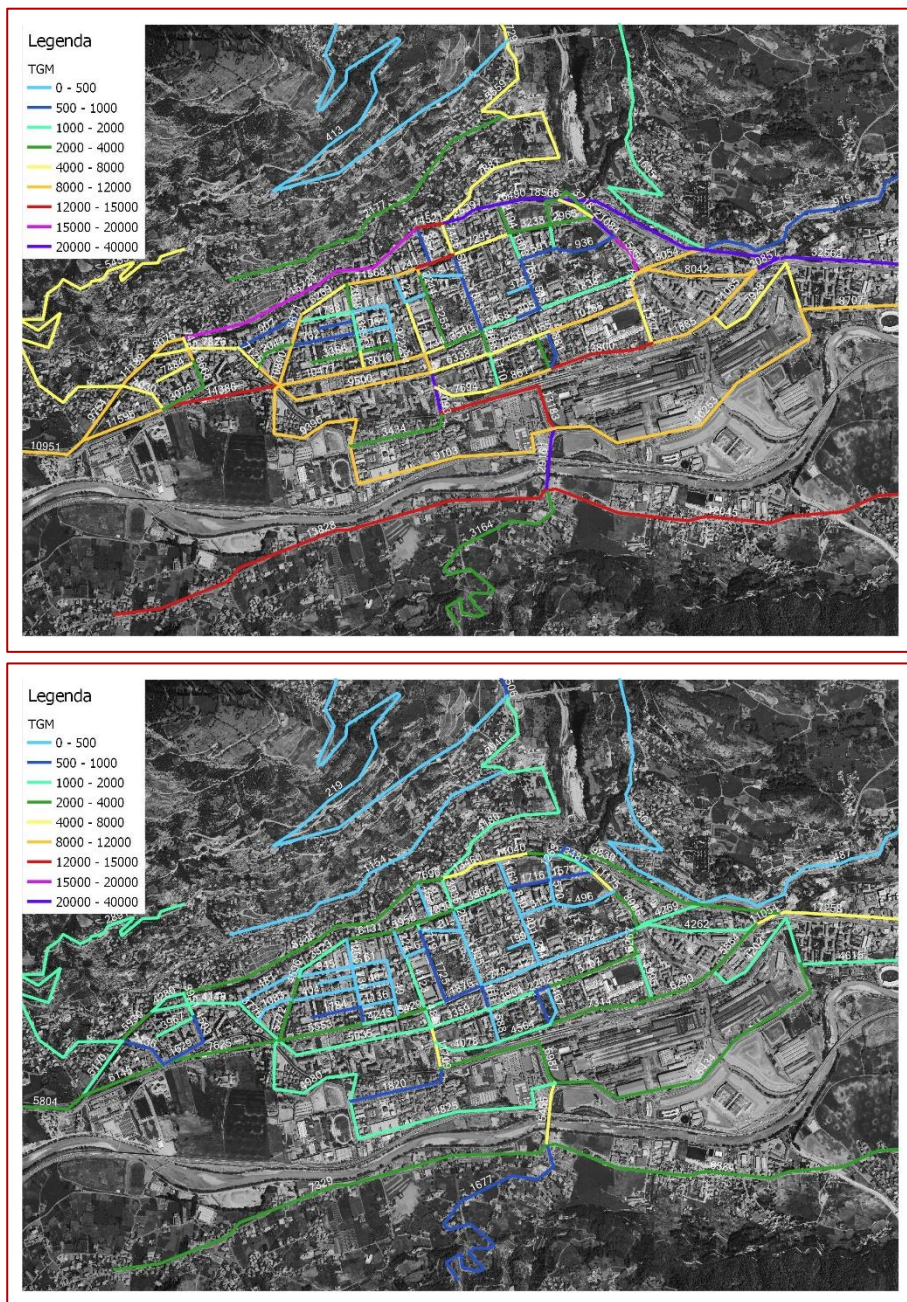


Figura 16: Ricostruzione dei flussi di traffico veicolare in Aosta con modello di calcolo (confronto dati 2017- mappa in alto, e P2, 9 marzo – 13 aprile del 2020, mappa in basso)

## La variazione delle emissioni nel 2020

Dal confronto dell'inventario dell'ultimo anno, il 2019 (che consideriamo rappresentativo della situazione media degli ultimi 5 anni), con quello che contiene le emissioni "ridotte" per il 2020 si può stimare l'effetto delle restrizioni alla mobilità e alle attività produttive nel 2020.

### Ossidi di azoto

Le stime delle emissioni regionali di tale inquinante, prodotto principalmente dai trasporti stradali, seguono l'andamento dei flussi veicolari. Forti riduzioni si hanno quindi da marzo a giugno (30-40%) e nei due ultimi mesi dell'anno (20%).

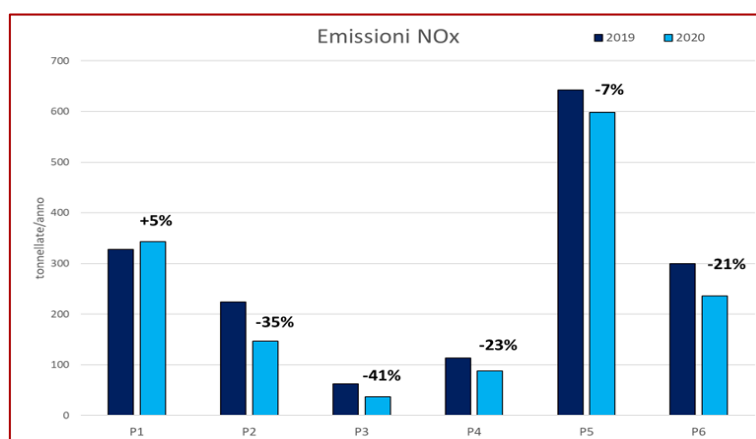


Figura 17: Variazione delle emissioni regionali di NOx (confronto 2019 – 2020)

### Particolato

Essendo le emissioni di polveri legate maggiormente al riscaldamento residenziale con impianti a biomassa legnosa, si è visto che la temperatura risulta avere una maggiore influenza rispetto alle misure di contenimento e la variazione di tali emissioni è molto meno pronunciata rispetto agli ossidi d'azoto. Le riduzioni sono superiori al 10% solo per i due periodi del primo lockdown (P2-P3).

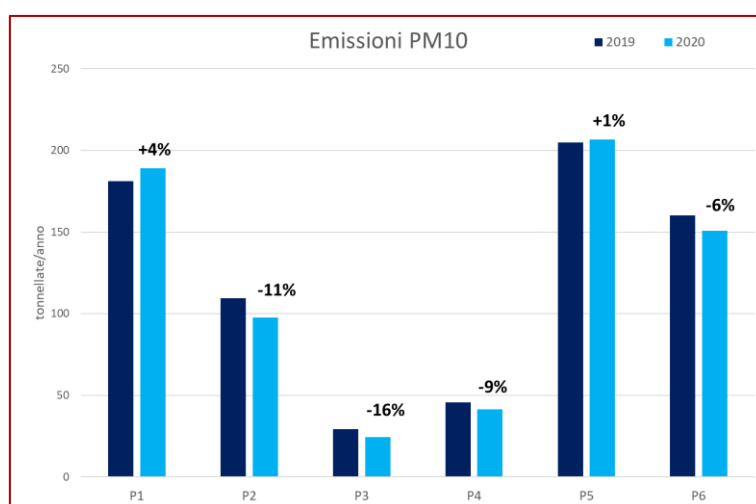


Figura 18: Variazione delle emissioni regionali di PM10 (confronto 2019 – 2020)

## Benzene

Le emissioni di benzene, inquinante principalmente legato al traffico stradale, presentano riduzioni superiori al 40% da marzo fino a maggio (P2-P3) e superiori al 30% a fine anno (P6).

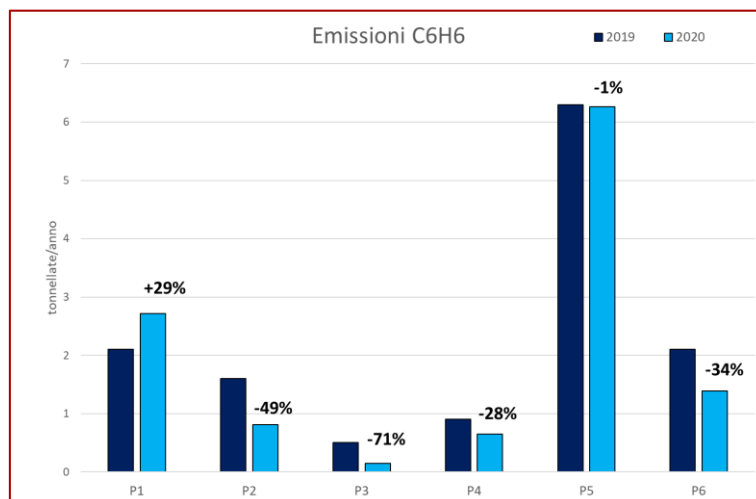


Figura 19: Variazione delle emissioni regionali di benzene (confronto 2019 – 2020)

## Idrocarburi policiclici aromatici (IPA totali)

Per questa famiglia di composti, nocivi in quanto comprendenti anche accertati cancerogeni per l'uomo come il benzo(a)pirene, non si rilevano variazioni significative nelle emissioni in atmosfera in quanto essi sono principalmente correlati al riscaldamento domestico.

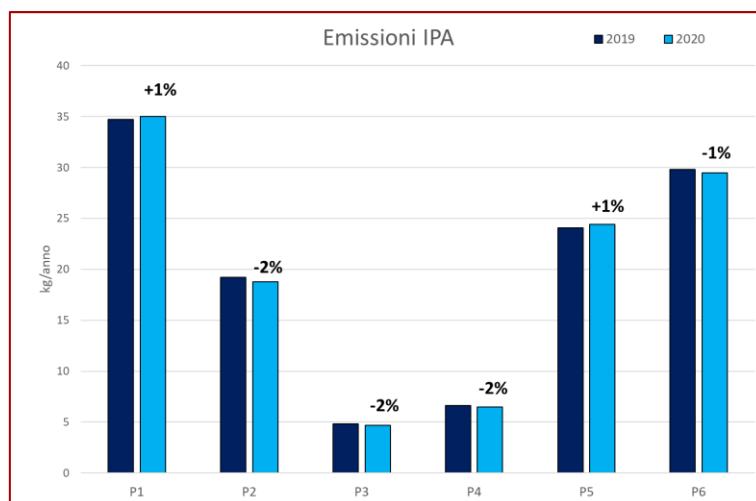


Figura 20: Variazione delle emissioni regionali degli IPA (confronto 2019 – 2020)

## Metalli pesanti

Per i principali metalli adesi al particolato:

- l'arsenico, il cadmio ed il piombo non registrano riduzioni/variazioni importanti, in quanto legati soprattutto al riscaldamento domestico
- il nichel è l'unico metallo ad avere una riduzione delle emissioni nel primo lockdown (P2-P3) essendo principalmente emesso dall'industria siderurgica.

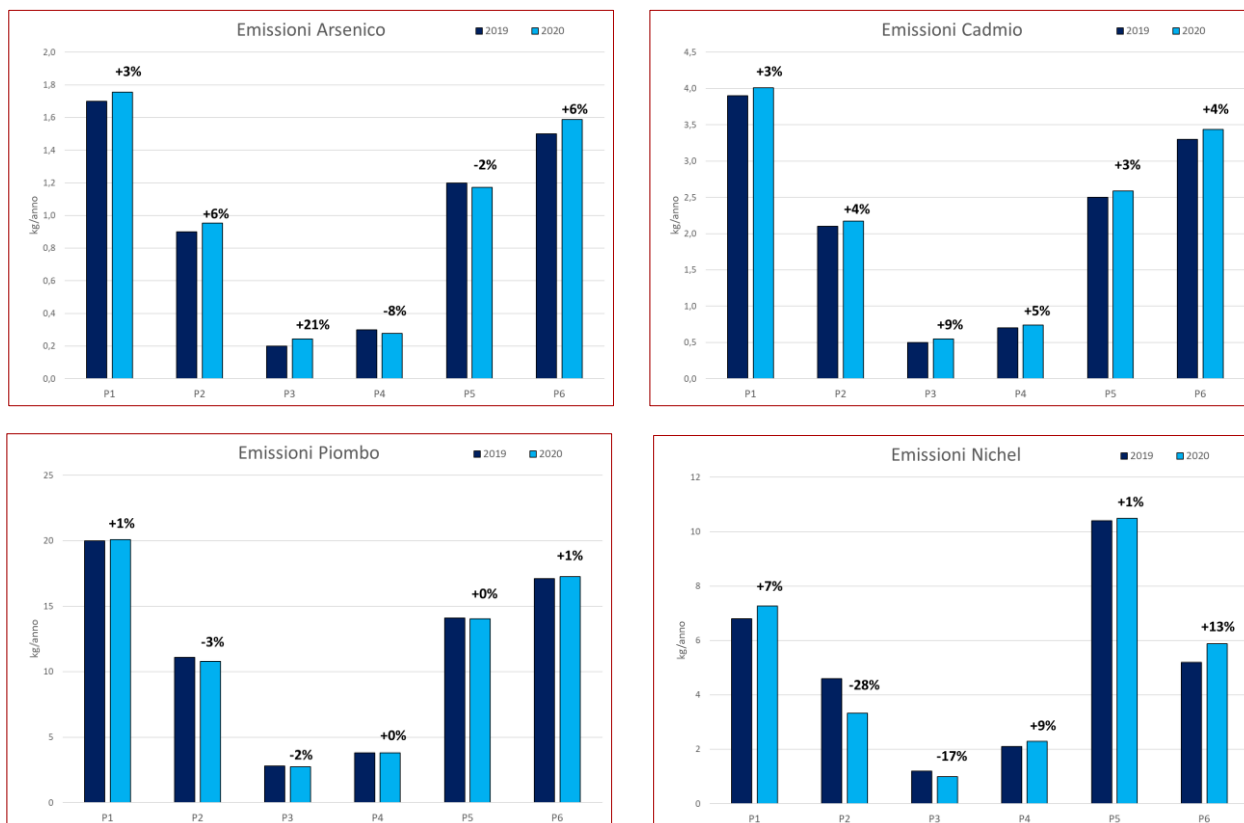


Figura 21: Variazione delle emissioni regionali dei metalli (confronto 2019 – 2020)

## 2.2. Il contesto meteorologico

La meteorologia influisce in modo determinante sulle concentrazioni di inquinanti in aria, per cui una analisi dettagliata non può prescindere dal considerare questo aspetto.

Nelle figure seguenti sono rappresentati gli andamenti delle grandezze meteorologiche significative per la qualità dell'aria, confrontando il 2020 con il quinquennio precedente, suddividendo i dati nei 6 periodi definiti in precedenza. I valori di temperatura (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) rientrano generalmente nei valori tipici dei periodi considerati, ad eccezione dell'ultimo periodo (novembre e dicembre) in cui sono leggermente più bassi. Per le precipitazioni (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), in particolare nella città di Aosta, i totali misurati sono decisamente bassi nei periodi P1 e P2 (da gennaio a metà aprile) e nel P6 (novembre e dicembre).

Valori bassi di temperatura, nel periodo invernale, portano sia ad un aumento delle emissioni da riscaldamento sia ad una diminuzione della capacità dispersiva dell'atmosfera, con conseguente aumento delle concentrazioni di inquinanti in aria. Poiché la precipitazione ha in generale un effetto "ripulente" sull'atmosfera, una diminuzione degli eventi di precipitazione può portare ad un accumulo degli inquinanti.

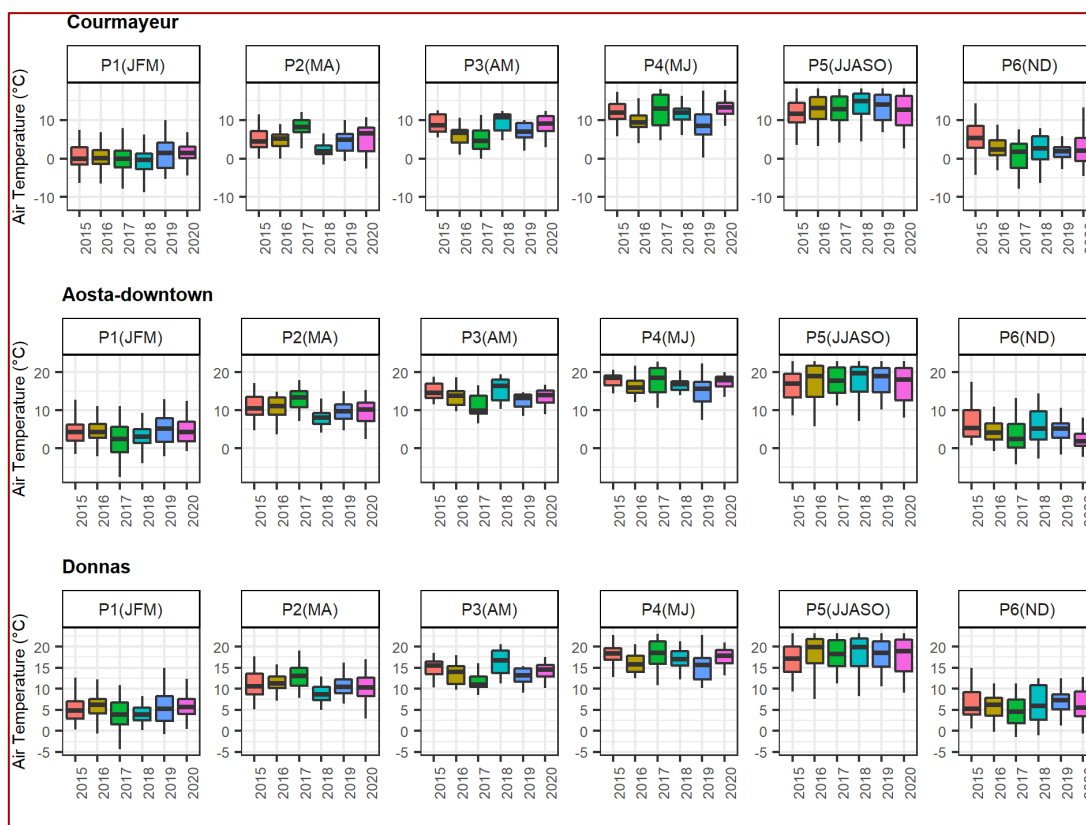


Figura 22: Temperatura - confronto tra i valori del 2020 e quelli del quinquennio precedente

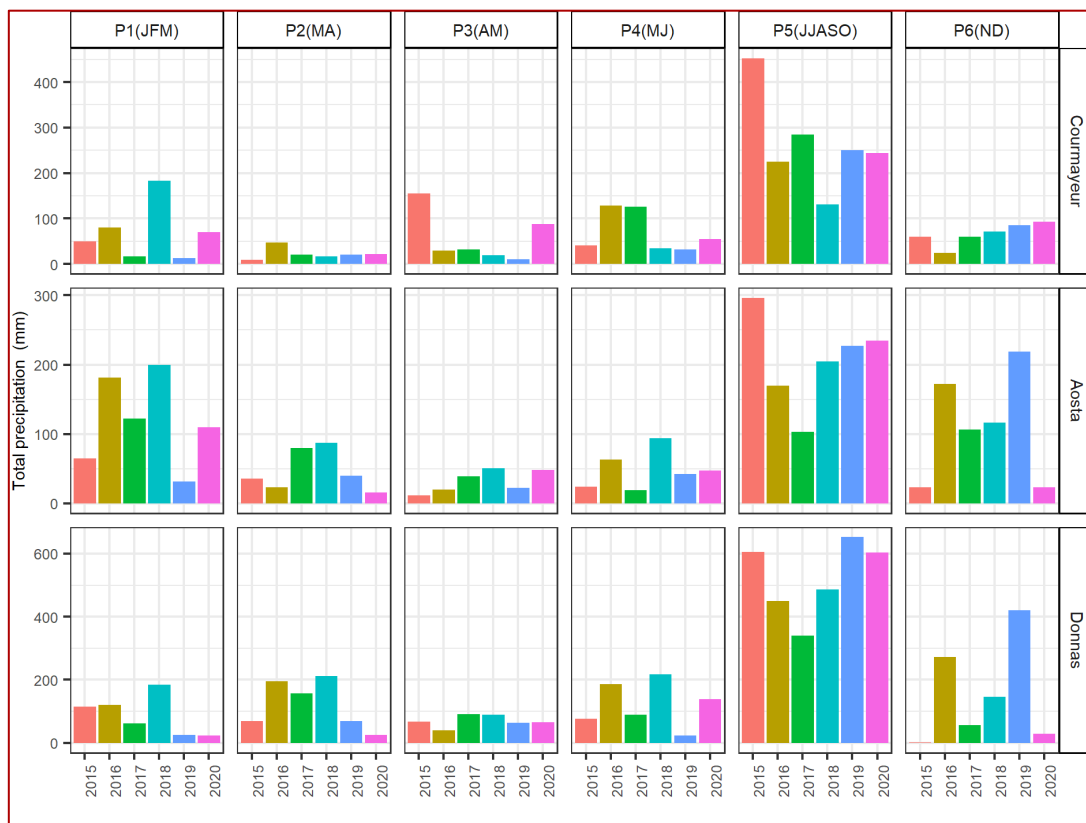


Figura 23: Precipitazioni - confronto tra i valori del 2020 e quelli del quinquennio precedente

## Tipi di tempo

Per valutare se le condizioni meteorologiche di un certo periodo sono state favorevoli o sfavorevoli alla dispersione degli inquinanti, si può utilizzare la classificazione dei giorni dell'anno in funzione dei tipi di tempo. In sintesi, a partire dalle variabili meteorologiche misurate in una stazione rappresentativa, con opportuni criteri definiti sulla base dei dati storici, si può determinare se in certo giorno si è presentata una particolare situazione meteorologica. I tipi di tempo definiti per una regione alpina come la Valle d'Aosta sono:

- condizioni di stabilità atmosferica ed inversione termica, tipici del periodo invernale, in cui i fenomeni di rimescolamento dell'atmosfera sono molto limitati con conseguente aumento delle concentrazioni di inquinanti (*Wind calm* in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**);
- venti provenienti da ovest, ivi comprese le condizioni di foehn, presenti in tutti i periodi dell'anno: questi venti hanno generalmente un effetto ripulente dell'atmosfera (*Westerly wind* in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**);
- venti provenienti da est, generalmente associati alla circolazione di brezza e più frequenti in primavera/estate: a queste condizioni si associano spesso fenomeni di avvezione di masse d'aria inquinate dalla pianura padana (*Easterly wind* in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**);
- presenza di precipitazioni, con effetto ripulente (*Precipitation* in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

Nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** i tipi di tempo nei vari periodi dell'anno 2020 sono confrontati con quelli dei periodi corrispondenti dei 5 anni precedenti:

Sezione Aria e Atmosfera



- nel periodo P1 vi sono pochi giorni con venti da est, mentre i venti da ovest sono nella media del periodo, come anche i giorni caratterizzati da calma di vento e precipitazioni;
- nei periodi P2, P3 e P4 del 2020 vi sono venti da est superiori alla media;
- nel P5 i venti occidentali sono superiori alla media, mentre quelli orientali sono inferiori;
- nel P6 i giorni di calma divento sono decisamente superiori alla media, mentre sono pochissimi i giorni con precipitazioni.

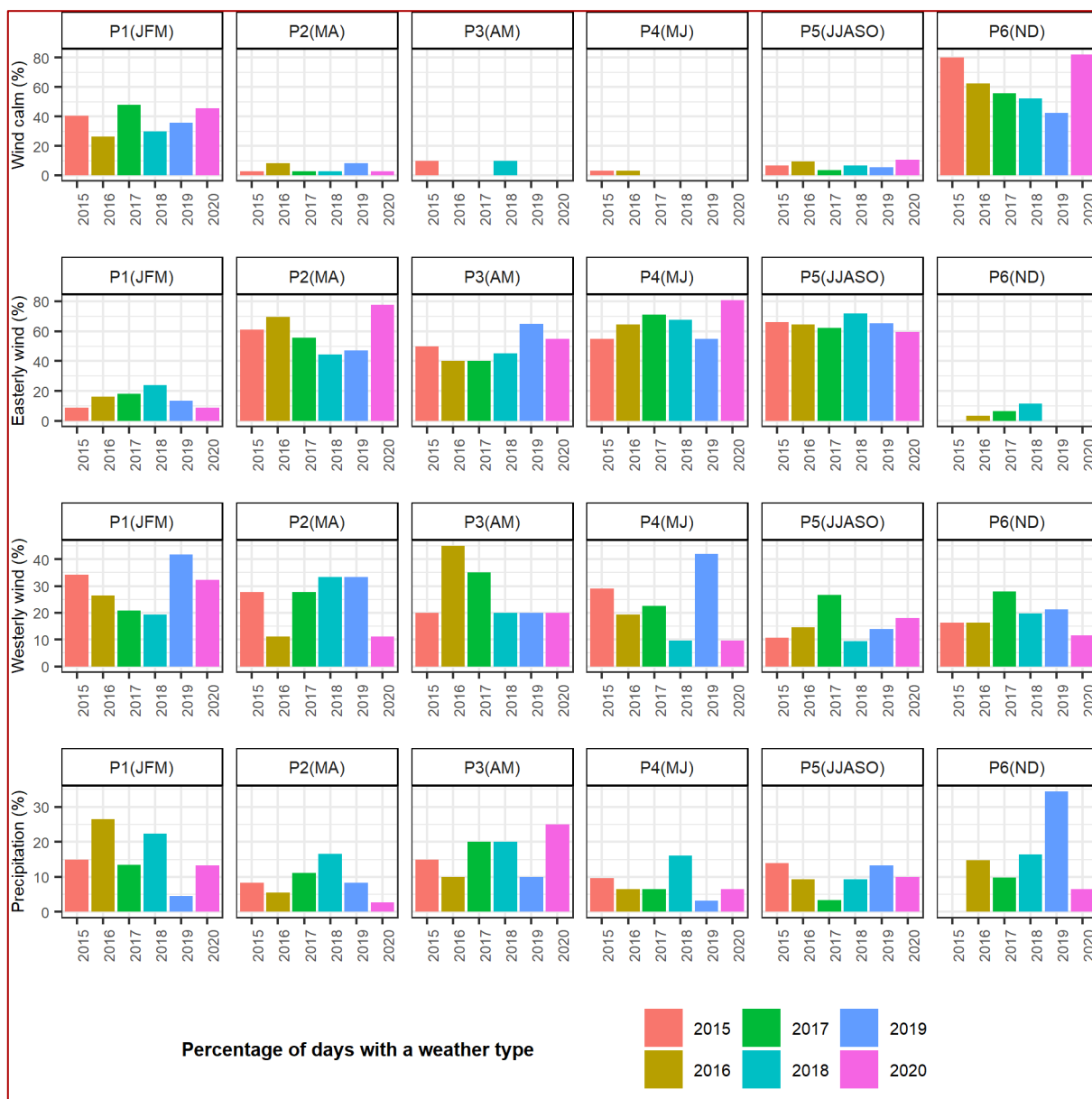


Figura 24: Classificazione dei giorni dell'anno per tipi di tempo, confronto tra il 2020 ed il quinquennio precedente

### 3. LE MISURE DI QUALITA' DELL'ARIA

#### 3.1. Metodologia

Per valutare l'impatto che le misure restrittive alle attività e agli spostamenti hanno avuto sulla qualità dell'aria, sono state confrontate le misure dell'anno 2020 con quelle degli anni precedenti, suddividendo l'anno solare nei sei periodi definiti al paragrafo 1.1.

Per questo studio sono state considerate le stazioni della rete regionale di monitoraggio della qualità dell'aria della Valle d'Aosta, riportate in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

Stazione	tipo sito	Ossidi di azoto	Ozono	PM10	PM4	PM2.5	PM1	Benzo (a) Pirene	Metalli pesanti
AOSTA Piazza Plouves	Fondo Urbano	X	X	X	X	X	X	X	X
AOSTA Via Liconi	Fondo Urbano	X	X	X		X		X	X
AOSTA Via I° Maggio	Industriale	X		X	X	X	X	X	X
Donnas Loc. Montey	Fondo Rurale	X	X	X					
Courmayeur Entrèves	Traffico Rurale	X		X	X	X	X		
Etroubles Capoluogo	Traffico Rurale	X		X	X	X	X		

Tabella 1: stazioni della rete di monitoraggio considerate

Si è effettuato il confronto delle distribuzioni delle concentrazioni degli inquinanti considerati (ossidi di azoto, ozono, particolato, benzo(a)pirene, arsenico, cadmio, cromo, nichel, piombo) per l'anno 2020 con quelle dei 5 anni precedenti. La distribuzione, descritta tramite semplici indici di dispersione e di posizione, viene rappresentata graficamente con un diagramma a scatola e baffi (o box and whiskers plot o box-plot, **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

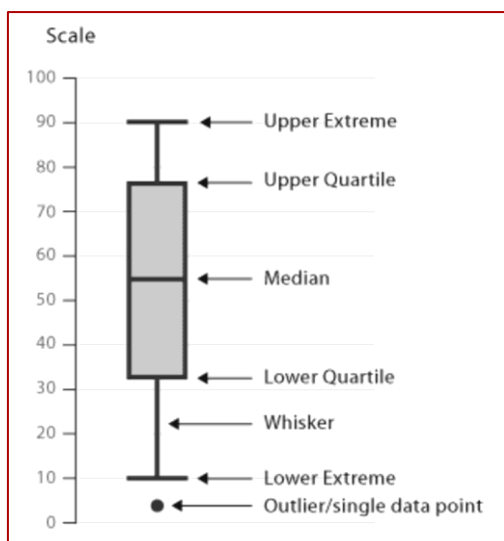


Figura 25: Descrizione del diagramma a baffi. Viene rappresentato (orientato orizzontalmente o verticalmente) tramite un rettangolo diviso in due parti, da cui escono due segmenti. Il rettangolo, detto scatola o box, è delimitato dal primo e dal terzo quartile, in basso e in alto rispettivamente, e diviso al suo interno dalla mediana. I segmenti, detti baffi o whiskers, sono delimitati dagli estremi inferiore e superiore. I valori "oltre i baffi" sono gli outliers, cioè valori anomali per la distribuzione. La scatola contiene il 50% dei dati: quanto più è alta, tanto maggiore è la variabilità dei valori misurati.

### 3.2. Risultati

Nei grafici seguenti i dati sono stati raggruppati nei sei periodi scelti e le distribuzioni delle concentrazioni sono state colorate in base alla caratteristica della stazione di monitoraggio:

- in azzurro le stazioni di fondo urbano di Aosta, Piazza Plouves e Via Liconi
- in rosso la stazione industriale di Aosta Via I Maggio, che si trova anche in prossimità di una strada ad elevato flusso di traffico
- in verde la stazione rurale di Donnas, situata all'imbocco della Valle d'Aosta dove si risente dell'afflusso di masse d'aria dalla pianura padana
- in grigio la stazione di traffico di Courmayeur, in prossimità dell'imbocco del tunnel del Monte Bianco

#### Periodo 1 (1° gennaio – 8 marzo)

Nel periodo pre-pandemia non si osservano sostanziali variazioni rispetto agli anni precedenti, eccetto che per gli ossidi di azoto a Courmayeur per i quali si osserva una netta diminuzione negli ultimi 2 anni e, in misura minore, a Donnas.

#### Ossidi di azoto

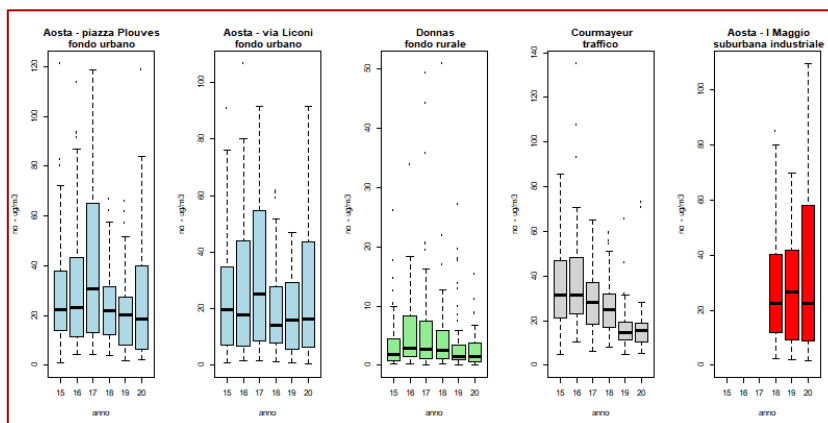


Figura 26: Concentrazioni di monossido di azoto: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° gennaio – 8 marzo)

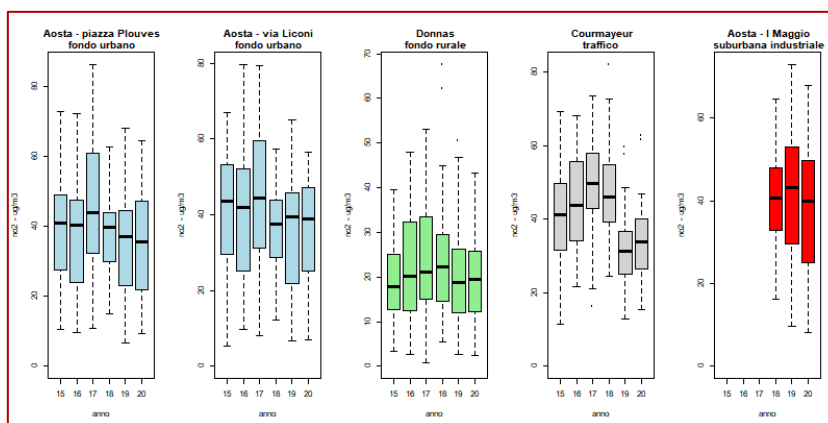


Figura 27: Concentrazioni di biossido di azoto: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° gennaio – 8 marzo)

## Ozono

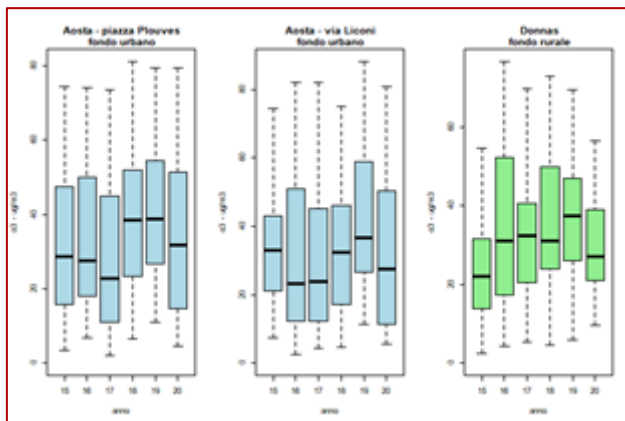


Figura 28: Concentrazioni di ozono: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° gennaio – 8 marzo)

## Particolato

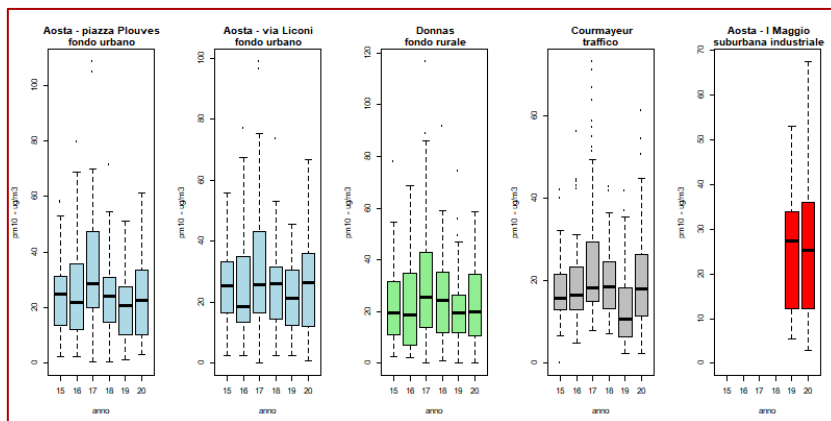


Figura 29: Concentrazioni di PM10: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° gennaio – 8 marzo)

## Microinquinanti

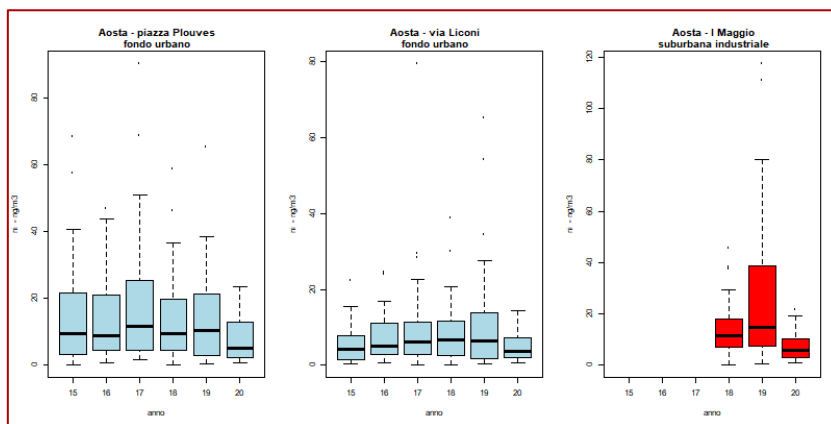


Figura 30: Concentrazioni di nichel: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° gennaio – 8 marzo)

Sezione Aria e Atmosfera

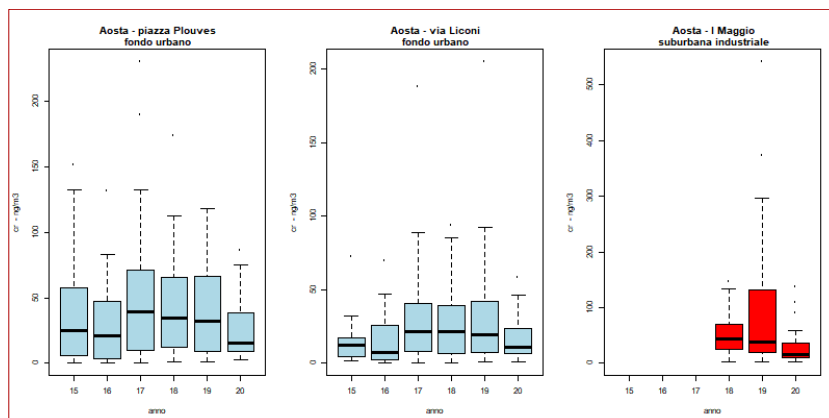


Figura 31: Concentrazioni di cromo: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° gennaio – 8 marzo)

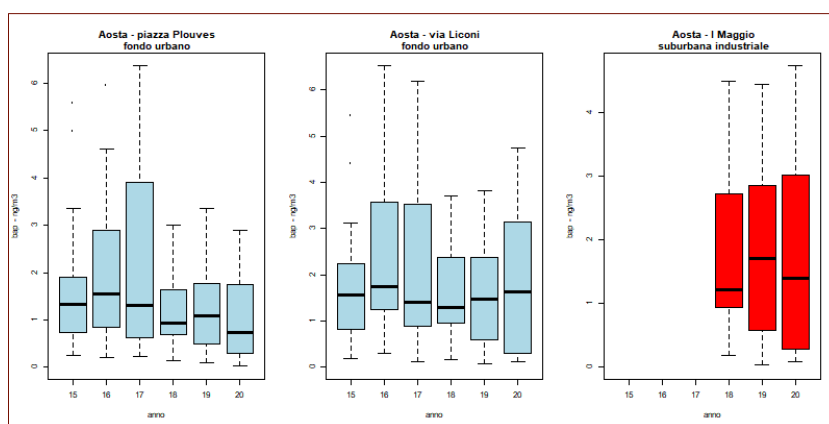


Figura 32: Concentrazioni di benzo(a)pirene: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° gennaio – 8 marzo)

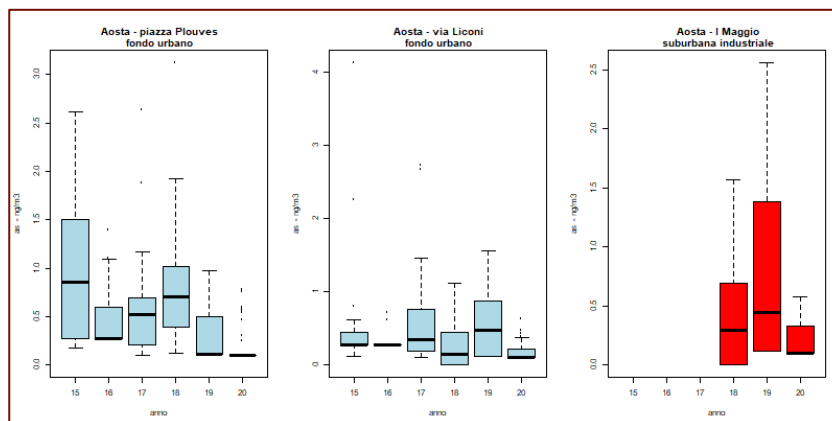


Figura 33: Concentrazioni di arsenico confronto valori dal 2015 al 2020 (1° gennaio – 8 marzo)

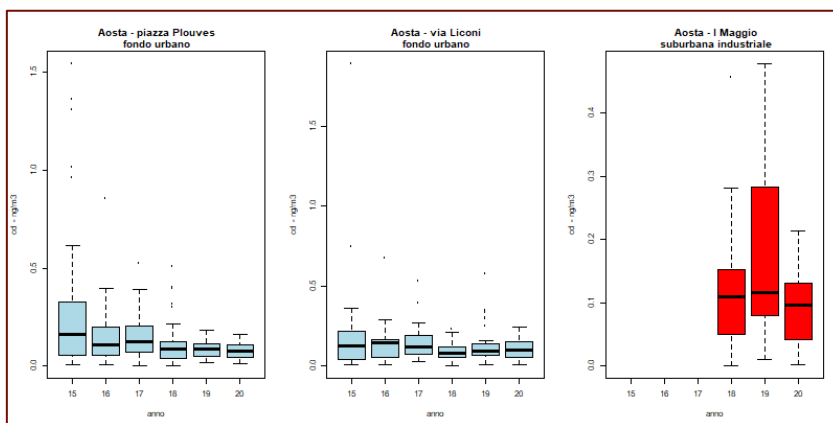


Figura 34: Concentrazioni di cadmio: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° gennaio – 8 marzo)

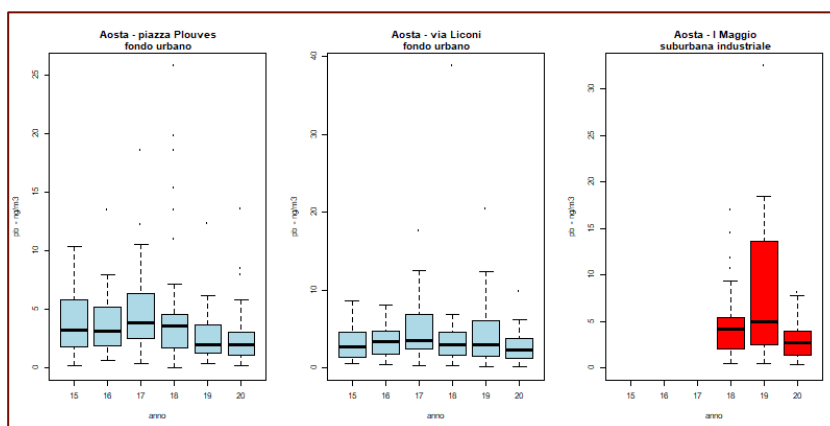


Figura 35: Concentrazioni di piombo: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° gennaio – 8 marzo)

## Periodo 2 (9 marzo – 13 aprile)

### Ossidi di azoto

In tutte le stazioni vi è un'evidente diminuzione (compresa tra il 40 e il 50%) dei livelli di biossido di azoto, dovute alla netta riduzione del traffico veicolare.

Per le concentrazioni di NO, un inquinante primario emesso dagli autoveicoli, la diminuzione risulta ancora più evidente con valori pari al 70% nelle stazioni più prossime a strade ad alto traffico.

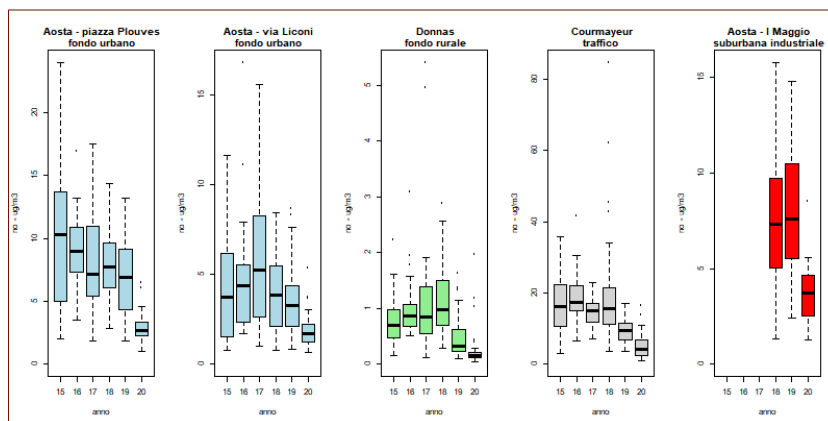


Figura 36: Concentrazioni di monossido di azoto: confronto valori dal 2015 al 2020 (9 marzo – 13 aprile)

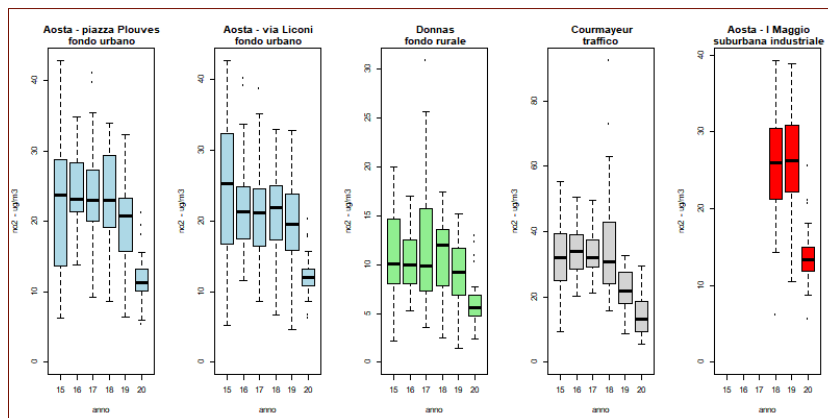


Figura 37: Concentrazioni di biossido di azoto: confronto valori dal 2015 al 2020 (9 marzo – 13 aprile)

Nei seguenti grafici sono riportate le “settimane tipo orarie” per il biossido di azoto ad Aosta Piazza Plouves e Donnas. Confrontando il 2020 (in verde) con gli anni precedenti (in rosso) si può osservare la notevole diminuzione dei livelli di questo inquinante (differenza in valore assoluto in azzurro). Nelle ore notturne le differenze sono pressoché nulle, mentre si accentuano nelle ore diurne ed in particolare nelle ore di “picco” del traffico (la mattina tra le 7.00 e le 8.00, il pomeriggio tra le 17.00 e le 18.00) dei giorni feriali. È interessante notare che, pur essendo estremamente ridotti i livelli di NO<sub>2</sub> in aria, l'andamento orario presenta gli stessi picchi: ciò significa che ci sono meno veicoli in circolazione, ma gli orari si mantengono invariati.

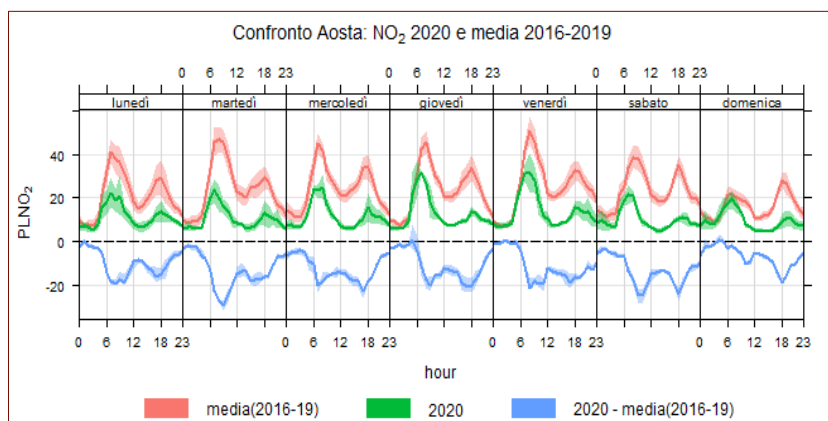


Figura 38: Settimana tipo oraria delle concentrazioni orarie di biossido di azoto ad Aosta (per ogni giorno della settimana nel periodo scelto vengono calcolate le medie per ciascuna ora)

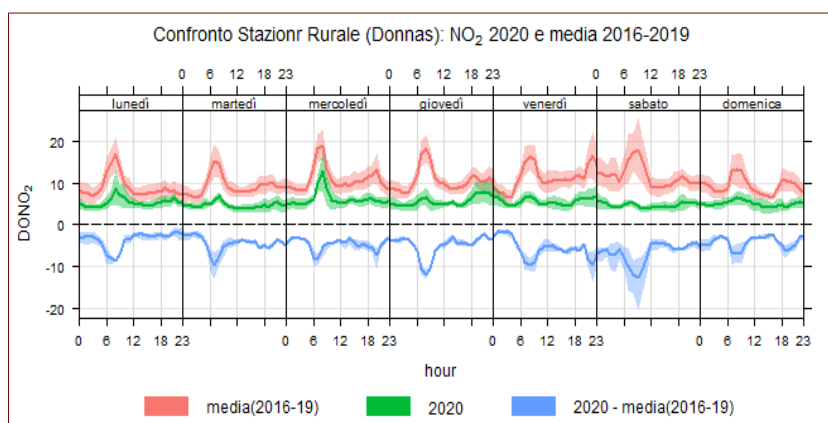


Figura 39: Settimana tipo oraria delle concentrazioni orarie di biossido di azoto a Donnas.

## Ozono

Si osserva un leggero aumento ad Aosta ed una diminuzione a Donnas.

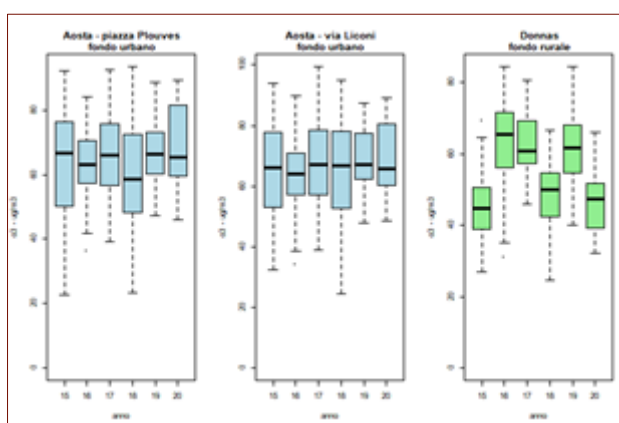


Figura 40: Concentrazioni di ozono: confronto valori dal 2015 al 2020 (9 marzo – 13 aprile)



## Particolato

Nelle stazioni di fondo urbano di Aosta (grafici in azzurro) i valori di PM10 del 2020 sono lievemente superiori agli ultimi due anni ma in linea se si considerano tutti i 5 anni precedenti. La stazione di industriale di Aosta (grafico in rosso) è l'unica a evidenziare una riduzione netta dovuta alla chiusura totale dello stabilimento produttivo che è una sorgente primaria di particolato: nel periodo di chiusura le concentrazioni di particolato sono simili a quelle delle stazioni di fondo urbano. Anche le stazioni di Donnas e Courmayeur non sembrano evidenziare grandi variazioni rispetto al quinquennio precedente.

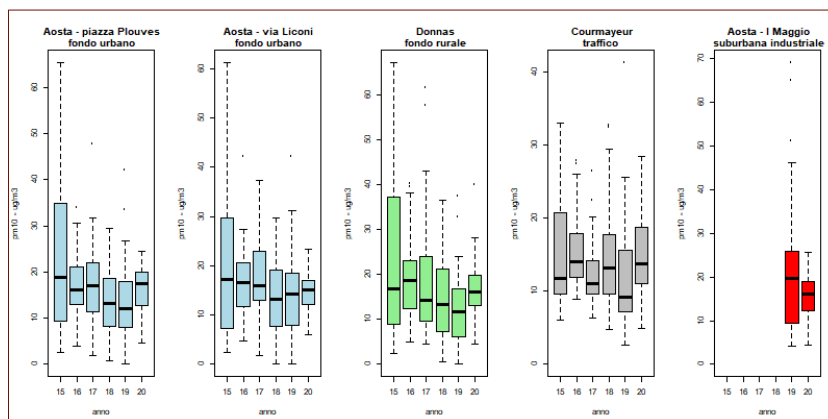


Figura 41: Concentrazioni di PM10: confronto valori dal 2015 al 2020 (9 marzo – 13 aprile)

## Microinquinanti

Considerando nichel e cromo, due metalli che si trovano sul particolato e che devono la loro origine principalmente all'acciaieria, si vede che nel periodo in cui questa è rimasta chiusa i valori di concentrazione sono crollati, sia nei siti di fondo urbano sia in quello industriale.

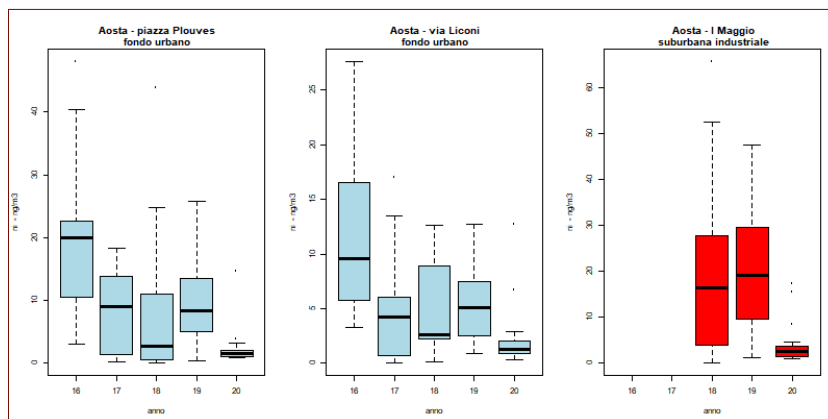


Figura 42: Concentrazioni di nichel: confronto valori dal 2015 al 2020 (9 marzo – 13 aprile)

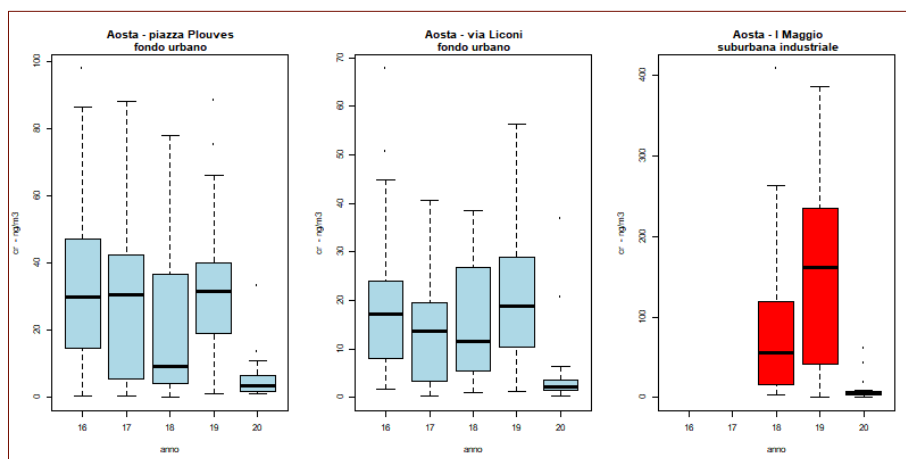


Figura 43: Concentrazioni di cromo: confronto valori dal 2015 al 2020 (9 marzo – 13 aprile)

Per il benzo(a)pirene il dato del 2020, per il periodo considerato, non mostra sostanziali variazioni rispetto agli anni precedenti.

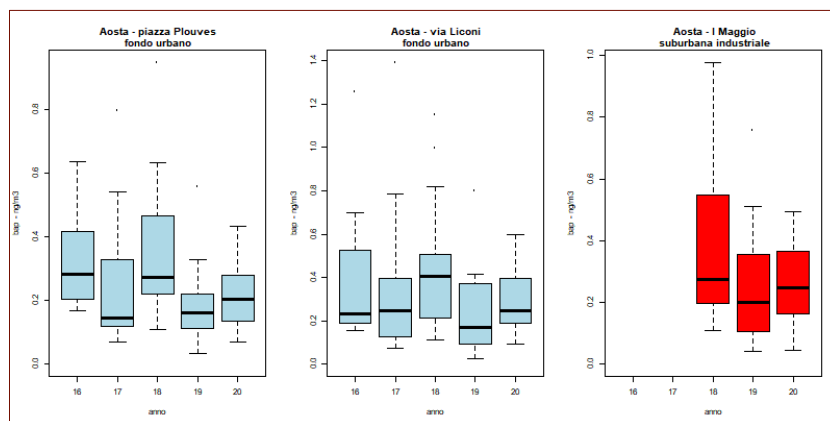


Figura 44: Concentrazioni di benzo(a)pirene: confronto valori dal 2015 al 2020 (9 marzo – 13 aprile)

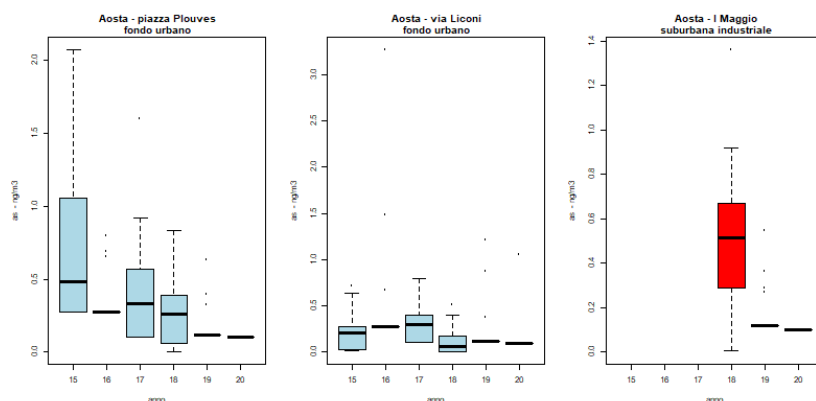


Figura 45: Concentrazioni di arsenico: confronto valori dal 2015 al 2020 (9 marzo – 13 aprile)

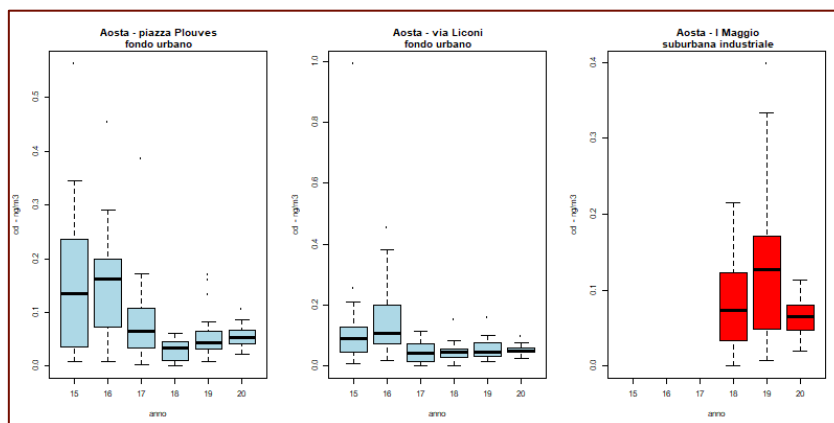


Figura 46: Concentrazioni di cadmio: confronto valori dal 2015 al 2020 (9 marzo – 13 aprile)

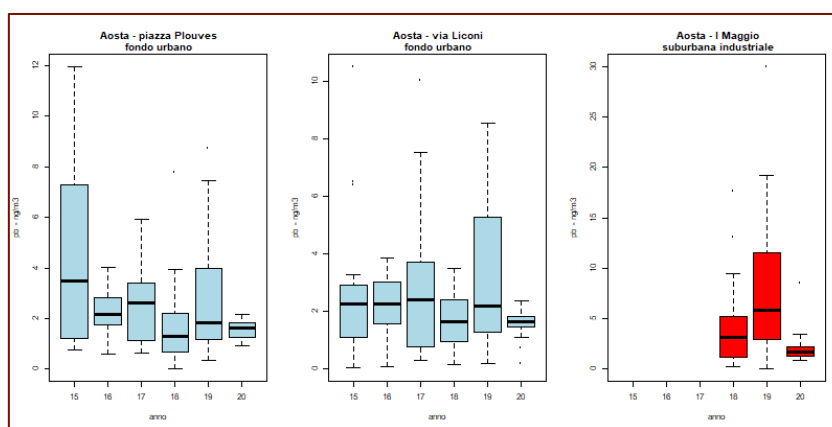


Figura 47: Concentrazioni di piombo: confronto valori dal 2015 al 2020 (9 marzo – 13 aprile)

### Periodo 3 (14 aprile – 4 maggio)

La differenza rispetto al periodo precedente è la progressiva riapertura dell'acciaiera in Aosta, per cui valgono tutte le considerazioni fatte per il periodo precedente, ad eccezione degli effetti sulle concentrazioni di metalli, che tornano ad avere valori paragonabili a quelli degli anni precedenti.

#### Ossidi di azoto

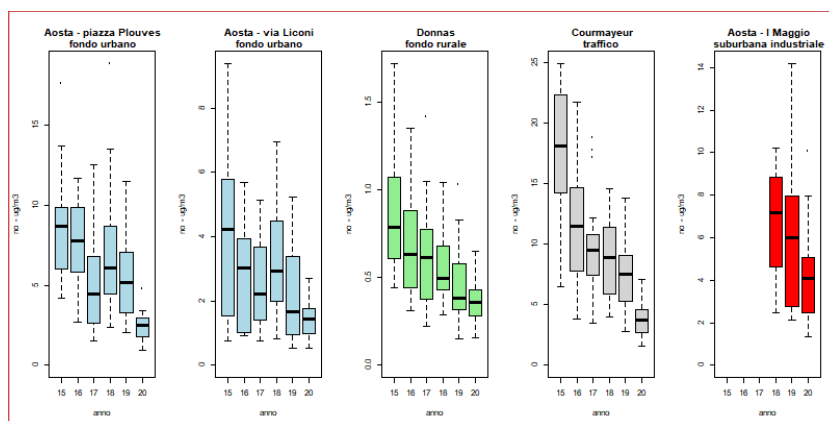


Figura 48: Concentrazioni di monossido di azoto: confronto valori dal 2015 al 2020 (14 aprile – 4 maggio)

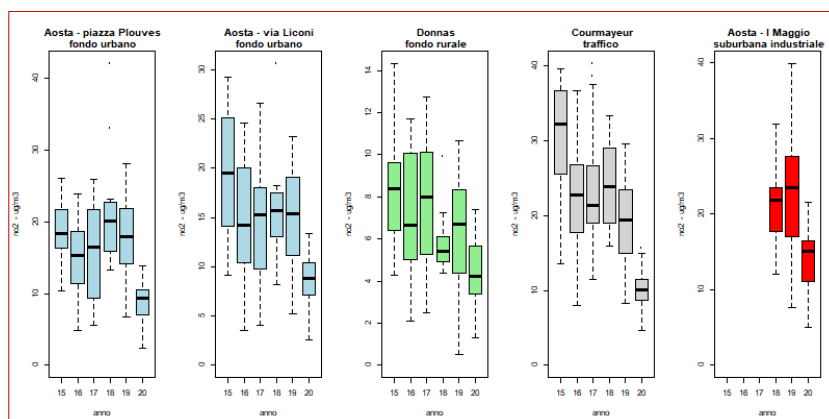


Figura 49: Concentrazioni di biossido di azoto: confronto valori dal 2015 al 2020 (14 aprile – 4 maggio)

## Ozono

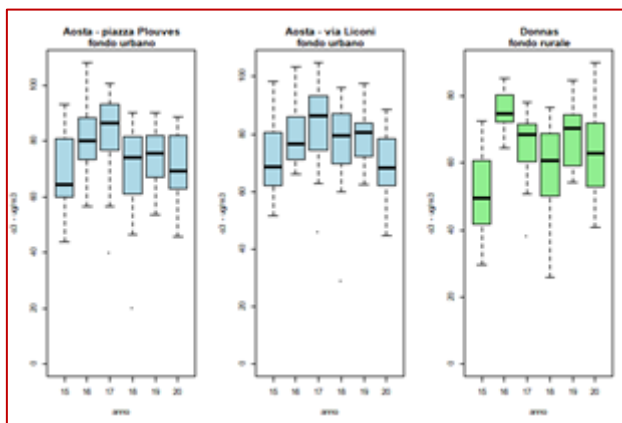


Figura 50: Concentrazioni di ozono: confronto valori dal 2015 al 2020 (14 aprile – 4 maggio)

## Particolato

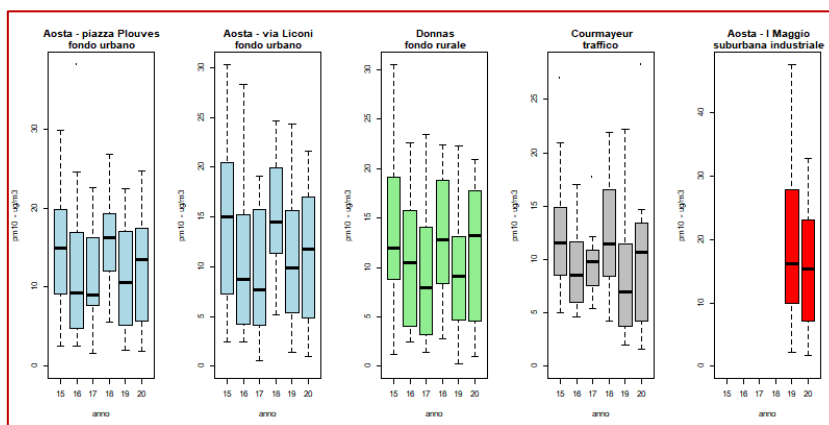


Figura 51: Concentrazioni di PM10: confronto valori dal 2015 al 2020 (14 aprile – 4 maggio)

## Microinquinanti

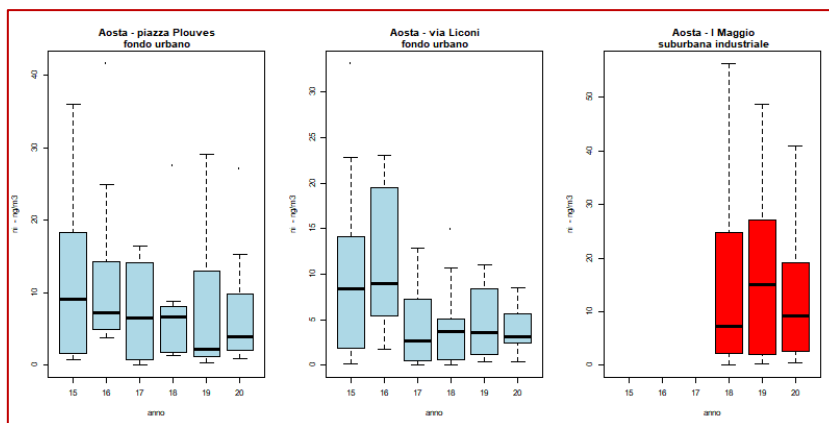


Figura 52: Concentrazioni di nichel: confronto valori dal 2015 al 2020 (14 aprile – 4 maggio)

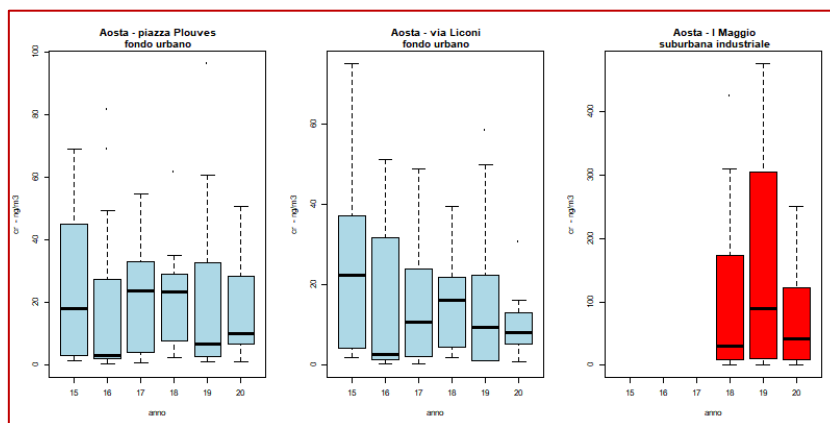


Figura 53: Concentrazioni di cromo: confronto valori dal 2015 al 2020 (14 aprile – 4 maggio)

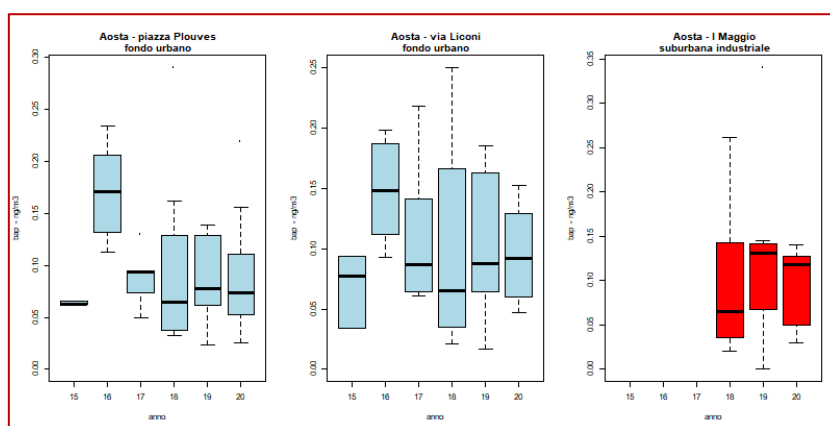


Figura 54: Concentrazioni di benzo(a)pirene: confronto valori dal 2015 al 2020 (14 aprile – 4 maggio)

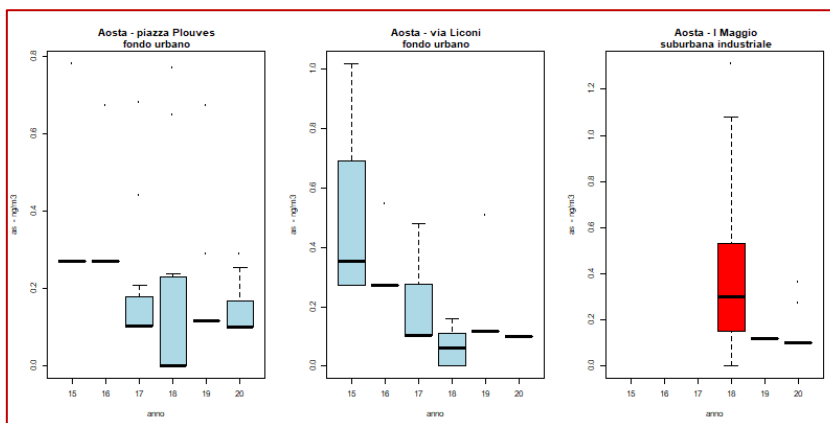


Figura 55: Concentrazioni di arsenico: confronto valori dal 2015 al 2020 (14 aprile – 4 maggio)

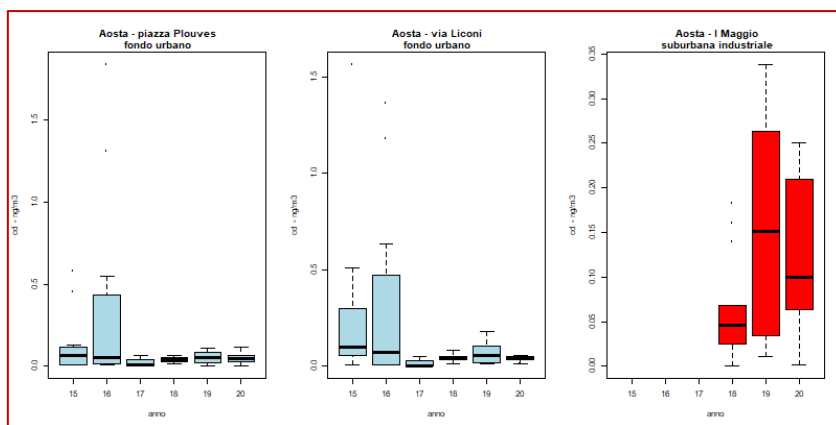


Figura 56: Concentrazioni di cadmio: confronto valori dal 2015 al 2020 (14 aprile – 4 maggio)

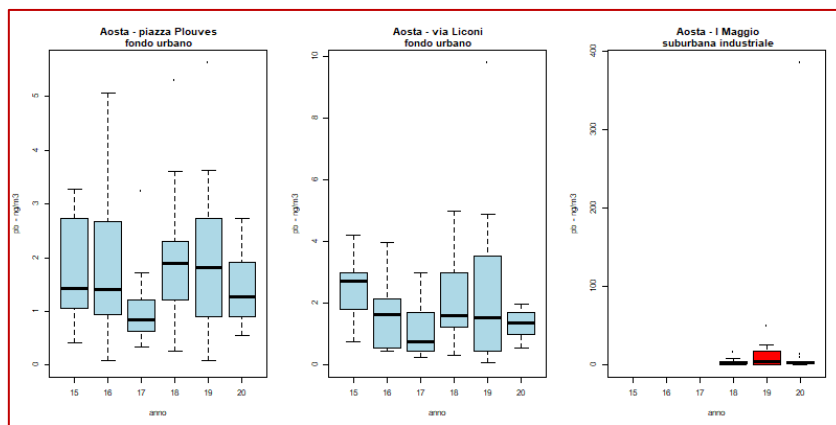


Figura 57: Concentrazioni di piombo: confronto valori dal 2015 al 2020 (14 aprile – 4 maggio)

## Periodo 4 (5 maggio – 3 giugno)

Nonostante questo quarto periodo sia caratterizzato dalla riapertura degli spostamenti all'interno dei confini regionali e una progressiva apertura al turismo, il traffico è ancora molto ridotto e questo si ripercuote sulle concentrazioni di ossidi di azoto, ancora basse se confrontate con lo stesso periodo degli anni precedenti.

Le polveri invece sono in linea con la media del periodo, ma più alte del 2020.

Le concentrazioni di benzo(a)pirene si mantengono basse per la minore esigenza di riscaldamento domestico.

I metalli caratteristici della lavorazione CAS evidenziano la attività dello stabilimento siderurgico.

### Ossidi di azoto

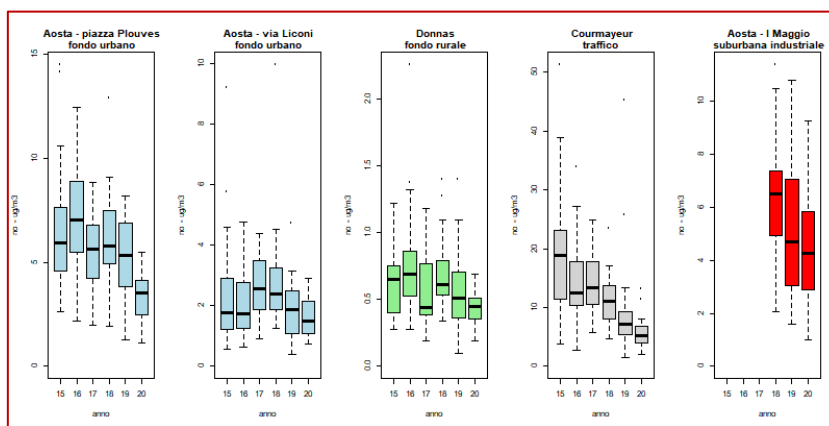


Figura 58: Concentrazioni di monossido di azoto: confronto valori dal 2015 al 2020 (5 maggio – 3 giugno)

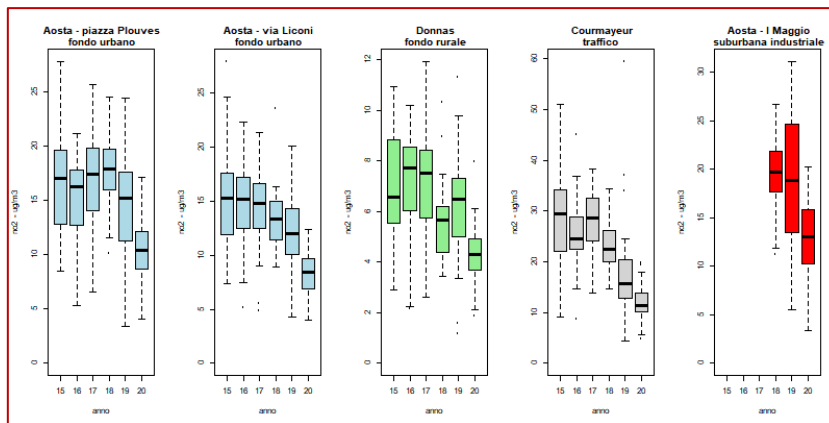


Figura 59: Concentrazioni di biossido di azoto: confronto valori dal 2015 al 2020 (5 maggio – 3 giugno)



## Ozono

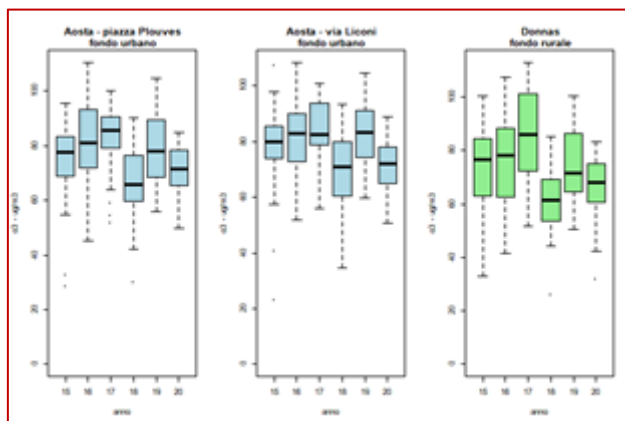


Figura 60: Concentrazioni di ozono: confronto valori dal 2015 al 2020 (5 maggio – 3 giugno)

## Particolato

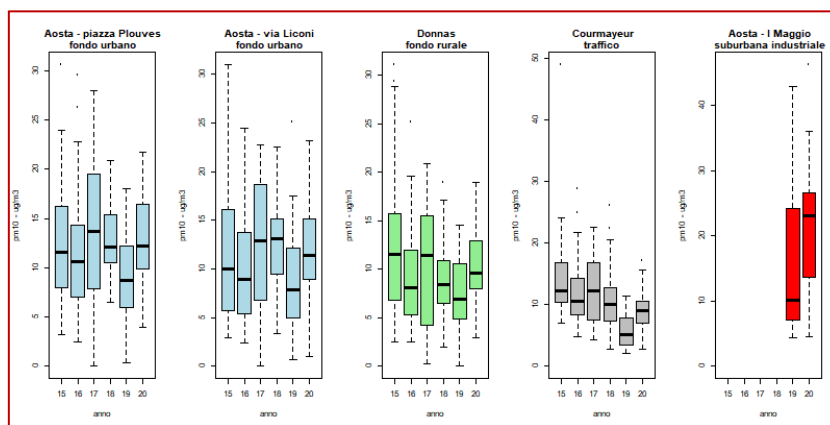


Figura 61: Concentrazioni di PM10: confronto valori dal 2015 al 2020 (5 maggio – 3 giugno)

## Microinquinanti

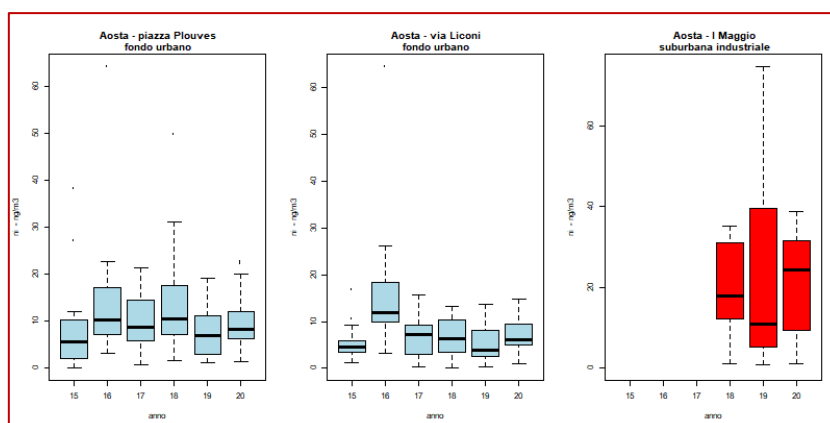


Figura 62: Concentrazioni di nichel: confronto valori dal 2015 al 2020 (5 maggio – 3 giugno)

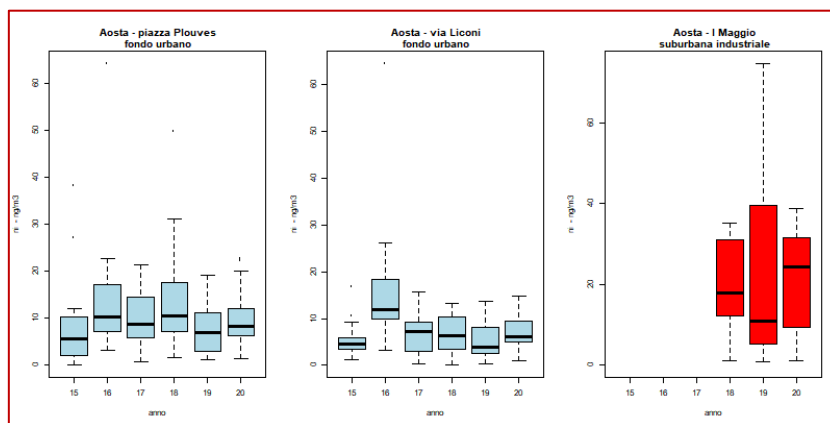


Figura 63: Concentrazioni di cromo: confronto valori dal 2015 al 2020 (5 maggio – 3 giugno)

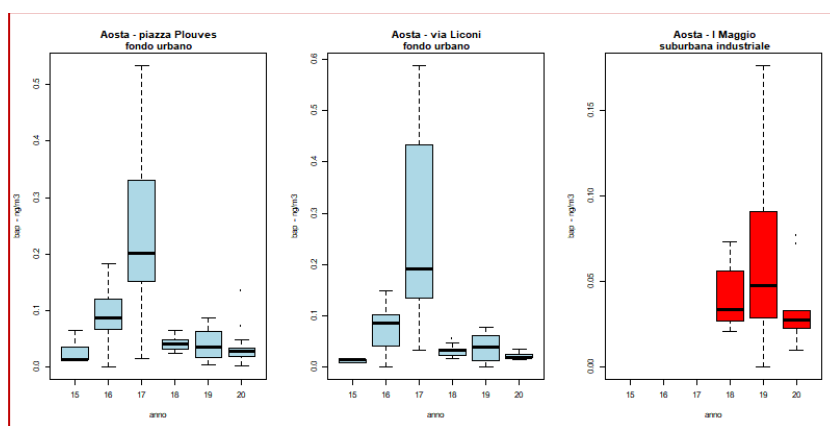


Figura 64: Concentrazioni di benzo(a)pirene: confronto valori dal 2015 al 2020 (5 maggio – 3 giugno)

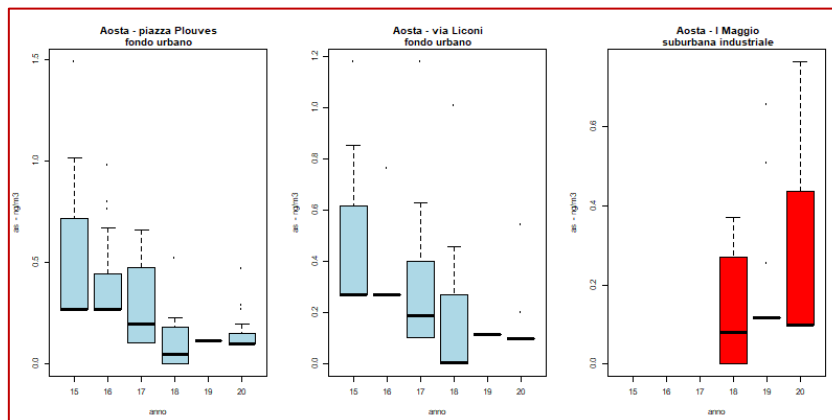


Figura 65: Concentrazioni di arsenico: confronto valori dal 2015 al 2020 (5 maggio – 3 giugno)

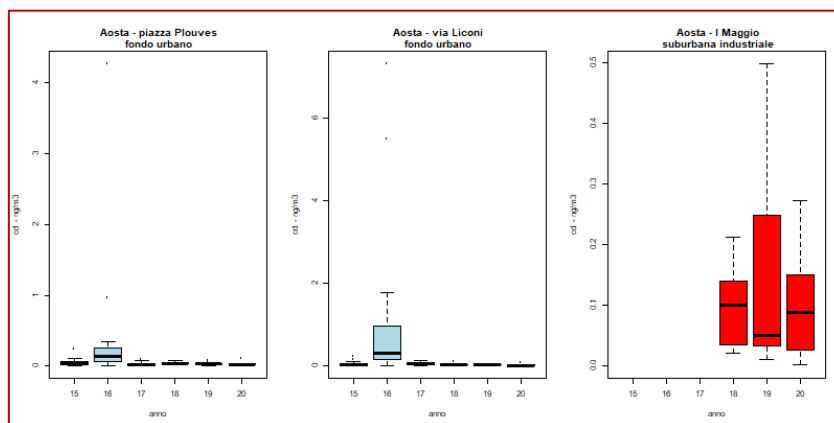


Figura 66: Concentrazioni di cadmio: confronto valori dal 2015 al 2020 (5 maggio – 3 giugno)

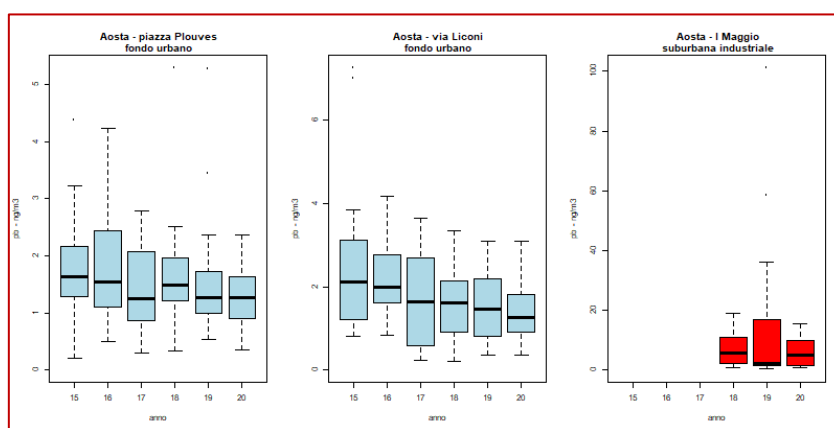


Figura 67: Concentrazioni di piombo: confronto valori dal 2015 al 2020 (5 maggio – 3 giugno)

## Periodo 5 (4 giugno – 31 ottobre)

In questo periodo, caratterizzato da una ripresa della mobilità e delle attività produttive, si assiste ad una ripresa dei valori delle concentrazioni di inquinanti, anche se in generale sono inferiori ai valori del quinquennio precedente, soprattutto nella stazione di Courmayeur i cui si vede l'assenza del turismo internazionale.

### Ossidi di azoto

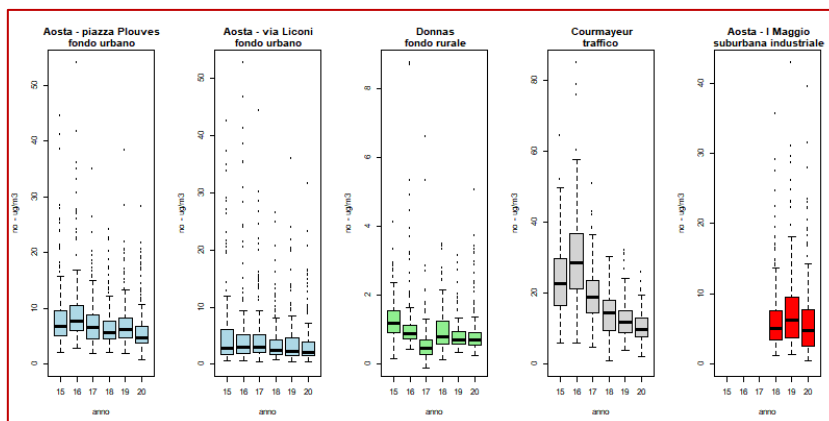


Figura 68: Concentrazioni di monossido di azoto: confronto valori dal 2015 al 2020 (4 giugno – 31 ottobre)

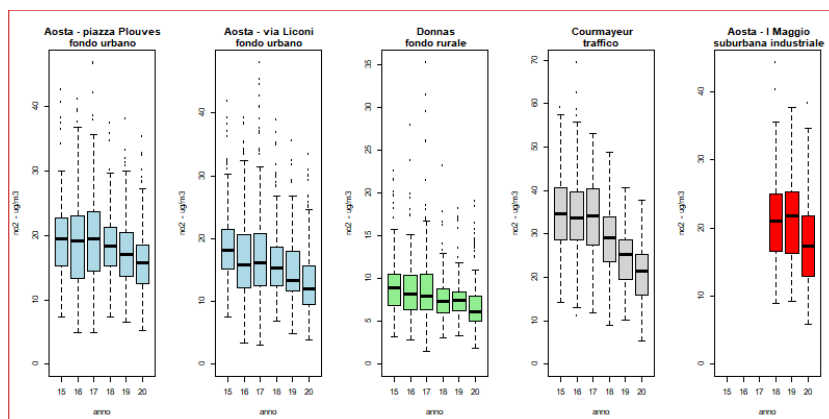


Figura 69: Concentrazioni di biossido di azoto: confronto valori dal 2015 al 2020 (4 giugno – 31 ottobre)

## Ozono

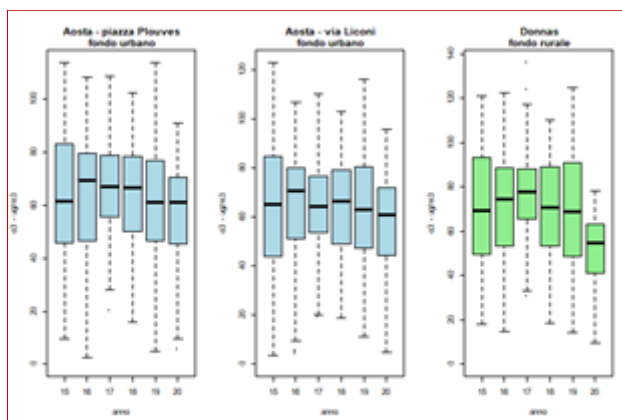


Figura 70: Concentrazioni di ozono: confronto valori dal 2015 al 2020 (4 giugno – 31 ottobre)

## Particolato

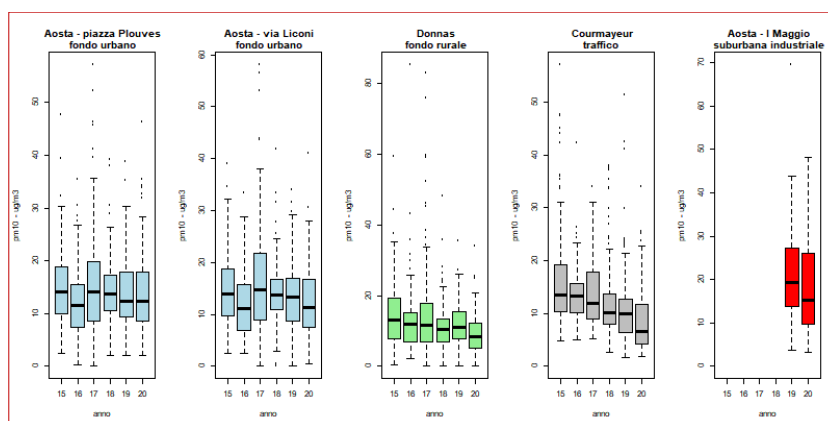


Figura 71: Concentrazioni di PM10: confronto valori dal 2015 al 2020 (4 giugno – 31 ottobre)

## Microinquinanti

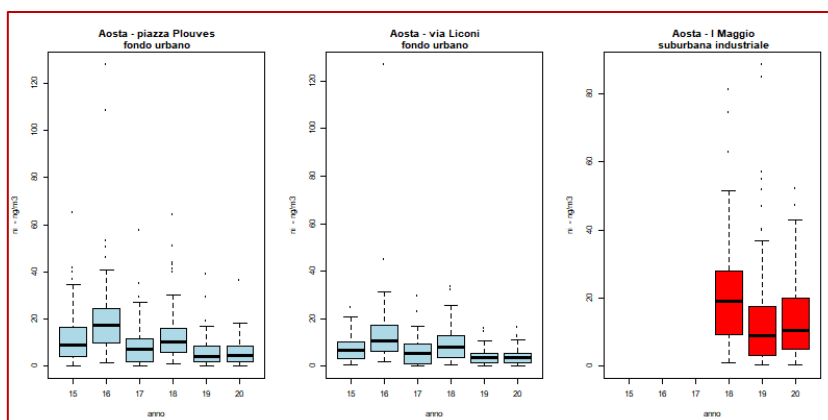


Figura 72: Concentrazioni di nichel: confronto valori dal 2015 al 2020 (4 giugno – 31 ottobre)

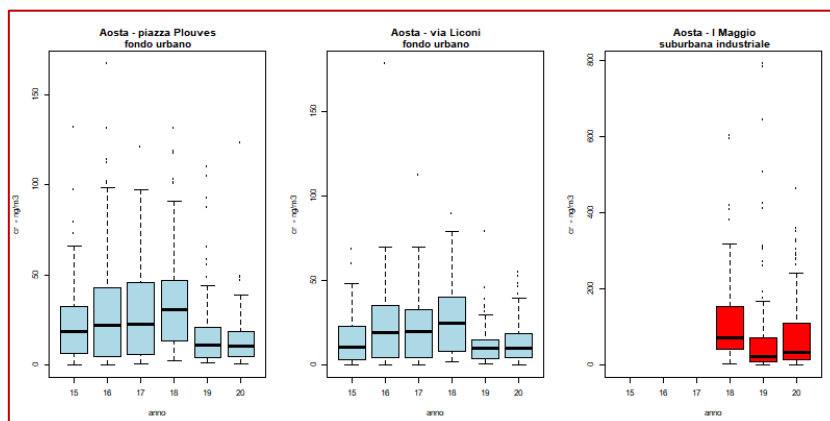


Figura 73: Concentrazioni di cromo: confronto valori dal 2015 al 2020 (4 giugno – 31 ottobre)

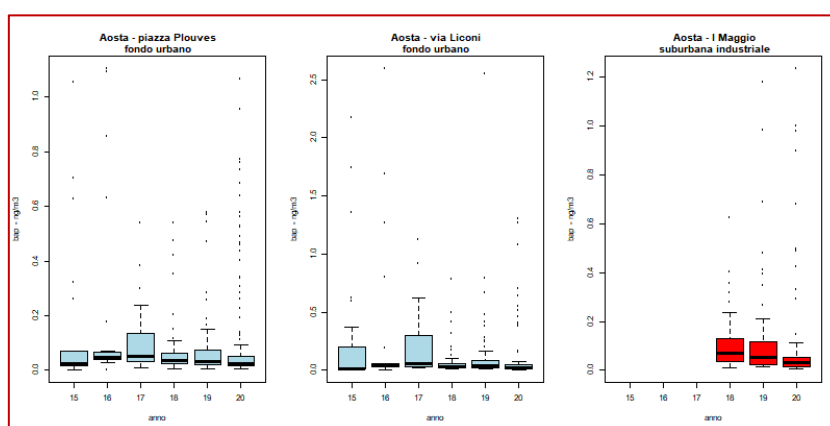


Figura 74: Concentrazioni di benzo(a)pirene: confronto valori dal 2015 al 2020 (4 giugno – 31 ottobre)

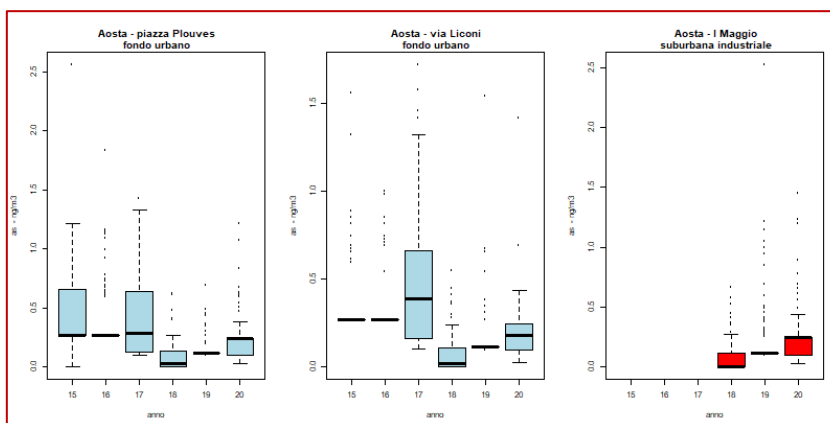


Figura 75: Concentrazioni di arsenico: confronto valori dal 2015 al 2020 (4 giugno – 31 ottobre)

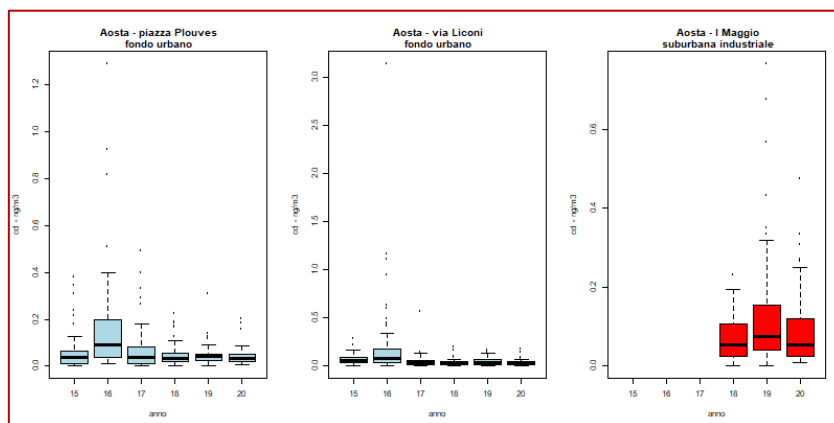


Figura 76:

Concentrazioni di cadmio: confronto valori dal 2015 al 2020 (4 giugno – 31 ottobre)

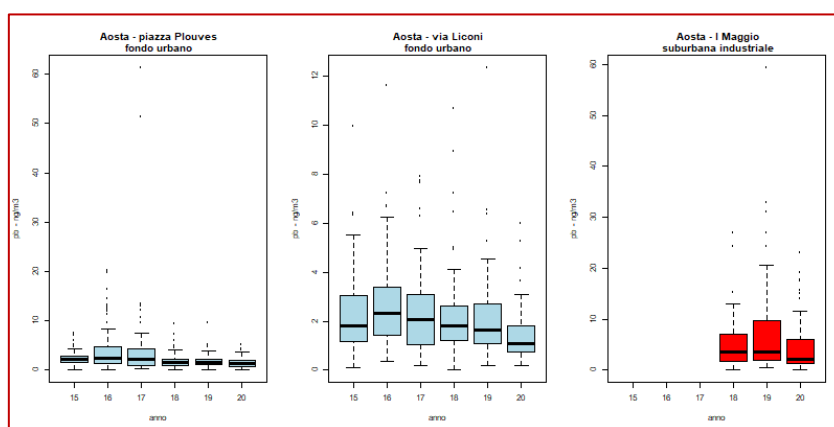


Figura 77: Concentrazioni di piombo: confronto valori dal 2015 al 2020 (4 giugno – 31 ottobre)

## Periodo 6 (1° novembre – 31 dicembre)

Negli ultimi 2 mesi del 2020, a causa della “seconda ondata” sono state re-introdotte alcune limitazioni agli spostamenti che portano a minori concentrazioni di ossidi di azoto, in particolare nelle stazioni di traffico.

### Ossidi di azoto

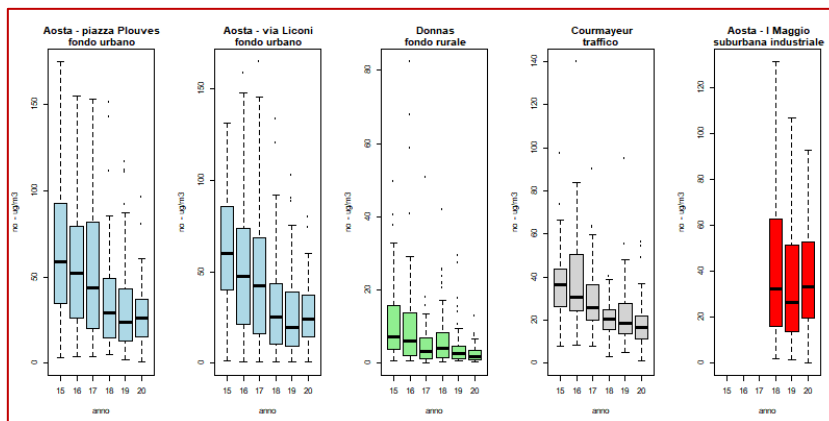


Figura 78: Concentrazioni di monossido di azoto: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° novembre – 31 dicembre)

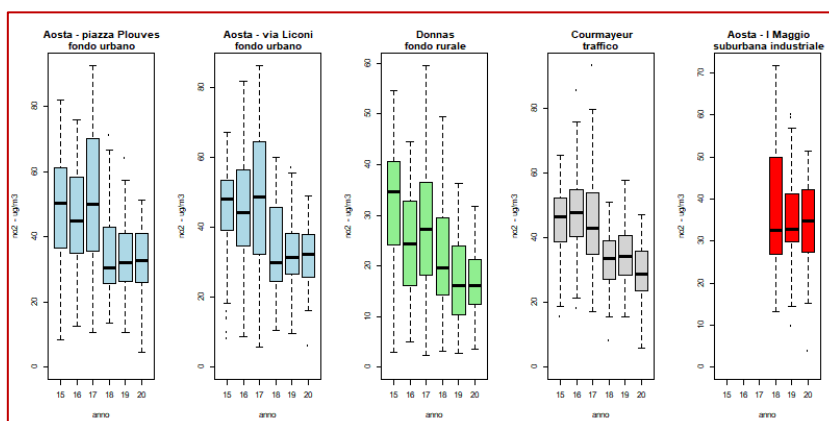


Figura 79: Concentrazioni di biossido di azoto: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° novembre – 31 dicembre)



## Ozono

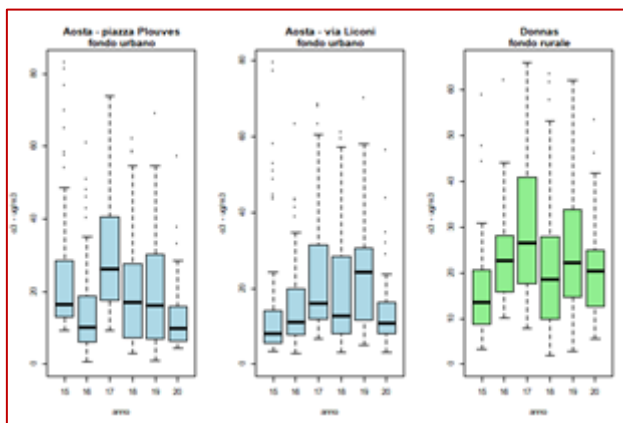


Figura 80: Concentrazioni di ozono: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° novembre – 31 dicembre)

## Particolato

Le polveri invece sono in controtendenza rispetto a un trend di diminuzione che si evidenziava negli ultimi anni.

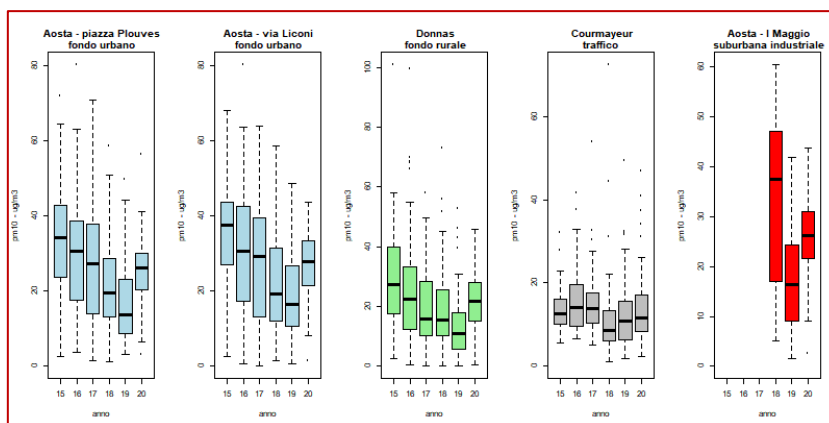


Figura 81: Concentrazioni di PM10: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° novembre – 31 dicembre)

## Microinquinanti

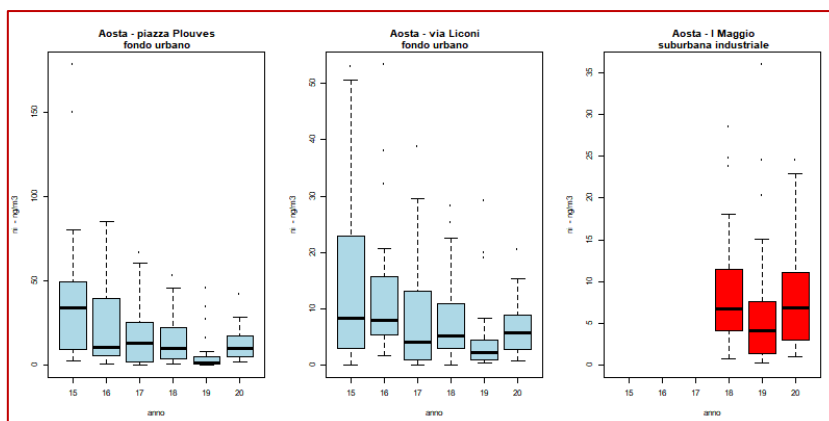


Figura 82: Concentrazioni di nichel: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° novembre – 31 dicembre)

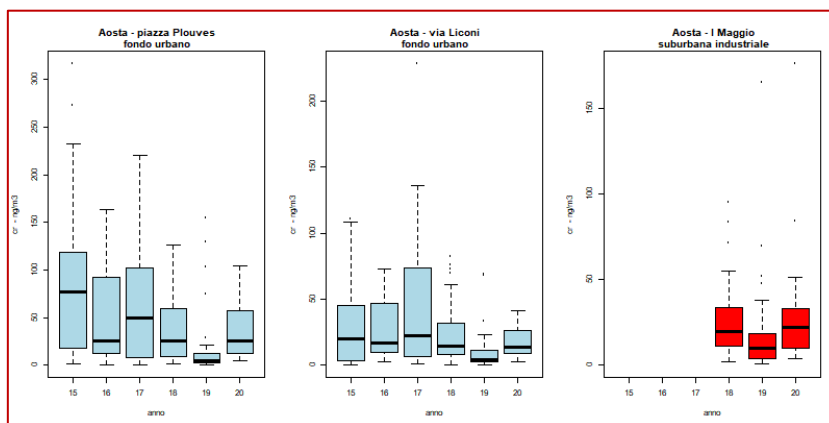


Figura 83: Concentrazioni di cromo: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° novembre – 31 dicembre)

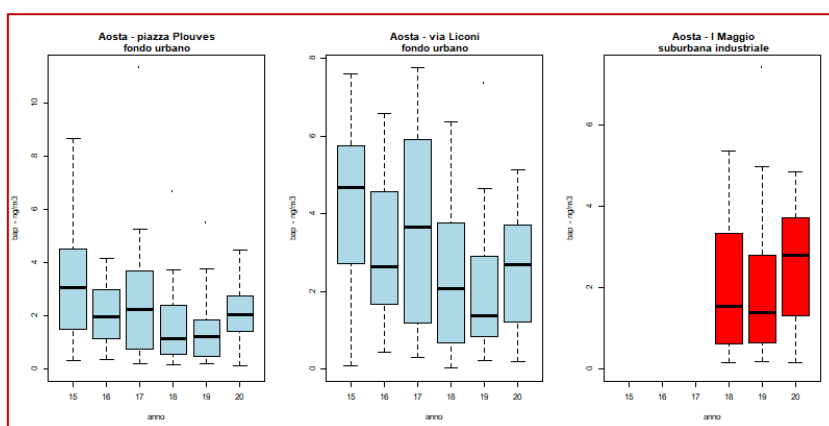


Figura 84: Concentrazioni di benzo(a)pirene: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° novembre – 31 dicembre)

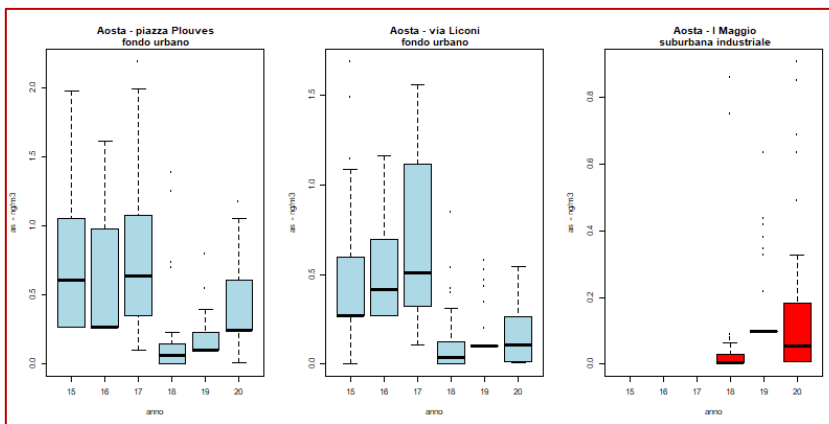


Figura 85: Concentrazioni di arsenico: confronto valori dal 2015 al 2020 (4 giugno – 31 ottobre)

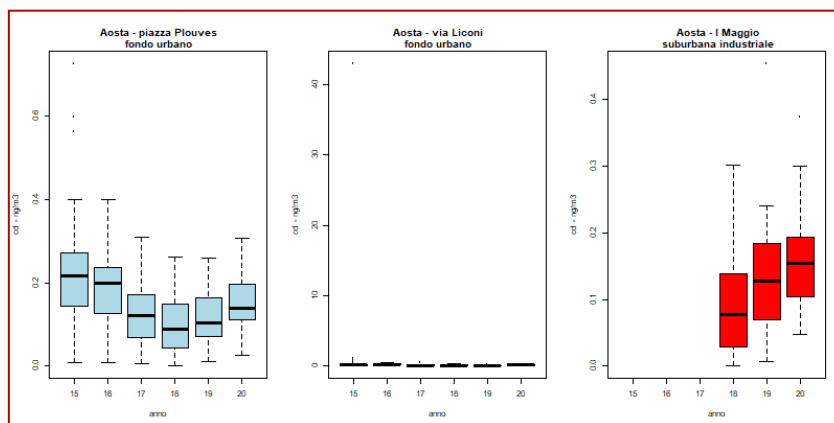


Figura 86:

Concentrazioni di cadmio: confronto valori dal 2015 al 2020 (4 giugno – 31 ottobre)

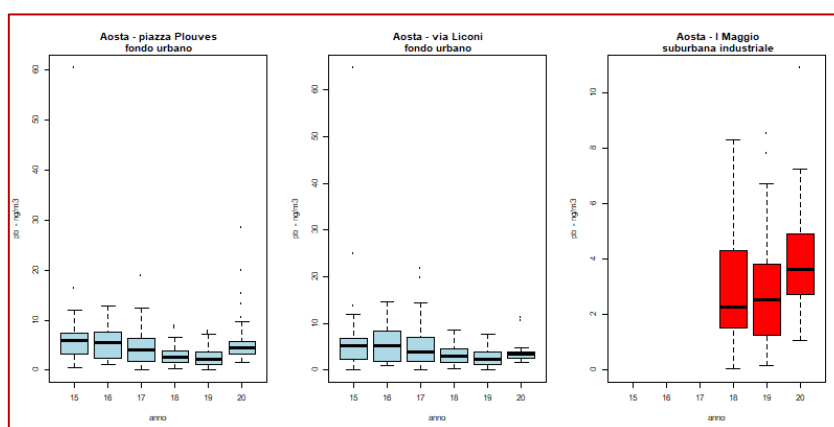


Figura 87:

Concentrazioni di piombo: confronto valori dal 2015 al 2020 (4 giugno – 31 ottobre)

### 3.3. Considerazioni finali

A causa delle differenti caratteristiche e della diversa origine delle sorgenti emmissive, l'effetto sulla qualità dell'aria dovuto alla diminuzione delle emissioni, principalmente legato alla riduzione del traffico veicolare, è più evidente per il biossido di azoto che per il PM10.

La spiegazione è legata al fatto che la sorgente primaria di particolato è il riscaldamento domestico e non è stata ridotta durante questo periodo di emergenza sanitaria. Inoltre i livelli di particolato in atmosfera sono soggetti a dinamiche complesse, come la formazione di particolato secondario di granulometria fine, che rimane in sospensione in atmosfera per periodi molto lunghi e può essere trasportato su larga scala, o eventi di trasporto polveri desertiche (6.1).

La situazione è diversa nelle vicinanze dell'acciaieria presente nella città di Aosta (Cogne Acciai Speciali): l'interruzione dell'attività nel mese di marzo ha portato ad una drastica riduzione dei livelli di concentrazione di particolato e metalli pesanti, ben visibili nei dati della stazione industriale di Aosta Via I Maggio.

## 4. VALUTAZIONI MODELLISTICHE

Poiché le concentrazioni sono determinate sia dalle emissioni sia dalle condizioni meteorologiche, si è risposto alla domanda:

***Come sarebbe stata la qualità dell'aria nel 2020 senza le misure di contenimento? Ovvero quale è stato l'effettiva riduzione delle concentrazioni di inquinanti prodotte dal confinamento nel 2020 al netto dell'effetto delle condizioni meteorologiche?***

utilizzando modelli matematici che consentono di calcolare i valori delle concentrazioni degli inquinanti atmosferici al variare delle variabili di ingresso (emissioni, meteorologia).

A tal fine sono stati utilizzati due metodi diversi:

- il primo utilizza i modelli di chimica e trasporto, cioè modelli matematici che a partire dai valori delle emissioni e delle variabili meteorologiche sono in grado di ricostruire i campi tridimensionali di concentrazione;
- il secondo utilizza modelli statistici predittivi (machine learning) che, in sintesi, utilizzano dati storici per prevedere i valori futuri e vengono dapprima “allenati” sulla base di dati pregressi, utilizzando (per le applicazioni di qualità dell'aria) in input le misure di opportune variabili meteorologiche per descrivere lo stato dell'atmosfera e marcatori temporali (momento del giorno/settimana) quali proxy delle emissioni, per prevedere il valore delle concentrazioni di inquinanti.

Con il primo metodo sono state effettuate e confrontate due simulazioni, nelle quali è stata mantenuta costante la componente meteorologica ed è stata variata la componente emissiva, considerando in un caso le emissioni “normali” e nell'altro le emissioni “ridotte” per tenere conto delle misure di contenimento adottate.

Con il secondo metodo, il modello random forest, un metodo machine learning, è stato addestrato sul quinquennio 2015-2019 (per determinare i valori di concentrazione “previsti” in determinate condizioni meteorologiche in un determinato giorno) e poi utilizzato per stimare i dati di concentrazione del 2020 utilizzando le variabili meteorologiche effettivamente misurate.

I due metodi, seppur con qualche differenza, sono in sostanziale accordo, stimando riduzioni anche importanti per gli ossidi di azoto e contenute per il particolato; queste riduzioni sono maggiori nella primavera 2020, ma significative anche negli ultimi mesi dell'anno.

#### 4.1. Modelli di chimica e trasporto

ARPA Valle d'Aosta utilizza per le simulazioni modellistiche di qualità dell'aria **FARM** un modello fotochimico ed euleriano a griglia in grado di riprodurre le concentrazioni anche di inquinanti secondari (ozono e particolato secondario). Questo modello viene utilizzato per la simulazione annuale della qualità dell'aria, per le previsioni giornaliere e per elaborare scenari per la pianificazione in ambito ambientale.

#### Metodologia

Per poter analizzare l'influenza delle misure di contenimento, sono state realizzate due simulazioni modellistiche, nelle quali la meteorologia è quella reale del 2020, mentre per le emissioni sono stati elaborati due scenari:

- Scenario normale: emissioni come gli anni precedenti (denominato nelle figure "senza lockdown")
- Scenario ridotto: in cui le emissioni sono state modulate in funzione delle misure di contenimento adottate (denominato nelle figure "2020")

Per i principali inquinanti di qualità dell'aria elaborati dalla simulazione annuale sono riportati i risultati in termini di:

- concentrazioni medie di periodo dei due scenari in tre punti, due dei quali in corrispondenza delle stazioni di monitoraggio di Aosta - Piazza Plouves e Donnas, e un punto per l'Alta Valle a Pré-St-Didier, estratti dai risultati riferiti a tutto il territorio regionale
- mappa della differenza tra le concentrazioni medie annuali dello scenario normale e quelle dello scenario ridotto

## Ossidi di azoto

Per questo inquinante sono state stimate riduzioni superiori al 40% da marzo a maggio (P2 e P3), in corrispondenza dei periodi con maggiori limitazioni alla mobilità, tra il 20% e il 30% a maggio (P4), quando c'è stata una ripresa delle attività e della mobilità regionale. Negli ultimi 2 mesi dell'anno (P6), nei siti prossimi alle vie di traffico nazionale ed internazionale, le riduzioni stimate superano il 25% per l'assenza di flusso turistico, mentre nella città di Aosta le s time portano a valori di riduzione più contenute.

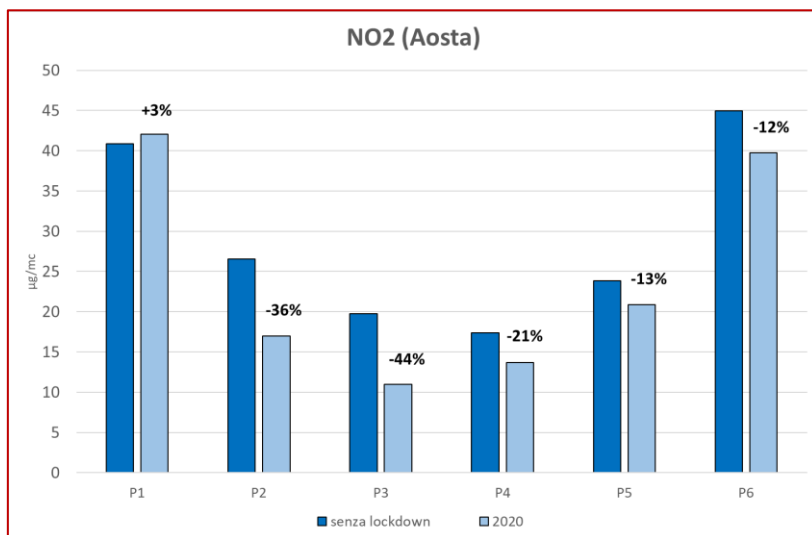


Figura 88: Concentrazioni medie di biossido di azoto per i due scenari emissivi (Aosta Piazza Plouves)

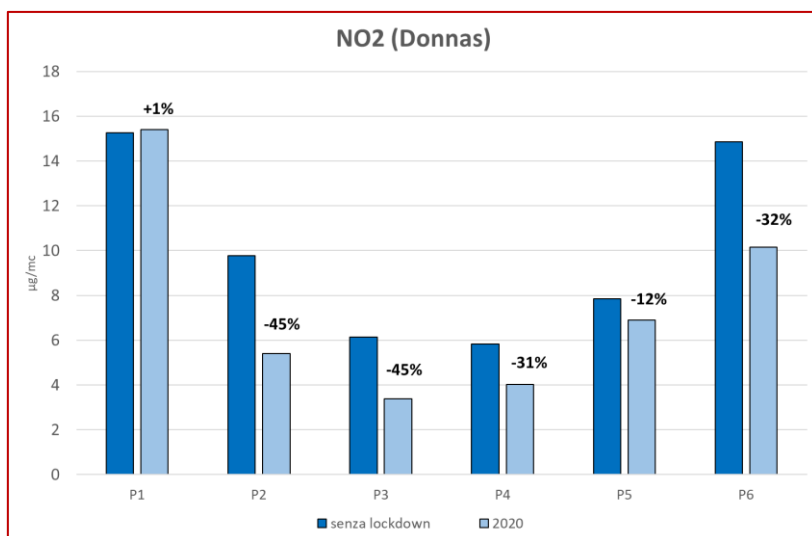


Figura 89: Concentrazioni medie di biossido di azoto per i due scenari emissivi (Donnas)

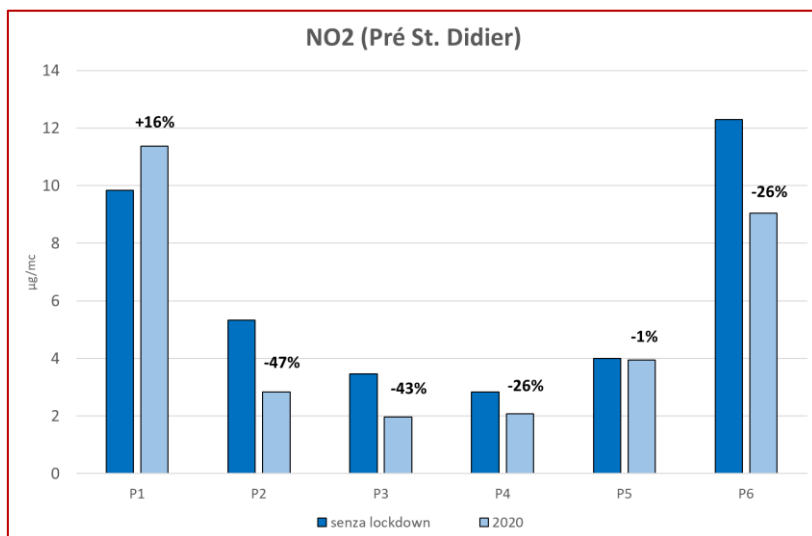


Figura 90: Concentrazioni medie di biossido di azoto per i due scenari emissivi (Pré Saint Didier)

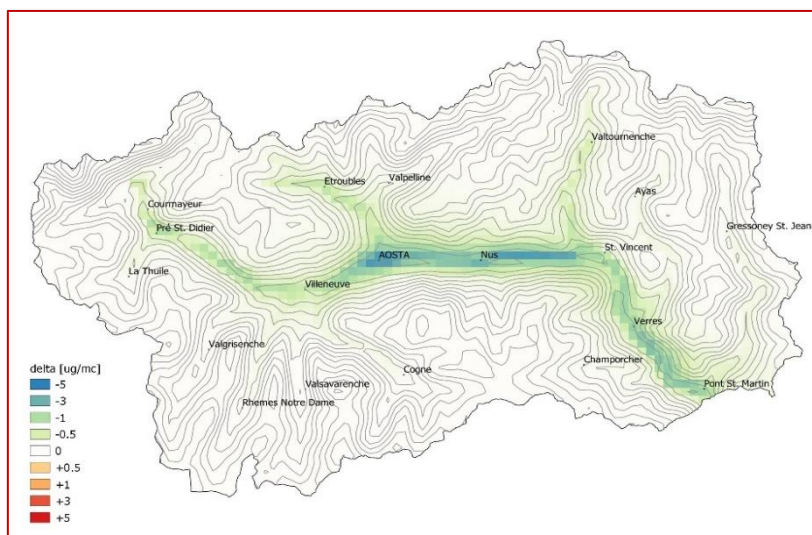


Figura 91: Mappa della differenza delle concentrazioni medie annuali di biossido di azoto per i due scenari emissivi: le riduzioni maggiori sono nel fondovalle principale e lungo gli assi principali di traffico (massimo di 4 µg/m<sup>3</sup>).



## Ozono

L'ozono è un inquinante che non viene emesso da sorgenti particolari, ma si forma in atmosfera in seguito a reazioni chimiche attivate dalla radiazione solare (durante la notte si ritrasforma in ossigeno se sono presenti altri inquinanti). Il modello FARM, che contiene nella sua formulazione tali reazioni chimiche, prevede un andamento delle concentrazioni dell'ozono opposto a quello degli inquinanti precursori, come gli ossidi d'azoto.

I confronti delle concentrazioni medie nei sei periodi considerati rilevano quindi nelle tre località considerate un aumento percentuale più significativo in particolare nei periodi P2, P3 e P6.

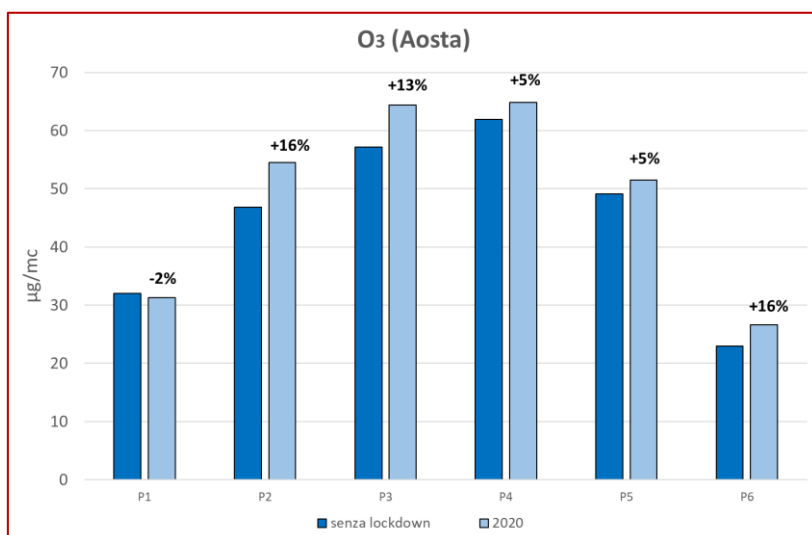


Figura 92: Concentrazioni medie di ozono per i due scenari emissivi (Aosta Piazza Plouves)

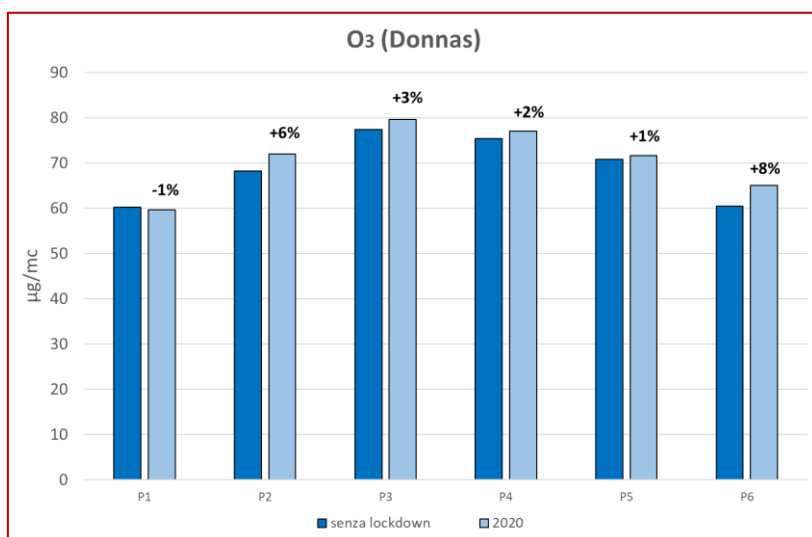


Figura 93: Concentrazioni medie di ozono per i due scenari emissivi (Donnas)

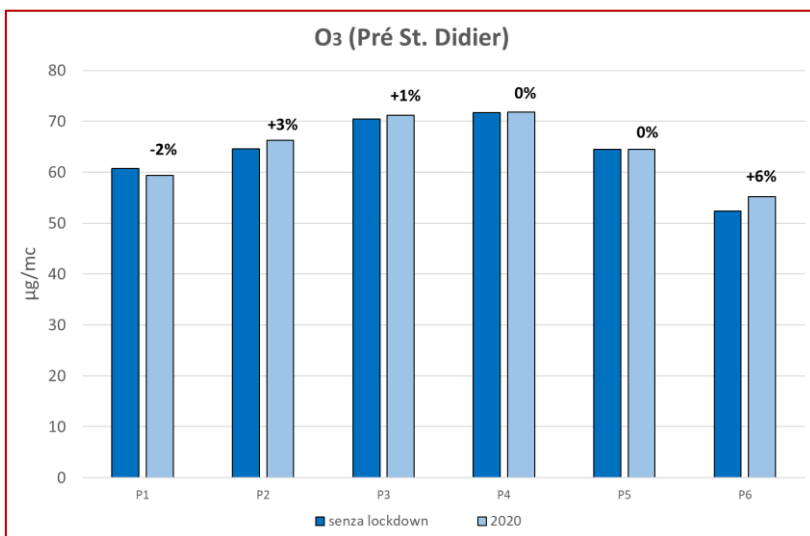


Figura 94: Concentrazioni medie di ozono per i due scenari emissivi (Pré-Saint-Didier)

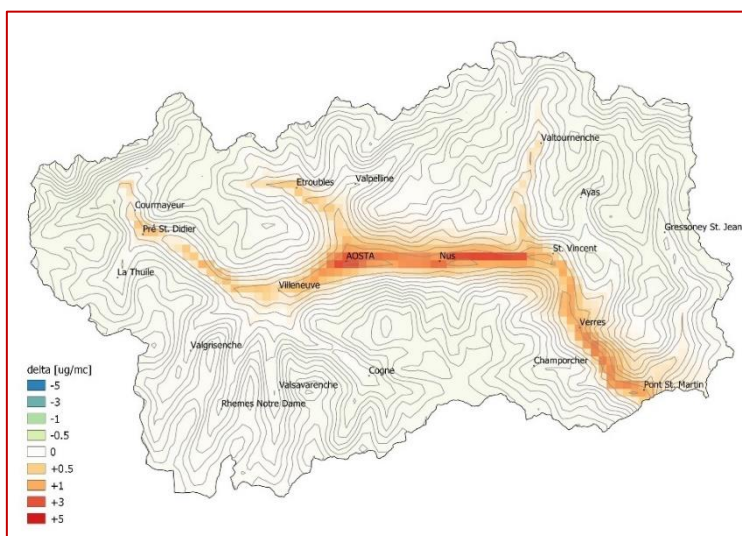


Figura 95: Mappa della differenza delle concentrazioni medie annuali di ozono per i due scenari emissivi: le variazioni più significative sono lungo il fondovalle e soprattutto nel tratto tra Aosta e Saint-Vincent, nella parte cioè di territorio dove le misure di confinamento del 2020 hanno comportato una maggiore riduzione degli inquinanti precursori della formazione dell'ozono.

## Particolato

Le riduzioni stimate per le polveri sono generalmente maggiori ad Aosta rispetto agli altri due punti considerati, in quanto il primo risulta maggiormente influenzato dalle emissioni da riscaldamento. La riduzione maggiore è nel periodo da marzo a maggio (P2-P3) ed è variabile dal 20% al 30%.

Nel territorio regionale le riduzioni della media annuale raggiungono i soli 2 µg/m<sup>3</sup> nel bacino del capoluogo.

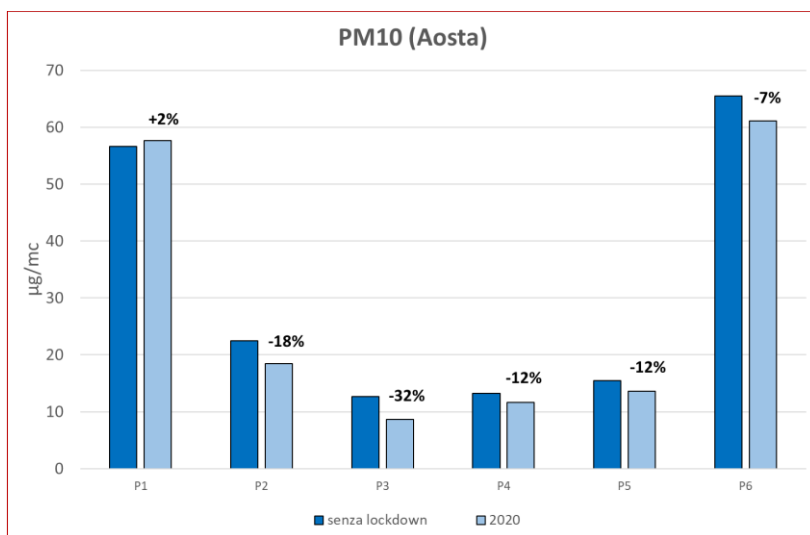


Figura 96: Concentrazioni medie di PM10 per i due scenari emissivi (Aosta Piazza Plouves)

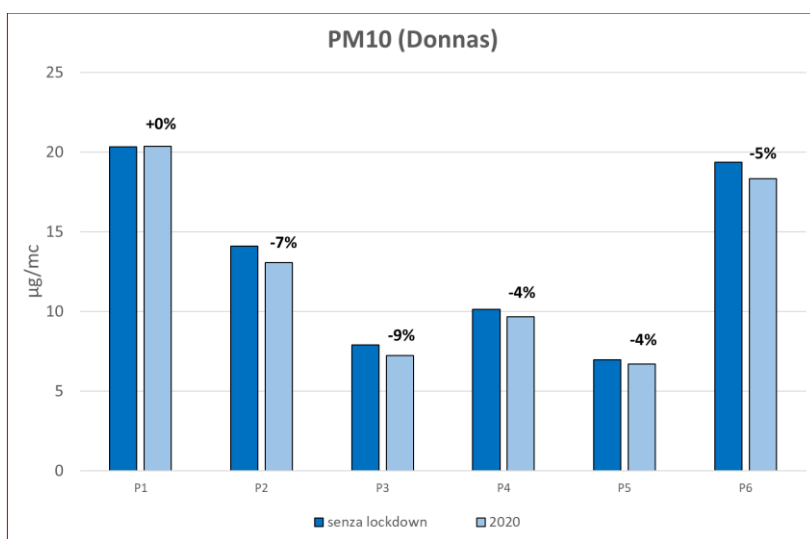


Figura 97: Concentrazioni medie di PM10 per i due scenari emissivi (Donnas)

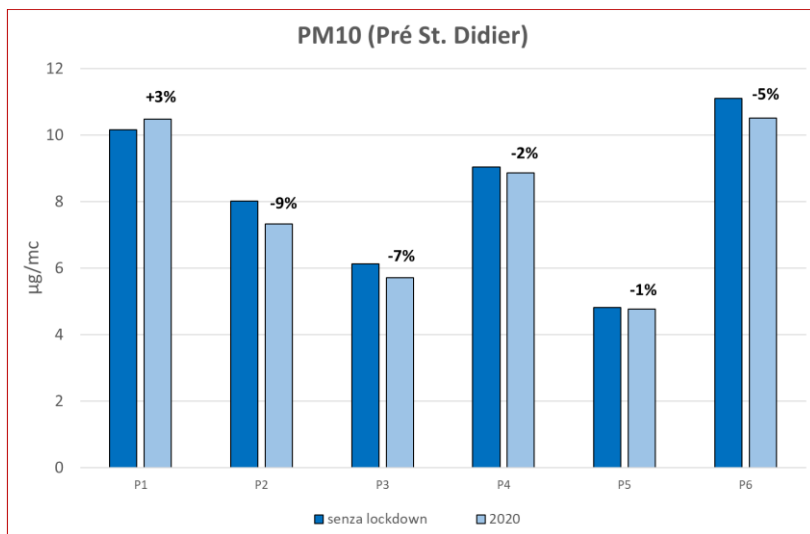


Figura 98: Concentrazioni medie di PM10 per i due scenari emissivi (Pré-Saint-Didier)

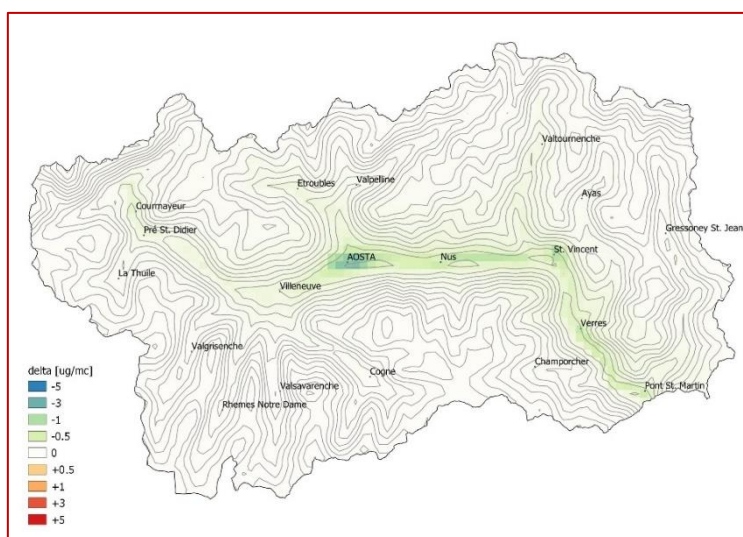


Figura 99: Mappa della differenza delle concentrazioni medie annuali di PM10 per i due scenari emissivi: le variazioni più significative sono soprattutto nella Plaine di Aosta.

## Benzene

Tra gli inquinanti simulati annualmente con il codice FARM, il benzene è quello per il quale si stimano le maggiori riduzioni di concentrazioni in quanto le sue emissioni (a livello regionale) sono esclusivamente correlate ai trasporti stradali. Si rilevano riduzioni del 30-50% da marzo a giugno e del 20% a fine anno ad Aosta; negli altri due siti le riduzioni arrivano anche al 40-60%.

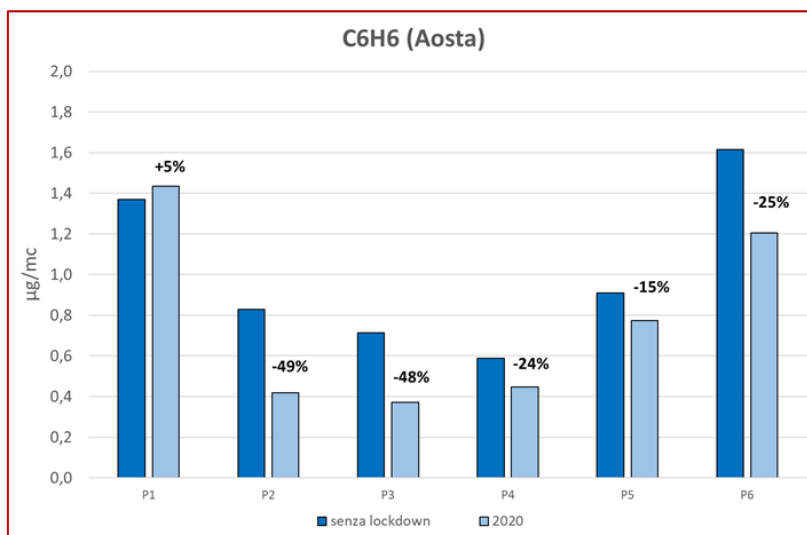


Figura 100: Concentrazioni medie di benzene per i due scenari emissivi (Aosta Piazza Plouves)

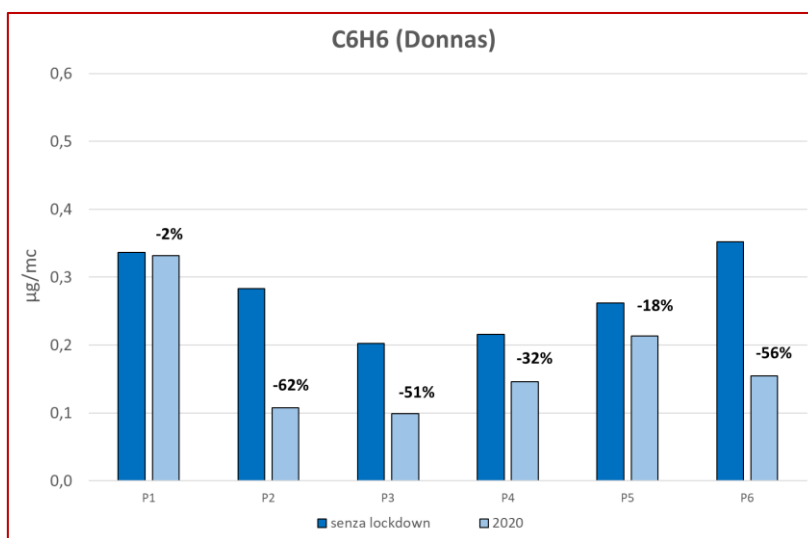


Figura 101: Concentrazioni medie di benzene per i due scenari emissivi (Donnas)

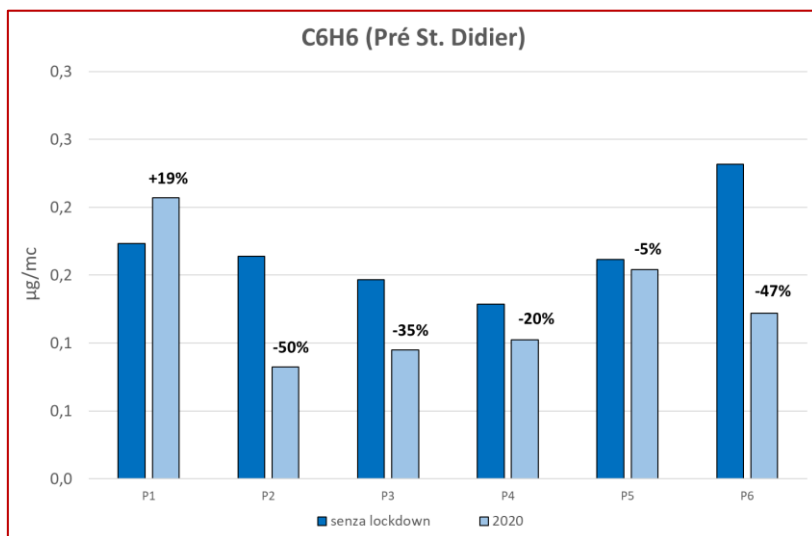


Figura 102: Concentrazioni medie di benzene per i due scenari emissivi (Pré-Saint-Didier)

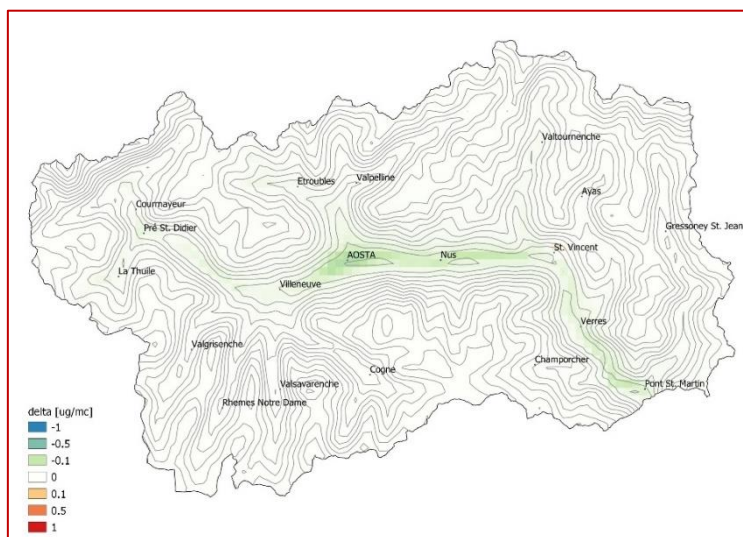


Figura 103: Mappa della differenza delle concentrazioni medie annuali di benzene per i due scenari emissivi: le riduzioni maggiori sono nel fondovalle principale ed in particolare nella Plaine di Aosta.

## Benzo(a)pirene

Il benzo(a)pirene è correlato al riscaldamento residenziale e ha piccole variazioni che vanno da -6% a -10% da marzo ad aprile. Nella stazione estiva (P4 e P5) le riduzioni sono elevate, ma non sono significative in quanto si riferiscono a concentrazioni molto basse in termini assoluti.

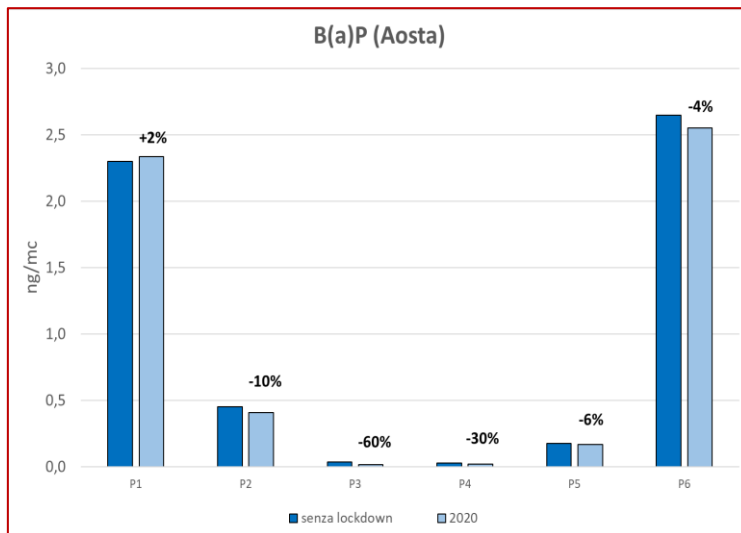


Figura 104: Concentrazioni medie di benzo(a)pirene per i due scenari emissivi (Aosta Piazza Plouves)

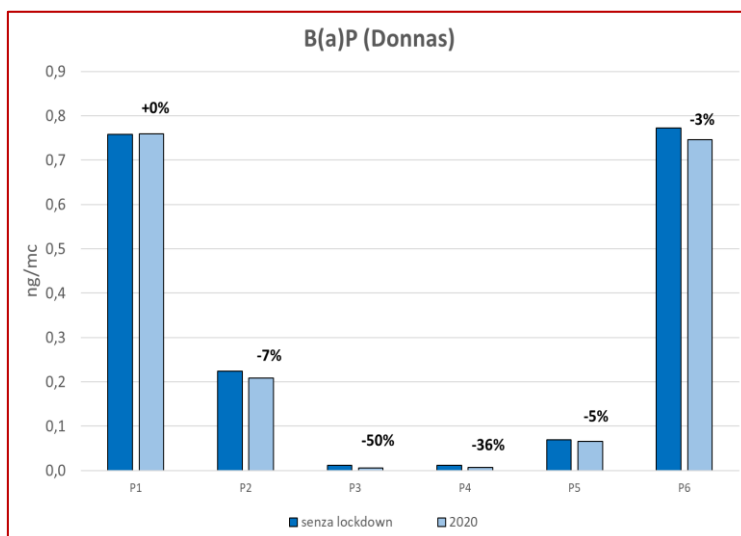


Figura 105: Concentrazioni medie di benzo(a)pirene per i due scenari emissivi (Donnas)

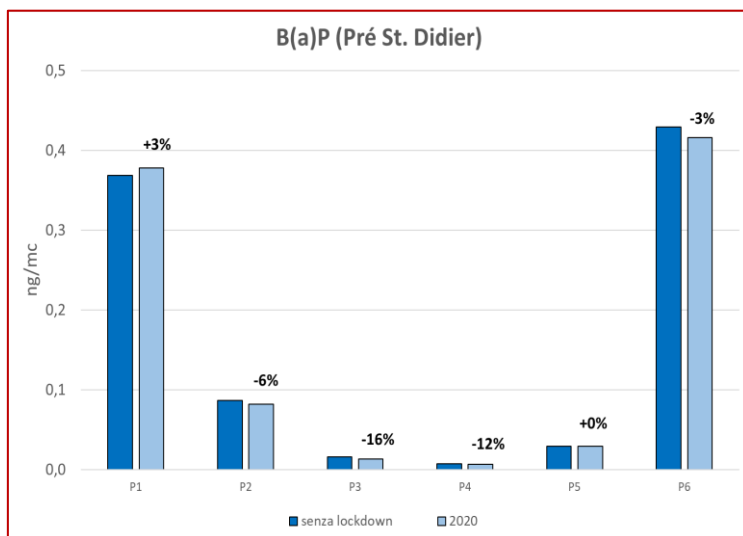


Figura 106: Concentrazioni medie di benzo(a)pirene per i due scenari emissivi (Pré-Saint-Didier)

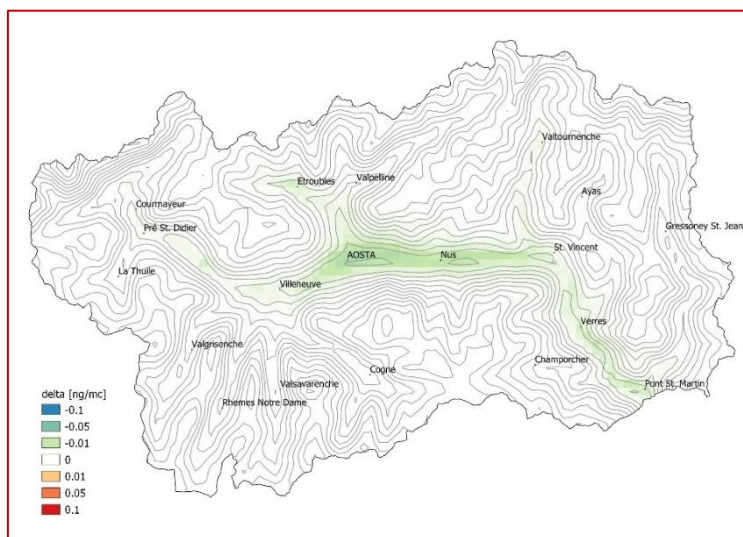


Figura 107: Mappa della differenza delle concentrazioni medie annuali di benzo(a)pirene per i due scenari emissivi: le riduzioni maggiori sono lungo le principali vie di traffico e nella Plaine di Aosta.



## Metalli pesanti

### Arsenico – Cadmio - Piombo

Non si osservano particolari riduzioni legate alle le misure di contenimento.

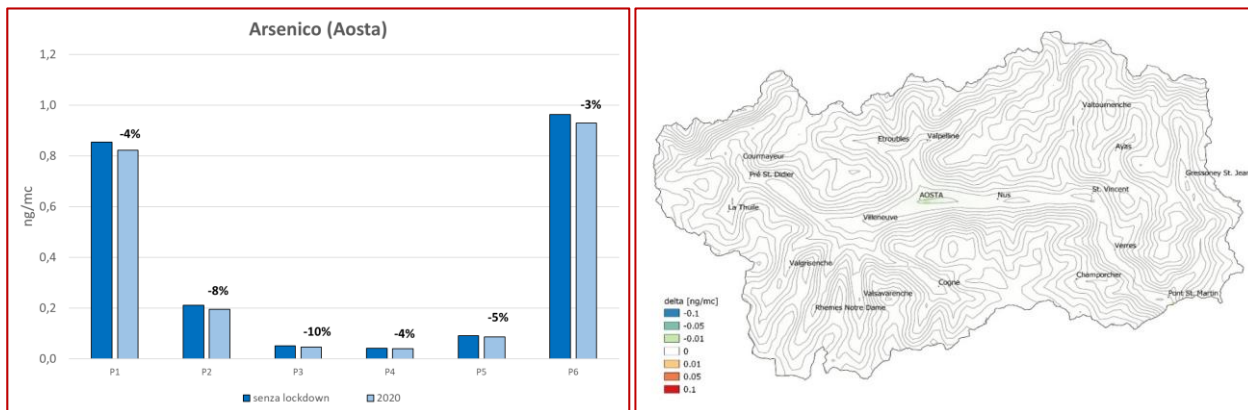


Figura 108: Arsenico: medie per periodo nei due scenari emissivi ad Aosta e mappa della differenza medie annua tra i due scenari

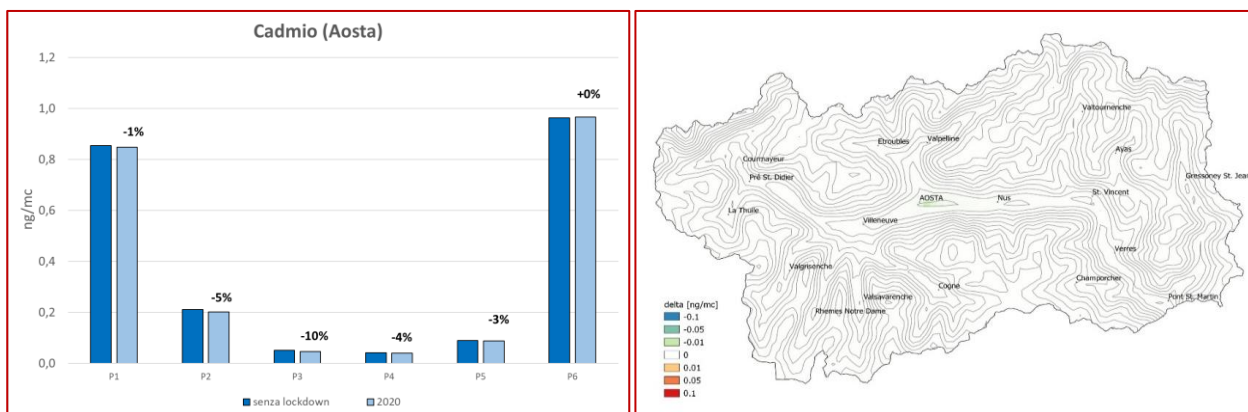


Figura 109: Cadmio: medie per periodo nei due scenari emissivi ad Aosta e mappa della differenza medie annua tra i due scenari

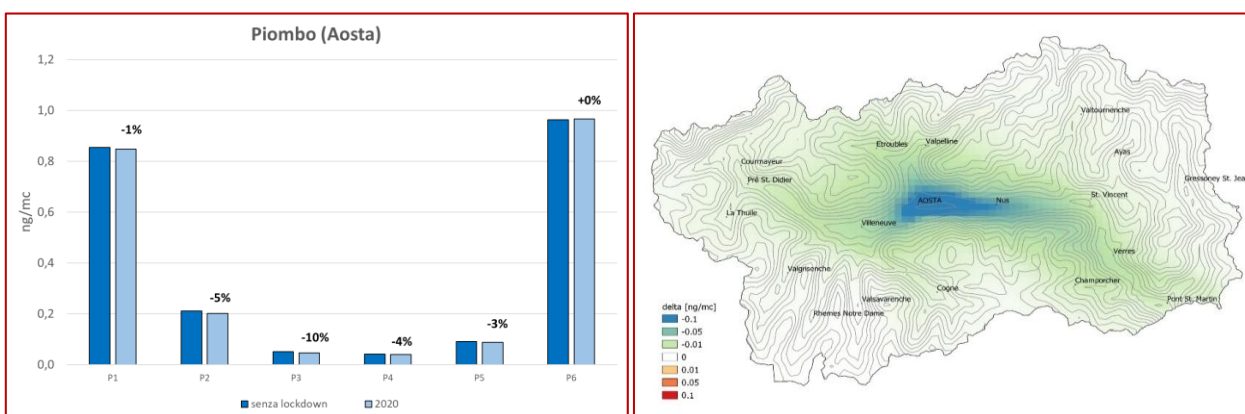


Figura 110: piombo: medie per periodo nei due scenari emissivi ad Aosta e mappa della differenza medie annua tra i due scenari

## Nichel

Essendo prodotto principalmente dal settore industriale, si osserva una riduzione superiore al 30% nel periodo marzo-aprile (P2-P3). Nella mappa regionale è evidente la riduzione delle concentrazioni di nichel in corrispondenza del polo siderurgico del capoluogo.

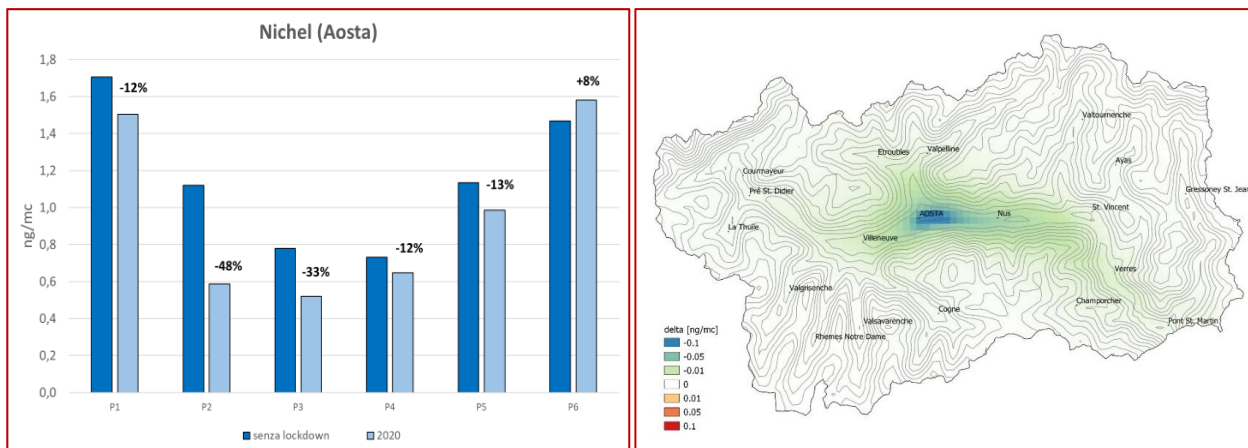


Figura 111: Nichel: medie per periodo nei due scenari emissivi ad Aosta e mappa della differenza medie annua tra i due scenari

## 4.2. Modelli statistici predittivi

I modelli statistici predittivi hanno avuto un notevole sviluppo negli ultimi anni grazie all'utilizzo delle tecniche di Machine Learning (cioè di apprendimento) che combinano statistica, data science e computing. Questi modelli, in sintesi, utilizzano dati storici per prevedere i valori futuri e vengono dapprima "allenati" sulla base di dati pregressi, utilizzando (per le applicazioni di qualità dell'aria) in input le misure di opportune variabili meteorologiche per descrivere lo stato dell'atmosfera e marcatori temporali (momento del giorno/settimana) quali proxy delle emissioni, e poi utilizzati per prevedere il valore delle concentrazioni di inquinanti. Esistono diversi modelli di questo tipo e molti utilizzano metodi di decisione ad albero: un albero decisionale è un metodo di apprendimento automatico basato su un algoritmo ricorsivo binario di classificazione. L'algoritmo suddivide ricorsivamente le osservazioni in due gruppi omologhi fino al raggiungimento della purezza del nodo. La natura ricorsiva dell'algoritmo consente di classificare correttamente i dati di input se gli alberi possono crescere fino alla loro massima profondità. Tuttavia, in alberi molto profondi, la divisione finale viene eseguita solo su due osservazioni. In questo lavoro è stato utilizzato il modello Random Forest (foresta casuale): è un metodo di decisione ad albero che utilizza anche tecniche di ensemble, nel senso che con questo metodo vengono elaborati molti alberi decisionali da una serie di dati di addestramento, scelti campionando a caso le osservazioni disponibili per  $n$  volte, e la previsione finale è l'insieme (cioè la media) delle  $n$  previsioni fornite da ogni singolo albero.

### Metodologia

Sono stati utilizzati i dati di concentrazione di NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> e PM<sub>10</sub>, aggregati su base giornaliera, e la previsione dei valori per l'anno è stata fatta addestrando il modello sui dati del quinquennio 2015-2019.

Le elaborazioni sono state fatte utilizzando il software *R*, un ambiente di sviluppo per elaborazioni dati e calcolo statistico, ed i package *rmweather* per il modello Random Forest, e *openair*, per la rappresentazione dei risultati.

Per il modello Random Forest sono state scelte come variabili esplicative fisiche (cioè meteorologiche) temperatura dell'aria, velocità e direzione del vento, umidità relativa, pressione atmosferica, radiazione solare, precipitazione (aggregati su base giornaliera come i dati di concentrazione) e come variabili temporali il giorno dell'anno ed il giorno della settimana.

Sono stati considerati i dati misurati ad Aosta, stazione di Piazza Plouves (fondo urbano), a Donnas, nella stazione in loc. Montey (fondo rurale), ed a Courmayeur, nella stazione di Entrèves (traffico rurale, sulla via di accesso al traforo del Monte Bianco).

### Test preliminare del modello

La capacità del modello di riprodurre le concentrazioni misurate è stata valutata effettuando 5 diversi run del modello: le concentrazioni per gli anni dal 2015 al 2019 sono state stimate allenando il modello sui dati del quinquennio precedente ed i risultati ottenuti sono stati soddisfacenti.

Nelle tabelle seguenti sono riportati i valori degli indici statistici utilizzati per la valutazione del modello:

- MB (Mean Bias), che fornisce una buona indicazione della sovrastima (se >0) o della sottostima (se <0) delle previsioni
- R (Pearson correlation coefficient), è una misura della bontà della relazione tra due variabili, ha valori compresi tra 0 e 1, dove 0 indica l'assenza di correlazione mentre 1 è il massimo.

NO <sub>2</sub>							
anno	periodo addestramento	Courmayeur		Aosta		Donnas	
		mB	R	mB	R	mB	R
2015	2010-2014	3.6	0.7	1.6	0.9	-0.0	0.9
2016	2011-2015	1.2	0.8	2.3	0.9	2.4	0.9
2017	2012-2016	0.4	0.8	-2.0	0.9	-0.0	0.9
2018	2013-2017	8.6	0.6	5.8	0.9	3.7	0.8
2019	2014-2018	8.0	0.7	2.1	0.9	4.5	0.8

Tabella 2: valutazione del metodo RF per la previsione di biossido di azoto

O <sub>3</sub>					
anno	periodo addestramento	Aosta		Donnas	
		mB	R	mB	R
2015	2010-2014	-4.1	0.9	-5.4	0.9
2016	2011-2015	0.5	0.9	-7.1	0.9
2017	2012-2016	-3.4	0.9	-5.6	0.9
2018	2013-2017	0.6	0.9	5.5	0.9
2019	2014-2018	1.5	0.9	-1.5	0.9

Tabella 3: valutazione del metodo RF per la previsione di ozono

PM10							
anno	periodo addestramento	Courmayeur		Aosta		Donnas	
		mB	R	mB	mB	R	mB
2015	2010-2014	4.0	0.6	3.1	0.8	-0.2	0.7
2016	2011-2015	1.6	0.6	4.4	0.8	1.4	0.7
2017	2012-2016	1.6	0.7	-1.7	0.8	1.2	0.7
2018	2013-2017	5.1	0.4	4.1	0.7	7.5	0.7
2019	2014-2018	4.1	0.4	2.2	0.7	2.2	0.7

Tabella 4: valutazione del metodo RF per la previsione di particolato

In sintesi, i dati delle tabelle precedenti indicano che il modello riproduce in maniera ottimale i valori di NO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub> e buona quelli di PM10. I valori negativi del 2017 rispecchiano il fatto che in quell'anno le concentrazioni misurate sono state superiori alla media del quinquennio considerato.

## Risultati

### Ossidi di azoto

Nei grafici è riportato l'andamento annuale delle concentrazioni di NO<sub>2</sub> **misurate e previste**, con il modello random forest, nei 3 siti di Aosta piazza Plouves, Donnas, Courmayeur.

I valori delle concentrazioni **previste** rappresentano quali sarebbero stati i livelli di ossidi di azoto senza misure di confinamento. Confrontati con i valori misurati, evidenziano la riduzione di inquinamento effettivamente prodotta dal confinamento.

Si vede infatti chiaramente un allontanamento delle due serie di dati in corrispondenza dell'inizio del lockdown a marzo; all'allentarsi delle restrizioni le due curve si riavvicinano, per poi allontanarsi nuovamente negli ultimi mesi dell'anno, anche se in maniera meno marcata, a causa di una parziale chiusura delle scuole, di una riduzione degli spostamenti locali e da fuori regione.

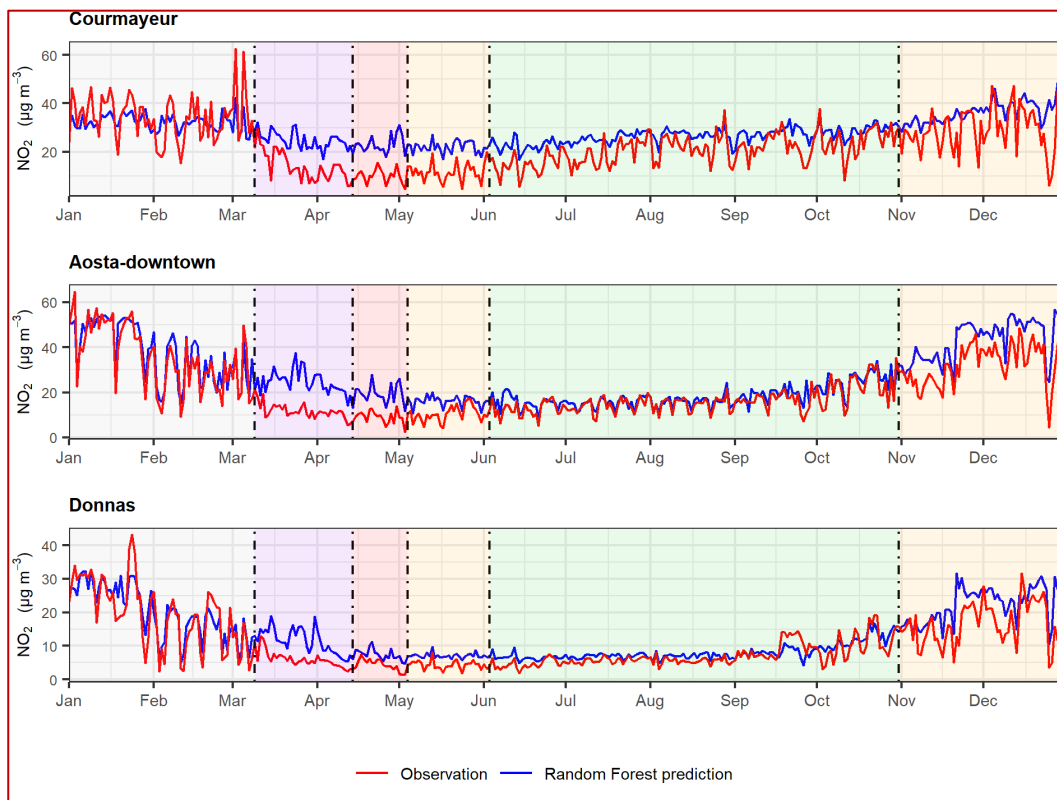


Figura 112: Confronto fra le concentrazioni di biossido di azoto misurate e previste con il modello random forest. Le fasce temporali colorate distinguono

### Ozono

Nei grafici è riportato l'andamento annuale delle concentrazioni di ozono misurate e previste con il modello random forest, nei siti di Aosta Piazza Plouves e Donnas. In Aosta, si osserva che i valori misurati sono superiori a quelli attesi nel mese di aprile, mentre a Donnas sia nel periodo marzo-aprile sia durante l'estate i valori misurati sono inferiori a quelli previsti.

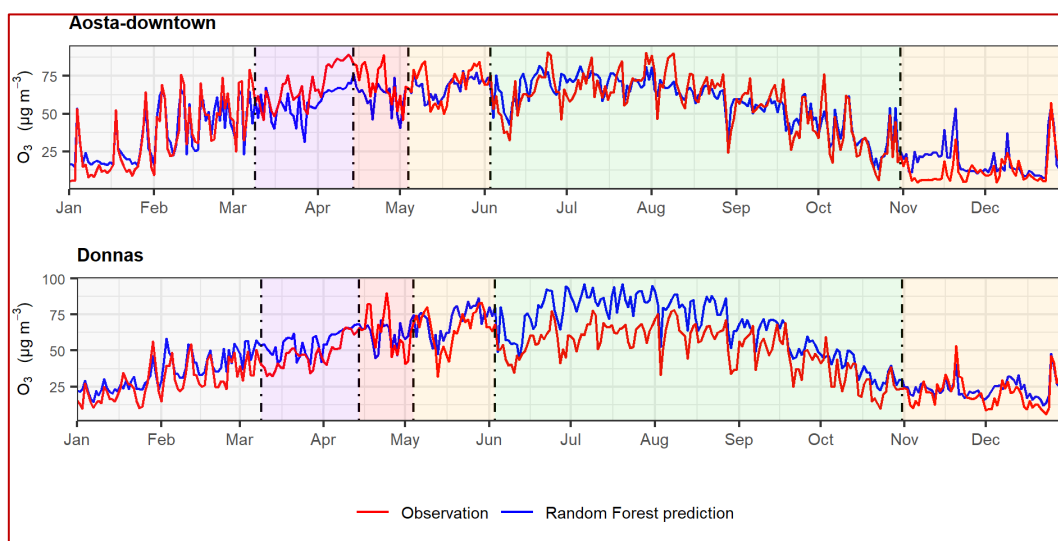


Figura 113: Confronto fra le concentrazioni di ozono misurate e previste con il modello random forest

### Particolato

Nei grafici è riportato l'andamento annuale delle concentrazioni di PM10 e PM2.5 misurate e previste con il modello random forest, nei 3 siti di Aosta Piazza Plouves, Donnas, Courmayeur.

Rispetto a NO2, le due serie di dati (misurate e previste) sono meno "distanti", e questo rispecchia quanto affermato in precedenza sul diverso comportamento dei due inquinanti, dovuto sia al meccanismo di formazione in aria (per il particolato è particolarmente la componente secondaria) sia alle dinamiche di dispersione e trasporto (per il particolato sono più importanti i fenomeni di trasporto).

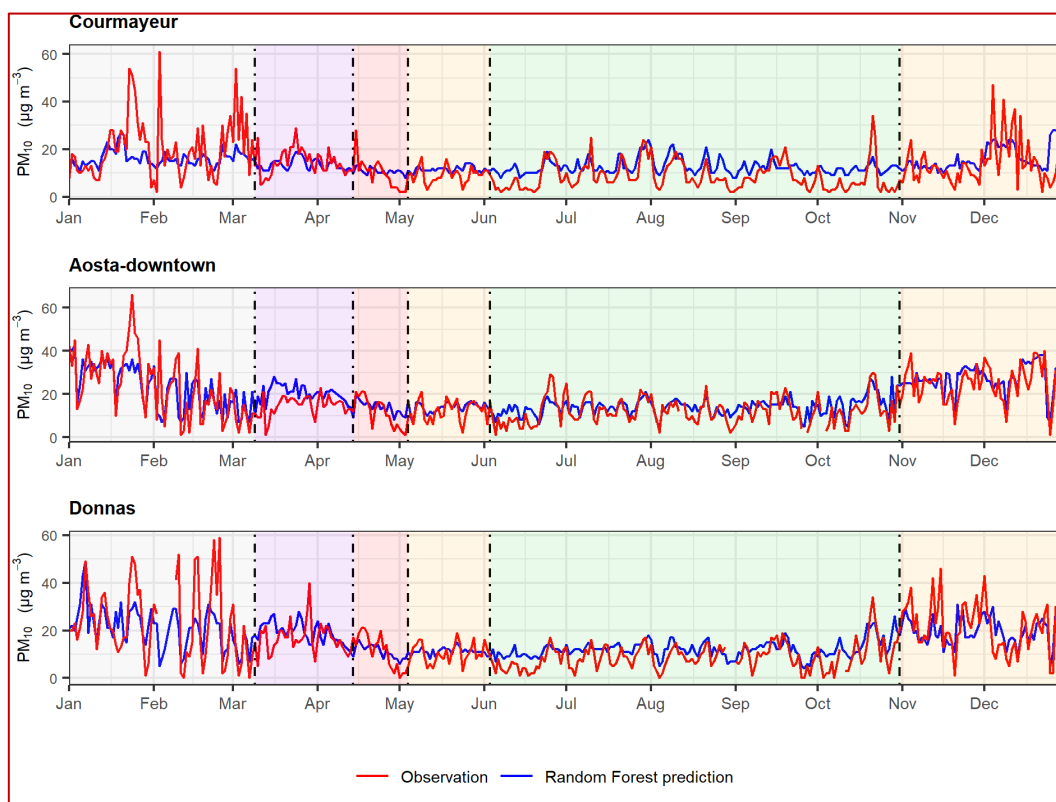


Figura 114: Confronto fra le concentrazioni di PM10 misurate e previste con il modello random forest

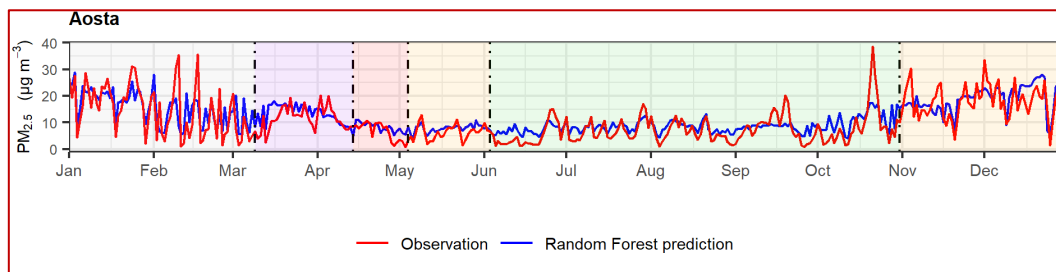


Figura 115: Confronto fra le concentrazioni di PM2.5 misurate e previste con il modello random forest

## 5. STIMA DELLE RIDUZIONI

### Metodologia

Sia il modello di chimica e trasporto sia il modello random forest, quando confrontiamo i dati “reali” del 2020 con quelli che si avrebbero avuto in condizioni “normali”, consentono di stimare la variazione delle concentrazioni:

- nel caso del modello di dispersione tali variazioni derivano esclusivamente dalle emissioni, in quanto le due simulazioni sono state realizzate con le stesse condizioni meteorologiche
- nel caso del modello random forest, le variazioni sono imputabili a “tutto quello che non è meteorologia”, cioè le emissioni ed il contributo alle concentrazioni derivante da fenomeni di trasporto a larga scala.

Le riduzioni dovute alle misure di contenimento sono state espresse, per ogni inquinante e per ogni periodo, come variazione percentuale:

$$\text{variazione}\% = 100 * \left( \frac{\text{CONC}_{\text{reale}} - \text{CONC}_{\text{prevista}}}{\text{CONC}_{\text{prevista}}} \right)$$

### Risultati

Nei paragrafi successivi sono riportate, in forma grafica le variazioni percentuali per inquinante, ottenuta mediano i risultati dei due modelli.

#### Ossidi di azoto

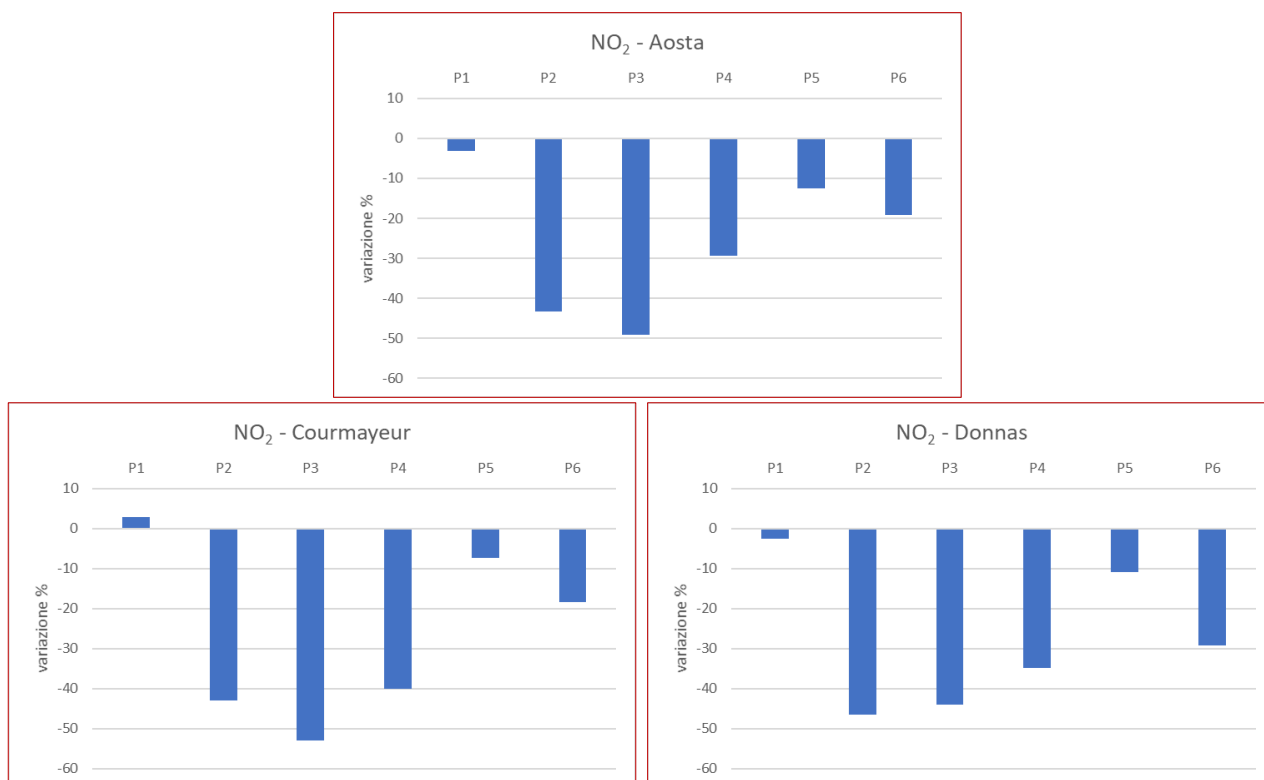


Figura 116: Riduzioni delle concentrazioni di biossido di azoto dovute alle misure di contenimento

## Ozono

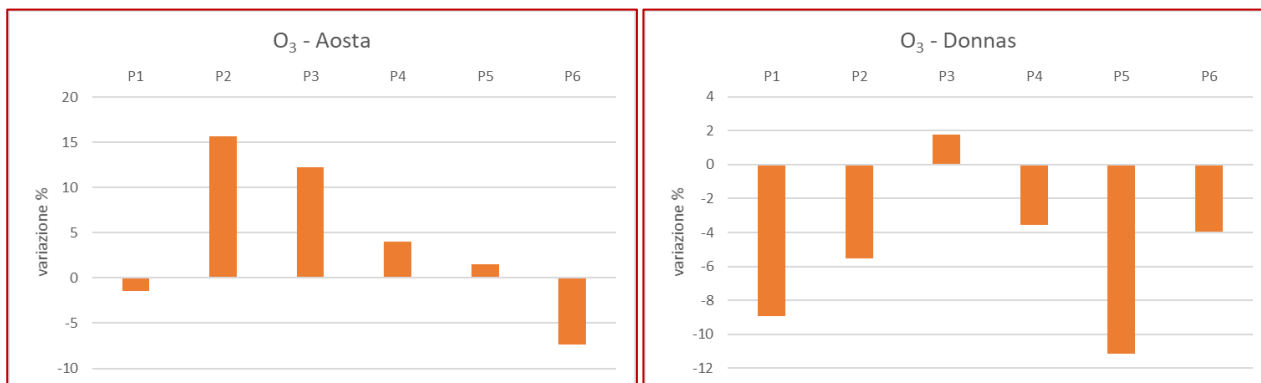


Figura 117: Riduzioni delle concentrazioni di ozono dovute alle misure di contenimento

## Particolato

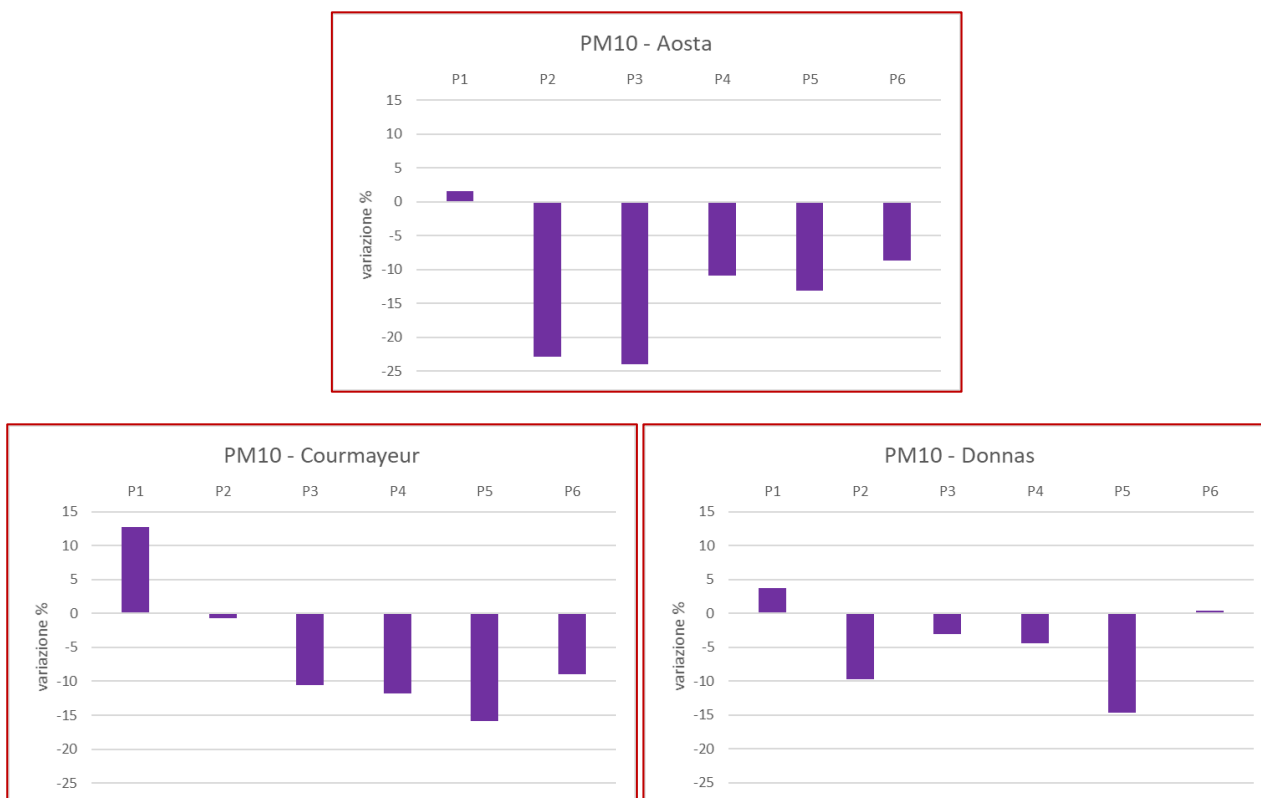


Figura 118: Riduzioni delle concentrazioni di particolato dovute alle misure di contenimento

## Considerazioni finali

Il modello FARM e il modello random forest (4.1 e 4.2), seppur con qualche differenza, sono in sostanziale accordo, stimando riduzioni anche importanti per gli ossidi di azoto e contenute per il particolato; queste riduzioni sono maggiori nella primavera 2020, ma significative anche negli ultimi mesi dell'anno.



## 6. APPROFONDIMENTI SUL PARTICOLATO

### 6.1. Fenomeni di trasporto a larga scala

L'atmosfera è un fluido continuo, all'interno del quale le diverse masse d'aria possono spostarsi con relativa libertà, guidate dai sistemi meteorologici e dall'interazione con la superficie della Terra. Per questo motivo, la composizione atmosferica e, per estensione, la qualità dell'aria che respiriamo, possono essere influenzate da masse d'aria che arrivano anche da molto lontano. Anche nel caso peculiare della Valle d'Aosta, un territorio dall'orografia complessa e nel cuore della catena alpina, alcune situazioni che esulano dalle dinamiche prettamente locali possono avere un impatto considerevole sulla qualità dell'aria e sull'inquinamento. Questi eventi possono trasportare sul territorio particolato atmosferico (aerosol o PM, da particulate matter) originatosi altrove, causando un peggioramento nella qualità dell'aria che può essere talvolta superiore a quello attribuibile alle sole emissioni locali, mediamente contenute.

I più comuni episodi di trasporto di aerosol di origine non locale sul territorio valdostano sono le avvezioni di masse d'aria dalla Pianura Padana e il trasporto di polveri desertiche. Le prime sono molto frequenti, potendo accadere fino a un giorno su due nelle stagioni più favorevoli (ad esempio in estate). Il trasporto di polveri desertiche è invece un fenomeno meno ricorrente, ma spesso molto vistoso, a causa del notevole impatto sulla qualità dell'aria e anche della possibile deposizione delle caratteristiche polveri color ocra sulle superfici (ad esempio sulle auto, o sul manto nevoso) **(Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.)**.



*Figura 119: Trasporto e deposito di polveri desertiche*

Alcuni degli eventi più rilevanti di questo tipo, identificati durante l'anno 2020, sono stati approfonditi nel seguito a partire dai dati che è stato possibile raccogliere grazie alla strumentazione di ARPA VdA. Si sono utilizzate in particolare:

- le misure di concentrazione del particolato in superficie in alcune stazioni della rete ARPA, ottenute con strumenti come il Fidas200E Palas, in grado di fornire le concentrazioni nelle varie classi di dimensione delle particelle (PM1, PM2.5, PM4, PM10)
- le osservazioni dell'Automated Lidar Ceilometer (o in breve ALC) collocato presso la sede ARPA di Saint-Christophe: questo strumento permette di rivelare gli strati carichi di aerosol e le nubi presenti sulla verticale, alle diverse quote

È stato poi utilizzato il calcolo delle retrotraiettorie delle masse d'aria per determinare l'origine di queste ultime: sfruttando i modelli meteorologici, è possibile fare delle simulazioni "all'indietro" per capire da dove è partita, probabilmente, la massa d'aria osservata in un certo punto. Le retrotraiettorie sono simulate con il modello HYSPLIT, reso disponibile pubblicamente dalla NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

## Trasporto di inquinanti dalla Pianura Padana

Data la notevole frequenza di questi episodi, e il loro impatto sulla qualità dell'aria in Valle d'Aosta, ARPA ha condotto degli approfondimenti che hanno portato alla pubblicazione di due articoli scientifici<sup>2</sup>. Questi studi hanno permesso di identificare:

1. i contesti meteorologici che favoriscono questo tipo di eventi: nelle stagioni calde, il meccanismo che guida il trasporto di inquinanti dalla pianura è il sistema di brezze che si sviluppano tra la pianura e la valle; il surriscaldamento diurno favorisce infatti il moto dell'aria dalla pianura verso l'interno della valle, con correnti orientali che sono tipiche sul fondovalle valdostano nelle ore centrali del giorno, e che possono trasportare inquinanti dal bacino padano. Nelle stagioni fredde, invece, possono essere le correnti sinottiche orientali a causare questo tipo di evento, specialmente nelle situazioni di forte stabilità atmosferica sul nord Italia: in questi casi, contraddistinti da calma di vento vicino alla superficie e frequenti inversioni termiche, gli inquinanti tendono ad accumularsi vicino al suolo, a causa dello scarso rimescolamento.

2. le caratteristiche del particolato atmosferico trasportato: in questi eventi, tipicamente, l'aerosol trasportato è costituito da particelle fini (diametro inferiore a 2.5 µm, PM<sub>2.5</sub>), di origine prevalentemente urbana o industriale. La composizione chimica mostra una maggioranza di particolato inorganico, composto da solfati e nitrati.

Di seguito vengono presentati gli eventi di avvezione dalla Pianura Padana più rilevanti identificati nell'anno 2020.

### Evento del 7-10 febbraio 2020

Dal pomeriggio del 7 (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) a metà giornata del 10 febbraio, un trasporto di inquinanti dalla Pianura Padana ha coinvolto l'interno della valle. Questo evento ha avuto luogo in un tipico contesto anticiclonico invernale, con un campo di alta pressione sul Mediterraneo che ha prodotto condizioni molto stabili in pianura. Ciò ha permesso l'accumulo di inquinanti vicino alla superficie, con l'aiuto di frequenti inversioni termiche. Con il prolungarsi delle condizioni di stabilità, le masse d'aria inquinata hanno iniziato a insinuarsi nel fondovalle valdostano. Le concentrazioni di particolato sono aumentate progressivamente, raggiungendo massimi superiori a 60-70 µg/m<sup>3</sup> tra il 9 e il 10 febbraio, con particolare abbondanza di particelle molto fini (PM<sub>1</sub>, **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). Inoltre si osserva che i valori si mantengono non trascurabili anche durante le ore notturne. È interessante notare la capacità delle masse d'aria inquinata di infiltrarsi in tutto il fondovalle: dal 9 febbraio infatti questo fenomeno è visibile anche a Courmayeur – Entrèves (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

---

<sup>2</sup> H. Diémoz, F. Barnaba, T. Magri, G. Pession, D. Dionisi, S. Pittavino, I. K. F. Tombolato, M. Campanelli, L. S. Della Ceca, M. Hervo, L. Di Liberto, L. Ferrero e G. P. Gobbi, Transport of Po Valley aerosol pollution to the northwestern Alps – Part 1: Phenomenology, Atmos. Chem. Phys. 19, 3065-3095 (2019).

H. Diémoz, G. P. Gobbi, T. Magri, G. Pession, S. Pittavino, I. K. F. Tombolato, M. Campanelli e F. Barnaba, Transport of Po Valley aerosol pollution to the northwestern Alps – Part 2: Long-term impact on air quality, Atmos. Chem. Phys. 19, 10129-10160 (2019).

A metà giornata del 10 febbraio, l'evento di avvezione ha avuto bruscamente termine a causa di un cambiamento nel regime meteorologico: l'ingresso di impetuose correnti occidentali di Foehn, ha letteralmente “spazzato” il fondovalle, ripulendolo dalle grandi quantità di particolato.

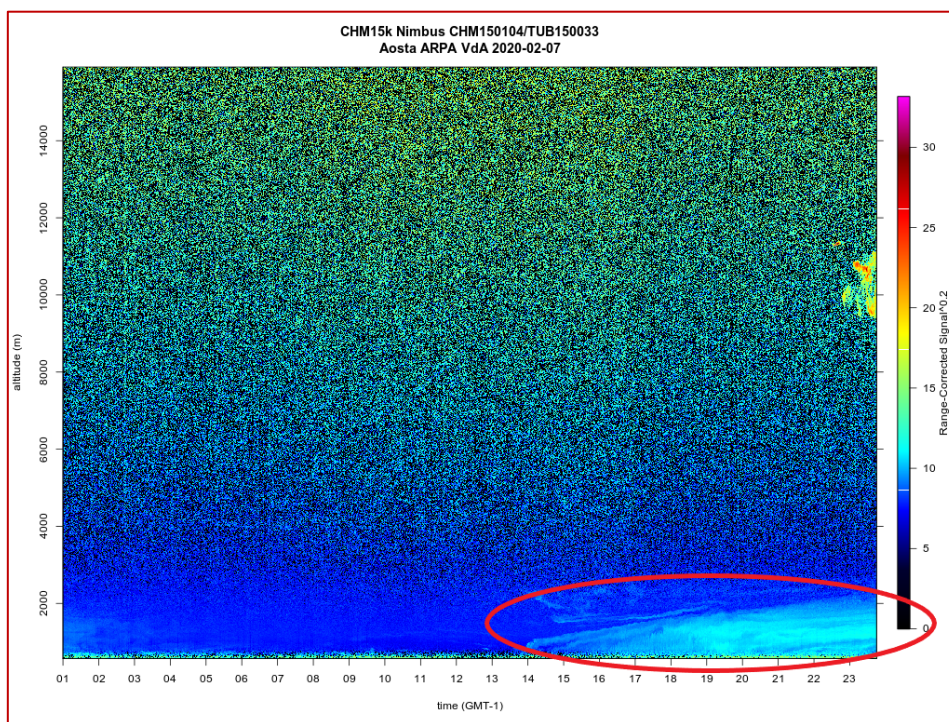


Figura 120: Elaborazione del segnale ALC, per il giorno 7 febbraio 2020. A bassa quota persiste lo strato carico di aerosol, mentre le macchie arancioni in quota indicano la presenza di qualche nube.

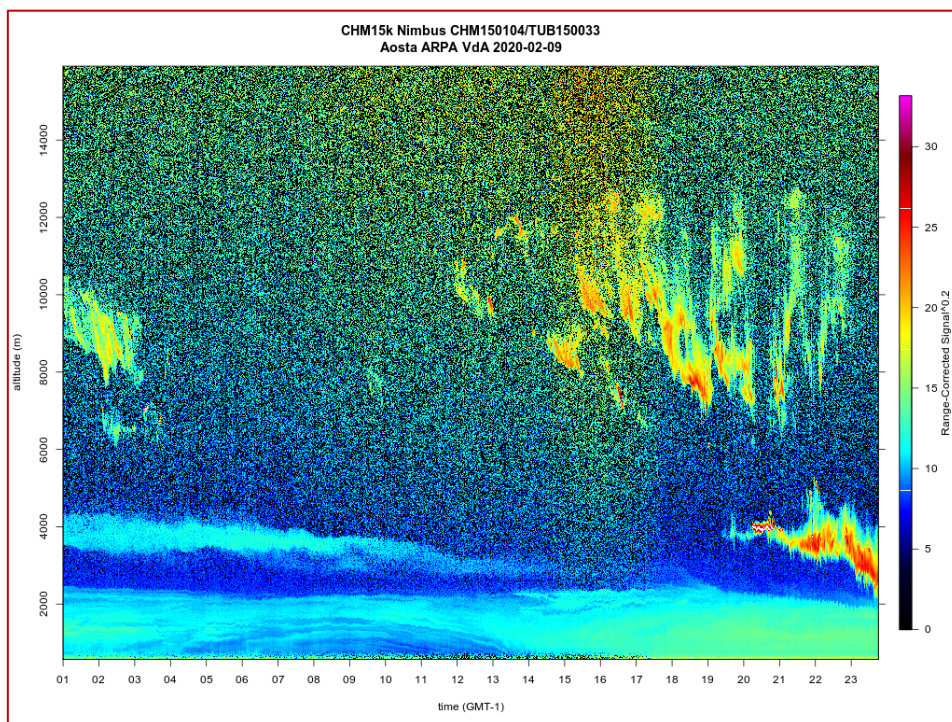


Figura 121: Elaborazione del segnale ALC, per il giorno 9 febbraio 2020. A bassa quota persiste lo strato carico di aerosol, mentre le macchie arancioni in quota indicano la presenza di qualche nube.

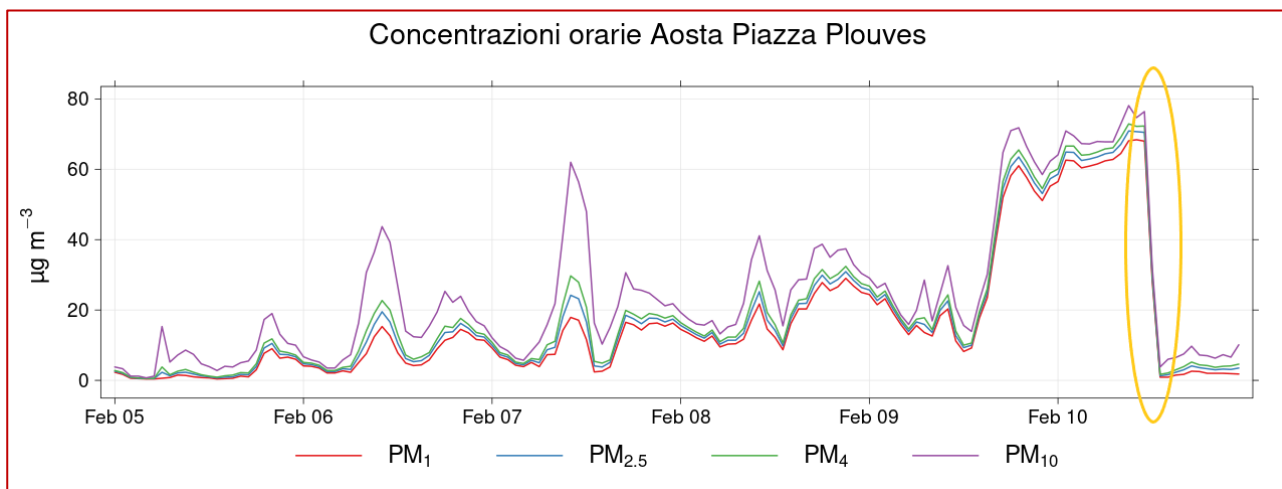


Figura 122: Concentrazioni orarie di particolato rilevate in piazza Plouves, Aosta, 5-10 febbraio 2020; viene evidenziato il momento di ingresso del Foehn, che fa crollare bruscamente le concentrazioni.

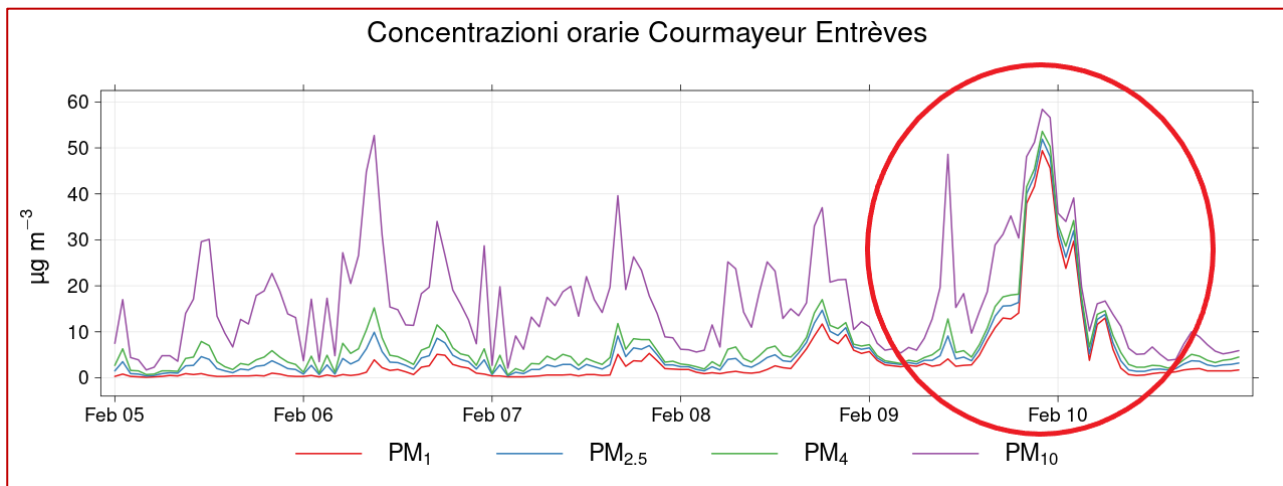


Figura 123: Concentrazioni orarie di particolato rilevate a Courmayeur Entrèves, viene evidenziato l'aumento delle concentrazioni di fondo per l'arrivo della massa d'aria.

### Evento di inizio aprile 2020

Nella prima metà di aprile 2020 si sono ripresentate a più riprese situazioni di trasporto di inquinanti dalla pianura in Valle d'Aosta. Ciò è stato favorito da frequenti condizioni anticicloniche, e conseguente stabilità. Il riscaldamento nelle ore diurne ha attivato circolazioni di brezza tra la pianura e la valle, ben identificabili dai dati di vento delle stazioni meteorologiche. Le brezze hanno favorito il trasporto di inquinanti, in particolare intorno ai giorni 4 e 5 aprile. Anche in questa situazione, una considerevole quantità di particolato fine, di origine urbana/industriale, è stata rilevata dalle strumentazioni ARPA, sia in superficie (es. stazioni di Aosta-piazza Plouves e Courmayeur-Entrèves, **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) sia in quota nell'atmosfera (grazie all'Automated Lidar Ceilometer, in grado di identificare il particolato lungo la colonna verticale, **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). Interessante anche che durante questi eventi i valori notturni si mantengono significativi, quando normalmente si abbassano.

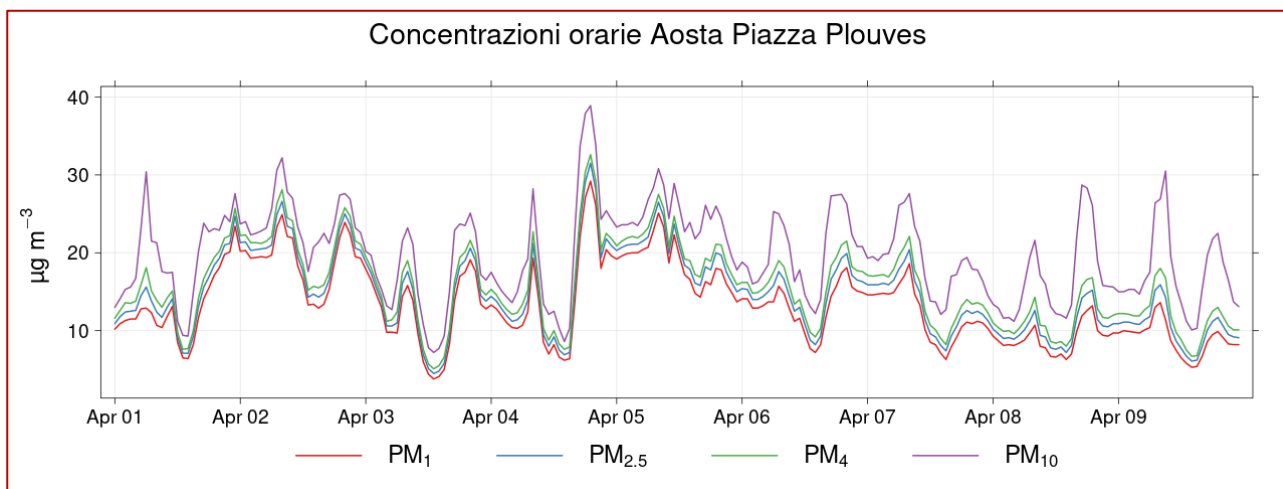


Figura 124: Concentrazioni orarie di particolato rilevate in piazza Plouves, Aosta, prima decade di aprile 2020

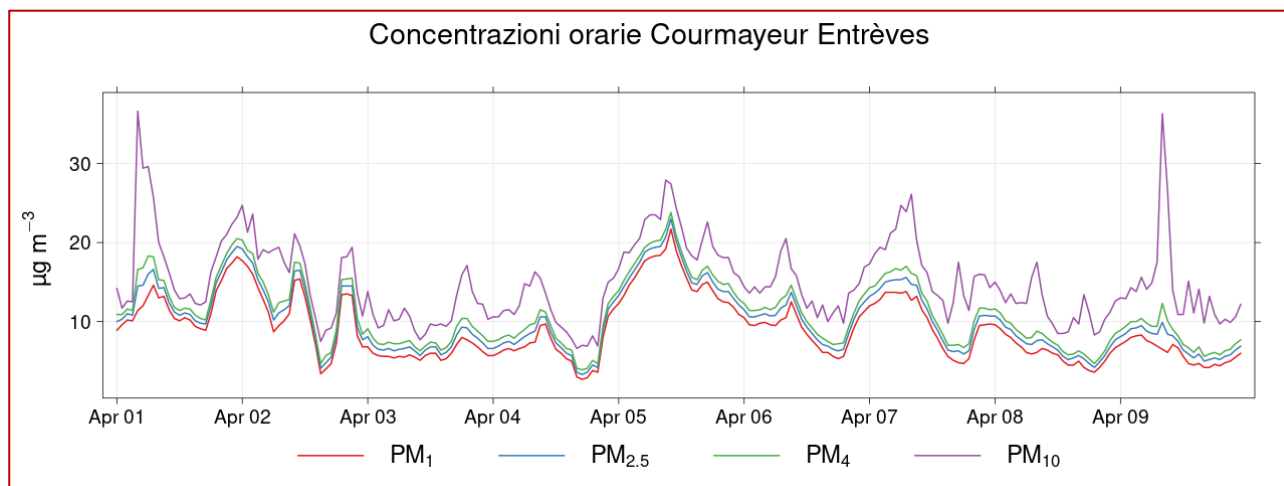


Figura 125: Concentrazioni orarie di particolato rilevate a Courmayeur – Entrèves, prima decade di aprile 2020

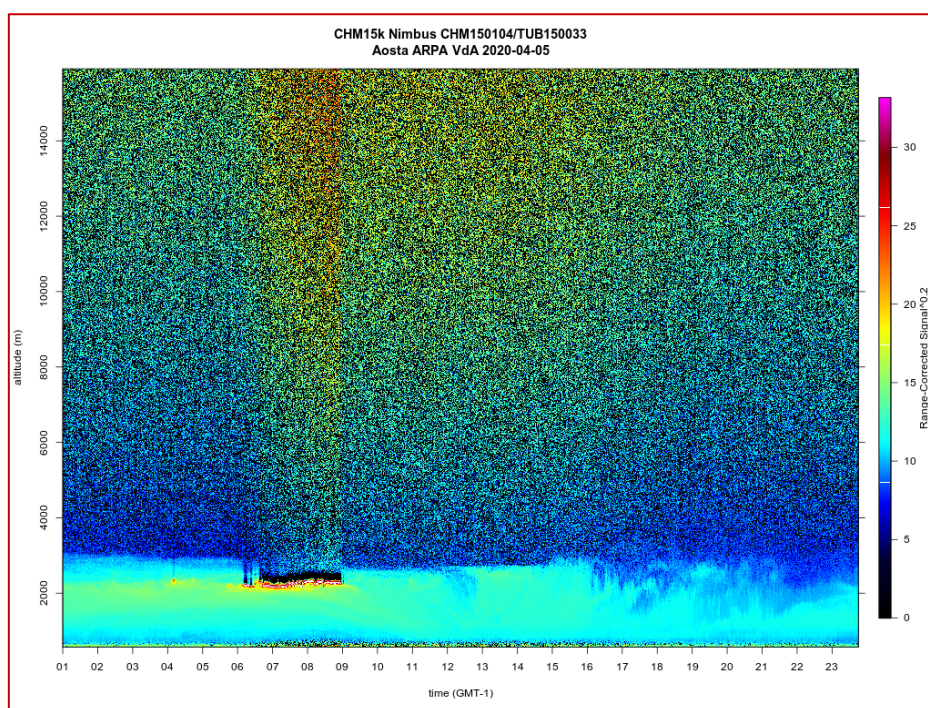


Figura 126: Elaborazione del segnale dell'ALC, 5 aprile 2020, che evidenzia il carico di aerosol vicino alla superficie.

### Evento del 19-22 agosto 2020

Un evento di avvezione nel pieno della stagione estiva si è verificato tra il 19 e il 22 agosto (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). Anche in questo caso, una situazione di alta pressione e stabilità, con lo sviluppo di brezze diurne tra pianura e valle, ha permesso il trasporto di inquinanti all'interno della catena alpina. Nelle ore più calde del giorno sono state misurate brezze orientali con velocità anche superiori ai 40 km/h, quindi piuttosto intense. In questa situazione le concentrazioni di particolato in superficie non hanno raggiunto valori particolarmente elevati, probabilmente perché l'aerosol si è distribuito più uniformemente lungo la verticale. La **Errore. L'origine riferimento**

Sezione Aria e Atmosfera

**non è stata trovata.** permette di identificare l'arrivo degli inquinanti dal pomeriggio; lo strato di aerosol si estende fino a circa 2500 metri, per poi ampliarsi ulteriormente nei giorni successivi (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). La maggiore estensione verticale dello strato di aerosol, e i valori di concentrazione non particolarmente elevati al suolo, sono coerenti con il maggior rimescolamento che avviene nei bassi strati nelle stagioni calde, a causa del forte riscaldamento del suolo.

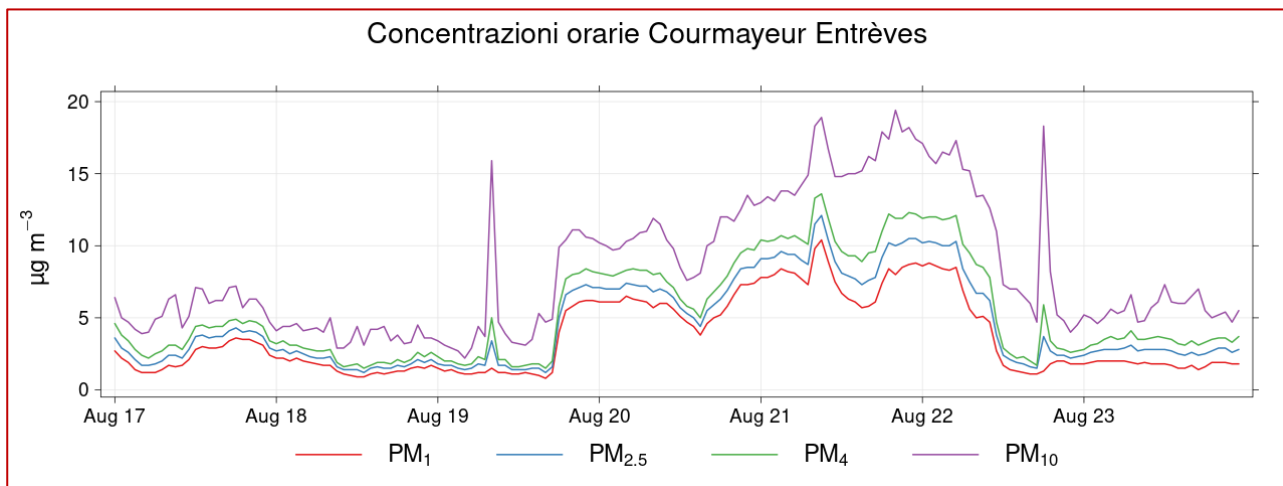


Figura 127: Concentrazioni di particolato a Courmayeur – Entrèves, 17-23 agosto 2020. È ben visibile l'aumento del particolato nei giorni 19-22.

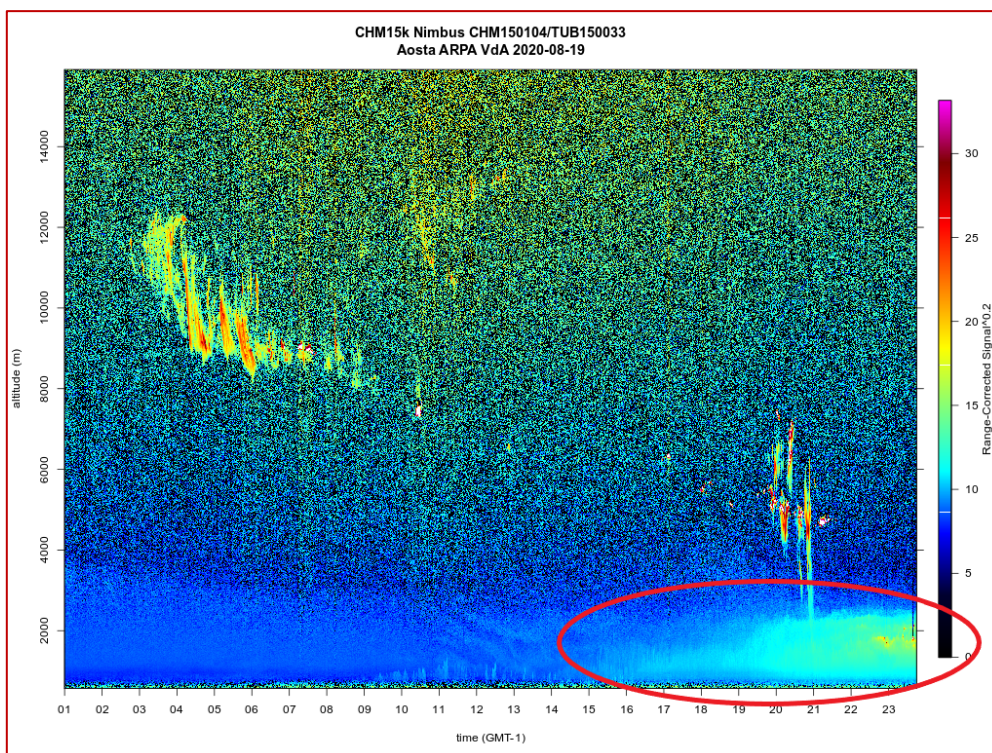


Figura 128: Elaborazione del segnale dell'ALC per il 19 agosto 2020, che permette di notare l'arrivo dell'aerosol nel pomeriggio.

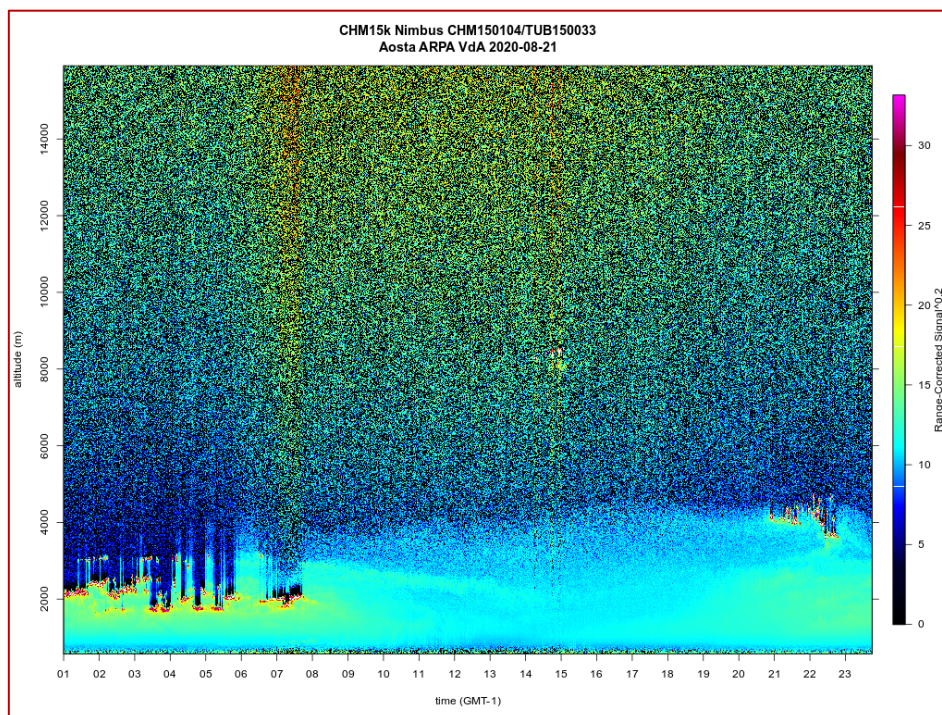


Figura 129: Elaborazione del segnale dell'ALC per il 21 agosto 2020; lo strato carico di aerosol si è esteso fino a circa 4000 metri. Alcune nubi basse disturbano il segnale tra la notte e il mattino.

## Trasporto di polveri desertiche

Le polveri desertiche, nella quasi totalità dei casi, vengono sollevate dal deserto del Sahara e trasportate fin sull'Europa da sistemi meteorologici a scala continentale. Questo tipo di particolato atmosferico è costituito prevalentemente da particelle grossolane (con diametro superiore ai 2.5  $\mu\text{m}$ ) di origine minerale. Le occasioni di trasporto di polveri possono vedere un aumento delle concentrazioni di particolato fino a valori molto alti. La polvere desertica può avere anche effetti a livello climatico: la deposizione sul manto nevoso, infatti, riduce le capacità di quest'ultimo di riflettere la luce solare, causandone una fusione più rapida.

### Evento del 22-26 gennaio 2020

Un primo episodio che viene presentato è quello che ha inizio il 22 gennaio 2020. Il primo indizio rivelatore dell'evento è ben visibile nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**: uno strato di aerosol ben definito che compare in quota (tra i 3000 e i 4000 metri), segno quindi di un probabile trasporto a larga scala, e non a sorgenti locali o ravvicinate. Per capire l'origine della massa d'aria, è possibile utilizzare il calcolo delle retrotraiettorie. La simulazione svolta per il 22 gennaio mostra senza ombra di dubbio che la provenienza dello strato di aerosol è nordafricana (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). Il trasporto è avvenuto a causa di una depressione atlantica che si è portata a latitudini particolarmente basse, sul Marocco, favorendo il sollevamento di polveri che sono poi state trasportate sull'Europa dalle correnti da sud o sud-ovest.

Sulla Valle d'Aosta, le conseguenze sono state più evidenti nei giorni successivi: lo strato infatti si è mantenuto inizialmente in quota, per depositarsi vicino alla superficie solo in un secondo momento (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata. Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). Quando ciò è avvenuto, le concentrazioni di

Sezione Aria e Atmosfera



aerosol sono aumentate fino a valori notevoli: picchi di PM10 superiori a 80-100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  e 60-80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  sono stati registrati rispettivamente nelle stazioni di Aosta e Courmayeur nei giorni 23 e 24 gennaio.

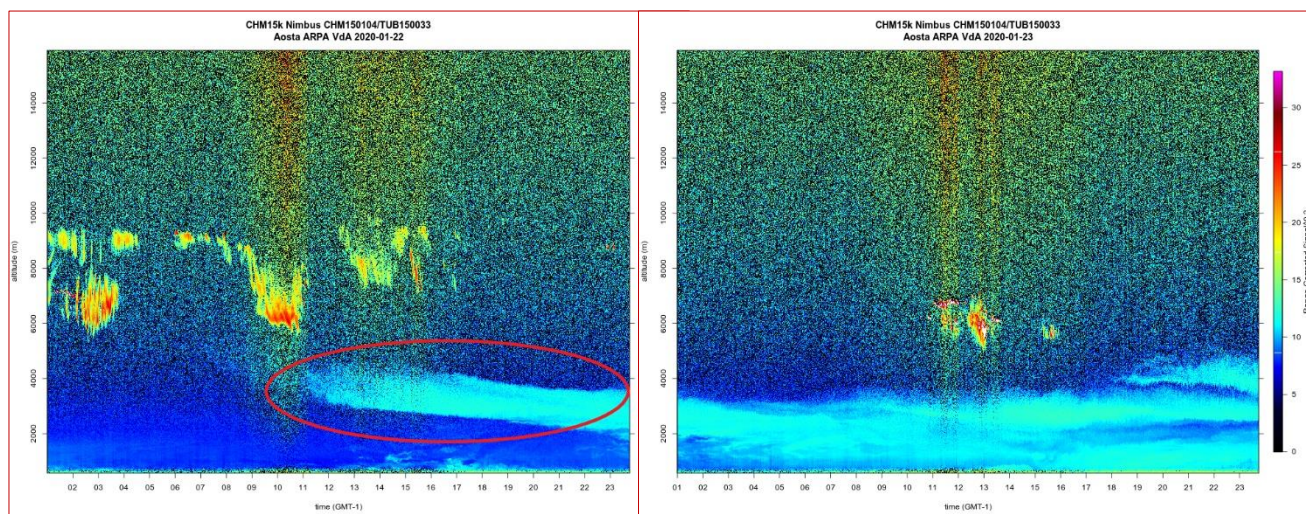


Figura 130: Elaborazione del segnale dell'ALC. Il 22 gennaio 2020 risulta ben evidente lo strato di aerosol in quota che compare durante il giorno, il 23 gennaio 2020 le polveri interessano anche gli strati più a contatto con la superficie.

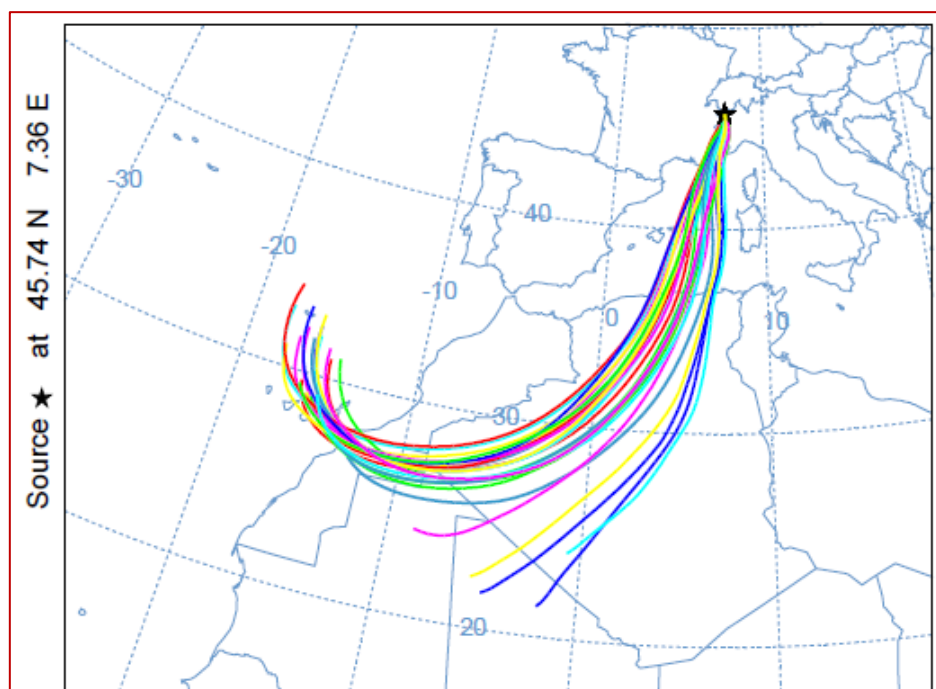


Figura 131: Simulazione delle retrotraiettorie per un punto a 3500 metri di quota sopra Saint-Christophe, alle 21 locali del 22 gennaio 2020. Indubbiamente la provenienza della massa d'aria è nordafricana.

### Evento del 3 febbraio 2020

L'evento di trasporto di polveri del 3 febbraio 2020 ha avuto delle caratteristiche molto particolari, differenti da quelle riscontrate nella maggior parte dei casi. In modo del tutto anomalo, le polveri hanno valicato le Alpi in seno a un flusso di Foehn, che invece di norma ha la tendenza a rimuovere il particolato presente in precedenza. In questa situazione, invece, al flusso favonico è stato associato un aumento molto marcato della quantità di aerosol: alcune stazioni ARPA, sia sul fondovalle sia a quota maggiore, hanno raggiunto picchi di PM10 superiori a 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , con abbondanza di particelle grossolane (Errore. L'origine riferimento non è stata trovata. e Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.).

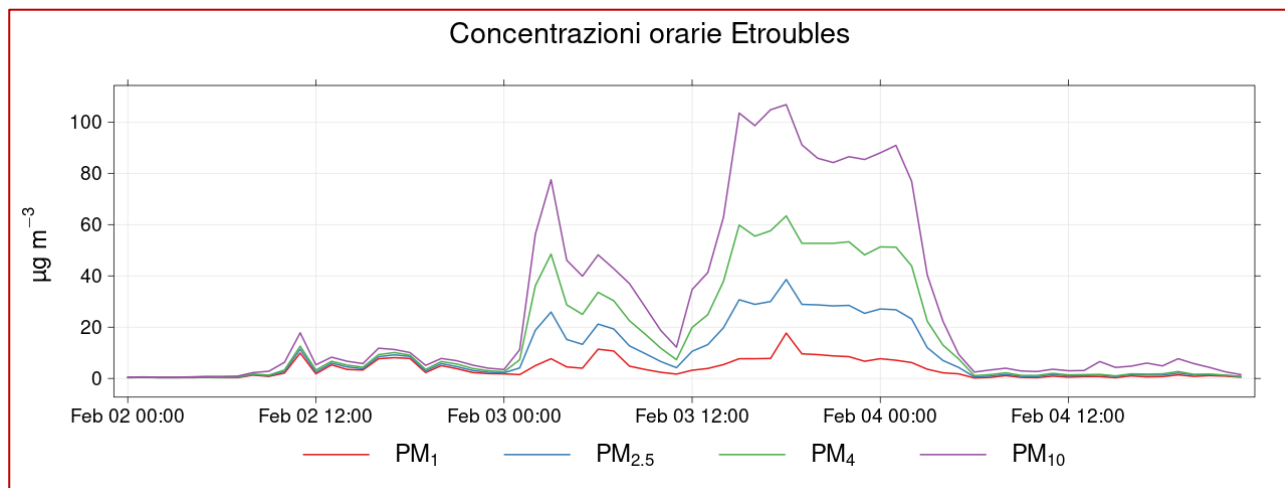


Figura 132: Concentrazioni di particolato a Etroubles, 2-4 febbraio 2020. Colpisce il notevole aumento di aerosol osservato il 3 febbraio, con abbondanza di particelle grossolane tipiche dei trasporti dal deserto.

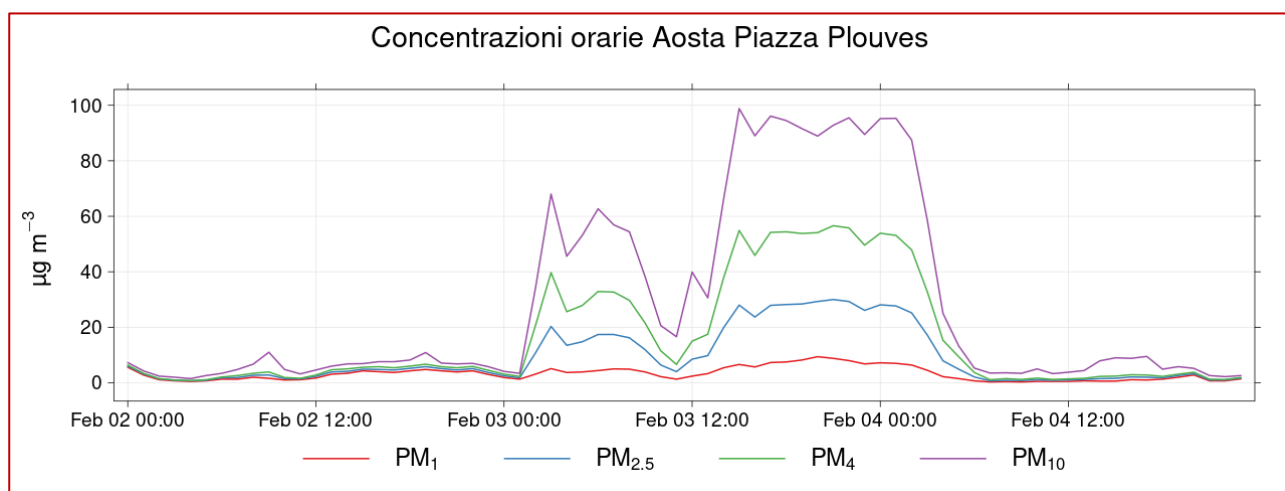


Figura 133: Concentrazioni di particolato ad Aosta – piazza Plouves, 2-4 febbraio 2020.

Questo evento è stato causato da un forte anticiclone sull'area iberica (regione libera da nubi estese nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), che ha fatto compiere alle polveri sollevate dal Sahara un'ampia traiettoria ad arco sull'Atlantico, per poi dirigerle verso il cuore dell'Europa.

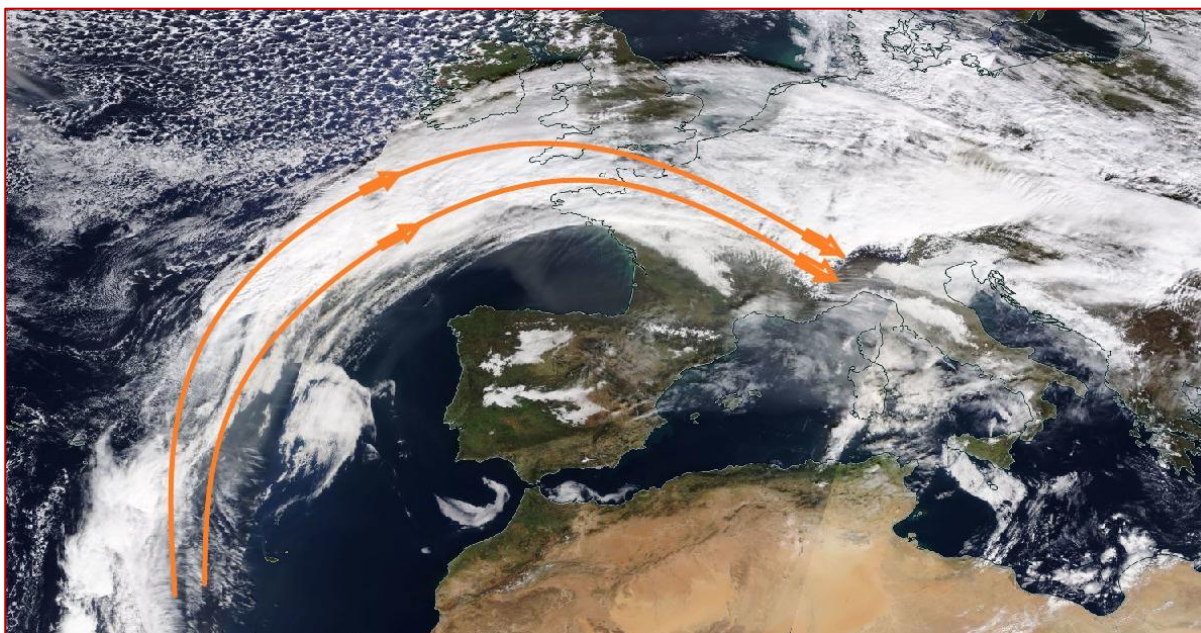


Figura 134: Immagine satellitare (NASA Terra) del 3 febbraio 2020. L'ampio arco di nubi rivela la traiettoria seguita dalle polveri africane nel trasporto verso l'Europa, evidenziata anche dalle frecce arancioni.

### Evento del 7-9 novembre 2020

Un altro evento di trasporto di polveri sahariane ha avuto luogo tra il 7 e il 9 novembre 2020. Come nel caso del 22-26 gennaio, uno strato ricco di aerosol in alta quota è stato rilevato a partire dal giorno 7 grazie all'ALC (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). L'analisi delle retrotraiettorie ha confermato la provenienza nordafricana della massa d'aria, come viene mostrato nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**. In questo caso la deposizione delle polveri in superficie è stata inferiore, e non sono stati raggiunti picchi di concentrazione del particolato particolarmente rilevanti.

Questo evento di trasporto è stato guidato, come avviene di frequente (anche nel caso del 22-26 gennaio ad esempio), da una depressione atlantica che si è portata a latitudini piuttosto basse, al largo del Portogallo e quasi spingendosi fino alle Canarie. Questo tipo di configurazione meteorologica è in grado di attivare intense correnti da sud-ovest dal Nordafrica verso il Mediterraneo, favorendo il sollevamento e il trasporto di polveri dal deserto.

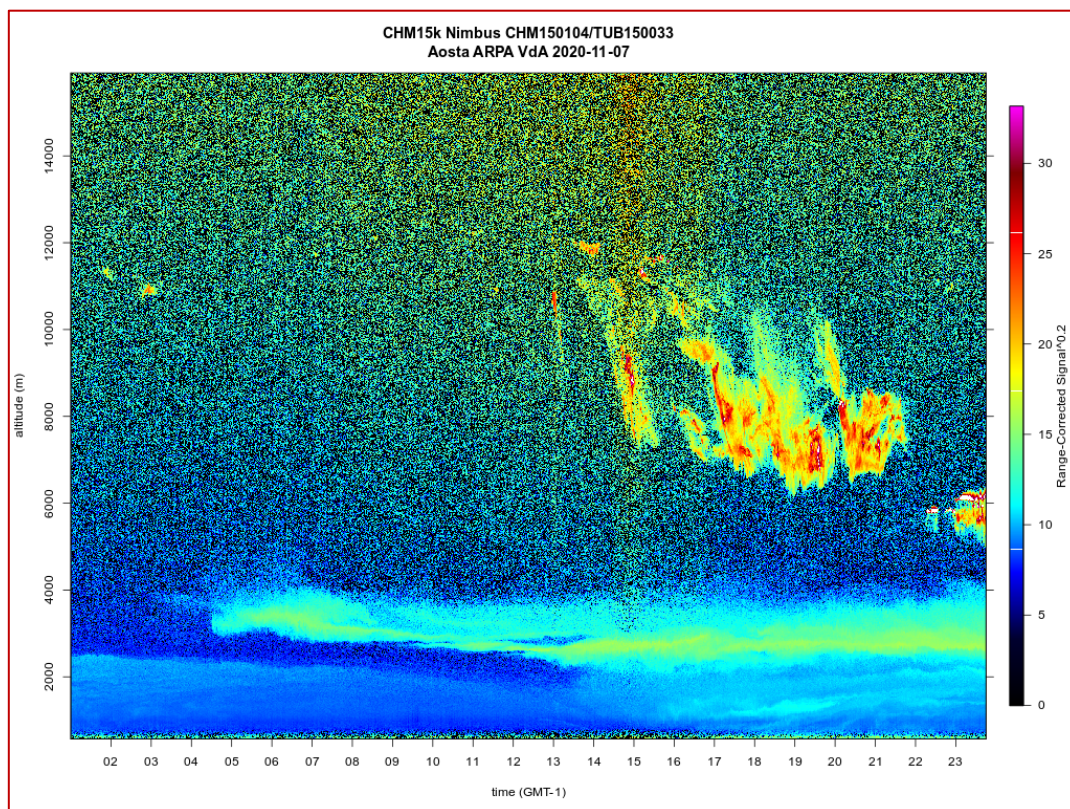


Figura 135: Elaborazione del segnale dell'ALC, 7 novembre 2020. È evidente lo strato carico di aerosol che compare in quota al mattino.

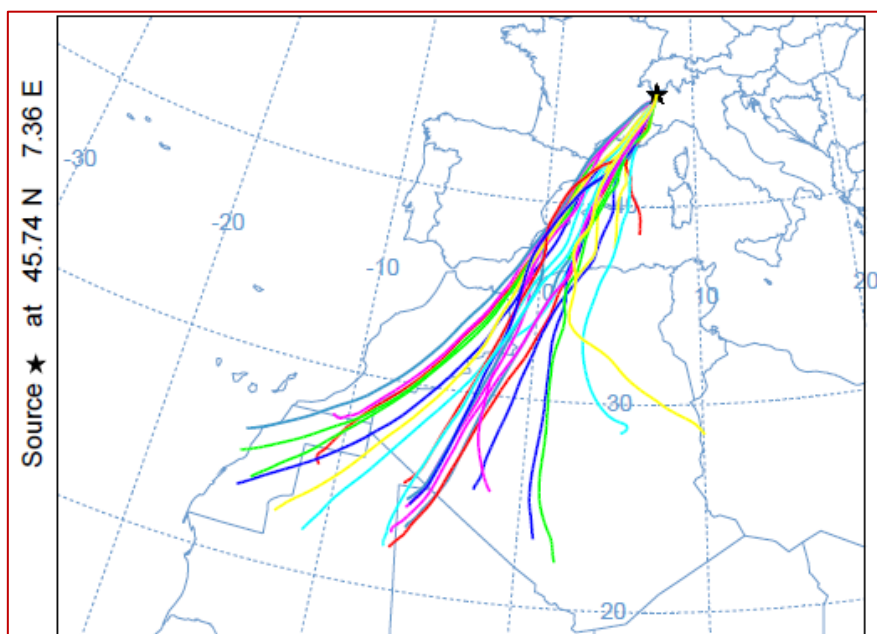


Figura 136: Simulazione delle retrotraiettorie per un punto a 3500 metri di quota sopra Saint-Christophe, alle 13 locali del 7 novembre 2020. Anche in questo caso si conferma la provenienza nordafricana della massa d'aria.

## Considerazioni finali

Gli eventi di trasporto di particolato atmosferico non locale in Valle d'Aosta sono da tenere in attenta considerazione nelle valutazioni sulla qualità dell'aria. Mediamente infatti le emissioni prodotte in loco sono ridotte, e alcuni di questi eventi possono essere forieri di concentrazioni di inquinanti ben sopra la media, sia sul fondovalle, ma anche in stazioni in quota, dove solitamente l'aria è molto pulita.

Nell'anno 2020, caratterizzato in alcuni periodi dalle restrizioni dovute alla pandemia di COVID-19, il contributo degli eventi a larga scala è stato cruciale nella valutazione dei cambiamenti nella qualità dell'aria a seguito delle norme di contenimento del contagio. Ciò è stato affrontato in modo più approfondito in uno studio condotto dall'ARPA ([3]). Da questo lavoro è emerso, ad esempio, che nel periodo primaverile (in corrispondenza del primo lockdown) si sono verificati ripetuti eventi di avvezione dal bacino padano, a causa di frequenti flussi orientali (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). Non considerando nel modo corretto queste situazioni, la diminuzione nelle concentrazioni di aerosol dovuta alle restrizioni sarebbe stata molto sottostimata.

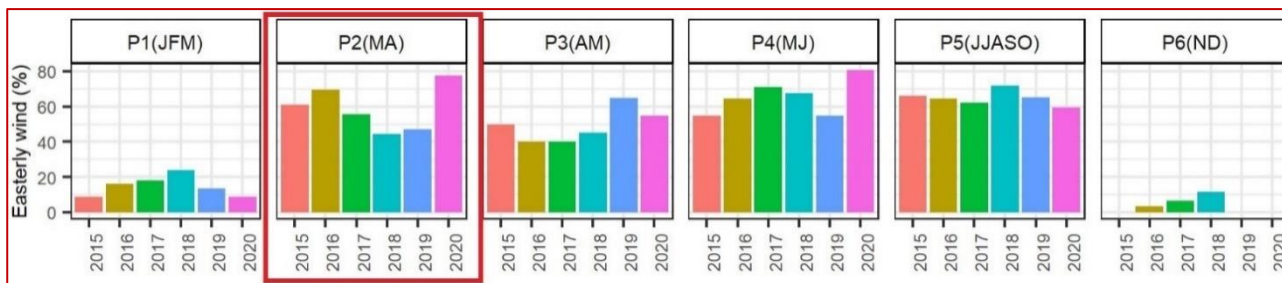


Figura 137: Percentuale di giorni con ventilazione orientale nei periodi considerati nell'articolo [3]. Nel periodo del primo lockdown (riquadro rosso), l'anno 2020 risalta rispetto ai precedenti per una frequenza particolarmente elevata di giorni con venti da est

Oltre alle considerazioni sulla qualità dell'aria, è importante sottolineare che l'aerosol atmosferico ha anche altri tipi di effetti, ad esempio a livello climatico. La capacità dell'aerosol di assorbire o riflettere la radiazione solare può influire sulla quantità di radiazione che raggiunge il suolo, e può causare un surriscaldamento degli strati atmosferici. Su questa tematica è stato condotto uno studio ([4]), reso possibile grazie agli strumenti di cui ARPA è dotata, che si è concentrato proprio su casi di avvezione dal bacino padano o di trasporto di polveri sahariane.

Infine, come hanno mostrato altri importanti studi ([5] e [6]), l'aerosol può avere un ruolo importante proprio in ambiente montano, perché potrebbe essere uno dei responsabili del maggior surriscaldamento osservato negli ambienti di alta quota rispetto alle altre regioni del globo (fenomeno dell'Elevation-Dependent Warming), un fenomeno di grande interesse nell'attuale ricerca climatica.

## 7. CONCLUSIONI

Le misure adottate nel 2020 per il contenimento della diffusione del virus SARS-CoV-2 hanno portato a variazioni nelle concentrazioni di inquinanti in tutti i siti di misura considerati, sia quelli urbani sia quelli rurali.

Le concentrazioni di inquinanti in aria sono determinate non solo dalle emissioni, ma anche dalle condizioni meteorologiche e da fenomeni di avvezione e di trasporto di masse d'aria: per valutare l'entità reali delle variazioni attribuibili alle misure di contenimento, è necessario considerare tutti questi fattori.

Questo può essere fatto solo effettuando delle simulazioni con modelli matematici che consentono di calcolare i valori delle concentrazioni degli inquinanti atmosferici al variare delle variabili di ingresso (emissioni, meteorologia).

Sono stati utilizzati il modello di chimica e trasporto *FARM* ed il modello statistico predittivo *random forest*: questi due modelli, pur molto diversi tra loro, hanno fornito risultati analoghi:

- le variazioni maggiori riguardano le concentrazioni di ossidi di azoto, a causa della riduzione significativa dei flussi di traffico: la diminuzione di NO<sub>2</sub> ha raggiunto valori del 50% nel periodo marzo-maggio e del 20-30% nei mesi di novembre e dicembre. La riduzione della fine dell'anno è dovuta principalmente all'assenza dei turisti.
- per il particolato, le variazioni arrivano ad un massimo del 25%

L'utilizzo dei modelli ha permesso di valutare l'influenza della meteorologia, che determina fenomeni di avvezione di massa d'aria dalla pianura (con influenza sulle frazioni più fini del particolato), il trasporto di polveri desertiche (frazione PM<sub>2-5</sub>.PM<sub>10</sub>):

- da marzo a giugno 2020 vi sono stati molti dei giorni con vento proveniente da est (rispetto al quinquennio precedente), aumentando quindi i fenomeni di avvezione di particolato dalla pianura padana con conseguente aumento delle concentrazioni: senza questa informazione gli effetti delle misure di contenimento sul PM<sub>10</sub> sarebbero sottostimati
- analogamente, se non si considera l'aumento dei venti occidentali nel periodo da giugno a settembre gli effetti della riduzione del traffico sarebbero sovrastimati.

## SOMMARIO

<b>1. PREMESSA .....</b>	<b>2</b>
1.1. SINTESI DELLE MISURE DI CONTENIMENTO .....	2
1.2. METODOLOGIA .....	3
<b>2. FATTORI DI PRESSIONE .....</b>	<b>4</b>
2.1. EMISSIONI DI INQUINANTI IN ATMOSFERA .....	4
<i>Sorgenti di emissione</i> .....	4
<i>La variazione delle emissioni nel 2020</i> .....	12
2.2. IL CONTESTO METEOROLOGICO .....	15
<i>Tipi di tempo</i> .....	16
<b>3. LE MISURE DI QUALITA' DELL'ARIA .....</b>	<b>18</b>
3.1. METODOLOGIA .....	18
3.2. RISULTATI.....	19
<i>Periodo 1 (1° gennaio – 8 marzo)</i> .....	19
<i>Periodo 2 (9 marzo – 13 aprile)</i> .....	23
<i>Periodo 3 (14 aprile – 4 maggio)</i> .....	28
<i>Periodo 4 (5 maggio – 3 giugno)</i> .....	32
<i>Periodo 5 (4 giugno – 31 ottobre)</i> .....	36
<i>Periodo 6 (1° novembre – 31 dicembre)</i> .....	40
3.3. CONSIDERAZIONI FINALI .....	44
<b>4. VALUTAZIONI MODELLISTICHE.....</b>	<b>45</b>
4.1. MODELLI DI CHIMICA E TRASPORTO .....	46
<i>Metodologia</i> .....	46
4.2. MODELLI STATISTICI PREDITTIVI.....	59
<i>Metodologia</i> .....	59
<i>Risultati</i> .....	60
<b>5. STIMA DELLE RIDUZIONI .....</b>	<b>63</b>
<i>Metodologia</i> .....	63
<i>Risultati</i> .....	63
<i>Considerazioni finali</i> .....	64
<b>6. APPROFONDIMENTI SUL PARTICOLATO .....</b>	<b>65</b>
6.1. FENOMENI DI TRASPORTO A LARGA SCALA.....	65
<i>Trasporto di inquinanti dalla Pianura Padana</i> .....	66
<i>Trasporto di polveri desertiche</i> .....	72
<i>Considerazioni finali</i> .....	77
<b>7. CONCLUSIONI .....</b>	<b>78</b>

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Produzione di energia termica (kW/h) dell'impianto TELCHA di Aosta (confronto 2019 – 2020).....	4
Figura 2: dati di consumo di metano in Valle d'Aosta dal 2015 al 2020 (fonte ITALGAS).....	5
Figura 3: Portata (Nm <sup>3</sup> /h) dei fumi a camino dello stabilimento siderurgico di Aosta (confronto 2019 – 2020).....	5
Figura 4: Giorni di funzionamento del reparto altoforno dello stabilimento siderurgico di Aosta (confronto 2019 – 2020).....	6
Figura 5: Traffico giornaliero medio di veicoli leggeri e pesanti al Traforo del Monte Bianco (confronto 2019 – 2020)...	6
Figura 6: Traffico giornaliero medio di veicoli leggeri e pesanti al Traforo del Gran San Bernardo (confronto 2019 – 2020).....	7
Figura 7: Traffico giornaliero medio di veicoli leggeri e pesanti nel tratto autostradale Aosta - Courmayeur (confronto 2019 – 2020).....	7
Figura 8: Traffico giornaliero medio di veicoli leggeri e pesanti nel tratto autostradale Nus – Aosta EST (confronto 2019 – 2020).....	7
Figura 9: Traffico giornaliero medio di veicoli leggeri e pesanti nel tratto autostradale di Pont-St-Martin (confronto 2019 – 2020).....	8
Figura 10: Traffico giornaliero medio di veicoli leggeri e pesanti nel tratto della SS26 a Pont-St-Martin (confronto 2019 – 2020).....	8
Figura 12: Traffico giornaliero medio di veicoli leggeri e pesanti all'imbocco della SR per la Valle di Cogne (confronto 2019 – 2020).....	9
Figura 13: Traffico giornaliero medio di veicoli leggeri e pesanti all'imbocco della SR per la Valtournenche (confronto 2019 – 2020).....	9
Figura 14: Traffico giornaliero medio di veicoli leggeri e pesanti all'imbocco della SR per la Valle d'Ayas (confronto 2019 – 2020).....	9
Figura 15: Traffico giornaliero medio di veicoli leggeri e pesanti all'imbocco della Valle di Gressoney (confronto 2019 – 2020).....	9
Figura 16: Traffico giornaliero medio veicolare in Aosta (confronto campagne con contatraffico 2017 e 2020).....	10
Figura 17: Ricostruzione dei flussi di traffico veicolare in Aosta con modello di calcolo (confronto dati 2017- mappa in alto, e P2, 9 marzo – 13 aprile del 2020, mappa in basso).....	11
Figura 18: Variazione delle emissioni regionali di NOx (confronto 2019 – 2020).....	12
Figura 19: Variazione delle emissioni regionali di PM10 (confronto 2019 – 2020).....	12
Figura 20: Variazione delle emissioni regionali di benzene (confronto 2019 – 2020).....	13
Figura 21: Variazione delle emissioni regionali degli IPA (confronto 2019 – 2020).....	13
Figura 22: Variazione delle emissioni regionali dei metalli (confronto 2019 – 2020).....	14
Figura 23: Temperatura - confronto tra i valori del 2020 e quelli del quinquennio precedente.....	15
Figura 24: Precipitazioni - confronto tra i valori del 2020 e quelli del quinquennio precedente.....	16
Figura 25: Classificazione dei giorni dell'anno per tipi di tempo, confronto tra il 2020 ed il quinquennio precedente...	17
Figura 26: Descrizione del diagramma a baffi. Viene rappresentato (orientato orizzontalmente o verticalmente) tramite un rettangolo diviso in due parti, da cui escono due segmenti. Il rettangolo, detto scatola o box, è delimitato dal primo e dal terzo quartile, in basso e in alto rispettivamente, e diviso al suo interno dalla mediana. I segmenti, detti baffi o whiskers, sono delimitati dagli estremi inferiore e superiore. I valori "oltre i baffi" sono gli outliers, cioè valori anomali per la distribuzione. La scatola contiene il 50% dei dati: quanto più è alta, tanto maggiore è la variabilità dei valori misurati.....	18
Figura 27: Concentrazioni di monossido di azoto: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° gennaio – 8 marzo).....	19



Figura 28: Concentrazioni di biossido di azoto: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° gennaio – 8 marzo).....	19
Figura 29: Concentrazioni di ozono: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° gennaio – 8 marzo).....	20
Figura 30: Concentrazioni di PM10: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° gennaio – 8 marzo) .....	20
Figura 31: Concentrazioni di nichel: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° gennaio – 8 marzo) .....	20
Figura 32: Concentrazioni di cromo: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° gennaio – 8 marzo) .....	21
Figura 33: Concentrazioni di benzo(a)pirene: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° gennaio – 8 marzo) .....	21
Figura 34: Concentrazioni di arsenico confronto valori dal 2015 al 2020 (1° gennaio – 8 marzo) .....	21
Figura 35: Concentrazioni di cadmio: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° gennaio – 8 marzo).....	22
Figura 36: Concentrazioni di piombo: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° gennaio – 8 marzo) .....	22
Figura 37: Concentrazioni di monossido di azoto: confronto valori dal 2015 al 2020 (9 marzo – 13 aprile) .....	23
Figura 38: Concentrazioni di biossido di azoto: confronto valori dal 2015 al 2020 (9 marzo – 13 aprile).....	23
Figura 39: Settimana tipo oraria delle concentrazioni orarie di biossido di azoto ad Aosta (per ogni giorno della settimana nel periodo scelto vengono calcolate le medie per ciascuna ora).....	24
Figura 40: Settimana tipo oraria delle concentrazioni orarie di biossido di azoto a Donnas. ....	24
Figura 41: Concentrazioni di ozono: confronto valori dal 2015 al 2020 (9 marzo – 13 aprile).....	24
Figura 42: Concentrazioni di PM10: confronto valori dal 2015 al 2020 (9 marzo – 13 aprile) .....	25
Figura 43: Concentrazioni di nichel: confronto valori dal 2015 al 2020 (9 marzo – 13 aprile) .....	25
Figura 44: Concentrazioni di cromo: confronto valori dal 2015 al 2020 (9 marzo – 13 aprile) .....	26
Figura 45: Concentrazioni di benzo(a)pirene: confronto valori dal 2015 al 2020 (9 marzo – 13 aprile) .....	26
Figura 46: Concentrazioni di arsenico: confronto valori dal 2015 al 2020 (9 marzo – 13 aprile).....	26
Figura 47: Concentrazioni di cadmio: confronto valori dal 2015 al 2020 (9 marzo – 13 aprile).....	27
Figura 48: Concentrazioni di piombo: confronto valori dal 2015 al 2020 (9 marzo – 13 aprile).....	27
Figura 49: Concentrazioni di monossido di azoto: confronto valori dal 2015 al 2020 (14 aprile – 4 maggio).....	28
Figura 50: Concentrazioni di biossido di azoto: confronto valori dal 2015 al 2020 (14 aprile – 4 maggio).....	28
Figura 51: Concentrazioni di ozono: confronto valori dal 2015 al 2020 (14 aprile – 4 maggio) .....	29
Figura 52: Concentrazioni di PM10: confronto valori dal 2015 al 2020 (14 aprile – 4 maggio).....	29
Figura 53: Concentrazioni di nichel: confronto valori dal 2015 al 2020 (14 aprile – 4 maggio) .....	29
Figura 54: Concentrazioni di cromo: confronto valori dal 2015 al 2020 (14 aprile – 4 maggio).....	30
Figura 55: Concentrazioni di benzo(a)pirene: confronto valori dal 2015 al 2020 (14 aprile – 4 maggio) .....	30
Figura 56: Concentrazioni di arsenico: confronto valori dal 2015 al 2020 (14 aprile – 4 maggio) .....	30
Figura 57: Concentrazioni di cadmio: confronto valori dal 2015 al 2020 (14 aprile – 4 maggio) .....	31
Figura 58: Concentrazioni di piombo: confronto valori dal 2015 al 2020 (14 aprile – 4 maggio).....	31
Figura 59: Concentrazioni di monossido di azoto: confronto valori dal 2015 al 2020 (5 maggio – 3 giugno).....	32
Figura 60: Concentrazioni di biossido di azoto: confronto valori dal 2015 al 2020 (5 maggio – 3 giugno) .....	32
Figura 61: Concentrazioni di ozono: confronto valori dal 2015 al 2020 (5 maggio – 3 giugno) .....	33
Figura 62: Concentrazioni di PM10: confronto valori dal 2015 al 2020 (5 maggio – 3 giugno).....	33
Figura 63: Concentrazioni di nichel: confronto valori dal 2015 al 2020 (5 maggio – 3 giugno).....	33
Figura 64: Concentrazioni di cromo: confronto valori dal 2015 al 2020 (5 maggio – 3 giugno).....	34
Figura 65: Concentrazioni di benzo(a)pirene: confronto valori dal 2015 al 2020 (5 maggio – 3 giugno).....	34
Figura 66: Concentrazioni di arsenico: confronto valori dal 2015 al 2020 (5 maggio – 3 giugno).....	34
Figura 67: Concentrazioni di cadmio: confronto valori dal 2015 al 2020 (5 maggio – 3 giugno) .....	35
Figura 68: Concentrazioni di piombo: confronto valori dal 2015 al 2020 (5 maggio – 3 giugno).....	35
Figura 69: Concentrazioni di monossido di azoto: confronto valori dal 2015 al 2020 (4 giugno – 31 ottobre) .....	36
Figura 70: Concentrazioni di biossido di azoto: confronto valori dal 2015 al 2020 (4 giugno – 31 ottobre).....	36

Figura 71: Concentrazioni di ozono: confronto valori dal 2015 al 2020 (4 giugno – 31 ottobre).....	37
Figura 72: Concentrazioni di PM10: confronto valori dal 2015 al 2020 (4 giugno – 31 ottobre) .....	37
Figura 73: Concentrazioni di nichel: confronto valori dal 2015 al 2020 (4 giugno – 31 ottobre) .....	37
Figura 74: Concentrazioni di cromo: confronto valori dal 2015 al 2020 (4 giugno – 31 ottobre) .....	38
Figura 75: Concentrazioni di benzo(a)pirene: confronto valori dal 2015 al 2020 (4 giugno – 31 ottobre) .....	38
Figura 76: Concentrazioni di arsenico: confronto valori dal 2015 al 2020 (4 giugno – 31 ottobre) .....	38
Figura 77: Concentrazioni di cadmio: confronto valori dal 2015 al 2020 (4 giugno – 31 ottobre).....	39
Figura 78: Concentrazioni di piombo: confronto valori dal 2015 al 2020 (4 giugno – 31 ottobre) .....	39
Figura 79: Concentrazioni di monossido di azoto: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° novembre – 31 dicembre) .....	40
Figura 80: Concentrazioni di biossido di azoto: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° novembre – 31 dicembre).....	40
Figura 81: Concentrazioni di ozono: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° novembre – 31 dicembre).....	41
Figura 82: Concentrazioni di PM10: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° novembre – 31 dicembre) .....	41
Figura 83: Concentrazioni di nichel: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° novembre – 31 dicembre) .....	41
Figura 84: Concentrazioni di cromo: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° novembre – 31 dicembre) .....	42
Figura 85: Concentrazioni di benzo(a)pirene: confronto valori dal 2015 al 2020 (1° novembre – 31 dicembre) .....	42
Figura 86: Concentrazioni di arsenico: confronto valori dal 2015 al 2020 (4 giugno – 31 ottobre) .....	42
Figura 87: Concentrazioni di cadmio: confronto valori dal 2015 al 2020 (4 giugno – 31 ottobre).....	43
Figura 88: Concentrazioni di piombo: confronto valori dal 2015 al 2020 (4 giugno – 31 ottobre) .....	43
Figura 89: Concentrazioni medie di biossido di azoto per i due scenari emissivi (Aosta Piazza Plouves) .....	47
Figura 90: Concentrazioni medie di biossido di azoto per i due scenari emissivi (Donnas) .....	47
Figura 91: Concentrazioni medie di biossido di azoto per i due scenari emissivi (Pré Saint Didier).....	48
Figura 92: Mappa della differenza delle concentrazioni medie annuali di biossido di azoto per i due scenari emissivi: le riduzioni maggiori sono nel fondovalle principale e lungo gli assi principali di traffico (massimo di 4 µg/m <sup>3</sup> )......	48
Figura 93: Concentrazioni medie di ozono per i due scenari emissivi (Aosta Piazza Plouves) .....	49
Figura 94: Concentrazioni medie di ozono per i due scenari emissivi (Donnas).....	49
Figura 95: Concentrazioni medie di ozono per i due scenari emissivi (Pré-Saint-Didier) .....	50
Figura 96: Mappa della differenza delle concentrazioni medie annuali di ozono per i due scenari emissivi: le variazioni più significative sono lungo il fondovalle e soprattutto nel tratto tra Aosta e Saint-Vincent, nella parte cioè di territorio dove le misure di confinamento del 2020 hanno comportato una maggiore riduzione degli inquinanti precursori della formazione dell'ozono. ....	50
Figura 97: Concentrazioni medie di PM10 per i due scenari emissivi (Aosta Piazza Plouves) .....	51
Figura 98: Concentrazioni medie di PM10 per i due scenari emissivi (Donnas) .....	51
Figura 99: Concentrazioni medie di PM10 per i due scenari emissivi (Pré-Saint-Didier).....	52
Figura 100: Mappa della differenza delle concentrazioni medie annuali di PM10 per i due scenari emissivi: le variazioni più significative sono soprattutto nella Plaine di Aosta.....	52
Figura 101: Concentrazioni medie di benzene per i due scenari emissivi (Aosta Piazza Plouves).....	53
Figura 102: Concentrazioni medie di benzene per i due scenari emissivi (Donnas).....	53
Figura 103: Concentrazioni medie di benzene per i due scenari emissivi (Pré-Saint-Didier) .....	54
Figura 104: Mappa della differenza delle concentrazioni medie annuali di benzene per i due scenari emissivi: le riduzioni maggiori sono nel fondovalle principale ed in particolare nella Plaine di Aosta. ....	54
Figura 105: Concentrazioni medie di benzo(a)pirene per i due scenari emissivi (Aosta Piazza Plouves) .....	55
Figura 106: Concentrazioni medie di benzo(a)pirene per i due scenari emissivi (Donnas) .....	55
Figura 107: Concentrazioni medie di benzo(a)pirene per i due scenari emissivi (Pré-Saint-Didier).....	56

Figura 108: Mappa della differenza delle concentrazioni medie annuali di benzo(a)pirene per i due scenari emissivi: le riduzioni maggiori sono lungo le principali vie di traffico e nella Plaine di Aosta. ....	56
Figura 109: Arsenico: medie per periodo nei due scenari emissivi ad Aosta e mappa della differenza medie annua tra i due scenari.....	57
Figura 110: Cadmio: medie per periodo nei due scenari emissivi ad Aosta e mappa della differenza medie annua tra i due scenari.....	57
Figura 111: piombo: medie per periodo nei due scenari emissivi ad Aosta e mappa della differenza medie annua tra i due scenari.....	57
Figura 112: Nichel: medie per periodo nei due scenari emissivi ad Aosta e mappa della differenza medie annua tra i due scenari.....	58
Figura 113: Confronto fra le concentrazioni di biossido di azoto misurate e previste con il modello random forest. Le fasce temporali colorate distinguono.....	61
Figura 114: Confronto fra le concentrazioni di ozono misurate e previste con il modello random forest.....	62
Figura 115: Confronto fra le concentrazioni di PM10 misurate e previste con il modello random forest.....	62
Figura 116: Confronto fra le concentrazioni di PM2.5 misurate e previste con il modello random forest.....	62
Figura 117: Riduzioni delle concentrazioni di biossido di azoto dovute alle misure di contenimento.....	63
Figura 118: Riduzioni delle concentrazioni di ozono dovute alle misure di contenimento.....	64
Figura 119: Riduzioni delle concentrazioni di particolato dovute alle misure di contenimento.....	64
Figura 120: Trasporto e deposito di polveri desertiche.....	65
Figura 121: Elaborazione del segnale ALC, per il giorno 7 febbraio 2020. A bassa quota persiste lo strato carico di aerosol, mentre le macchie arancioni in quota indicano la presenza di qualche nube. ....	67
Figura 122: Elaborazione del segnale ALC, per il giorno 9 febbraio 2020. A bassa quota persiste lo strato carico di aerosol, mentre le macchie arancioni in quota indicano la presenza di qualche nube. ....	68
Figura 123: Concentrazioni orarie di particolato rilevate in piazza Plouves, Aosta, 5-10 febbraio 2020; viene evidenziato il momento di ingresso del Foehn, che fa crollare bruscamente le concentrazioni. ....	68
Figura 124: Concentrazioni orarie di particolato rilevate a Courmayeur Entrèves, viene evidenziato l'aumento delle concentrazioni di fondo per l'arrivo della massa d'aria.....	69
Figura 125: Concentrazioni orarie di particolato rilevate in piazza Plouves, Aosta, prima decade di aprile 2020.....	69
Figura 126: Concentrazioni orarie di particolato rilevate a Courmayeur – Entrèves, prima decade di aprile 2020.....	70
Figura 127: Elaborazione del segnale dell'ALC, 5 aprile 2020, che evidenzia il carico di aerosol vicino alla superficie. ..	70
Figura 128: Concentrazioni di particolato a Courmayeur – Entrèves, 17-23 agosto 2020. È ben visibile l'aumento del particolato nei giorni 19-22. ....	71
Figura 129: Elaborazione del segnale dell'ALC per il 19 agosto 2020, che permette di notare l'arrivo dell'aerosol nel pomeriggio.....	71
Figura 130: Elaborazione del segnale dell'ALC per il 21 agosto 2020; lo strato carico di aerosol si è esteso fino a circa 4000 metri. Alcune nubi basse disturbano il segnale tra la notte e il mattino. ....	72
Figura 131: Elaborazione del segnale dell'ALC. Il 22 gennaio 2020 risulta ben evidente lo strato di aerosol in quota che compare durante il giorno, il 23 gennaio 2020 le polveri interessano anche gli strati più a contatto con la superficie. .	73
Figura 132: Simulazione delle retrotraiettorie per un punto a 3500 metri di quota sopra Saint-Christophe, alle 21 locali del 22 gennaio 2020. Indubbiamente la provenienza della massa d'aria è nordafricana. ....	73
Figura 133: Concentrazioni di particolato a Etroubles, 2-4 febbraio 2020. Colpisce il notevole aumento di aerosol osservato il 3 febbraio, con abbondanza di particelle grossolane tipiche dei trasporti dal deserto. ....	74
Figura 134: Concentrazioni di particolato ad Aosta – piazza Plouves, 2-4 febbraio 2020. ....	74

Figura 135: Immagine satellitare (NASA Terra) del 3 febbraio 2020. L'ampio arco di nubi rivela la traiettoria seguita dalle polveri africane nel trasporto verso l'Europa, evidenziata anche dalle frecce arancioni. ....	75
Figura 136: Elaborazione del segnale dell'ALC, 7 novembre 2020. È evidente lo strato carico di aerosol che compare in quota al mattino. ....	76
Figura 137: Simulazione delle retrotraiettorie per un punto a 3500 metri di quota sopra Saint-Christophe, alle 13 locali del 7 novembre 2020. Anche in questo caso si conferma la provenienza nordafricana della massa d'aria. ....	76
Figura 138: Percentuale di giorni con ventilazione orientale nei periodi considerati nell'articolo [3]. Nel periodo del primo lockdown (riquadro rosso), l'anno 2020 risalta rispetto ai precedenti per una frequenza particolarmente elevata di giorni con venti da est.....	77

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: stazioni della rete di monitoraggio considerate.....	18
Tabella 2: valutazione del metodo RF per la previsione di biossido di azoto .....	60
Tabella 3: valutazione del metodo RF per la previsione di ozono .....	60
Tabella 4: valutazione del metodo RF per la previsione di particolato.....	60