



Verifica della catena modellistica di qualità dell'aria in Emilia-Romagna Anno 2021

Prima parte: analisi

Unità previsioni numeriche qualità dell'aria Arpae Struttura Idro-Meteo-Clima
Michele Stortini, Roberta Amorati, Giulia Giovannini, Lidia Bressan

Luglio 2022

Indice

1. Introduzione	3
2. La catena operativa	3
3. I dati osservati	5
4. Gli inquinanti	5
5. Metodo di verifica	6
MQI assessment	6
Summary plot	7
Target Plot	7
Scatter plot	9
6. Risultati della verifica	10
PM10	10
PM2.5	12
O ₃	13
NO ₂	15
7. Sintesi e conclusioni	17
Acronimi e sigle	18
Bibliografia	18

1. Introduzione

Lo scopo del presente lavoro è la valutazione delle prestazioni delle analisi di concentrazione di inquinanti ottenute dalla catena modellistica di qualità dell'aria, operativa in Arpae. Questa catena produce giornalmente le analisi del giorno precedente e le previsioni di qualità dell'aria per i tre giorni successivi. Le analisi rappresentano la riproduzione dello stato passato dell'atmosfera utilizzando i dati e le informazioni disponibili, mentre le previsioni calcolano lo stato futuro.

In questo primo lavoro vengono valutate le analisi, effettuate ogni giorno sulla regione Emilia-Romagna, delle concentrazioni del giorno precedente dei principali inquinanti: materiale particolato (PM10, PM2.5), biossido di azoto (NO₂) e ozono (O₃). La valutazione del modello si riferisce alle prestazioni complessive su base annuale per il 2021.

La presente verifica si inserisce nell'ambito delle attività del Forum for Air Quality Modeling (FAIRMODE) coordinate dal Joint Research Centre (JRC) su mandato dell'Agenzia Ambientale Europea (EEA).

2. La catena operativa

La catena modellistica della qualità dell'aria, gestita operativamente da Arpae, produce quotidianamente analisi e previsioni orarie di concentrazione di inquinanti su vari domini: europeo, italiano, di bacino padano e regionale dell'Emilia-Romagna (Stortini et al., 2020).

Le corse del modello sono effettuate in successione su diverse griglie innestate, a partire dal dominio europeo a bassa risoluzione spaziale (20 km), in cui è innestata la griglia italiana (ITA7 a risoluzione di 7 km), che contiene a sua volta la griglia a scala locale centrata sulla regione Emilia-Romagna a maggiore risoluzione (EMR3 a 3 km). I diversi domini sono rappresentati in Figura 1.

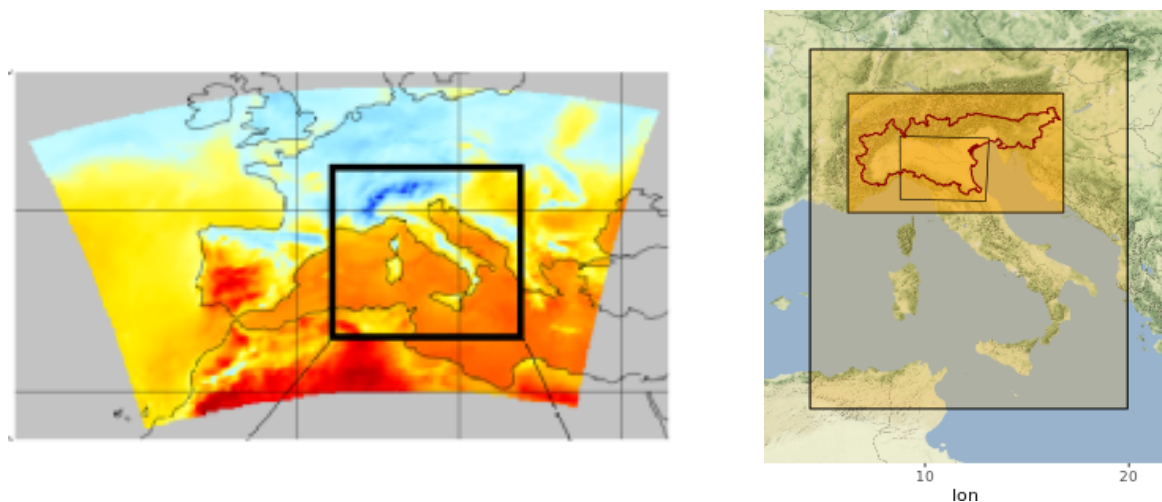


Figura 1: domini utilizzati dalla catena modellistica della qualità dell'aria di Arpae Emilia-Romagna. Dal dominio europeo, al dominio italiano, al dominio del bacino padano al dominio della regione Emilia-Romagna.

La catena modellistica è composta da un modello di trasporto chimico (Chemical Transport Model, CTM) abbinato a un modello meteorologico che fornisce lo stato e l'evoluzione dell'atmosfera.

Il modello di trasporto chimico, CHIMERE (<http://www.lmd.polytechnique.fr/chimere/>; Mailler et al., 2017), è un modello numerico euleriano che calcola il trasporto, la dispersione, le reazioni chimiche e la deposizione umida e secca dei gas e degli aerosol presenti in atmosfera.

Per la forzante meteorologica vengono utilizzati i campi atmosferici orari forniti dal modello COSMO-5M e COSMO-2I, rispettivamente a 5 km e 2 km di risoluzione orizzontale. COSMO (<http://www.cosmo-model.org>; Doms et al., 2020) è il modello adottato dalla Protezione Civile Nazionale per le previsioni operative giornaliere ed è gestito da Arpa-Struttura IdroMeteoClima (SIMC).

Componente necessaria alla catena modellistica di qualità dell'aria è il dato emissivo in input. I quantitativi di inquinanti primari e precursori immessi in atmosfera vengono stimati a partire da inventari a diversa scala spaziale: a livello regionale l'inventario delle emissioni INEMAR (Inventario EMISSIONI ARia), a livello italiano l'inventario nazionale ISPRA e a livello transnazionale viene utilizzato l'inventario europeo elaborato nell'ambito del progetto MACC (Monitoring Atmospheric Composition and Climate, 2011). Le condizioni al contorno per il dominio europeo vengono prese dal modello globale CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service).

In Figura 2 sono evidenziate le componenti principali della catena modellistica di qualità dell'aria.

Le simulazioni del modello di qualità dell'aria si riferiscono a un volume di atmosfera, fino a 500 hPa. Per il confronto con il dato osservato da stazione vengono estratti i valori al primo livello vicino al suolo.

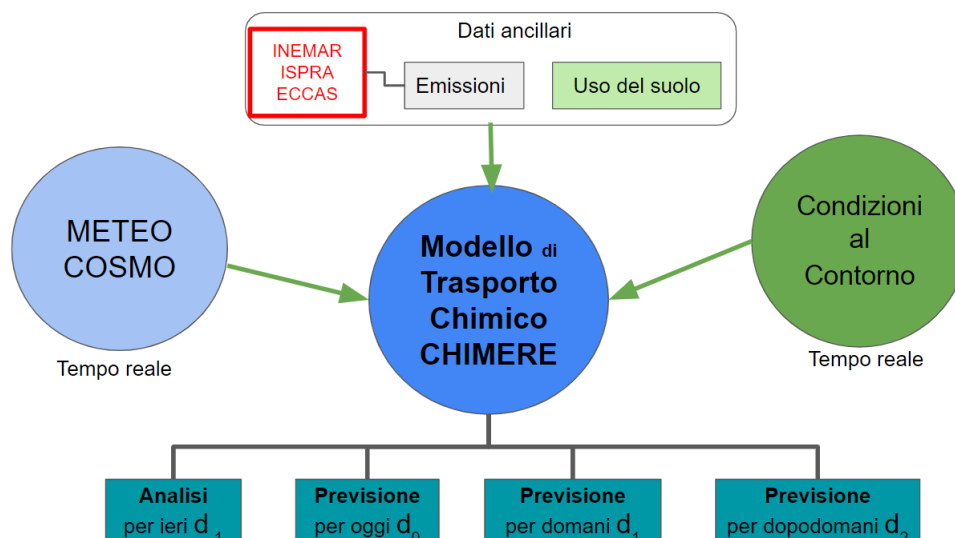


Figura 2: schema della catena modellistica di qualità dell'aria di Arpa.

3. I dati osservati

Arpae monitora la qualità dell'aria attraverso la [Rete Regionale di Qualità dell'Aria \(RRQA\)](#), che è costituita da 47 stazioni fisse distribuite sul territorio regionale (Figura 3), suddivise in stazioni di fondo (urbano, suburbano, rurale) e traffico (urbano). I dati misurati sono controllati e validati quotidianamente dagli operatori Arpae delle unità dell'aria dei Sistemi Ambientali (SSA). I dati utilizzati per la verifica delle stime da modello sono i dati orari del biossido di azoto (NO₂) e dell'ozono (O₃) e i dati giornalieri delle polveri, PM10 e PM2.5. In questo report vengono usate per la verifica le stazioni di fondo, più confrontabili con i dati simulati alla risoluzione del modello di 3X3 km².

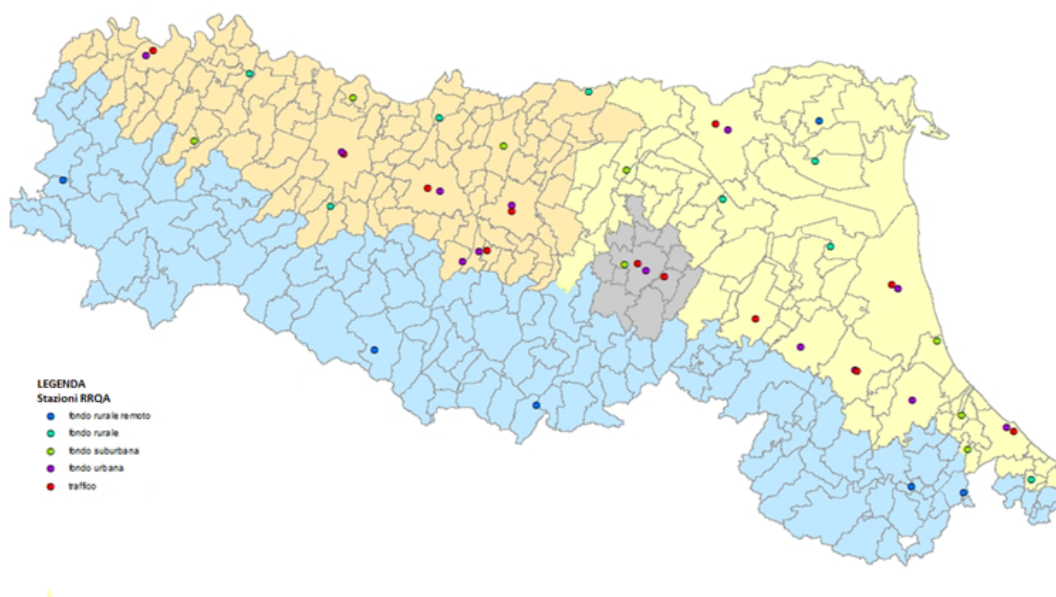


Figura 3: Stazioni della rete regionale di monitoraggio della qualità dell'aria.

4. Gli inquinanti

Il modello di trasporto chimico elabora e produce le concentrazioni di centinaia di specie gassose e di aerosol. La verifica descritta in questo lavoro è stata eseguita sugli inquinanti e sugli indicatori di maggiore interesse disciplinati da normativa: il massimo giornaliero di biossido di azoto (NO₂), il massimo della media mobile su 8 ore di ozono (O₃) e le concentrazioni medie giornaliere del materiale particolato PM10 e PM2.5.

Inquinante	Indicatore	Soglia giornaliera di legge
NO ₂	massimo orario	200 µg/m ³
O ₃	massimo della media mobile sulle 8 ore	120 µg/m ³
PM10	media giornaliera	50 µg/m ³
PM2.5	media giornaliera	nessuna

Tabella 1: Inquinanti soggetti a normativa, considerati in questa verifica

5. Metodo di verifica

Le concentrazioni al suolo prodotte dal modello vengono confrontate con i dati osservati dalle stazioni di misura di fondo. Ad ogni punto di misura viene associato il valore stimato dal modello sul punto di griglia più vicino.

La valutazione delle analisi della catena modellistica, per l'intero anno 2021, è stata effettuata utilizzando il software dedicato *DeltaTool*, un software di analisi statistica sviluppato dal JRC nel contesto FAIRMODE (<https://fairmode.jrc.ec.europa.eu/>) allo scopo di soddisfare i requisiti della Direttiva Europea 2008/50/EC ed ampiamente adottato per la verifica di modelli di qualità dell'aria (Monteiro et al. 2018).

Il DeltaTool (Janseen and Thunis, 2022) permette la valutazione dei modelli non solo utilizzando gli indicatori statistici classici (ad es. RMSE, CORR, FB), ma anche attraverso indicatori complessivi di "assessment" (analisi) e di "forecast" (previsione). Tali indicatori sono stati definiti e discussi all'interno del gruppo di lavoro CT3 di [FAIRMODE](#), cui partecipa anche Arpae.

In particolare viene identificato un obiettivo di qualità (MQO, Modelling Quality Objective) minimo che deve essere raggiunto dall'indicatore di qualità (MQI, Modelling Quality Indicator), affinché il modello possa essere considerato adeguato per finalità di pianificazione o di previsione (Pernigotti et al., 2013; Thunis et al. 2012 a) e b)).

MQI assessment

Per la verifica delle analisi, l'indicatore di qualità MQI (che deve essere inferiore o uguale a 1) viene definito come il rapporto tra l'errore del modello e un valore rappresentativo dell'incertezza massima accettabile.

$$MQI_{assessment} = \frac{RMSE}{\beta RMSU}, \text{ dove}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - M_i)^2},$$

con O_i dato osservato e M_i dato simulato dal modello

RMSU è l'incertezza delle misure, definita come $RMSU = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_{95}(O_i))^2}$

Il valore di β è assunto pari a 2, permettendo una deviazione del modello dalle osservazioni pari al doppio dell'incertezza delle misure.

Come indicato nel D. Lgs 155/2010, l'MQO deve essere soddisfatto per almeno il 90% delle stazioni disponibili. L'implementazione di questo approccio nel DeltaTool consiste nel calcolare l'MQI per ogni stazione di monitoraggio, ordinare i valori ottenuti in senso crescente e calcolare il 90° percentile secondo la seguente interpolazione lineare:

$$MQI_{90^{\circ}\text{perc}} = MQI_{(\text{stat}90)} + [MQI_{(\text{stat}90+1)} - MQI_{(\text{stat}90)}] * \text{dist}$$

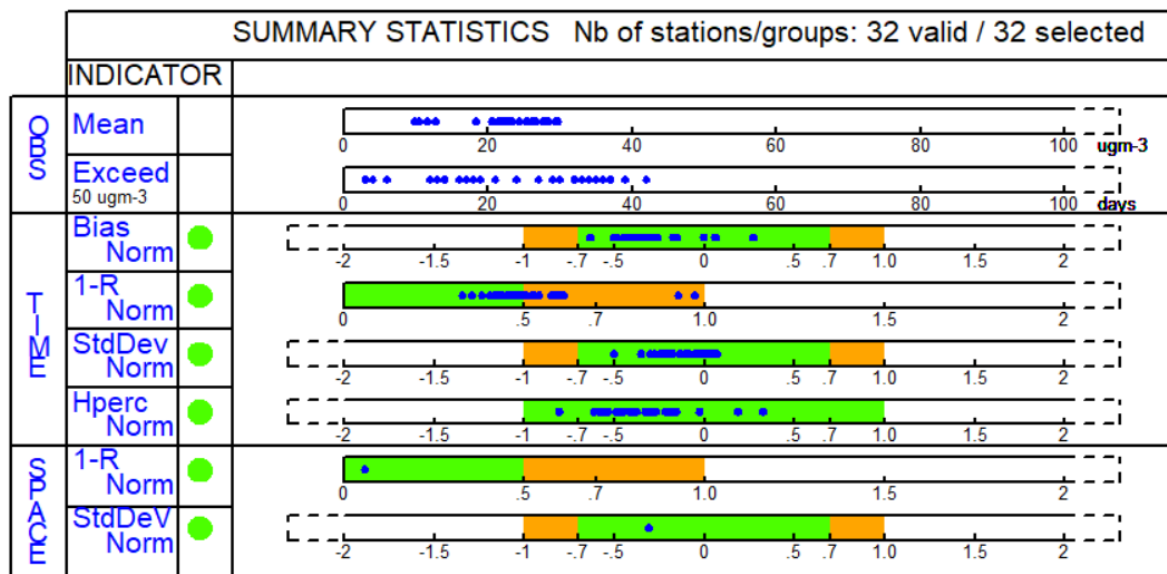
dove

$$\text{stat}90 = \text{int}(\text{numero stazioni} * 0.9)$$

$$\text{dist} = \text{numero stazioni} * 0.9 - \text{int}(\text{numero stazioni} * 0.9)$$

MQO è quindi soddisfatto se $MQI_{90^{\circ}\text{perc}} \leq 1$.

Summary plot



Esempio di summary plot

Questi diagrammi grafici sintetizzano insieme molte informazioni e sono strutturati come una tabella, con gli indicatori statistici a sinistra e i risultati a destra.

Nella valutazione di assessment le prime due righe si riferiscono alla media annuale delle osservazioni (OBS Mean) e al numero di superamenti di soglia nell'anno (OBS Exceed). Le righe successive si riferiscono agli indicatori calcolati per la valutazione del modello (Janseen and Thunis, 2022), raggruppati in indicatori che rappresentano la qualità della stima temporale (TIME) e della stima spaziale (SPACE). Per ogni indicatore, vengono mostrati i corrispondenti valori calcolati per ogni stazione e vengono inoltre indicate zone verdi, arancioni e bianche, a seconda della qualità della stima: i punti che ricadono nelle zone verdi o arancioni soddisfano i criteri di performance del modello, con la specifica che per il punto ricadente nell'area arancione l'errore complessivo, pur soddisfacendo il criterio di performance, è dominato dal corrispondente indicatore statistico.

La terza colonna fornisce informazioni sul raggiungimento dei criteri di qualità del modello, con verde che significa "criterio soddisfatto" e rosso "criterio non soddisfatto".

Target Plot

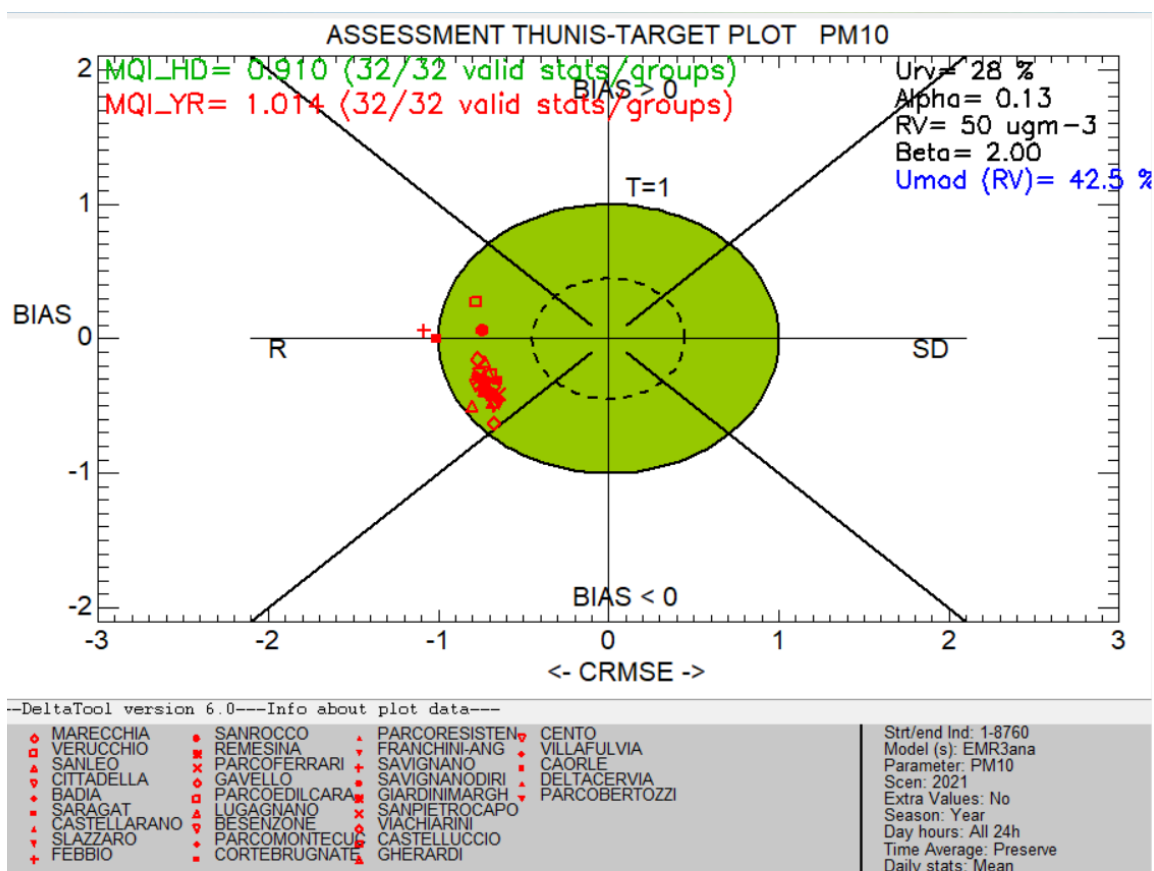
Il DeltaTool consente di visualizzare in modo immediato se l'obiettivo di qualità viene raggiunto per le diverse stazioni su un diagramma specifico, denominato target plot, i cui assi X e Y rappresentano rispettivamente il CRMSE (centered root mean square error) ed il BIAS normalizzati rispetto all'incertezza delle osservazioni β RMSu.

Il CRMSE è definito come

$$CRMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((M_i - \bar{M}) - (O_i - \bar{O}))^2}$$

ed inoltre vale

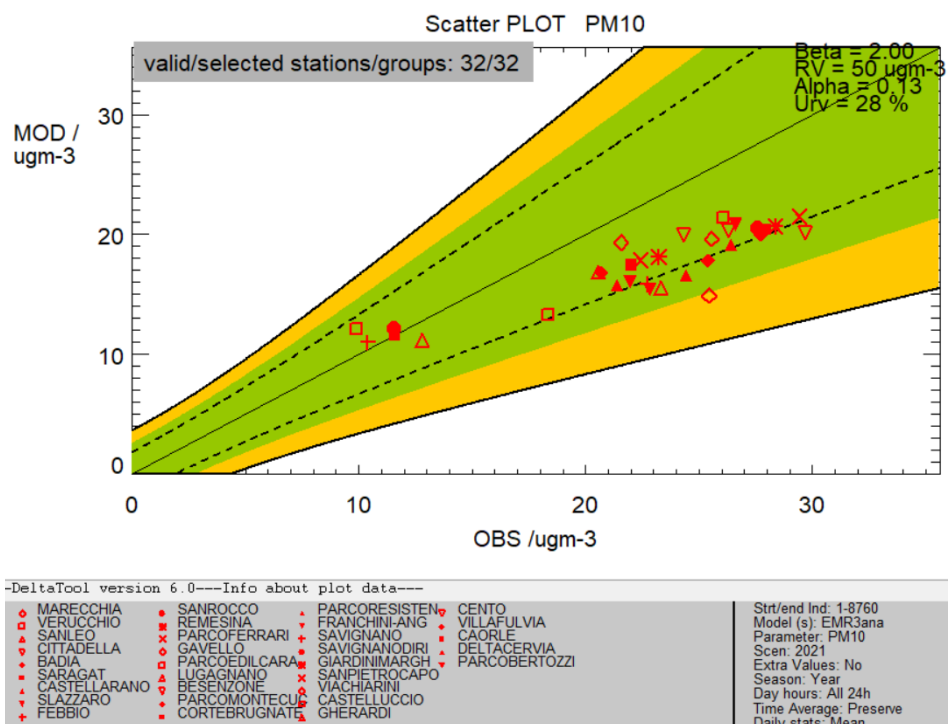
- $RMSE^2 = BIAS^2 + CRMSE^2$
- $CRMSE^2 = \sigma_o^2 + \sigma_M^2 - 2 \sigma_o \sigma_M R$



Esempio di target plot

L'area colorata in verde identifica il raggiungimento del criterio di performance ($T \leq 1$), il cerchio tratteggiato rappresenta l'area all'interno della quale $T \leq 0.5$. Il valore numerico di $MQI_{90^{perc}}$ è indicato in alto a sinistra nel diagramma (MQI_HD), insieme al MQI annuale (MQI_YR). L'asse negativo e positivo delle ordinate identificano rispettivamente un bias negativo e positivo, mentre le zone a sinistra e a destra dell'asse Y identificano gli errori dominati rispettivamente dalla correlazione o dalla deviazione standard (Janssen and Thunis, 2022).

Scatter plot



Esempio di scatter plot

Lo scatter plot è utile per la valutazione e la rendicontazione dei risultati medi annuali del modello. Ogni punto dello scatter plot rappresenta una centralina di monitoraggio, mentre le linee tratteggiate rappresentano il rapporto tra il bias e due volte il valore dell'incertezza delle misure (BIAS/2RMSU). Le linee tratteggiate e quelle continue individuano le regioni dove tale rapporto vale 0.5 e 1 mentre quelle arancioni le aree dove tale rapporto è maggiore di 0.71.

I diagrammi sopra descritti sono spiegati nel dettaglio nella documentazione di DeltaTool, dove vengono esposti i metodi di calcolo degli indicatori statistici e i metodi di definizione delle aree colorate (Thunis P. and C. Cuvelier, 2020).

6. Risultati della verifica

I risultati delle elaborazioni eseguite con il DeltaTool sul dominio di simulazione sull'Emilia-Romagna a 3 km di risoluzione sono presentati nei paragrafi seguenti.

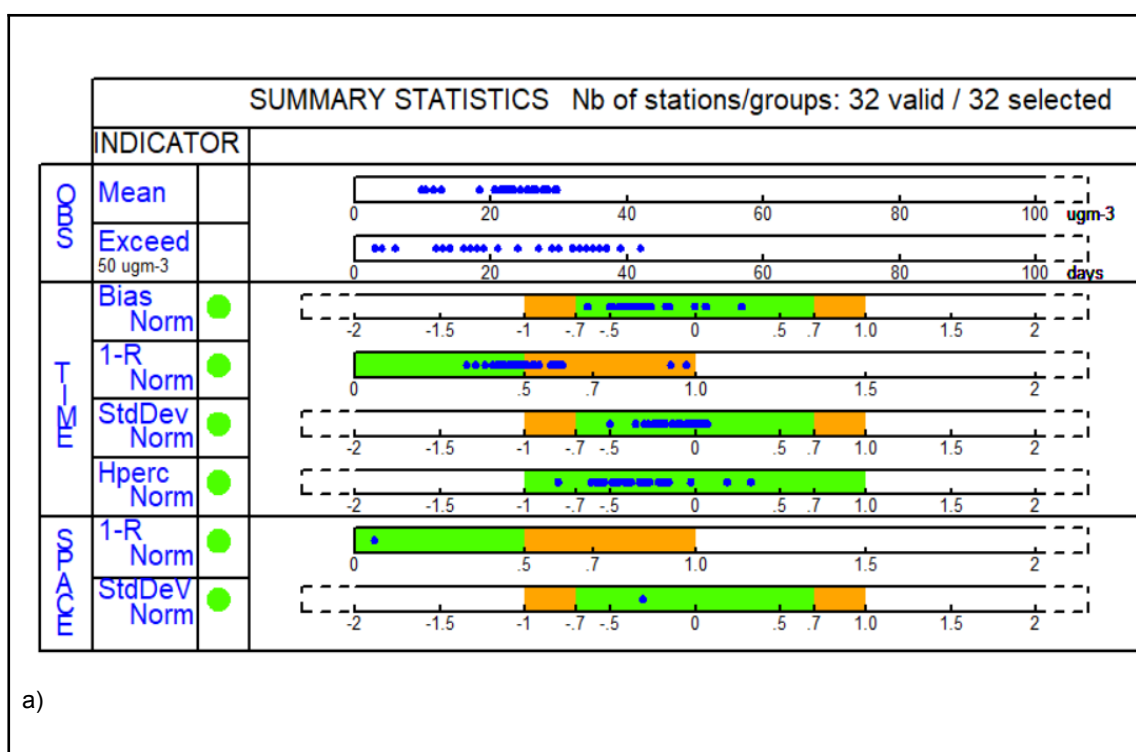
Per tutti gli inquinanti elencati in Tabella 1 sono riportati il summary plot, il target plot e lo scatter plot, descritti nel paragrafo precedente.

Il target plot mostra che l'indicatore di qualità MQI associato al 90° percentile delle stazioni (indicato in alto a sinistra del diagramma) risulta minore di 1 per tutti gli inquinanti, soddisfacendo per il 2021 l'obiettivo di qualità.

PM10

Per il PM10 il summary plot (Figura 4a) mostra buone performance da parte del modello, evidenziate dal puntino verde accanto ad ogni indicatore statistico. Il target plot mostra che l'indicatore di qualità MQI associato al 90° percentile delle stazioni risulta minore di 1 (Figura 4b).

Gli scatter plot (Figura 4c) evidenziano una leggera sottostima delle concentrazioni da parte del modello, tuttavia la maggior parte delle stazioni si posizionano nella zona verde del grafico che racchiude l'area in cui l'incertezza del modello rientra nell'incertezza massima accettabile.



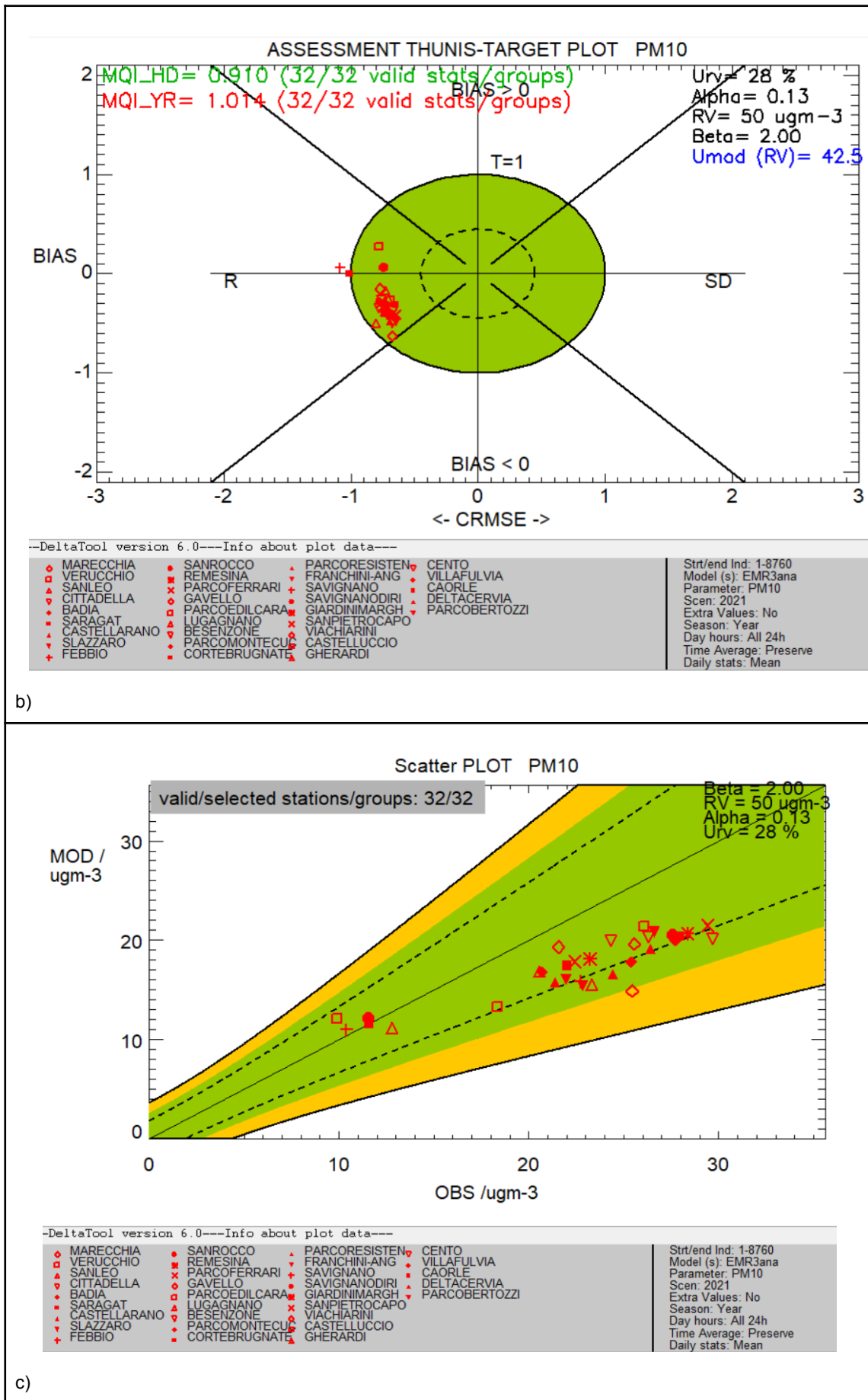
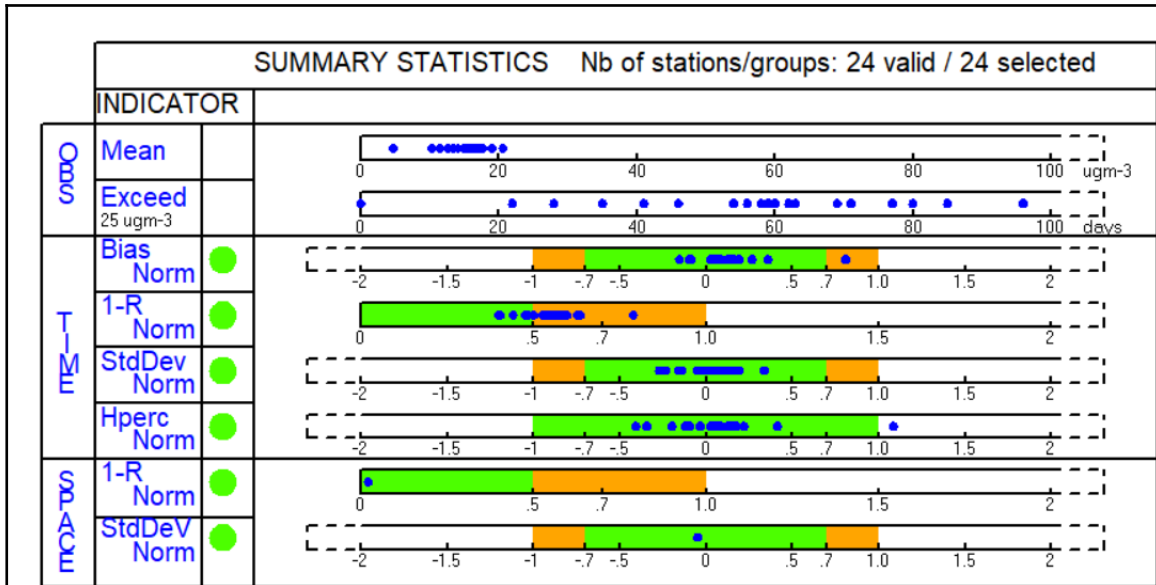


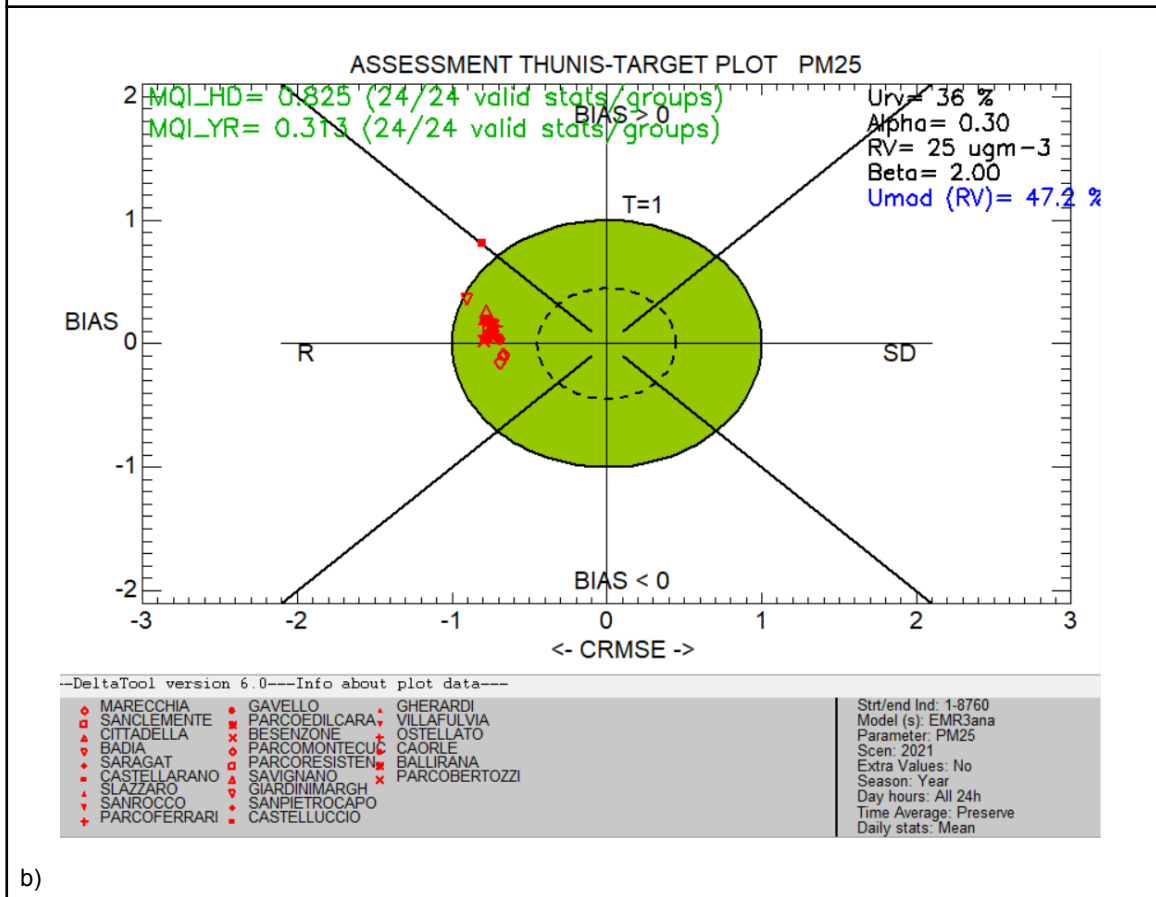
Figura 4: PM10 - Summary statistics, target plot e scatter plot. Confronto modello EMR3 e stazioni di fondo

PM2.5

I grafici relativi al PM2.5 vengono rappresentati nella Figura 5 da cui si osserva che viene rispettato l'obiettivo di qualità. L'indicatore di qualità MQI associato al 90° percentile delle stazioni risulta minore di 1. Da notare la differenza di comportamento della stima di PM10, generalmente sottostimato, e di PM2.5 che presenta invece un bias prossimo allo zero, ma positivo.



a)



b)

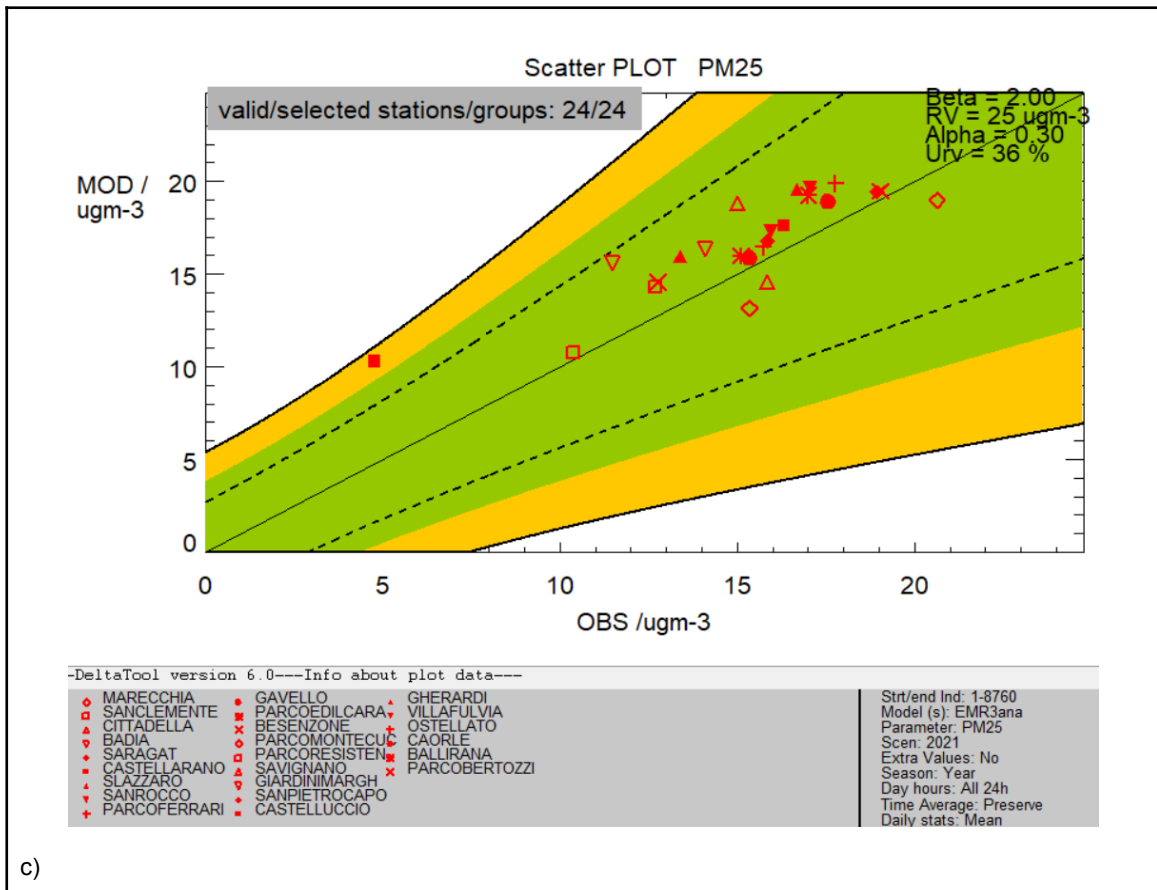
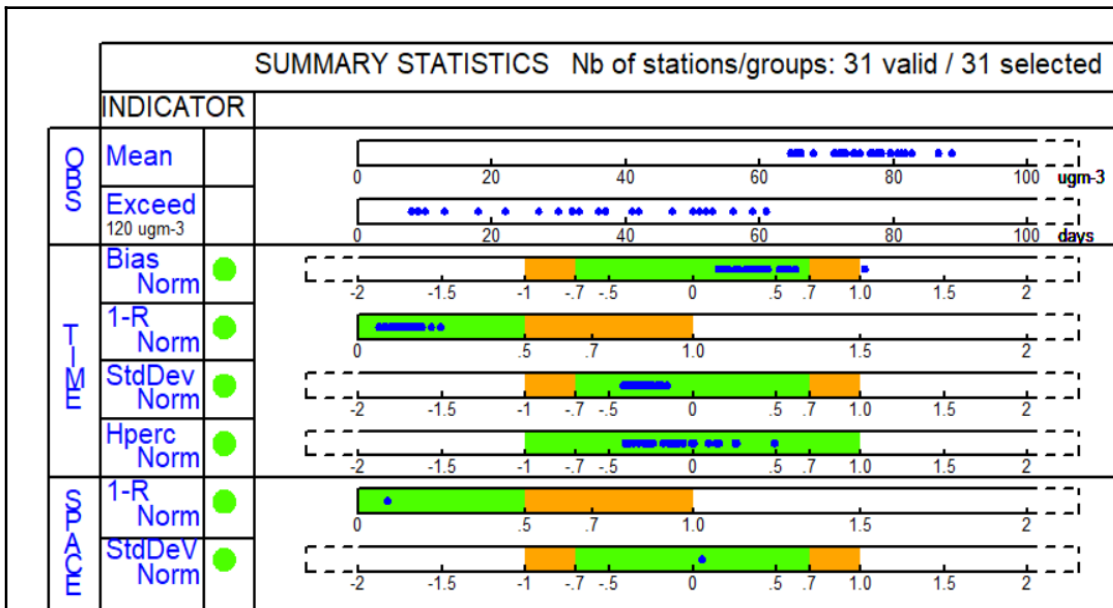


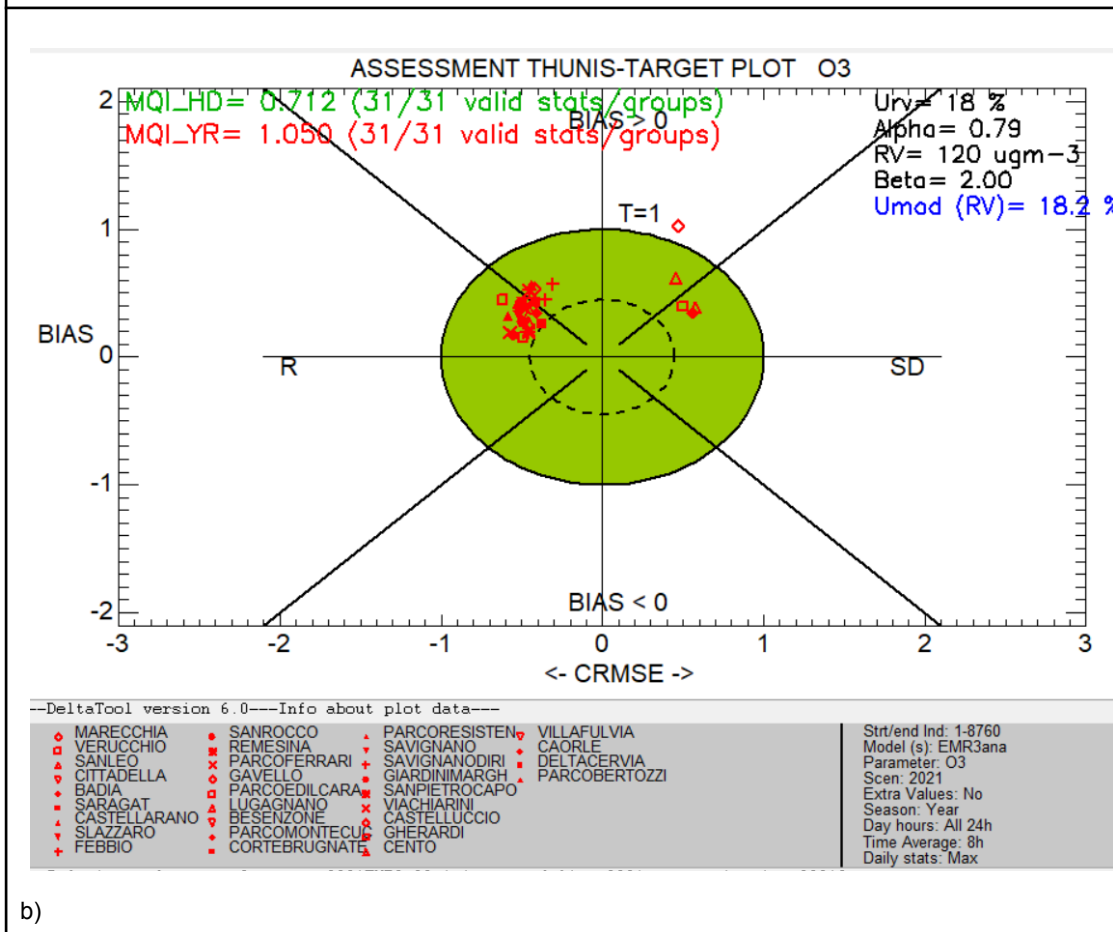
Figura 5: PM2.5. - Summary statistics, target plot e scatter plot. Confronto modello EMR3 e stazioni di fondo

O₃

I grafici relativi a O₃ vengono rappresentati nella Figura 6. Si osserva che viene rispettato l'obiettivo di qualità (l'indicatore di qualità MQI associato al 90° percentile delle stazioni risulta minore di 1), pur evidenziando una leggera sovrastima da parte del modello rispetto ai valori effettivamente osservati dalle centraline, evidenziata prevalentemente nello scatter plot.



a)



b)

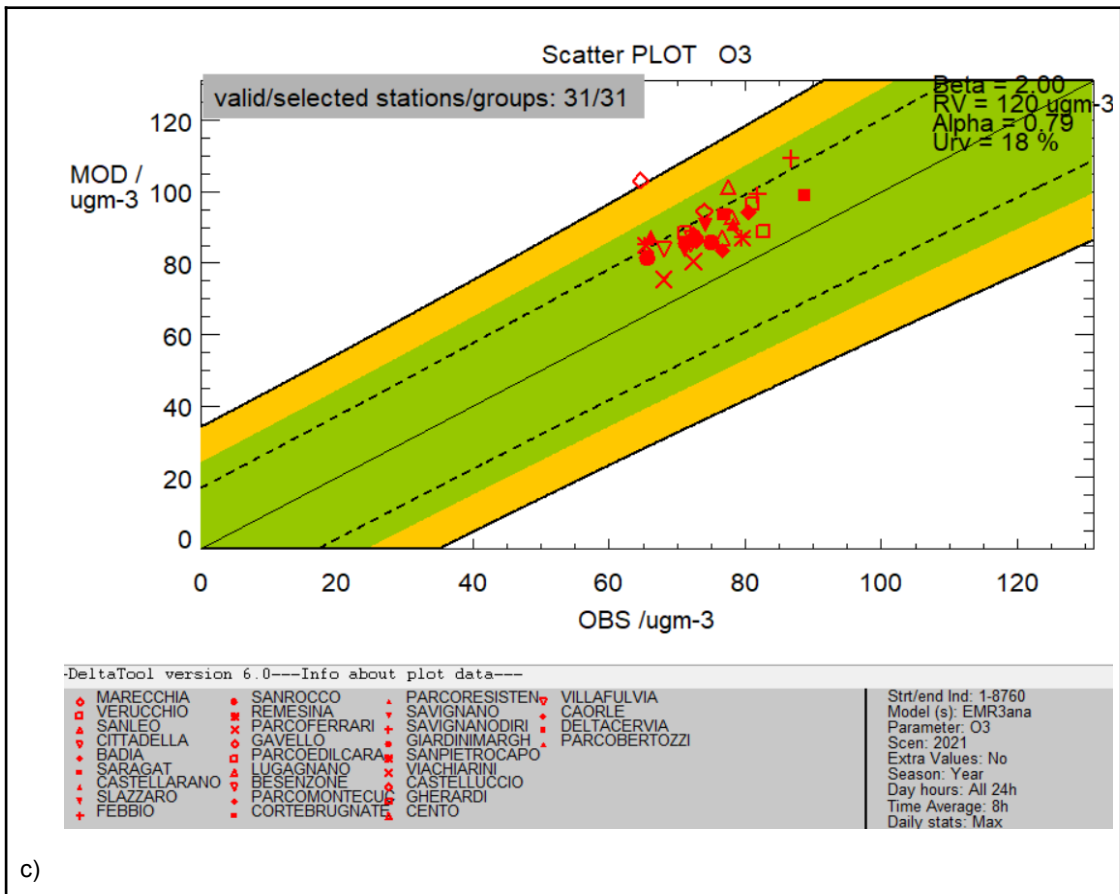
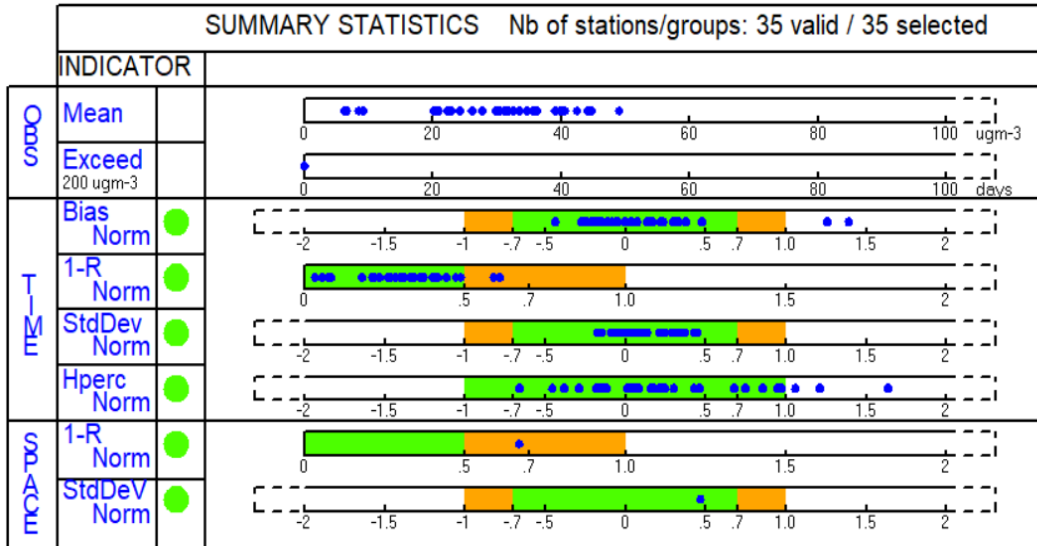


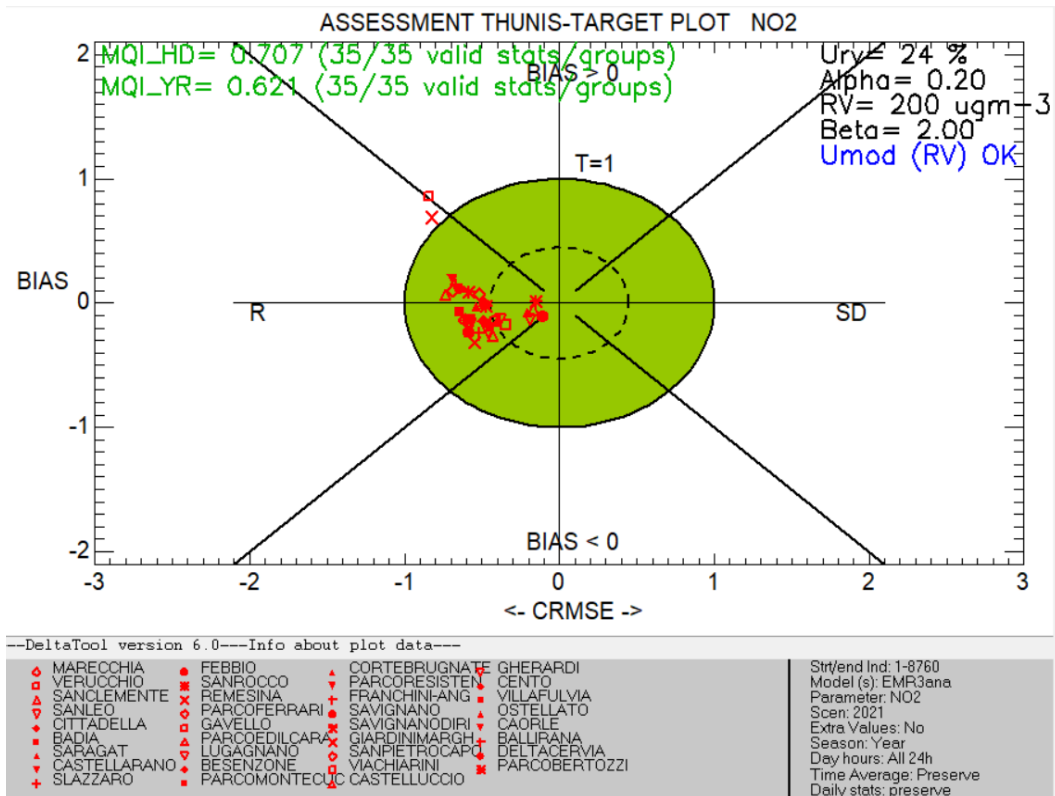
Figura 6: O₃ - Summary statistics, target plot e scatter plot. Confronto modello EMR3 e stazioni di fondo

NO₂

I risultati di NO₂, vengono mostrati in Figura 7. Sia il summary plot, sia il target plot mostrano buone performance da parte del modello EMR3, con il 90% delle stazioni che rientrano nella zona verde del grafico e l'indicatore di qualità MQI associato al 90° percentile delle stazioni minore di 1.



a)



b)

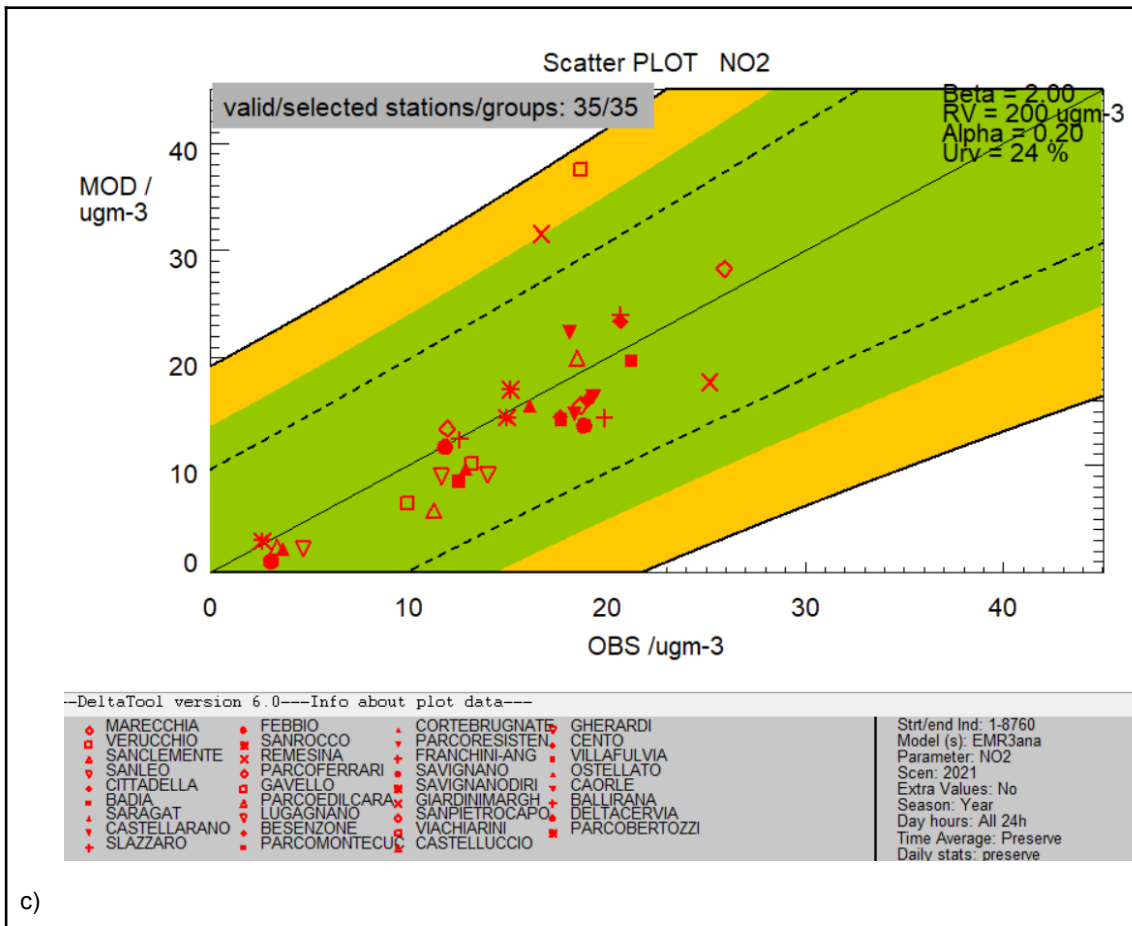


Figura 7: NO₂ - Summary statistics, target plot e scatter plot. Confronto modello EMR3 e stazioni di fondo

7. Sintesi e conclusioni

In questo lavoro è stato verificato il sistema modellistico di qualità dell'aria di Arpae, in particolare è stata considerata l'analisi delle concentrazioni di inquinanti riferite al giorno precedente sul dominio dell'Emilia-Romagna a risoluzione di 3 km. Sono state considerate le analisi prodotte per l'anno 2021 delle concentrazioni degli inquinanti principali: NO₂, O₃, PM10 e PM2.5. Dal presente lavoro risulta che le prestazioni del modello rispettano i criteri di qualità proposti da FAIRMODE.

Acronimi e sigle

- CAMS: Copernicus Atmosphere Monitoring Service
- CHIMERE: modello di trasporto chimico
- COSMO: Consortium for Small-scale Modeling, modello meteorologico
- CTM: Chemical Transport Model, modello di trasporto chimico
- DeltaTool: software di verifica
- EMR3: domino su Emilia-Romagna a risoluzione 3 km
- FAIRMODE: Forum for Air Quality Modeling
- INEMAR: Inventario Emissioni Aria
- ITA7: domino nazionale a risoluzione 7 km
- JRC: Joint Research Centre
- MACC: Monitoring Atmospheric Composition and Climate
- MPI: Model Performance Indicator
- MQI: Modelling Quality Indicator
- MQO: Modelling Quality Objective

Bibliografia

- COSMO. Source Consortium for Small-scale Modeling. 2020. Available online: <http://www.cosmo-model.org>.
- Doms, G.; Baldauf, M. A Description of the Non hydrostatic Regional COSMO-Model. Part I: Dynamics and Numerics. 2015. Available online: User guide documentation at www.cosmo-model.org.
- INEMAR Official Site. Available online: <http://www.inemar.eu>
- Janssen S., Thunis P., con il contributo di Adani, M., Piersanti, A., Carnevale, C., Cuvelier, C., Durka, P., Georgieva, E., Guerreiro, C., Malherbe, L., Maiheu, B., Meleux, F., Monteiro, A., Miranda, A., Olesen, H., Pfäfflin, F., Stocker, J., Sousa Santos, G., Stidworthy, A., Stortini, M., Trimpeneers, E., Viaene, P., Vitali, L., Vincent, K., Wesseling, J. (2022) FAIRMODE Guidance Document on Modelling Quality Objectives and Benchmarking https://fairmode.jrc.ec.europa.eu/document/fairmode/WG1/Guidance_MQO_Bench_v_s3.3_20220519.pdf
- MACC-III Monitoring Atmospheric Composition and Climate 3. Available online: <https://cordis.europa.eu/project/id/633080>
- Mailler S. et al., 2017: CHIMERE-2017: from urban to hemispheric chemistry-transport modeling, Geosci. Model Dev., 10, 2397-2423, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2397-2017>, 2017.
- Monterio, A., Durka, P., Flandorfer, C., Georgieva, E., Gueirreiro, C., Kushta, J., Malherbe, L., Maiheu, B., Miranda, A., Santos, G., Stocker, J., Trimpeneers, E., Tognet, F., Stortini, M., Wesseling, J., Janssen, S. and Thunis, P., Strengths and weaknesses of the FAIRMODE benchmarking methodology for the evaluation of air quality models, ENVIRONMENTAL SCIENCE and POLICY, 11 (4), 2018, p. 373-383, <http://dx.doi.org/10.1007/s11869-018-0554-8>
- Pernigotti D., P. Thunis, C. Belis and M. Gerboles, (2013) Model quality objectives based on measurement uncertainty. Part II: PM10 and NO2, Atmospheric Environment, 79, p.869-878.
- Stortini M, Arvani B, Deserti M. Operational Forecast and Daily Assessment of the Air Quality in Italy: A Copernicus-CAMS Downstream Service. Atmosphere. 2020; 11(5):447. <https://doi.org/10.3390/atmos11050447>.

- Thunis P., A. Pederzoli, D. Pernigotti (2012), Performance criteria to evaluate air quality modelling applications. *Atmospheric Environment*, 59, p.476-482
- Thunis P., E. Georgieva, A. Pederzoli (2012), A tool to evaluate air quality model performances in regulatory applications, *Environmental Modelling & Software* 38, p.220-230
- Thunis P. and C. Cuvelier, 2020: DELTA User's guide. <https://aqm.jrc.ec.europa.eu/>