SIMULAZIONE ANNUALE DELLA DISPERSIONE DI INQUINANTI IN ATMOSFERA CON IL CODICE FOTOCHIMICO FARM

LA CATENA MODELLISTICA OPERATIVA UTILIZZATA

ARPA Valle d'Aosta nelle simulazioni modellistiche per la qualità dell'aria utilizza la suite ARIA Regional[1], creata appositamente per lo studio dell'inquinamento atmosferico a scala regionale (domini variabili da 30 a 500-1000 Km di lato) in territorio complesso.
La figura seguente descrive schematicamente la catena modellistica del codice FARM.

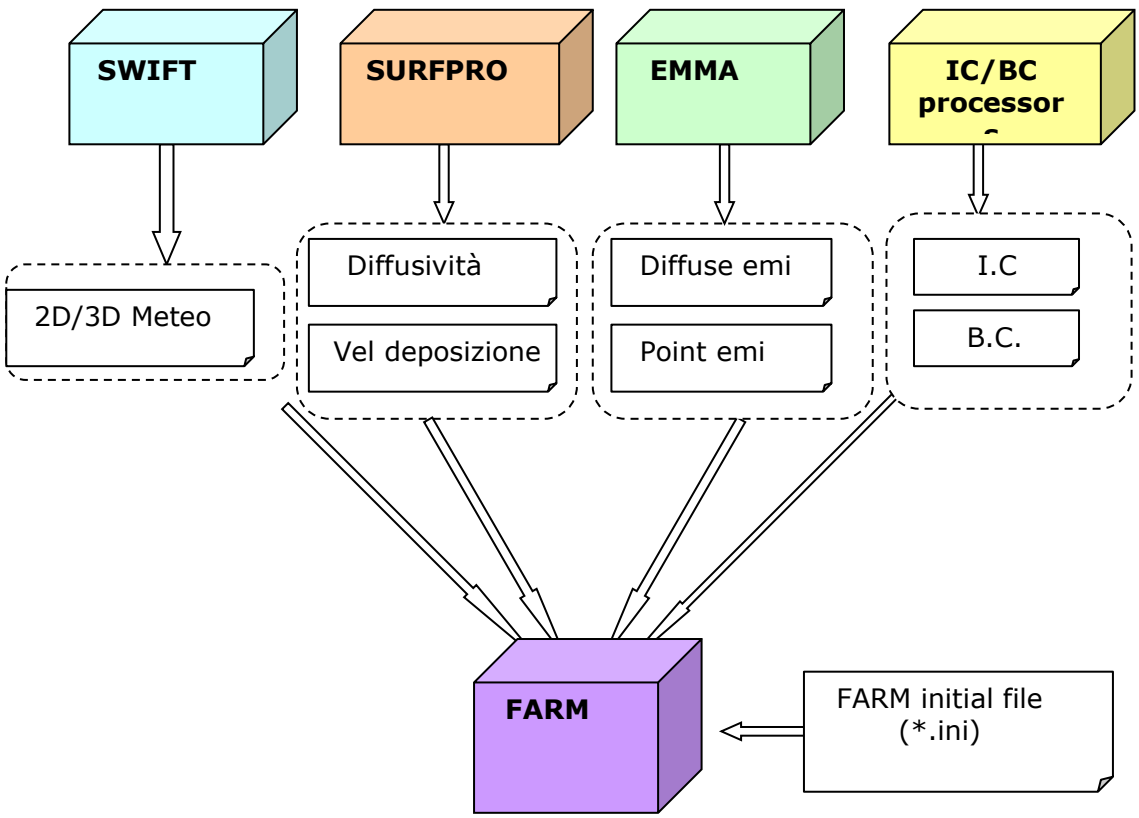


Figura 1: catena modellistica per le simulazioni di dispersione di inquinanti utilizzata da ARPA Valle d'Aosta.

[1] sviluppata dalla società francese ARIA Technologies, distribuita in Italia dalla società ARIANET

Meteorologia e turbolenza

SWIFT

Il preprocessore meteorologico utilizzato nella catena modellistica è SWIFT, codice sviluppato dalla società francese ARIA Technologies. Si tratta di un modello per i campi di vento 3D per terreni complessi. Esso produce i campi di vento a partire da una rete di monitoraggio meteo. Al software sono necessari due tipi di dati in ingresso: le informazioni topografiche e di uso del suolo del sito da studiare e i dati meteorologici, i quali devono includere i dati dei venti, della temperatura e dell'umidità relativa nei livelli prossimi al suolo (ovvero i dati misurati dalle stazioni meteorologiche) e un profilo verticale delle precedenti tre variabili. Per una ricostruzione 3D dei campi di vento sono richiesti almeno dati meteo di un punto di misura e un profilo verticale. Quest'ultimo è necessario per poter definire la stratificazione termica dell'atmosfera.
SWIFT è uno strumento per lo studio dei venti su scala locale (raggio di 5-50 km) e regionale (raggio di 50-500 km). I parametri fondamentali per la ricostruzione del campo di vento sono:

- I venti su scala locale (velocità e direzione), nei livelli prossimi al suolo e sopra i 1000m;
- Topografia e rugosità del suolo;
- Temperatura e umidità.

Il codice è in grado di modellizzare rapidamente i campi di vento a partire da osservazione in sito, attraverso la prima equazione di Navier-Stokes, il bilancio di massa e tenendo conto degli effetti del terreno sulle masse fluide.
I campi di vento sono calcolati su una griglia spaziale tridimensionale: per il livello orizzontale viene utilizzato un sistema di coordinate cartesiane, con dimensione delle celle fisse, mentre la griglia verticale è terrain-following, ovvero segue l'andamento del terreno.

SURFPRO

La parte inferiore dell'atmosfera è chiamata strato limite terrestre (planetary boundary layer, PBL) e si estende da 1 a 2 km sopra la crosta terrestre. Lo spessore del PBL dipende dalle condizioni meteorologiche e dall'ora del giorno, infatti esso cresce con la luce solare.
SURFPRO (SURFace-atmosphere interface PROcessor) è un codice sviluppato per stimare la griglia dei campi dei parametri di turbolenza del PBL. Il modulo è in grado di calcolare la diffusività orizzontale e verticale dei vortici turbolenti e la velocità di deposizione in funzione della copertura del suolo, delle condizioni atmosferiche (velocità del vento, temperatura, stabilità, radiazione solare) e delle caratteristiche chimiche delle specie.
Un database dell'uso del territorio, sotto forma di griglia, è l'informazione fondamentale su cui si basa il modulo per i calcoli. L'acquisizione dei dati meteorologici e i calcoli dei moduli interni si basano sul file di input dei campi di vento nelle 3 componenti spaziali U, V e W.

Emissioni degli inquinanti in atmosfera

La stima delle emissioni parte dai dati contenuti nell' Inventario Regionale delle emissioni. Tale inventario costituisce una serie organizzata di dati relativi alle quantità di inquinanti introdotti nell'atmosfera da sorgenti naturali e/o da attività antropiche. L'inventario contiene una stima quantitativa di tali flussi di materia dalle sorgenti all'atmosfera, inclusa la loro ripartizione territoriale, la loro evoluzione nel tempo ed una caratterizzazione puntuale delle sorgenti più significative. Si parla di una stima in quanto le variabili coinvolte sono così numerose che non è possibile condurre un calcolo preciso.

EMMA

Per la stima delle emissioni, FARM si affida a un preprocessore emissivo sviluppato da ARIANET: EMMA. Questo codice necessita di diversi file in input per poter generare lo scenario emissivo richiesto:

- una serie di "fichiers client", contenenti i dati elementari delle emissioni delle sorgenti areali, lineari e puntuali;
- file cartografici, che descrivano la geometria delle sorgenti areali;
- un file che descriva i parametri delle sorgenti puntuali;
- un file che specifichi le specie chimiche utilizzate dal codice;
- file per la modulazione temporale (oraria, settimanale e mensile);
- dati di disaggregazione spaziale, come i file contenuti i tematismi territoriali (uso del suolo)
- i dati di speciazione dei COVNM;
- i dati di speciazione del particolato;
- un file dell'orografia.

Per quanto riguarda le polveri, sono dati in ingresso al preprocessore emissivo i profili di speciazione delle polveri e dei COVNM per ogni tipo di sorgente (fonti: EPA (programma Speciate), CARB (California Sir Resource Board) ed elaborazioni di dati di letteratura).

Condizioni iniziali ed al contorno

Il modello FARM, tra i files di input, necessita della descrizione delle condizioni iniziali (IC, Initial Conditions) e quelle al contorno (BC, Boundary Conditions) per poter risolvere le equazioni differenziali . Queste vengono calcolate in base a simulazione già effettuate normalmente elaborate su di un dominio comprendente la griglia di calcolo in esame.
Per la presente simulazione le IC e le BC sono state estrapolate dalla simulazione a scala nazionale con FARM elaborata da Arianet srl per l'anno 2018 (progetto "Qualearia").

LA SIMULAZIONE MODELLISTICA DI DISPERSIONE

Per tale simulazione si è utilizzato un dominio di calcolo comprendente l'intera Regione Valle d'Aosta e parte delle regioni confinanti. La griglia di calcolo ha una risoluzione orizzontale di 1 km x 1 km.
Si è elaborata una simulazione annuale per il **2019** utilizzando i seguenti dati in ingresso al modello:

- emissioni degli inventari regionali valdostano e piemontese e da inventario europeo EMEP per le regioni francesi e svizzere confinanti
- meteorologia ricostruita con il codice SWIFT con i dati delle stazioni meteo di ARPA VdA e della Protezione Civile
- condizioni al contorno ricavate dalla simulazione nazionale di qualità dell'aria di FARM elaborata da ARIANET s.r.l. per lo stesso anno.

Ogni mese simulato ha richiesto all'incirca 12 ore di simulazione e ha prodotto un file di concentrazione in aria ed i file di deposizione al suolo.

Stima delle concentrazioni DEGLI INQUINANTI IN ATMOSFERA

Le simulazioni effettuate hanno prodotto 117 specie di inquinanti in uscita per la simulazione di quelli principali e 81 specie per quella dei POPs, di seguito sono riportate le mappe delle concentrazioni medie annuali delle seguenti sostanze la cui valutazione è richiesta dal DM 155/2010:

- *inquinanti gassosi*:
  - monossido di carbonio* (CO)
  - biossido di zolfo* (SO_2)
  - biossido di azoto* (NO_2)
  - ozono* (O_3)
  - benzene* (C_6H_6)

- *polveri*:
  - PM10*
  - PM2.5*

- *metalli*:
  - arsenico* (As)
  - cadmio* (Cd)
  - cromo (Cr)
  - rame (Cu)
  - mercurio* (Hg)
  - nichel* (Ni)
  - piombo* (Pb)
  - selenio (Se)
  - zinco (Zn)

- *POPs*:
  - Benzo(a)pirene*
  - IPA totali*

(* inquinanti di cui viene richiesta la valutazione dal DM 155/2010)

➢ Biossido d'azoto

Dalla mappa di concentrazione si notano valori più elevati nelle aree maggiormente antropizzate, in corrispondenza della vallata centrale e, in particolare, del bacino del capoluogo.
I livelli di concentrazione dal giallo al rosso si rapportano al limite normativo e alle sue soglie di valutazione.
Per tale inquinante la stagione estiva presenta tipicamente concentrazioni molto inferiori a quelle della stagione invernale caratterizzata dall'apporto delle emissioni da riscaldamento domestico e dalle condizioni climatiche sfavorevoli alla dispersione (venti deboli e basso irraggiamento solare).

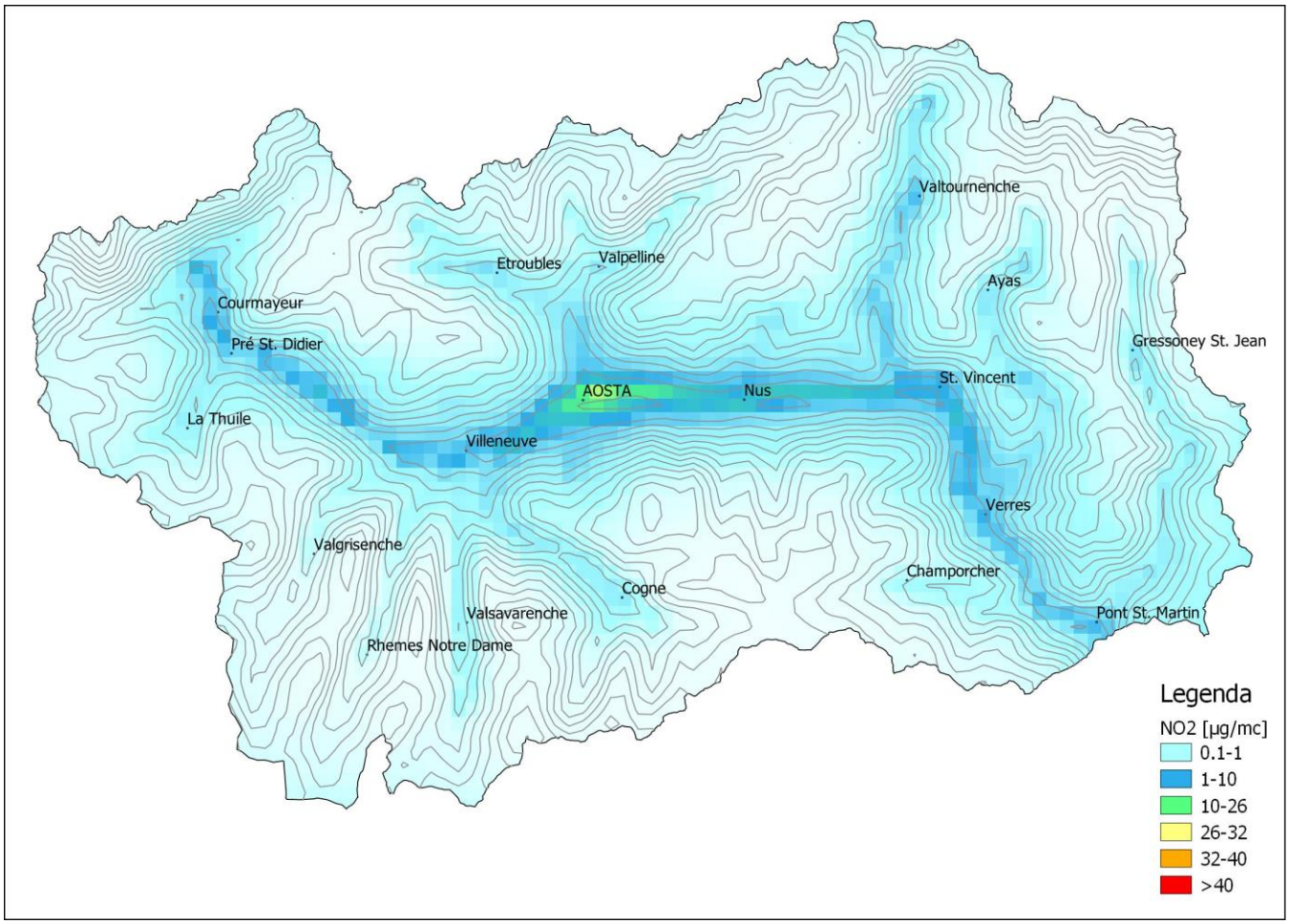


Figura 2: concentrazioni medie annuali di NO_2 (anno 2019)

➢ Biossido di zolfo

Le concentrazioni medie annuali del biossido di zolfo risultano più consistenti nel bacino del capoluogo e lungo l'asse della vallata principale, sono comunque molto basse, se comparate al limite normativo di 20 µg/m^3.
Le emissioni maggiori di tale inquinante provengono dal riscaldamento residenziale a gasolio.

I livelli di concentrazione dal giallo al rosso si rapportano al limite normativo e le sue soglie di valutazione.

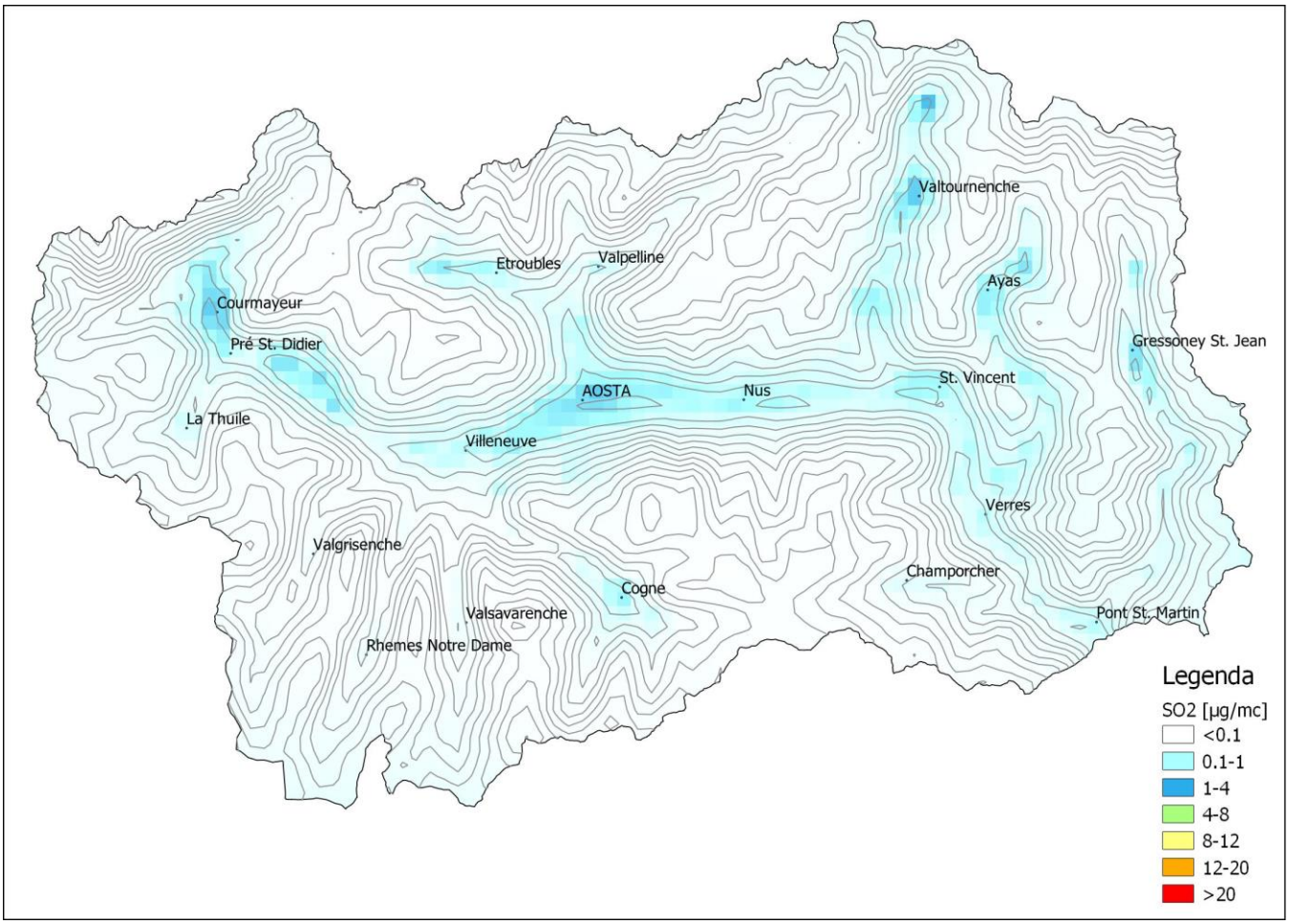


Figura 3: concentrazioni medie annuali di SO_2 (anno 2019)

➢ Monossido di carbonio

Rispetto al biossido d'azoto nella mappa della media annuale del monossido di carbonio si notano concentrazioni non trascurabili anche nelle vallate laterali.
Tale inquinante, difatti, è particolarmente legato alle emissioni da riscaldamento domestico, in particolare in relazione al combustibile legnoso.

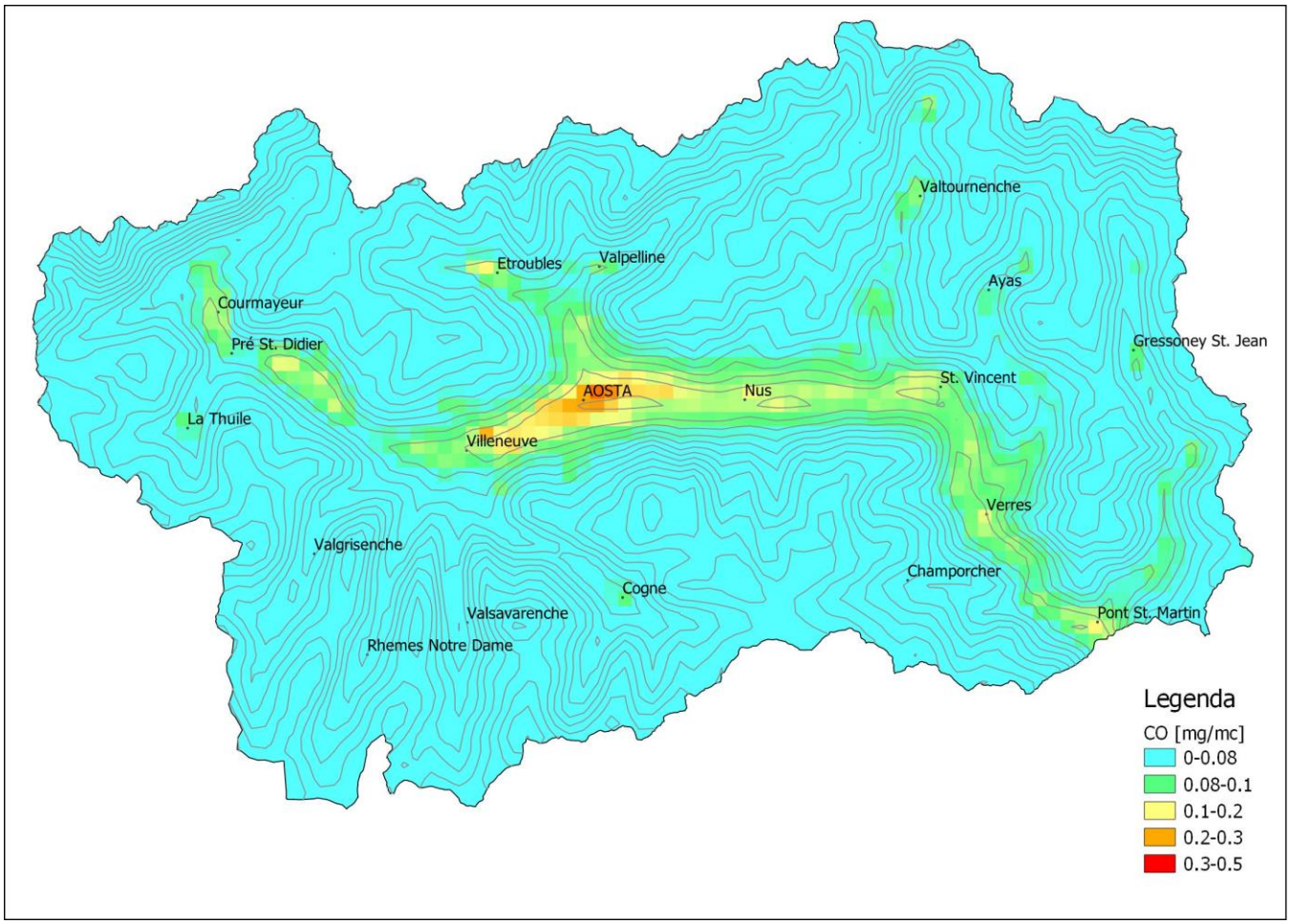


Figura 4: concentrazioni medie annuali di CO (anno 2019)

➢ Polveri PM10

I valori più elevati di concentrazioni delle polveri in atmosfera si trovano nelle aree maggiormente antropizzate, in corrispondenza della vallata centrale e, in particolare, del bacino del capoluogo.
La stagione estiva presenta concentrazioni molto inferiori a quelle della stagione invernale perché priva dell'apporto delle emissioni da riscaldamento domestico (in particolare quello a combustibile legnoso) e delle condizioni climatiche sfavorevoli alla dispersione tipicamente invernali (venti deboli e basso irraggiamento solare).

I livelli di concentrazione dal giallo al rosso si rapportano al limite normativo ed alle sue soglie di valutazione.

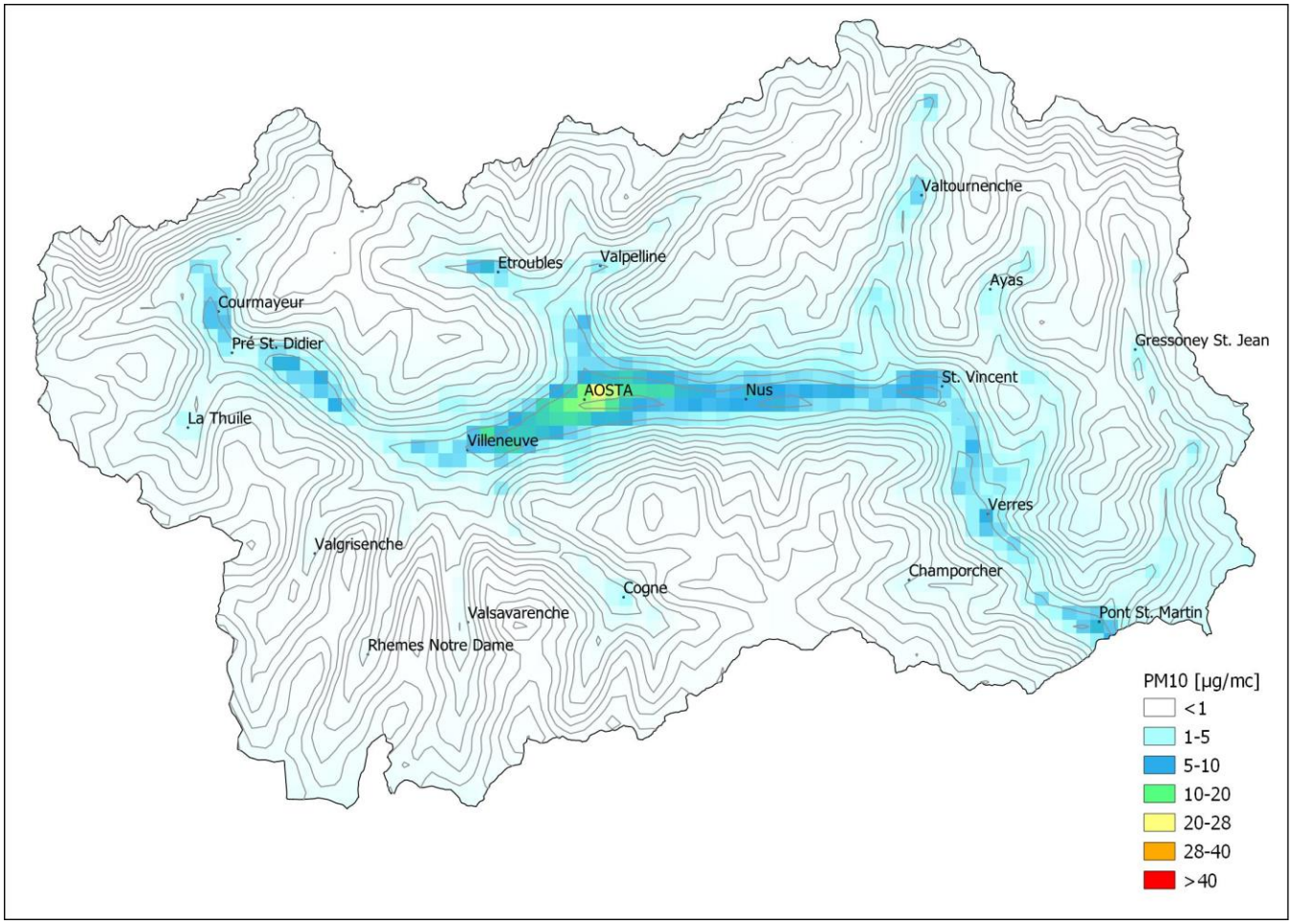


Figura 5: concentrazioni medie annuali di PM10 (anno 2019)

➢ Polveri PM2.5

Per la granulometria più fine delle polveri, il PM 2.5, non si rilevano particolari differenze rispetto alla distribuzione territoriale delle concentrazioni del PM10, i loro valori risultano inferiori al limite normativo in tutto il territorio regionale.

I livelli di concentrazione dal giallo al rosso si rapportano al limite normativo e le sue soglie di valutazione.

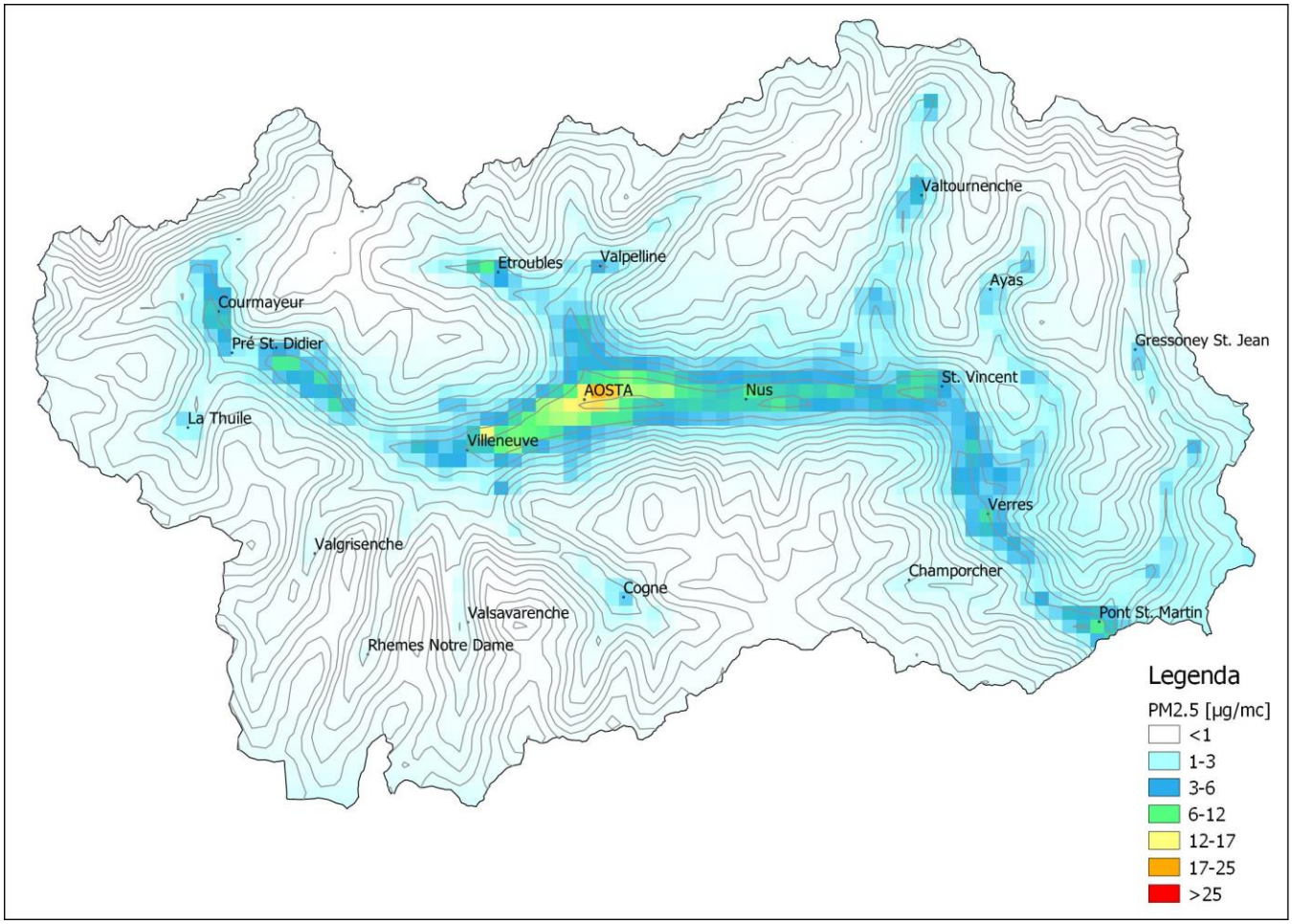


Figura 6: concentrazioni medie annuali di PM2.5 (anno 2019)

➢ Ozono

L'ozono è l'unica sostanza che si discosta dal comportamento degli altri inquinanti primari in maniera speculare. Esso registra, difatti, per la media annuale valori più elevati in alta montagna rispetto al fondovalle, poiché qui non avviene la reazione di distruzione da parte degli altri inquinanti che hanno contribuito alla sua formazione (in particolare gli ossidi d'azoto).
Anche a scala stagionale la situazione è speculare a quella degli altri inquinanti: le concentrazioni maggiori non si registrano in inverno, ma in estate, nel periodo a maggiore insolazione, in quanto è proprio grazie ad essa che l'ozono si forma.

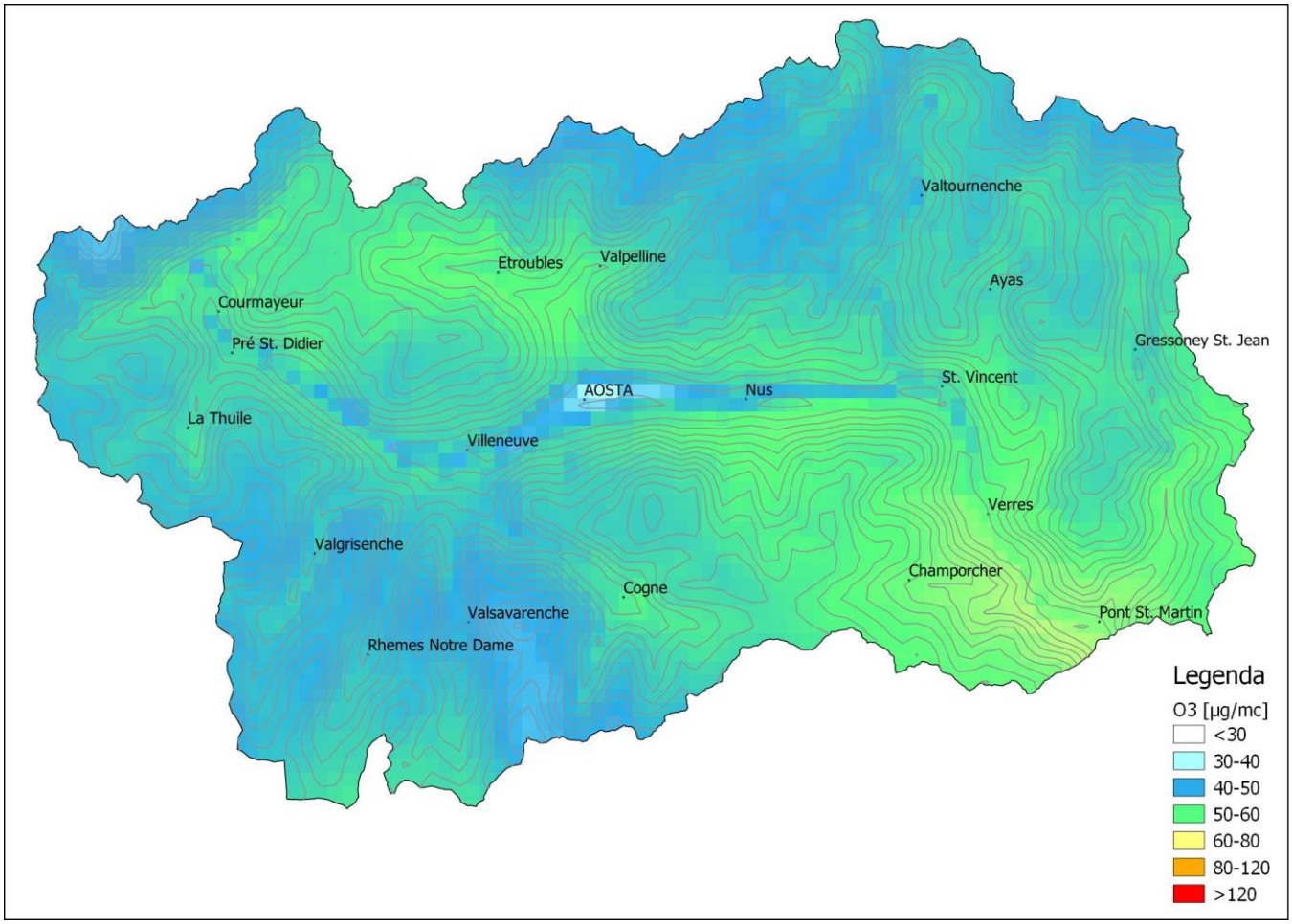


Figura 7: concentrazioni medie annuali di ozono (anno 2019)

➢ Benzene

Inquinante particolarmente legato al traffico stradale di tipo urbano, il benzene registra valori consistenti solo nel bacino del capoluogo.
Non presenta particolari differenze a livello stagionale.

I livelli di concentrazione dal giallo al rosso si rapportano al limite normativo e le sue soglie di valutazione.

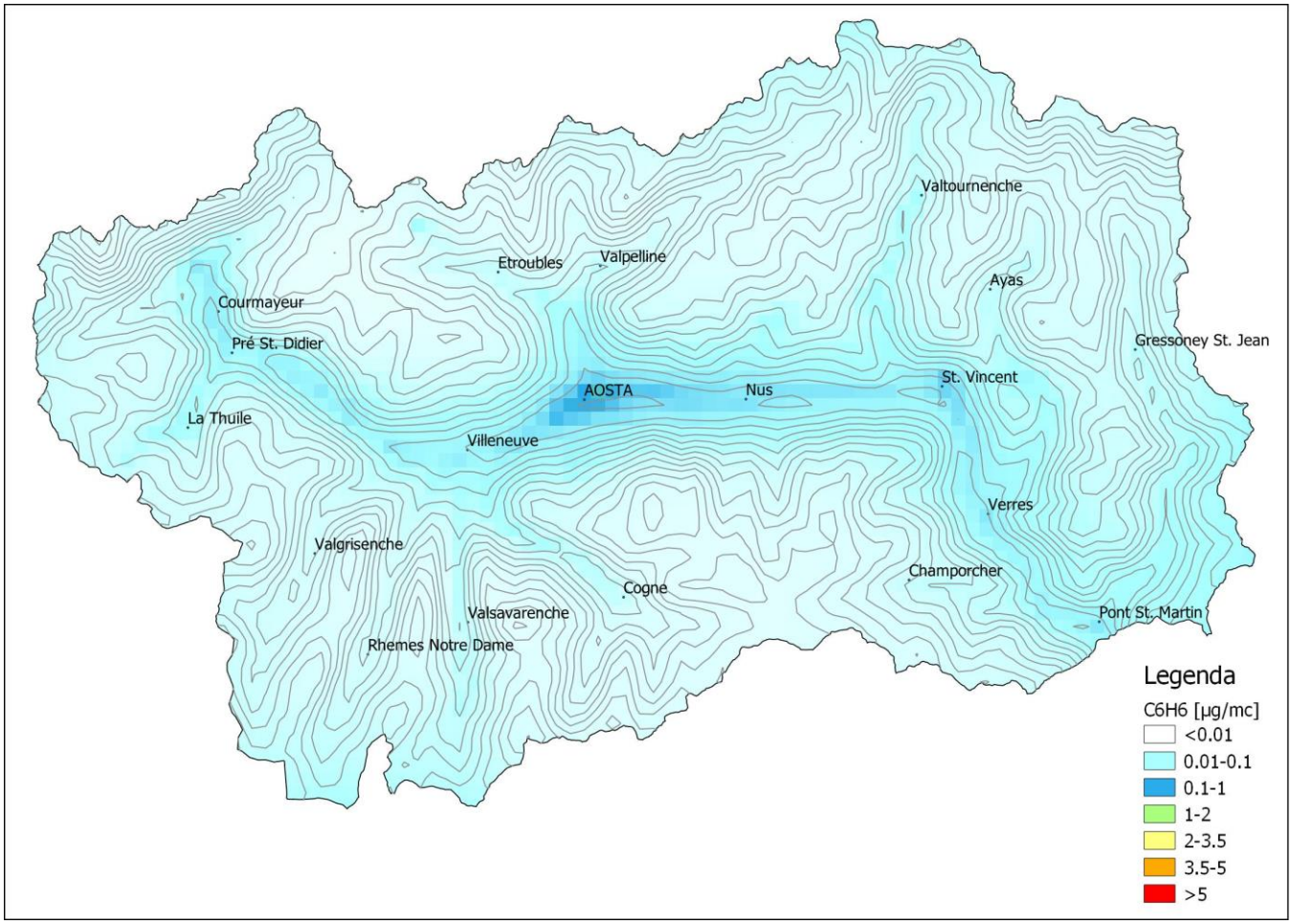


Figura 8: concentrazioni medie annuali di benzene (anno 2019)

➢ Ammoniaca

Le concentrazioni medie annuali di ammoniaca risultano più consistenti nel bacino del capoluogo e nelle aree adibite a pascolo in quanto l'allevamento bestiame risulta la principale sorgente di emissione di tale sostanza.

Non presenta particolari differenze a livello stagionale.

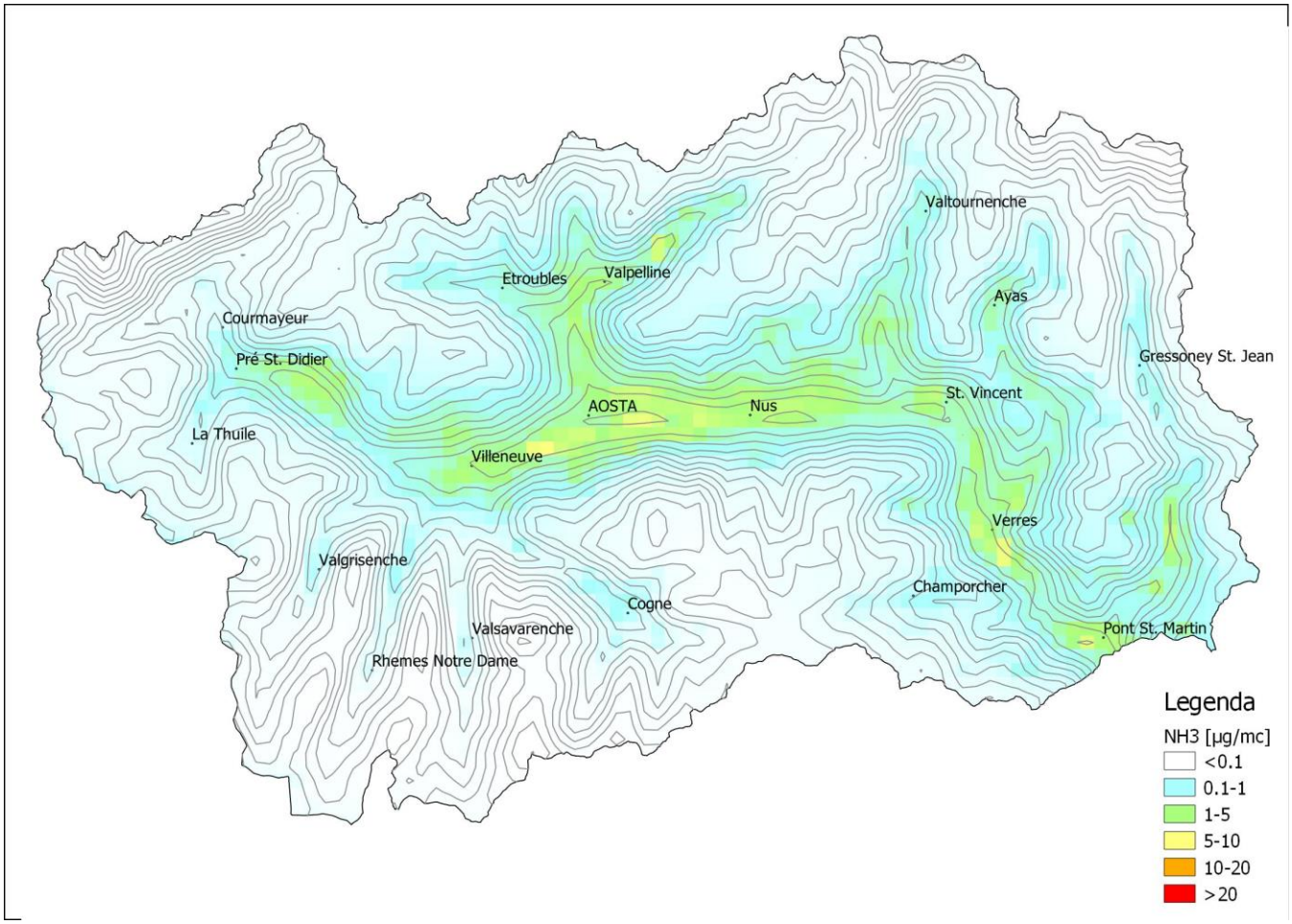


Figura 9: concentrazioni medie annuali di NH_3 (anno 2019)

➢ Metalli

1. *Arsenico*

Dall'Inventario Regionale delle emissioni l'arsenico risulta emesso principalmente dal settore riscaldamento residenziale a gasolio e da quello delle attività industriali. Le concentrazioni di tale metallo risultano presenti in particolare nella conca di Aosta e, in minor misura, dal confine piemontese.
I livelli di concentrazione dal giallo al rosso si rapportano al limite normativo e le sue soglie di valutazione.

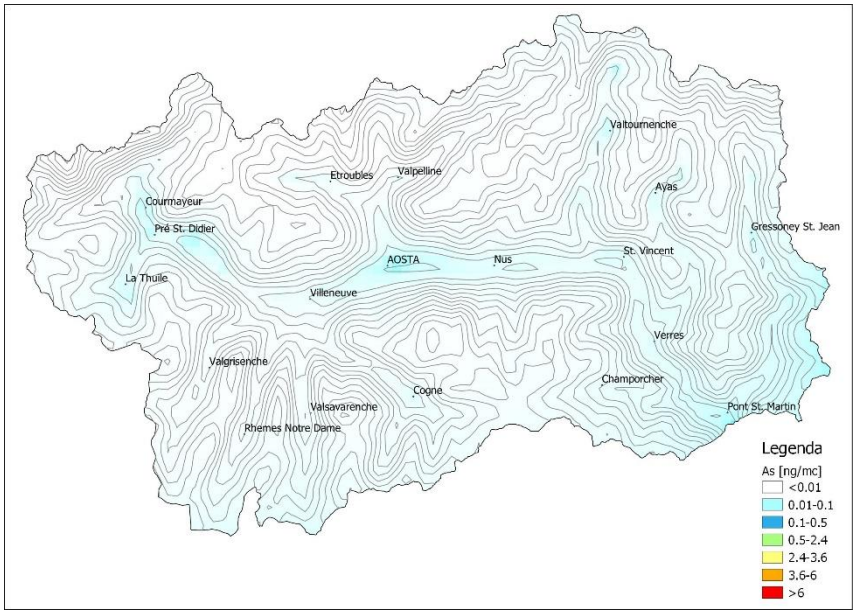


Figura 10: concentrazioni medie annuali di Arsenico (anno 2019)

2. *Cadmio*

Il Cadmio è emesso principalmente dal riscaldamento domestico a legna e, in minor misura, dall'industria.
Le concentrazioni di tale metallo si situano soprattutto nel fondovalle centrale.
I livelli di concentrazione dal giallo al rosso si rapportano al limite normativo e le sue soglie di valutazione.

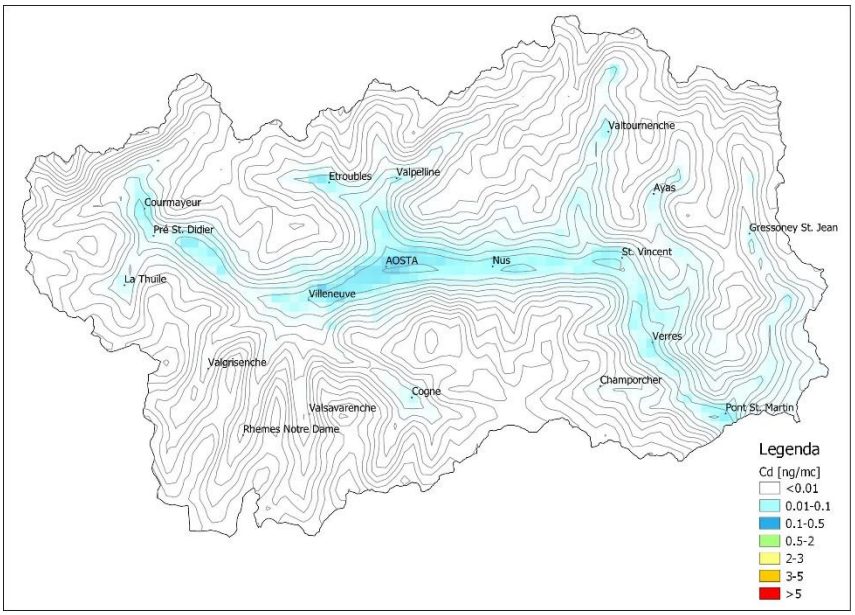


Figura 11: concentrazioni medie annuali di Cadmio (anno 2019)

3. Nichel

Il Nichel viene emesso dall'industria e dal riscaldamento domestico a legna.
Le concentrazioni di tale metallo si situano in particolare nel bacino del capoluogo, in corrispondenza del polo siderurgico.
I livelli di concentrazione dal giallo al rosso si rapportano al limite normativo e le sue soglie di valutazione.

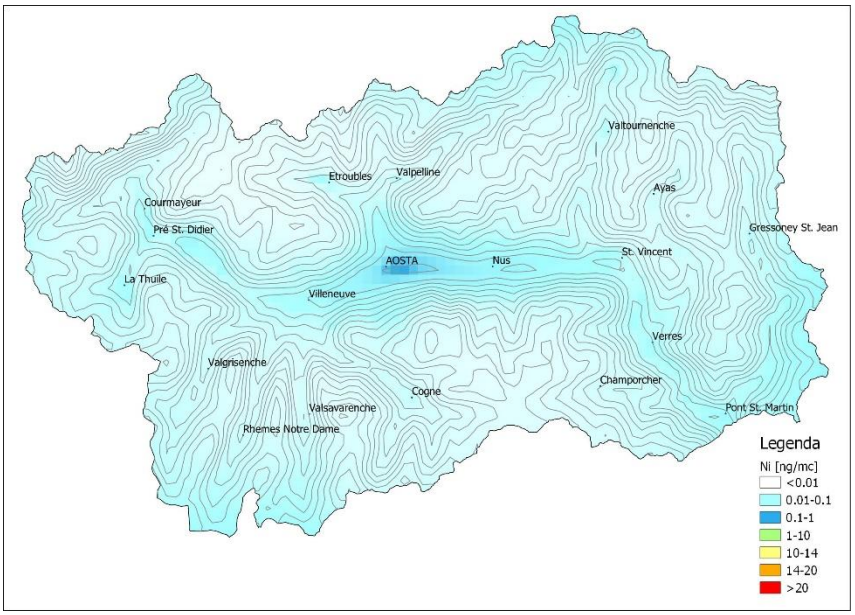


Figura 12: concentrazioni medie annuali di Nichel (anno 2019)

4. Piombo

Il Piombo viene emesso dal riscaldamento domestico a legna e dai veicoli.
Le concentrazioni di tale metallo si situano in particolare nella vallata centrale e nel capoluogo, seguendo le principali vie di traffico stradale.
I livelli di concentrazione dal giallo al rosso si rapportano al limite normativo e le sue soglie di valutazione.

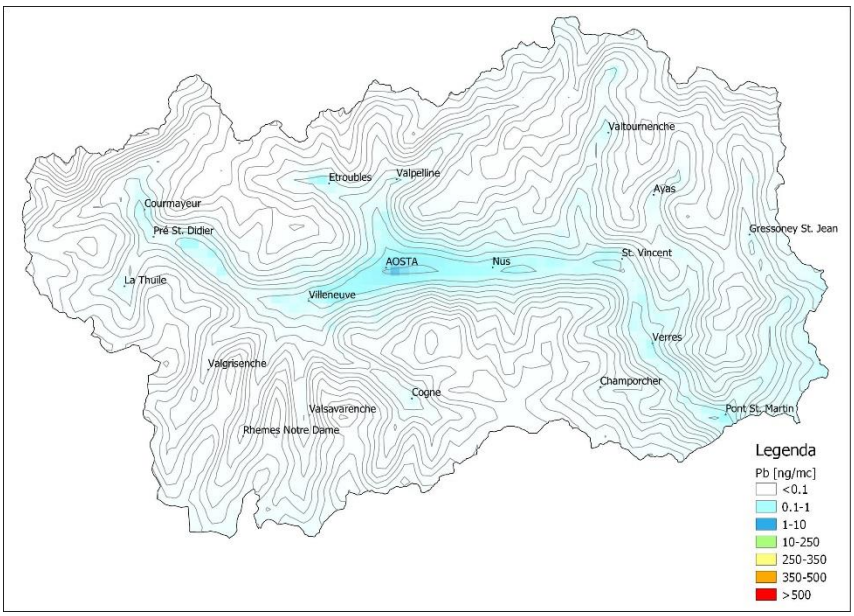


Figura 13: concentrazioni medie annuali di Piombo (anno 2019)

➢ Idrocarburi policiclici aromatici (benzo-a-pirene)

Gli Idrocarburi Policiclici Aromatici, dei quali il benzo-a-pirene è l'unico normato, sono legati particolarmente alle emissioni in atmosfera provocate dalla combustione della legna e, quindi, del settore riscaldamento residenziale.

Le concentrazioni di tali sostanze in aria risultano difatti presenti in particolare lungo tutti i fondovalle nei pressi degli abitati.

Per il benzo-a-pirene i livelli di concentrazione dal giallo al rosso si rapportano al limite normativo e le sue soglie di valutazione.

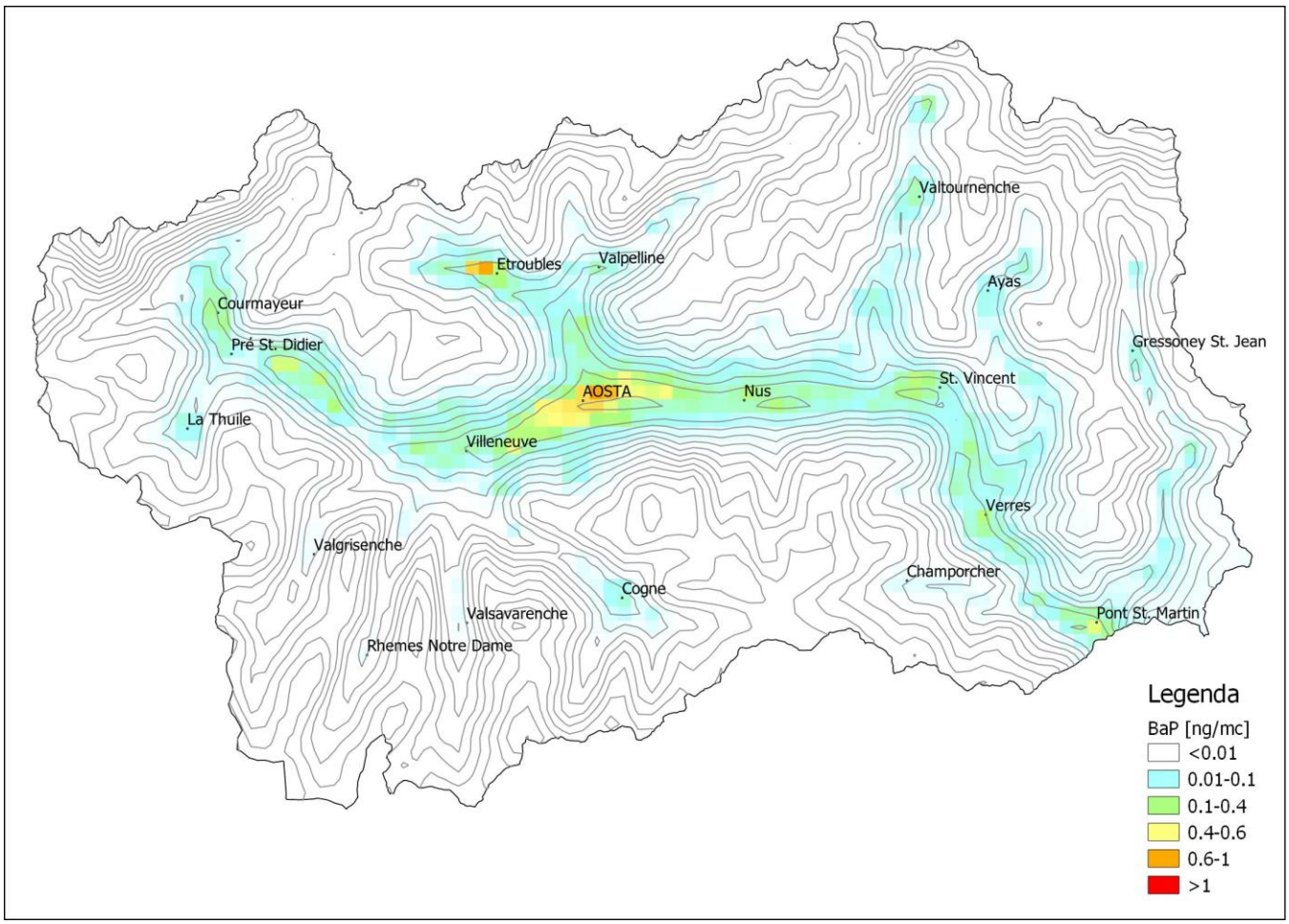


Figura 14: concentrazioni medie annuali di Benzo-A-Pirene (anno 2019)

Confronto dei risultati modellistici con le misure locali

I risultati delle simulazioni annuali elaborate vengono confrontati con i dati misurati presso le stazioni di monitoraggio della qualità dell'aria di ARPA Valle d'Aosta.
Nella tabella seguente sono indicati i punti di misura considerati per il confronto.

LOCALITA'	NO_2	PM10	PM2.5	O_3	CO	SO_2	C_6H_6	IPA SU PM10	METALLI SU PM10
AOSTA - PIAZZA PLOUVES	√	√	√	√	√	√	√	√	√
AOSTA - VIA LICONI	√	√	√	√				√	√
AOSTA - I MAGGIO	√	√	√					√	√
DONNAS	√	√		√					
LA THUILE	√	√		√					
ETROUBLES	√	√	√						
SAINT MARCEL (LAB. MOBILE)	√	√							

Viene di seguito illustrata l'analisi statistica per valutare il confronto tra i dati misurati e quelli simulati e quindi la prestazione generale del codice di calcolo nel riprodurre le concentrazioni di inquinanti in aria.

Il decreto legislativo 155/10, oltre agli obiettivi di qualità (vedere tabella seguente), stabilisce anche come ricavare l'incertezza del modello. Tale metodo prevede che per ciascun punto si confrontino dati ottenuti dalle stazioni di misurazione con quelli ottenuti dalle simulazioni definendo l'errore relativo (ER) come:

$$ER = \frac{|O_{VL} - M_{VL}|}{VL}$$

dove O_{VI} è la concentrazione misurata più vicina al valore limite (o al valore obiettivo) e M_{VI} è la corrispondente concentrazione fornita dal modello nella distribuzione quantile-quantile.
In generale, i migliori risultati di confronto tra le concentrazioni simulate e quelle misurate si ottengono quando le stazioni di misurazione sono rappresentative di una porzione di territorio all'incirca pari alla risoluzione del modello, che per la simulazione regionale è di 1 km. Per determinare l'incertezza del modello è, pertanto, necessario operare, per quanto possibile, il confronto delle concentrazioni simulate con i dati ottenuti da un set di stazioni di misurazione aventi rappresentatività spaziale congruente con la risoluzione spaziale del modello.

Incertezza	NO_2, SO_2	PM10	CO	O_3	C6H6	As, Cd, Ni	Pb	B(a)P
media mobile su 8 ore			50%	50%				
media annuale	30%	50%			50%	60%	50 %	60%

Incertezza del modello riportata nel DLgs 155/10 (allegato I Tabella I)

Nelle tabelle e nei grafici seguenti sono riportate i principali indici statistici e le incertezze del modello per la simulazione annuale di qualità dell'aria del 2018.
Le indicazioni che forniscono i primi due indici sono le seguenti:

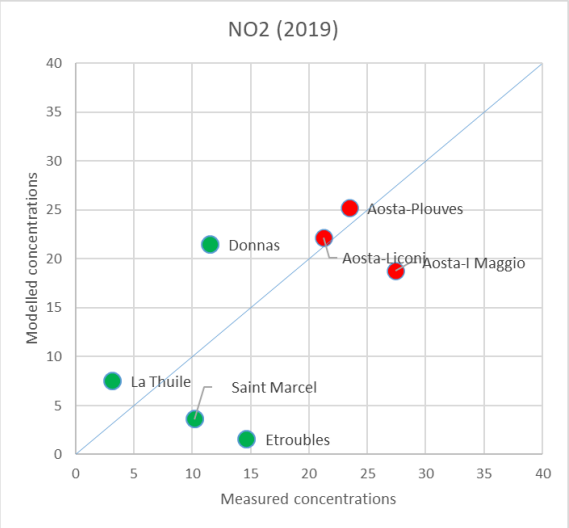
- **FRACTIONAL BIAS**: tendenza del modello alla sovrastima (se < 0) o sottostima (se > 0)
- **SKILL VAR**: capacità del modello a riprodurre le variazioni delle misure.

Nei grafici di confronto delle concentrazioni misurate e da modello vengono segnate in rosso le stazioni del capoluogo Aosta.

Macroinquinanti:

• media annuale NO_2 (µg/m³)

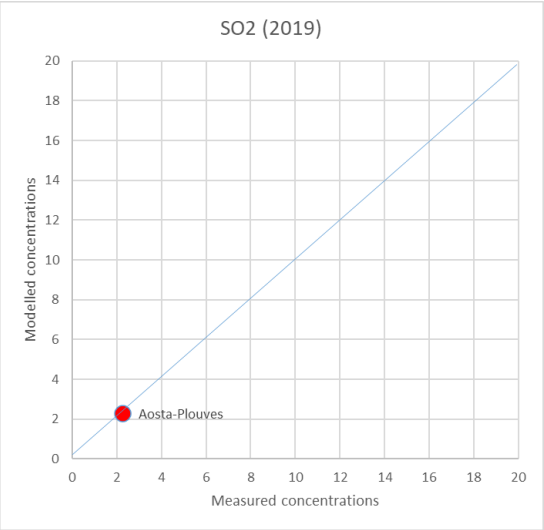
Stazione di monitoraggio	**Fractional Bias** [ottimale 0]	**SKILL VAR** [ottimale 1]	**Errore relativo su media annuale** [massimo ±30%]
Aosta – Piazza Plouves	-0.07	1.23	**-4%**
Aosta – via Liconi	-0.04	1.15	**-2%**
Aosta – I Maggio	0.37	0.94	**22%**
Etroubles	1.61	0.16	**33%**
Donnas	-0.60	1.84	**-25%**
La Thuile	-0.81	3.22	**-11%**
Saint Marcel	0.96	0.53	**17%**



Per il biossido di azoto i valori in uscita dal modello sono abbastanza vicini a quanto misurato e sono sostanzialmente in linea con l'incertezza fissata dal Decreto, a parte il punto di Etroubles che la supera di un 3%.

- **media annuale SO_2 ($\mu g/m^3$)**

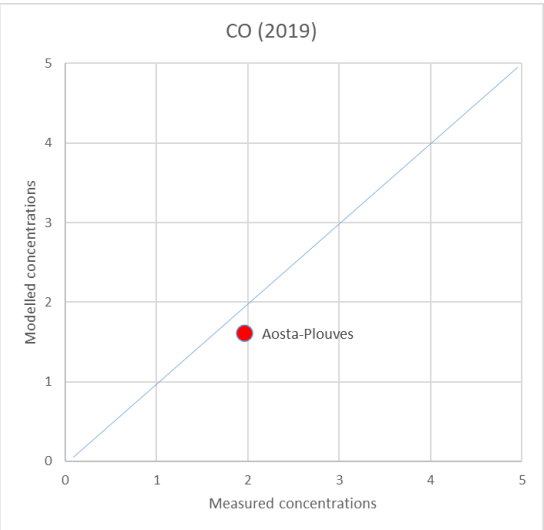
Stazione di monitoraggio	**Fractional Bias** [ottimale 0]	**SKILL VAR** [ottimale 1]	**Errore relativo su media annuale** [massimo ±30%]
Aosta – Piazza Plouves	-0.02	1.02	**0%**



Il biossido di zolfo é di poco sottostimato dal modello ed è ampiamente in linea con l'incertezza fissata dal Decreto.

- **media mobile su 8 ore CO (mg/m^3)**

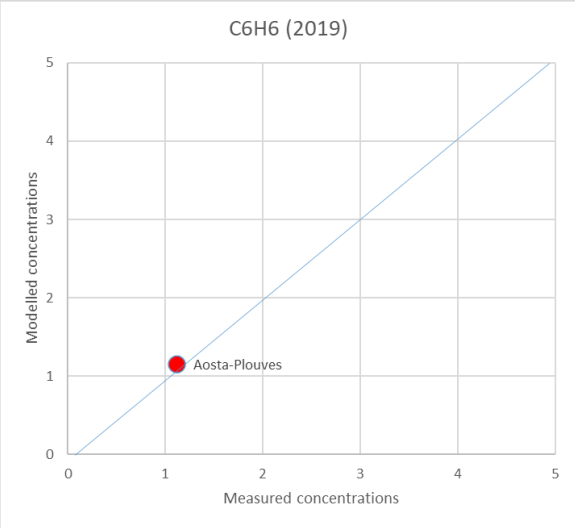
Stazione di monitoraggio	**Fractional Bias** [ottimale 0]	**SKILL VAR** [ottimale 1]	**Errore relativo su media mobile 8h** [massimo ±50%]
Aosta – Piazza Plouves	0.64	0.88	**3%**



Il monossido di carbonio è di poco sottostimato dal modello e risulta del tutto in linea con l'incertezza fissata dal Decreto.

- **media annuale C_6H_6 (µg/m³)**

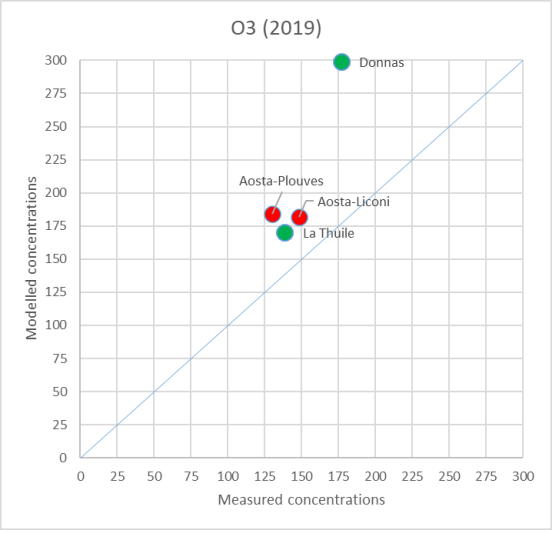
Stazione di monitoraggio	**Fractional Bias** [ottimale 0]	**SKILL VAR** [ottimale 1]	**Errore relativo su media annuale** [massimo ±50%]
Aosta – Piazza Plouves	-0.04	1.04	**-1%**



Il benzene simulato è vicino a quello misurato e rispetta decisamente il limite di incertezza fissato dal Decreto.

- **media mobile su 8 ore O_3 (µg/m³)**

Stazione di monitoraggio	**Fractional Bias** [ottimale 0]	**SKILL VAR** [ottimale 1]	**Errore relativo su massima media mobile 8h** [massimo ±50%]
Aosta – p.zza Plouves	0.21	0.96	**-45%**
Aosta – via Liconi	0.22	0.87	**-28%**
Donnas	-0.14	1.18	**-101%**
La Thuile	0.32	1.34	**-26%**



L'ozono é sovrastimato dal modello e supera l'incertezza ammessa dal Decreto per la stazione di Donnas, per le due stazioni di Aosta e di La Thuile rientra invece nella tolleranza consentita.

- **media annuale PM_{10} ($\mu g/m^3$)**

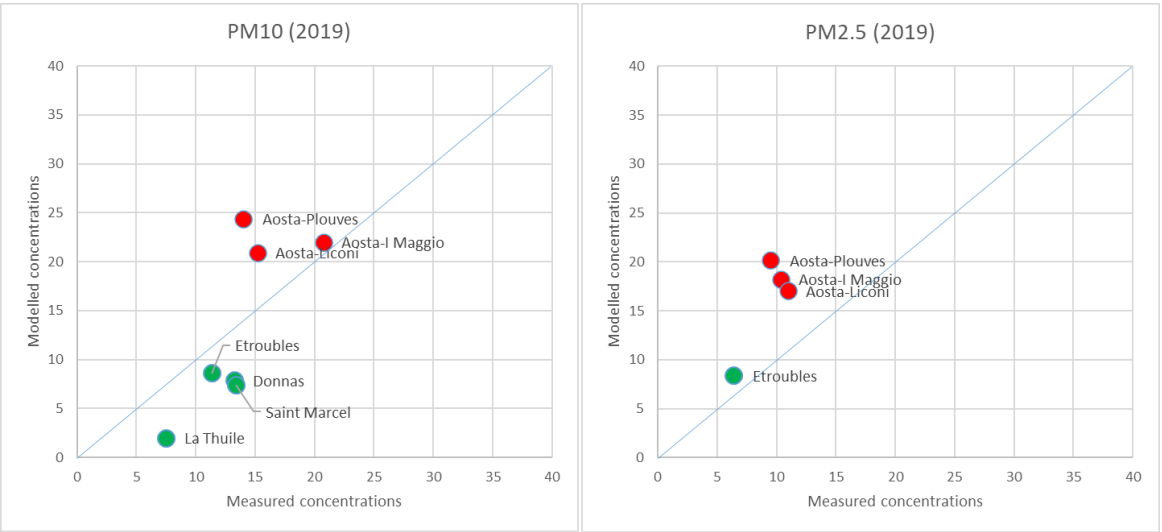
Stazione di monitoraggio	**Fractional Bias** [ottimale 0]	**SKILL VAR** [ottimale 1]	**Errore relativo su media annuale** [massimo ±50%]
Aosta – Piazza Plouves	-0.54	2.16	**-26%**
Aosta – via Liconi	-0.32	1.92	**-14%**
Aosta – I Maggio	-0.06	1.54	**-3%**
Etroubles	0.28	0.80	**7%**
Donnas	0.51	0.62	**13%**
La Thuile	1.17	0.30	**14%**
Saint Marcel	0.58	0.72	**15%**

Le polveri PM10 sono sovrastimate dal modello nell'abitato di Aosta e sottostimate altrove, risultano comunque in linea con l'incertezza fissata dal Decreto.

- **media annuale $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)**

Stazione di monitoraggio	**Fractional Bias** [ottimale 0]	**SKILL VAR** [ottimale 1]	**Errore relativo su media annuale** [massimo ±50%]
Aosta – Piazza Plouves	-0.72	2.38	**-43%**
Aosta – via Liconi	-0.43	2.39	**-24%**
Aosta – I Maggio	-0.55	2.33	**-31%**
Etroubles	-0.26	1.41	**-8%**

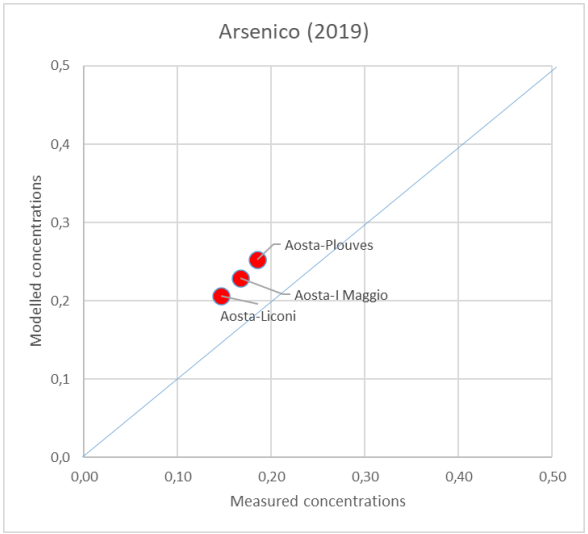
Le polveri PM2.5 sono sovrastimate dal modello e risultano in linea con l'incertezza fissata dal Decreto.



Microinquinanti:

- ### media annuale Arsenico (ng/m³)

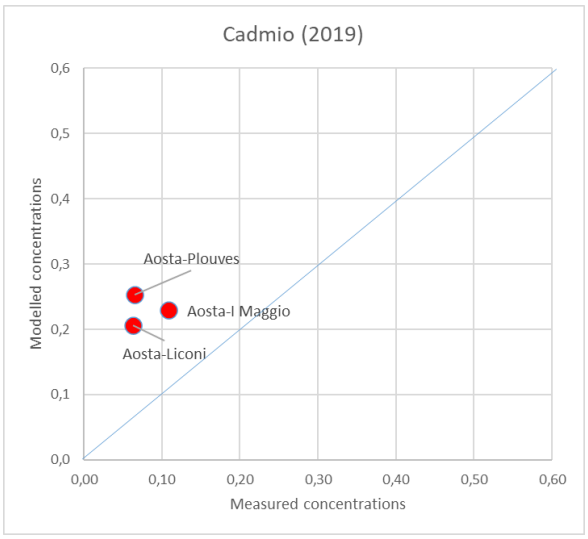
Stazione di monitoraggio	**Fractional Bias** [ottimale 0]	**SKILL VAR** [ottimale 1]	**Errore relativo su media annuale** [massimo ±60%]
Aosta – Piazza Plouves	-0.31	1.71	**-1%**
Aosta – via Liconi	-0.34	2.25	**-1%**
Aosta – via I Maggio	-0.32	2.02	**-1%**



L'arsenico è di poco sovrastimato dal modello ed in linea con l'incertezza fissata dal Decreto.

- ### media annuale Cadmio (ng/m³)

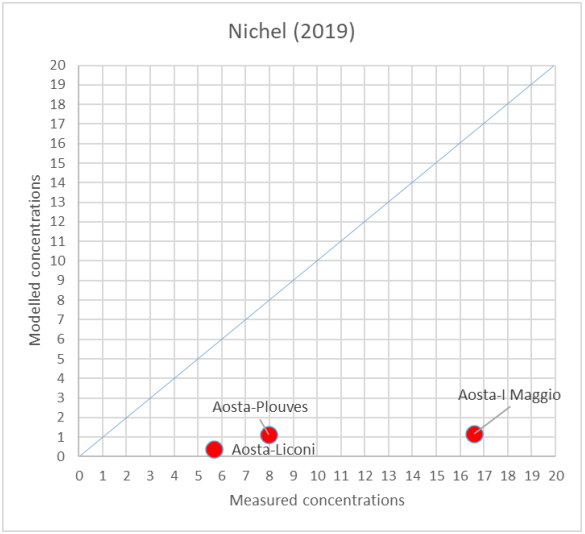
Stazione di monitoraggio	**Fractional Bias** [ottimale 0]	**SKILL VAR** [ottimale 1]	**Errore relativo su media annuale** [massimo ±60%]
Aosta – Piazza Plouves	-1.18	5.48	**-4%**
Aosta – via Liconi	-1.07	4.87	**-3%**
Aosta – via I Maggio	-0.71	3.14	**-2%**



Il cadmio è fortemente sovrastimato dal modello, ma risulta comunque in linea con l'incertezza ammessa dal Decreto.

- **media annuale Nichel (ng/m³)**

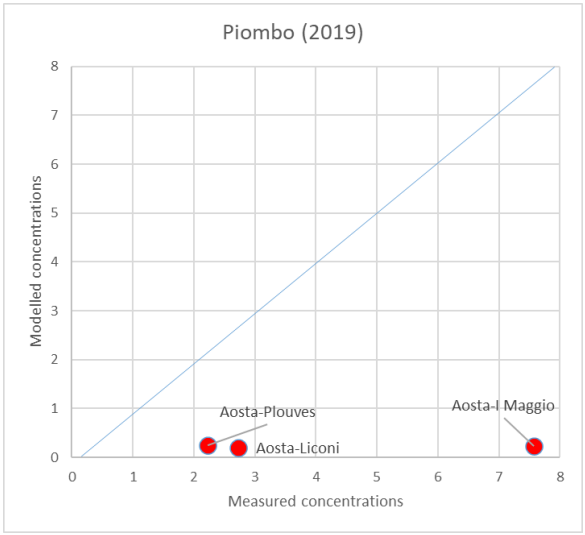
Stazione di monitoraggio	**Fractional Bias** [ottimale 0]	**SKILL VAR** [ottimale 1]	**Errore relativo su media annuale** [massimo ±60%]
Aosta – Piazza Plouves	1.50	0.10	**34%**
Aosta – via Liconi	1.74	0.04	**26%**
Aosta –I Maggio	1.74	0.04	**77%**



Il nichel è fortemente sottostimato dal modello e supera l'incertezza fissata dal Decreto per la stazione industriale di Aosta – via I Maggio. Si rende necessaria una revisione del calcolo delle emissioni industriali di tale metallo.

- **media annuale Piombo (ng/m³)**

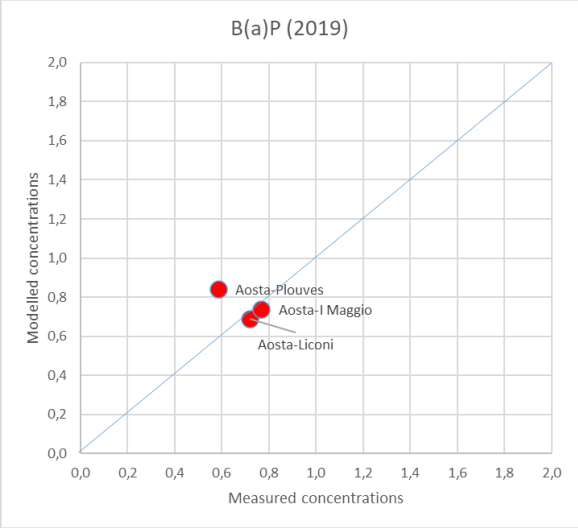
Stazione di monitoraggio	**Fractional Bias** [ottimale 0]	**SKILL VAR** [ottimale 1]	**Errore relativo su media annuale** [massimo ±50%]
Aosta – Piazza Plouves	1.59	0.16	**0.4%**
Aosta – via Liconi	1.72	0.09	**0.5%**
Aosta – via I Maggio	1.88	0.02	**1.5%**



Il piombo è molto sottostimato dal modello, ma in linea con l'incertezza fissata dal Decreto.

- **media annuale $B_{(A)}P$ (ng/m^3)**

Stazione di monitoraggio	**Fractional Bias** [ottimale 0]	**SKILL VAR** [ottimale 1]	**Errore relativo su media annuale** [massimo ±60%]
Aosta – Piazza Plouves	-0.36	1.11	**-26%**
Aosta – via Liconi	0.04	0.69	**3%**
Aosta – I Maggio	0.04	0.73	**3%**



Il benzo-a-pirene è ben riprodotto dal modello, con incertezza inferiore a quanto fissato dal Decreto.