



arpae
agenzia
prevenzione
ambiente energia
emilia-romagna



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

Seconda parte: previsioni

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. Il modulo di post processamento statistico IBIS	5
4. I dati osservati	6
5. Gli inquinanti	6
6. Metodo di verifica	7
Indicatori e grafici per verifica delle previsioni	7
MQI assessment	7
MQI Forecast	8
Scatter plot	9
Forecast Performance Normalized Diagram	9
7. Risultati della verifica	11
7.1. Risultati ottenuti con gli indicatori di assessment	11
Confronto EMR3 e EMR3+IBIS	11
EMR3+IBIS	12
Previsioni per le stazioni di fondo	12
PM10	12
PM2.5	14
O ₃	15
NO ₂	16
Previsioni per le stazioni di traffico	17
PM10	17
NO ₂	18
7.2. Risultati ottenuti con gli indicatori di forecast	19
Confronto EMR3 e EMR3+IBIS	19
EMR3+IBIS	19
Previsioni per le stazioni di fondo	19
PM10	19
PM2.5	21
O ₃	22
Previsioni per le stazioni di traffico	23
PM10	23
8. Sintesi e conclusioni	24
Acronimi e Sigle	25
Bibliografia	25
Appendice	27

1. Introduzione

Lo scopo del presente lavoro è la valutazione delle prestazioni delle previsioni 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 secondo lavoro vengono valutate le previsioni, effettuate ogni giorno sulla regione Emilia-Romagna, delle concentrazioni del giorno in corso e dei due successivi 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. Questa 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). L'altezza dell'ultimo livello in verticale è 500 hPa ed il loro numero varia dai 9 dei modelli a scala europea ed italiana ai 13 del modello a scala regionale. I diversi domini sono rappresentati in *Figura 1*.

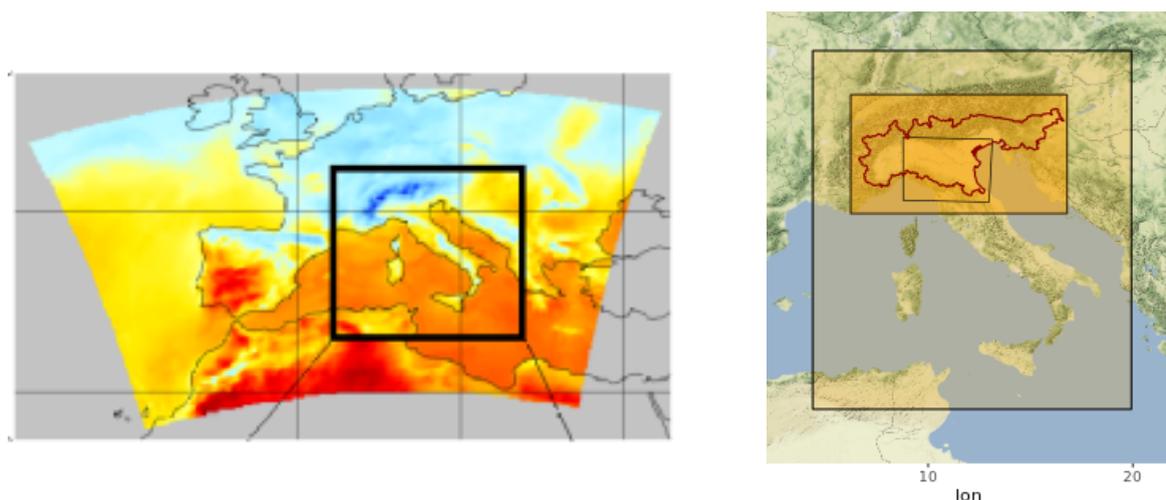


Figura 1: domini utilizzati dalla catena modellistica della qualità dell'aria di Arpae Emilia-Romagna. Dal dominio europeo, al dominio italiano, al dominio del bacino padano al dominio della regione Emilia-Romagna.

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.

Per il confronto con il dato osservato da stazione vengono estratti i valori al primo livello vicino al suolo.

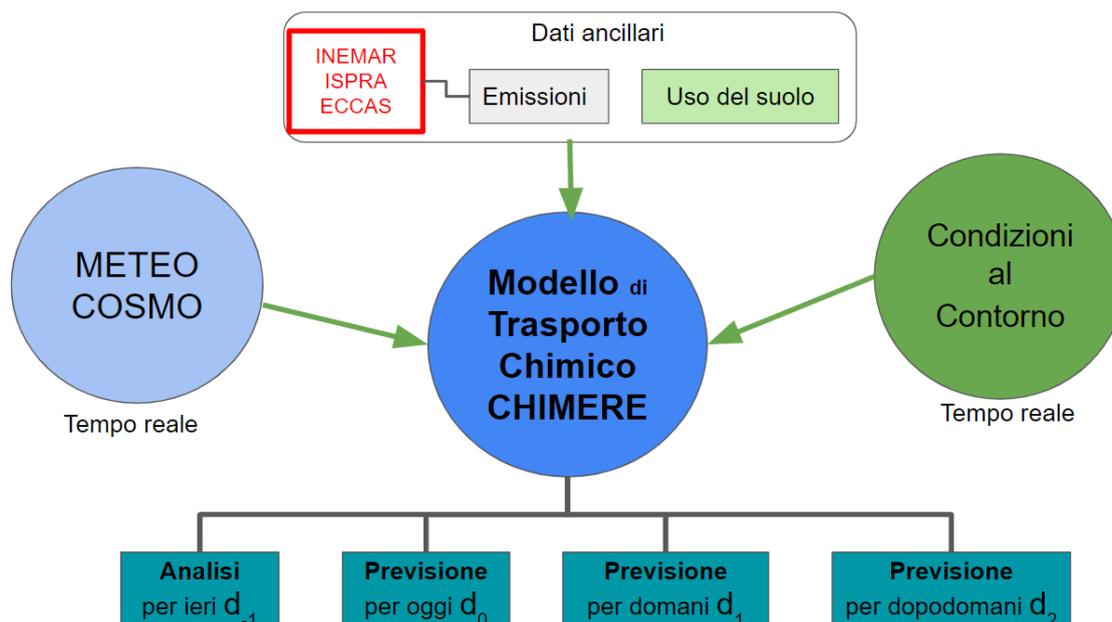


Figura 2 : schema della catena modellistica di qualità dell'aria di Arpa.

3. Il modulo di post processamento statistico IBIS

IBIS (Inferenza Bayesiana Inquinamento Simulato) è il modulo di post processamento statistico che segue le elaborazioni del modello di analisi e previsione EMR3.

Questo modulo statistico si basa sul lavoro di Sahu et al. (2009) inizialmente ideato per la previsione di ozono ed adattato in Arpae per trattare tutti gli inquinanti di interesse (PM10, PM2.5, NO₂, O₃). Il modello è implementato attraverso la libreria R spTimer appositamente sviluppata dagli autori (Bakar and Sahu, 2015.) IBIS è un modello statistico gerarchico bayesiano che si basa sulle analisi del modello fotochimico EMR3, i dati osservati dalle stazioni nei giorni precedenti al giorno di cui si vuole fare previsione e sulle previsioni a tre giorni del modello EMR3.

Combinando le analisi e i dati osservati dei 14 giorni precedenti viene stimato un modello bayesiano per ciascun inquinante che permette una previsione nel tempo e nello spazio su una griglia regolare uguale a quella del modello EMR3. Il modello bayesiano restituisce per ciascun punto di previsione una distribuzione di possibili valori di concentrazione degli inquinanti. L'informazione che ne deriva è pertanto probabilistica: può essere sintetizzata da un valore (ad esempio la mediana della distribuzione) o può essere mantenuta l'informazione completa per la stima della probabilità di superamento di una certa soglia o per avere informazioni sulla precisione della previsione (considerando ad esempio la deviazione standard della distribuzione). Le previsioni, nel caso di PM10 anche della probabilità di superamento del valore giornaliero di 50 µg/m³, vengono sintetizzate in mappe rappresentative delle concentrazioni di fondo e sono pubblicate sul sito di Arpae (<https://www.arpae.it/it/temi-ambientali/aria/previsioni/previsioni-di-qualita-dellaria>).

Per PM10 e NO₂, inquinanti che sono rilevati sia da stazioni di fondo sia da stazioni di traffico, vengono stimati due modelli bayesiani distinti per le stazioni di traffico e le stazioni di fondo, che restituiscono previsioni sui punti stazione indipendenti tra le due categorie.

La previsione di PM10 è particolarmente critica in quanto entra nel percorso decisionale per l'emissione delle misure emergenziali per la qualità dell'aria. Per questo inquinante la previsione sui punti dove sono collocate le stazioni di traffico è di estremo interesse.

Una descrizione dettagliata del modello bayesiano IBIS è consultabile in Appendice.

4. 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 Servizi 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 di PM10 e PM2.5.

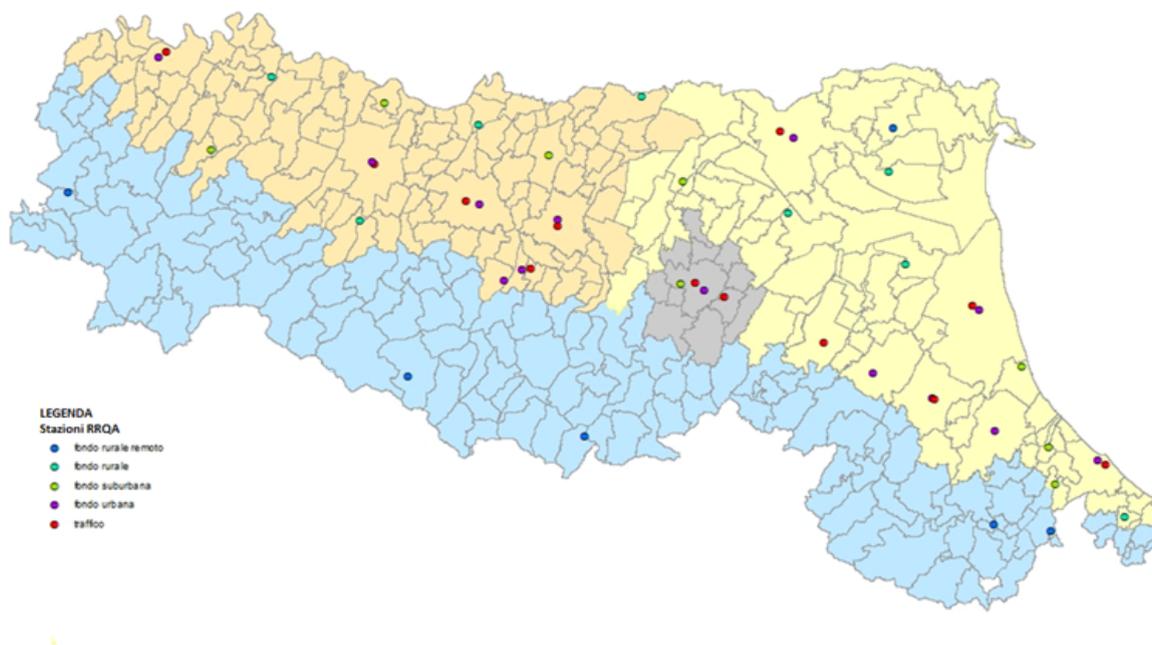


Figura 3: Stazioni della rete regionale di monitoraggio della qualità dell'aria.

5. 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.

6. Metodo di verifica

Le capacità di previsione della catena modellistica, per l'intero anno 2021, è stata valutata con il software dedicato DeltaTool, un software di analisi statistica sviluppato dal JRC nel contesto FAIRMODE, 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).

DeltaTool (Janssen 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)).

Le linee guida di FAIRMODE nel caso di valutazioni delle prestazioni di un modello previsionale raccomandano l'utilizzo sia di indicatori di assessment sia di indicatori di forecast, descritti nei paragrafi successivi.

Indicatori e grafici per verifica delle previsioni

MQI assessment

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, MQO deve essere soddisfatto per almeno il 90% delle stazioni disponibili. L'implementazione di questo approccio in DeltaTool consiste nel calcolare 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 $MQI_{90^{\circ}\text{perc}} \leq 1$.

MQI Forecast

Due caratteristiche interessanti da valutare per un modello previsionale sono le seguenti:

1. la capacità del modello di prevedere l'inizio e la fine di un episodio di inquinamento (cambiamento repentino dei livelli di concentrazione);
2. la capacità nel riprodurre il superamento di una soglia specifica, in quanto tale superamento può essere utilizzato per attivare l'adozione di provvedimenti di carattere emergenziale.

La metodologia introdotta in DeltaTool consiste nel confrontare la capacità del modello di prevedere i livelli di concentrazione misurati rispetto al cosiddetto "modello a persistenza", che prevede una concentrazione uguale all'ultimo dato osservato disponibile.

L'indicatore di qualità MQI viene in questo caso definito come la differenza tra il valore misurato e quello previsto normalizzato rispetto al RMSE del modello a persistenza rispetto alle osservazioni

$$MQI_{forecast} = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}}$$

dove M_i sono le previsioni del modello per il giorno i -esimo, P_i sono le previsioni del modello a persistenza, O_i le osservazioni dello stesso giorno, e N il numero di giorni inclusi nella previsione (365 per un anno).

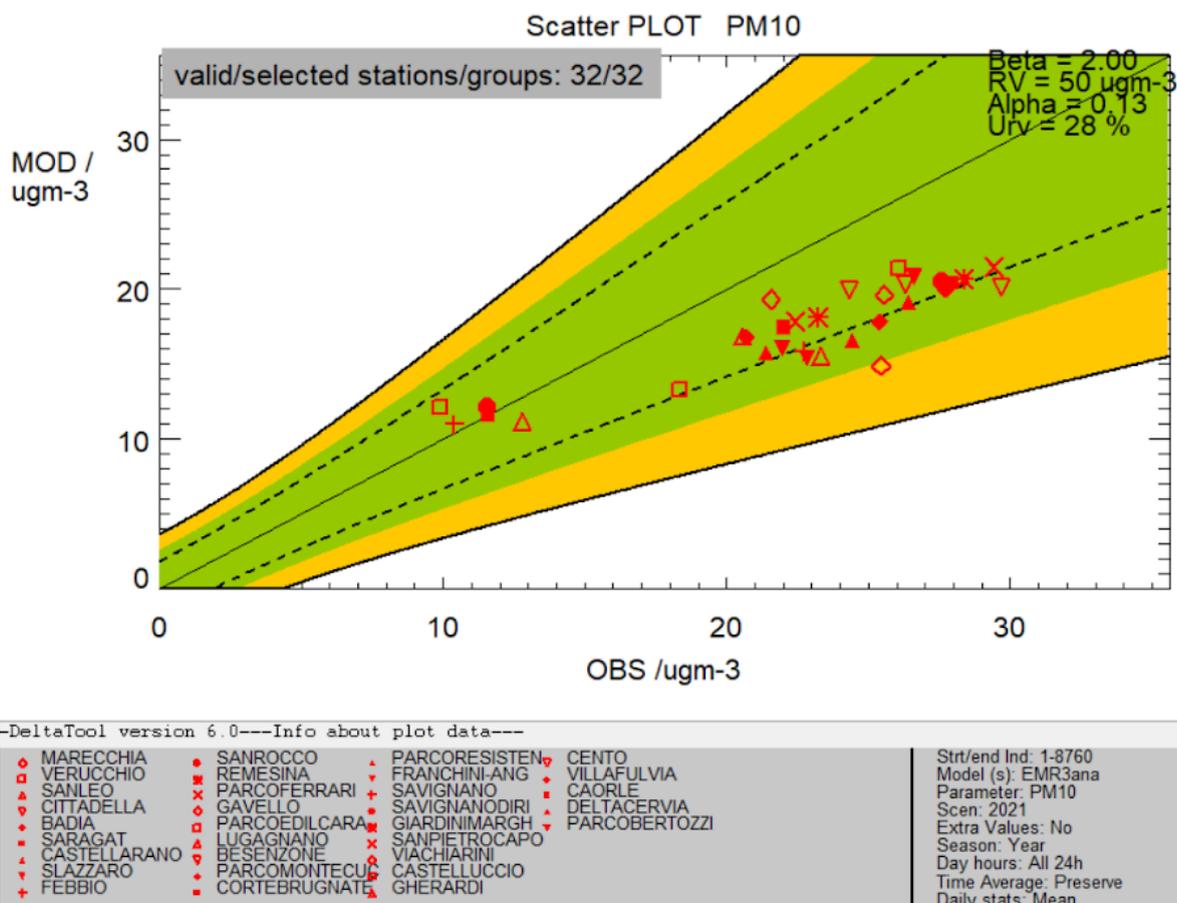
Indicando con fh l'orizzonte temporale della previsione (*forecast horizon*), la previsione del modello a persistenza è definito come:

$$P_i = O_{i-1-fh} \pm OU(O_{i-1-fh})$$

dove OU rappresenta l'incertezza sulle osservazioni e l'orizzonte previsionale fh varia da 0 (+24h) a 2 (+72h) giorni.

L'introduzione dell'incertezza nella definizione del modello a persistenza previene la possibilità che il denominatore nella formula di MQI sia zero e che pertanto l'indicatore tenda ad infinito. In definitiva, l'obiettivo di qualità $MQO_{forecast}$ è soddisfatto se $MQI_{forecast} < 1$ ovvero quando il modello previsionale M ha una capacità migliore rispetto al modello a persistenza P di prevedere i livelli misurati. $MQI_{forecast}$ diventa 1 quando le performance del modello persistenza P e del modello previsionale coincidono, mentre valori di $MQI_{forecast}$ maggiori di 1 indicano una performance della previsione non soddisfacente.

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 rispettivamente 0.5 e 1; le aree arancioni delimitano valori maggiori della radice quadrata di 0.5 (~ 0.71).

Forecast Performance Normalized Diagram

Il Forecast Performance Diagram è costruito utilizzando gli indicatori di previsione POD (Probability Of Detection) e SR (Success Ratio) calcolati come

$$POD = GA_{+} / (MA + GA_{+})$$

$$SR = 1 - False Alarm Ratio = 1 - FAR = 1 - FA / (FA + GA_{+}) = GA_{+} / (FA + GA_{+})$$

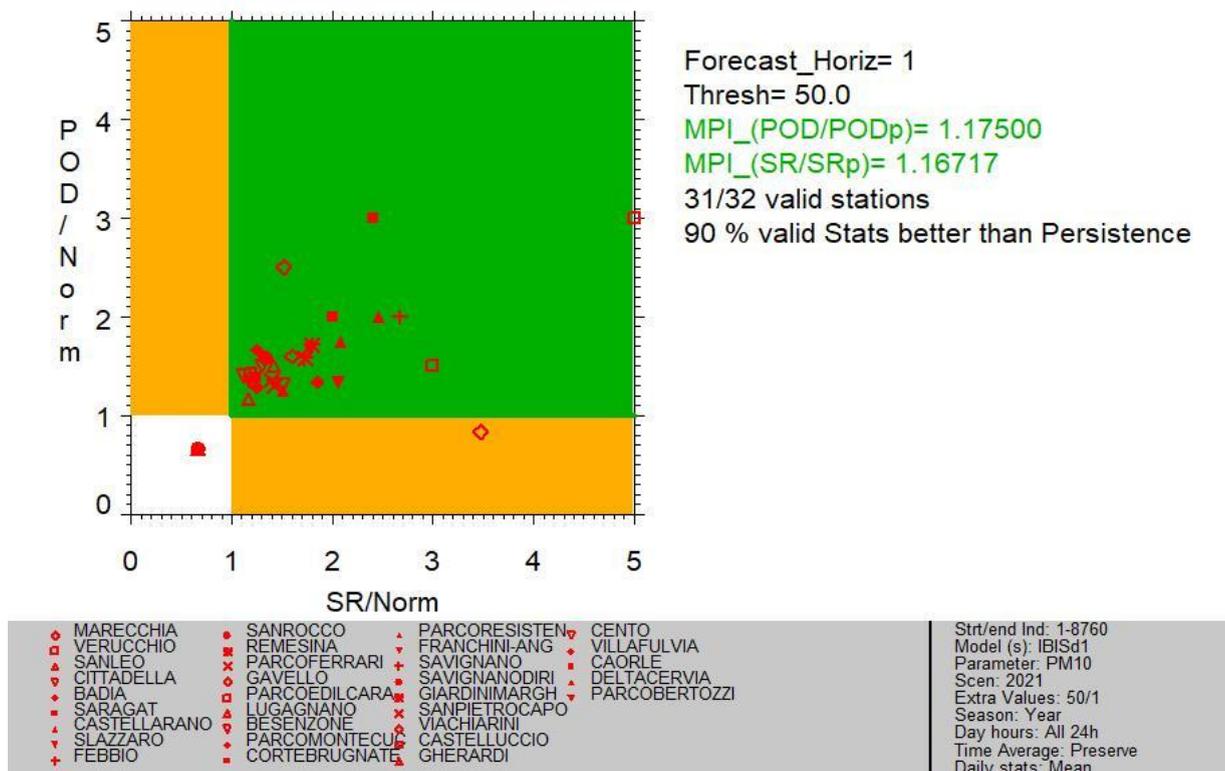
dove GA_{+} indica il numero di osservazioni e previsioni entrambi sopra soglia, MA il numero di mancati allarmi e FA il numero di falsi allarmi.

SR si trova sull'asse delle ascisse e POD sull'asse delle ordinate. I valori di POD e SR per le diverse stazioni sono normalizzati con i rispettivi valori del modello a persistenza, per cui, per POD e SR maggiori di 1, il modello ha performance migliori rispetto al modello a persistenza (area verde). Al contrario, se il punto stazione presenta entrambi i valori minori

di 1, le performance del modello sono peggiori rispetto a quelle del modello a persistenza (zona bianca), mentre se solo uno dei due indicatori è migliore rispetto al modello a persistenza, la stazione cade nella zona arancione.

Gli indicatori di qualità MPI (Model Performance Indicator) indicati a lato del grafico corrispondono al 10° valore percentile più grande e, per avere buone previsioni, devono essere maggiori di 1.

Forecast Threshold Performance Normalized PM10



Esempio di Forecast Performance Diagram

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).

7. Risultati della verifica

I risultati delle elaborazioni eseguite con DeltaTool sul dominio di simulazione dell'Emilia-Romagna a 3 km di risoluzione, comprendente l'intero territorio regionale, sono presentati nei paragrafi seguenti.

I confronti con le performance di EMR3 vengono riassunti in tabelle, indicando i valori dei rispettivi MQI e successivamente vengono mostrati in dettaglio i risultati delle performance di previsione di EMR3+IBIS per le scadenze d0 (la previsioni effettuata oggi per oggi), d1 (la previsione fatta oggi per domani) e d2 (la previsione fatta oggi per dopo domani).

Per ciascun inquinante le analisi sono state effettuate utilizzando sia gli indicatori di assessment sia quelli di forecast di DeltaTool, per questo motivo il seguente paragrafo è strutturato in modo da tenere conto di questa separazione.

L'unico inquinante a fare eccezione è NO₂ per cui sono stati utilizzati solo gli indicatori di assessment in quanto il valore soglia di 200 µg/m³ non viene mai raggiunto, rendendo inutile analizzare la capacità di prevedere i superamenti o meno della soglia.

Le elaborazioni sono state effettuate per ciascun inquinante considerato e per PM10 e NO₂ esaminando sia le stazioni di fondo sia di traffico. Per questi due inquinanti i valori analizzati di IBIS per le stazioni di traffico sono quelli ottenuti esattamente sulle stazioni e non all'interno delle celle che le contengono, come al contrario avviene per le previsioni sulle stazioni di fondo.

7.1. Risultati ottenuti con gli indicatori di assessment

Confronto EMR3 e EMR3+IBIS

Stazioni di fondo						
	d0		d1		d2	
	MQI EMR3	MQI EMR3+IBIS	MQI EMR3	MQI EMR3+IBIS	MQI EMR3	MQI EMR3+IBIS
PM10	0.844	0.740	0.899	0.953	0.930	1.143
PM2.5	0.857	0.613	0.952	0.823	1.107	1.065
O ₃	0.706	0.451	0.707	0.469	0.654	0.485
NO ₂	0.718	0.524	0.734	0.559	0.800	0.595
Stazioni di traffico						
PM10	0.872	0.584	0.877	0.718	0.888	0.965
NO ₂	0.946	0.650	0.954	0.676	1.069	0.701

Tabella 2: Confronto MQI Assessment EMR e EMR3+IBIS alle scadenze temporali d0,d1 e d2.

Come si osserva in *Tabella 2*, per tutti gli inquinanti, per le scadenze temporali d0 e d1, i valori di MQI_{assessment} sono inferiori a 1, indice del raggiungimento dell'obiettivo di qualità da parte di entrambi i modelli. Fanno eccezione alcuni valori alla scadenza d2, che comunque superano di poco il valore soglia 1.

EMR3+IBIS

Nelle figure successive sono riportati gli scatter plot per tutte e tre le scadenze temporali delle previsioni di EMR3+IBIS per le stazioni di fondo, una per ogni inquinante. Inoltre per il PM10 e l'NO₂ vengono riportati anche i grafici relativi alle stazioni di traffico. Questi grafici sono stati ottenuti utilizzando gli indicatori di assessment di DeltaTool.

Previsioni per le stazioni di fondo

PM10

I grafici calcolati utilizzando gli indicatori di assessment relativi al PM10 vengono rappresentati in *Figura 4*. 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.

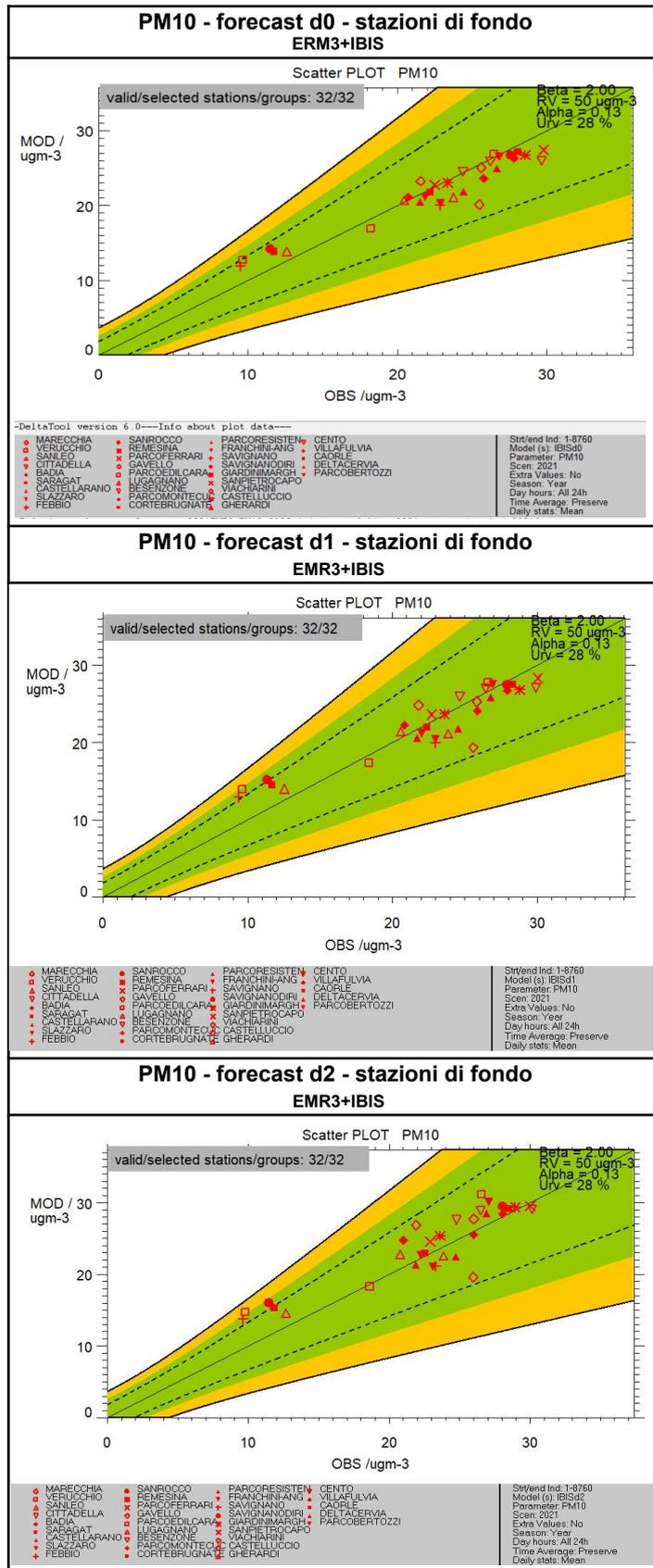


Figura 4: Scatter plot per la previsione del PM10, previsioni di EMR3+IBIS, per le scadenze d0, d1 e d2, stazioni di fondo.

PM2.5

I grafici relativi al PM2.5 vengono rappresentati nella *Figura 5*. Anche in questo caso la maggior parte delle stazioni si posizionano nella zona verde del grafico, nonostante si noti una leggera sovrastima dei valori, in particolare al tempo d2.

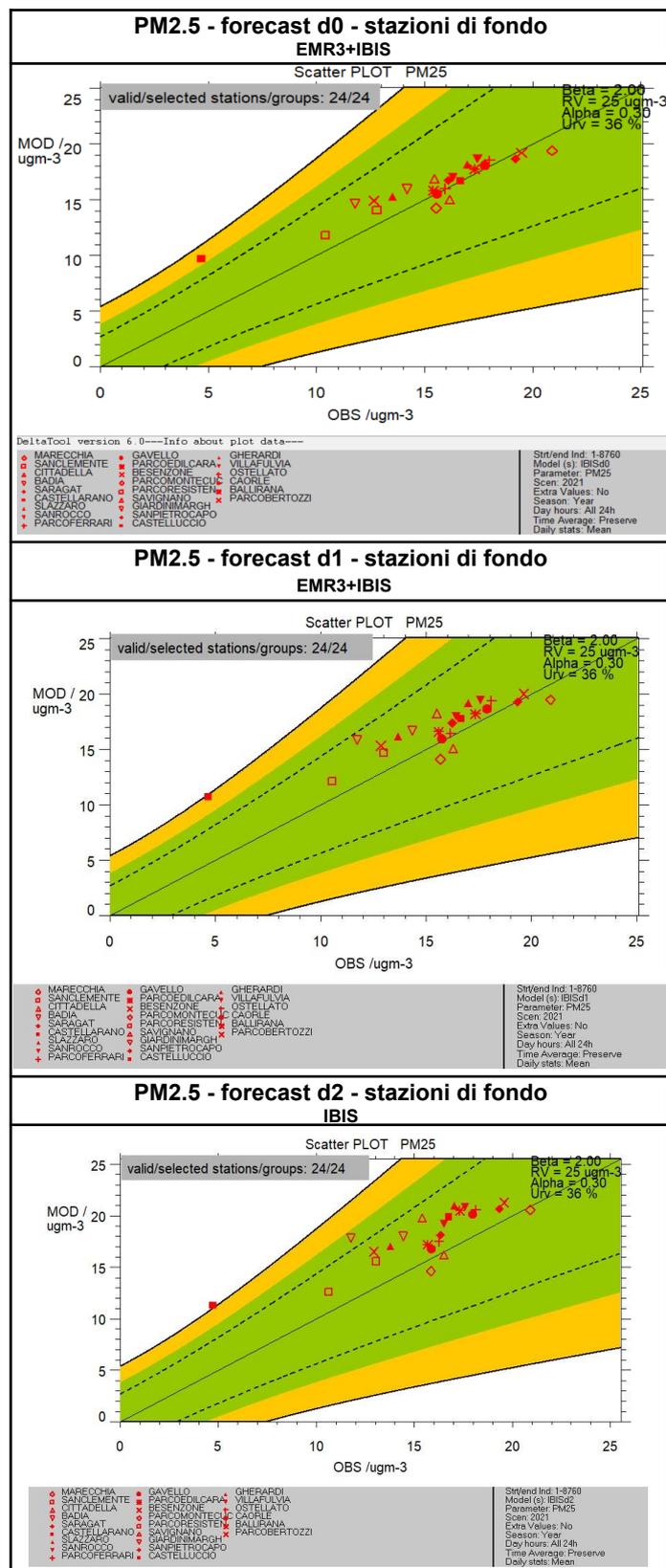


Figura 5: Scatter plot per la previsione del PM2.5, previsioni di EMR3+IBIS, per le scadenze d0, d1 e d2, stazioni di fondo.

O₃

I grafici relativi a O₃ vengono rappresentati nella *Figura 6*. Per tutte e tre le scadenze temporali tutte le stazioni si posizionano nella zona verde del grafico che racchiude l'area in cui l'incertezza del modello rientra nell'incertezza massima accettabile.

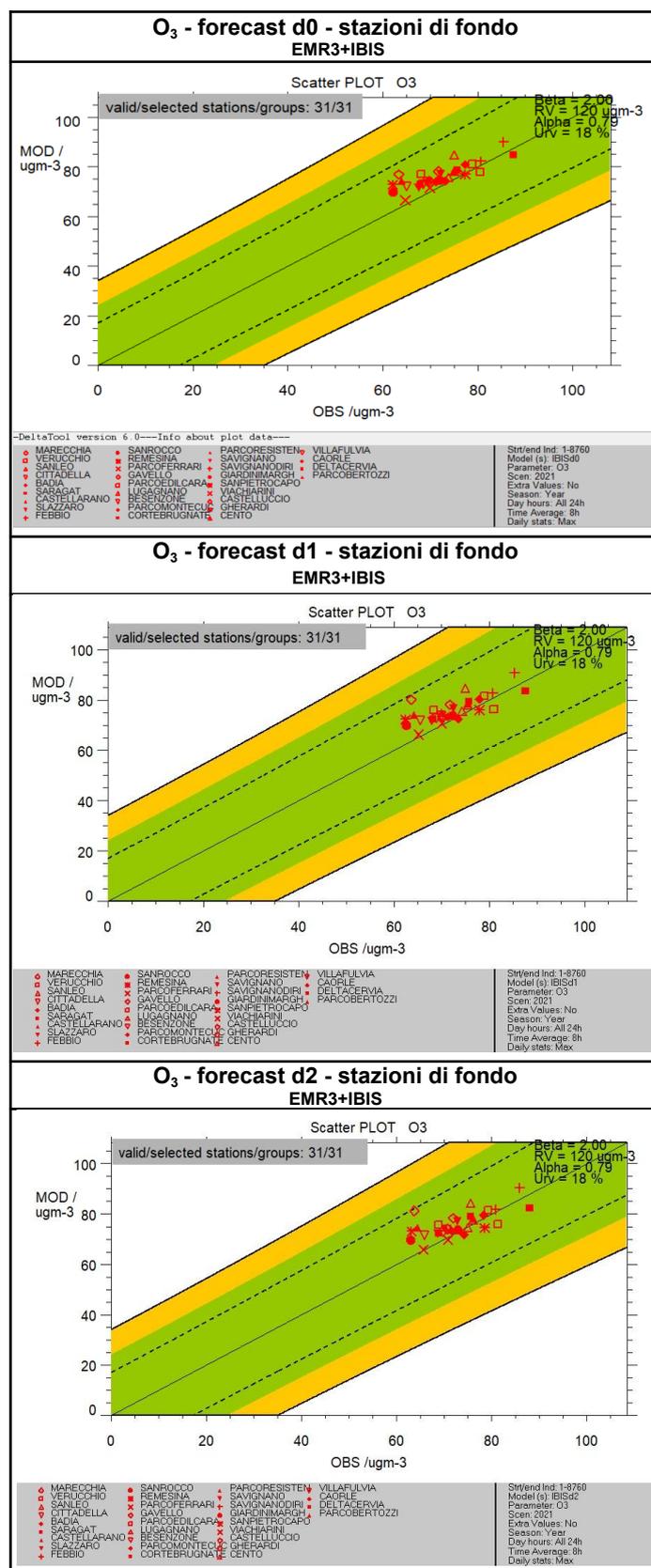


Figura 6: Scatter plot per la previsione del O₃, previsioni di EMR3+IBIS, per le scadenze d0, d1 e d2, stazioni di fondo

NO₂

I risultati di NO₂ vengono mostrati in *Figura 7*. Anche in questo caso per tutte e tre le scadenze temporali tutte le stazioni si posizionano nella zona verde del grafico.

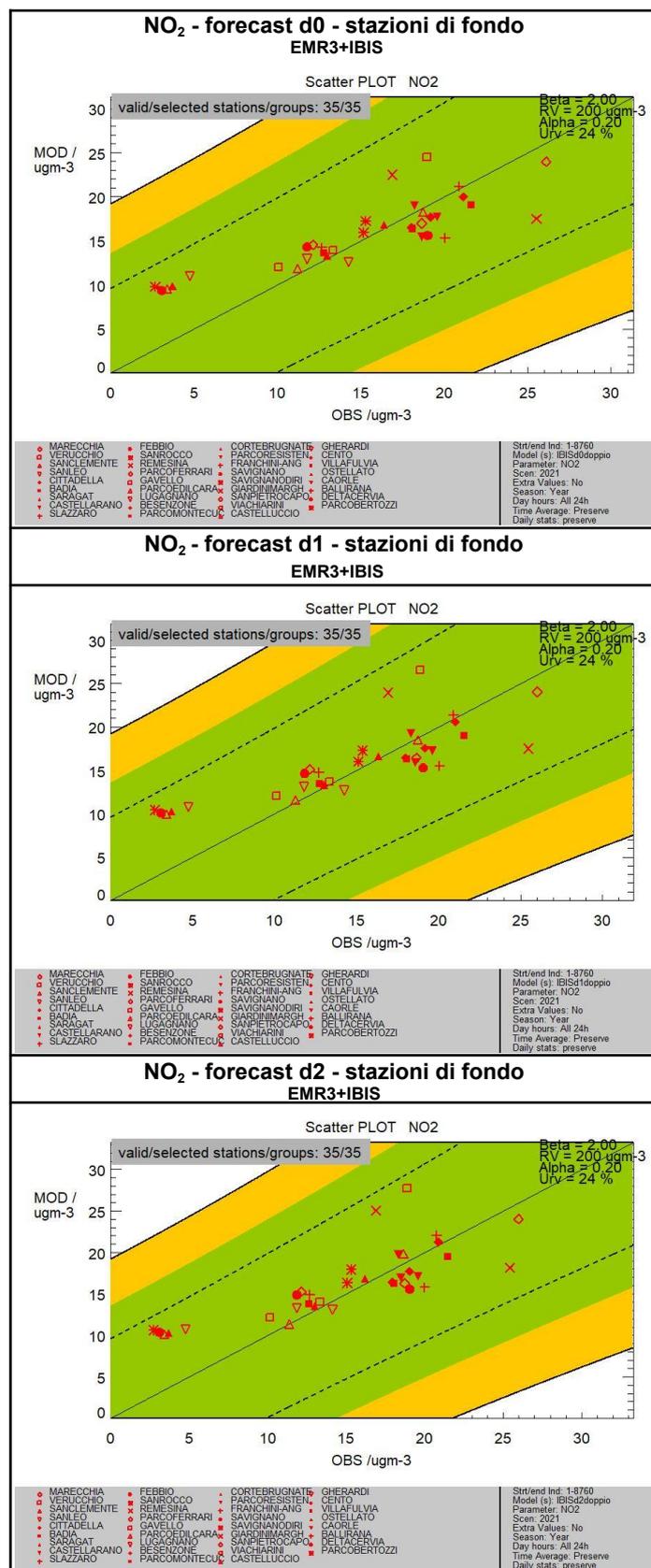


Figura 7: Scatter plot per la previsione del NO₂, previsioni di EMR3+IBIS, per le scadenze d0, d1 e d2, stazioni di fondo.

Previsioni per le stazioni di traffico

PM10

I grafici calcolati per il PM10 relativamente alle stazioni di traffico vengono mostrati in *Figura 8*. Tutte le stazioni si collocano nella zona verde dello scatter plot.

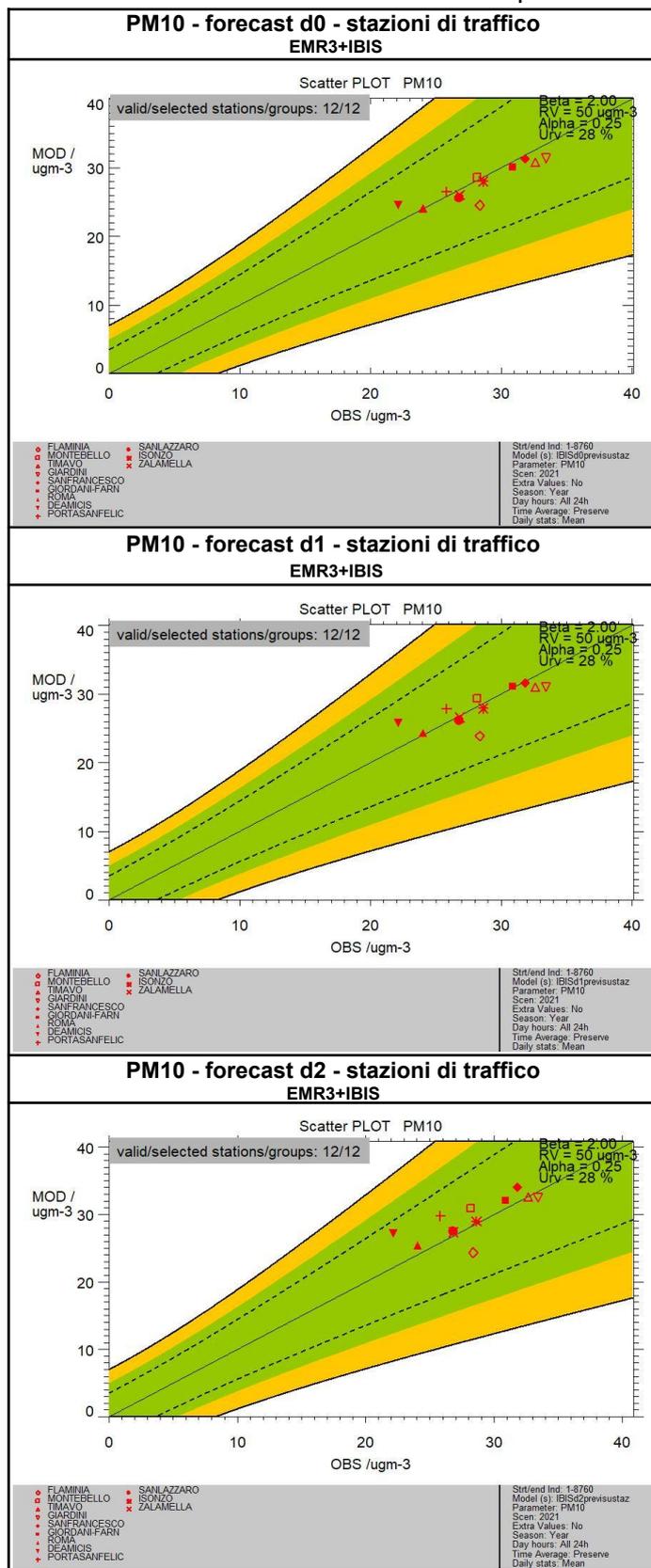


Figura 8: scatter plot per la previsione del PM10, previsioni di EMR3+IBIS, per le scadenze d0, d1 e d2, stazioni di traffico.

NO₂

I grafici calcolati per NO₂ sulle stazioni di traffico utilizzando gli indicatori di assessment vengono mostrati in *Figura 9*. Tutte le stazioni si collocano nella zona verde dello scatter plot, mostrando quindi buone performance del modello.

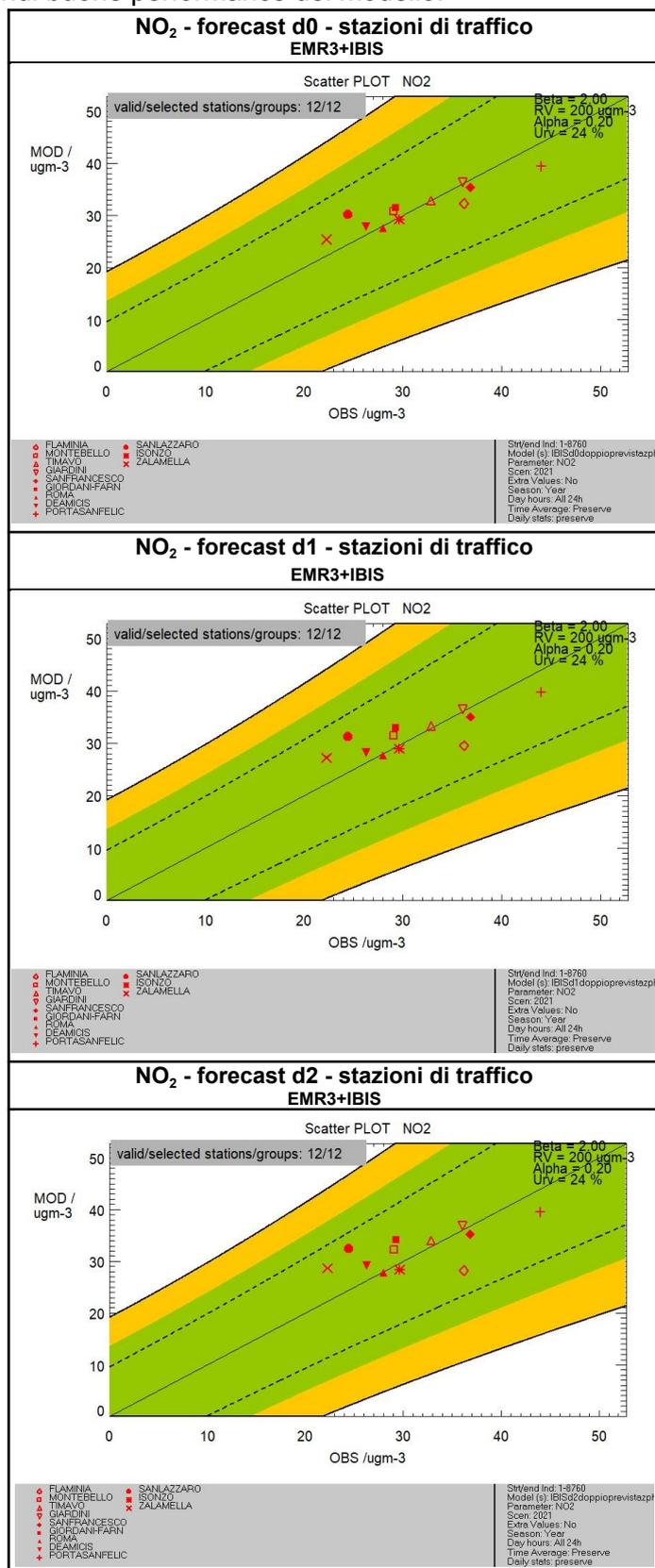


Figura 9: scatter plot per la previsione del NO₂, previsioni di EMR3+IBIS, per le scadenze d0, d1 e d2, stazioni di traffico.

7.2. Risultati ottenuti con gli indicatori di forecast

Le verifiche sono state eseguite per le stazioni di fondo per PM10, PM2.5 e O₃. Per PM10 sono stati analizzati anche i risultati delle stazioni di traffico.

Confronto EMR3 e EMR3+IBIS

Stazioni di fondo						
	d0		d1		d2	
	MQI EMR3	MQI EMR3+IBIS	MQI EMR3	MQI EMR3+IBIS	MQI EMR3	MQI EMR3+IBIS
PM10	0.782074	0.615304	0.642688	0.648388	0.639109	0.799928
PM2.5	0.861474	0.638152	0.800445	0.698633	0.887004	0.839268
O ₃	0.867065	0.558524	0.764170	0.503629	0.693786	0.511340
Stazioni di traffico						
PM10	0.804811	0.524992	0.657292	0.553685	0.635118	0.689425

Tabella 3: Confronto MQI Forecast EMR e EMR3+IBIS alle scadenze temporali d0,d1 e d2.

Come si osserva in *Tabella 3*, per tutti gli inquinati e per tutte e tre le scadenze temporali i valori di MQI_{forecast} sono inferiori a 1, indice del raggiungimento dell'obiettivo di qualità da parte di entrambi i modelli. In generale comunque i valori di EMR3+IBIS risultano inferiori rispetto a quelli del solo modello EMR3.

EMR3+IBIS

Nelle figure successive sono riportati i forecast performance normalized diagram per il modello accoppiato EMR3+IBIS. Questi grafici sono stati ottenuti utilizzando gli indicatori di forecast di DeltaTool, poiché l'obiettivo è quello di valutare la capacità di prevedere i superamenti o meno delle rispettive soglie dei limiti di legge.

Previsioni per le stazioni di fondo

PM10

I grafici relativi al PM10 vengono mostrati in *Figura 10*. Per tutte e tre le scadenze è maggiore il numero di stazioni che hanno previsioni migliori rispetto al modello persistenza. In particolare al tempo d1 tutti e due i valori di MPI risultano essere maggiori di 1.

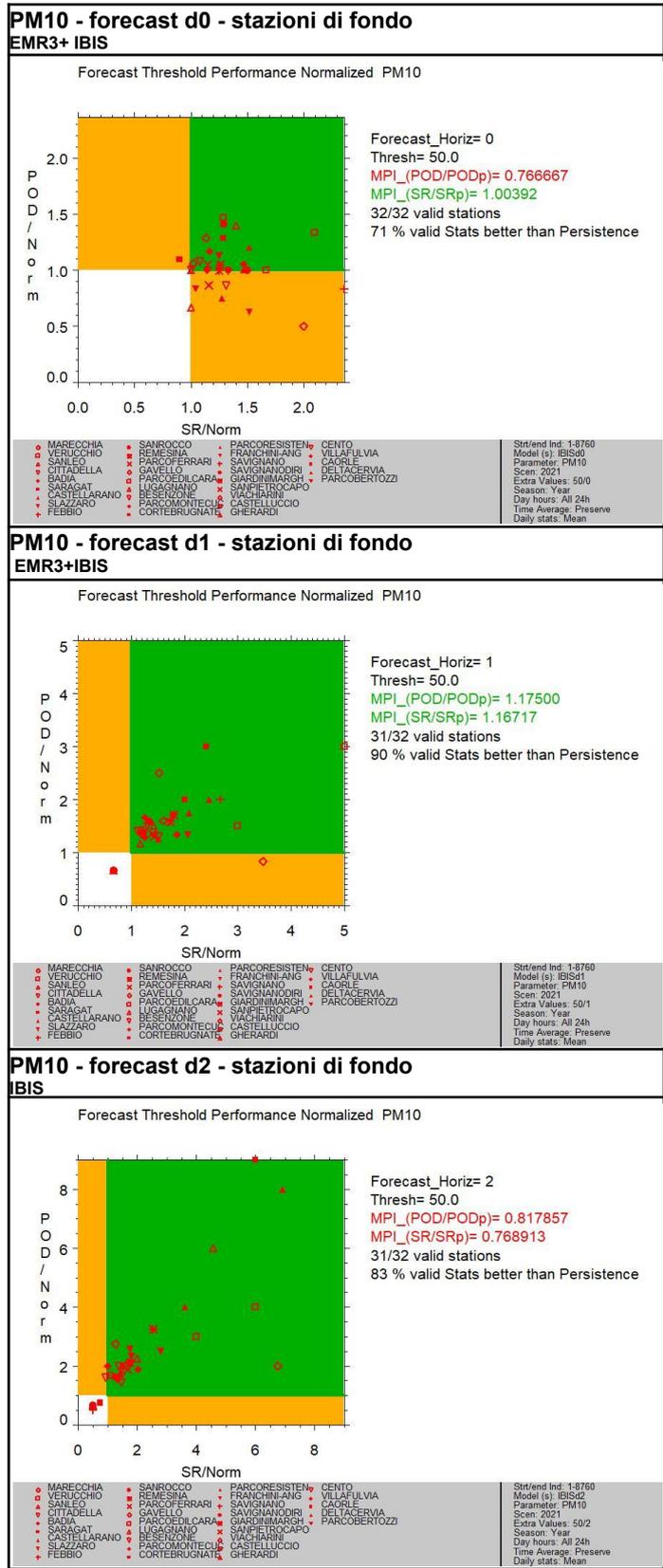


Figura 10: Forecast performance normalized plot per la previsione del PM10, previsioni di EMR3+IBIS, per le scadenze d0, d1 e d2, stazioni di fondo

PM2.5

I grafici relativi al PM2.5 vengono mostrati in *Figura 11*. Il modello EMR3+IBIS risulta essere migliore rispetto a quello a persistenza per tutte e tre le scadenze temporali. Al tempo d2 tutti e due i valori di MPI risultano essere maggiori di 1.

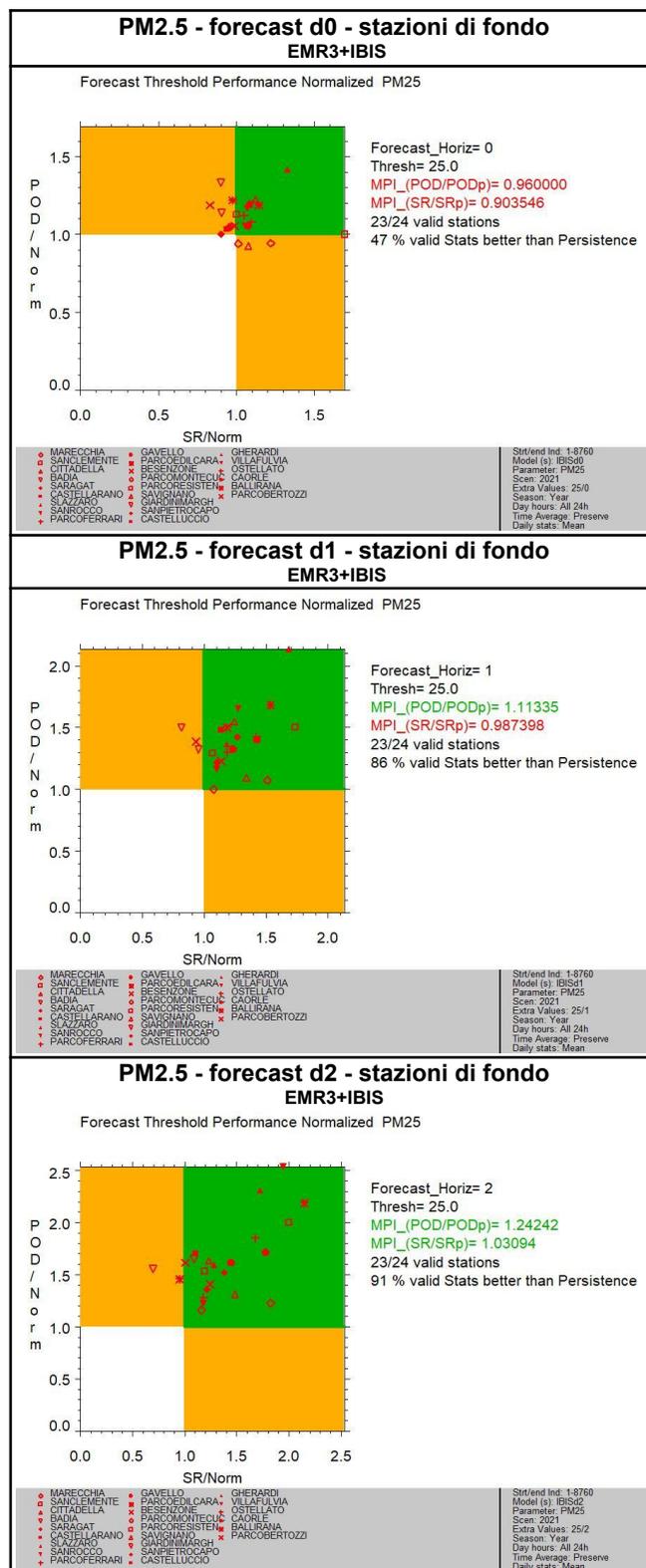


Figura 11: Forecast performance normalized plot per la previsione del PM2.5, previsioni di EMR3+IBIS, per le scadenze d0, d1 e d2, stazioni di fondo.

O₃

I grafici relativi a O₃ vengono mostrati in *Figura 12*. Il modello EMR3+IBIS risulta essere migliore rispetto a quello persistenza per tutte e tre le scadenze temporali. In particolare al tempo d2 tutti e due i valori di MPI risultano essere maggiori di 1.

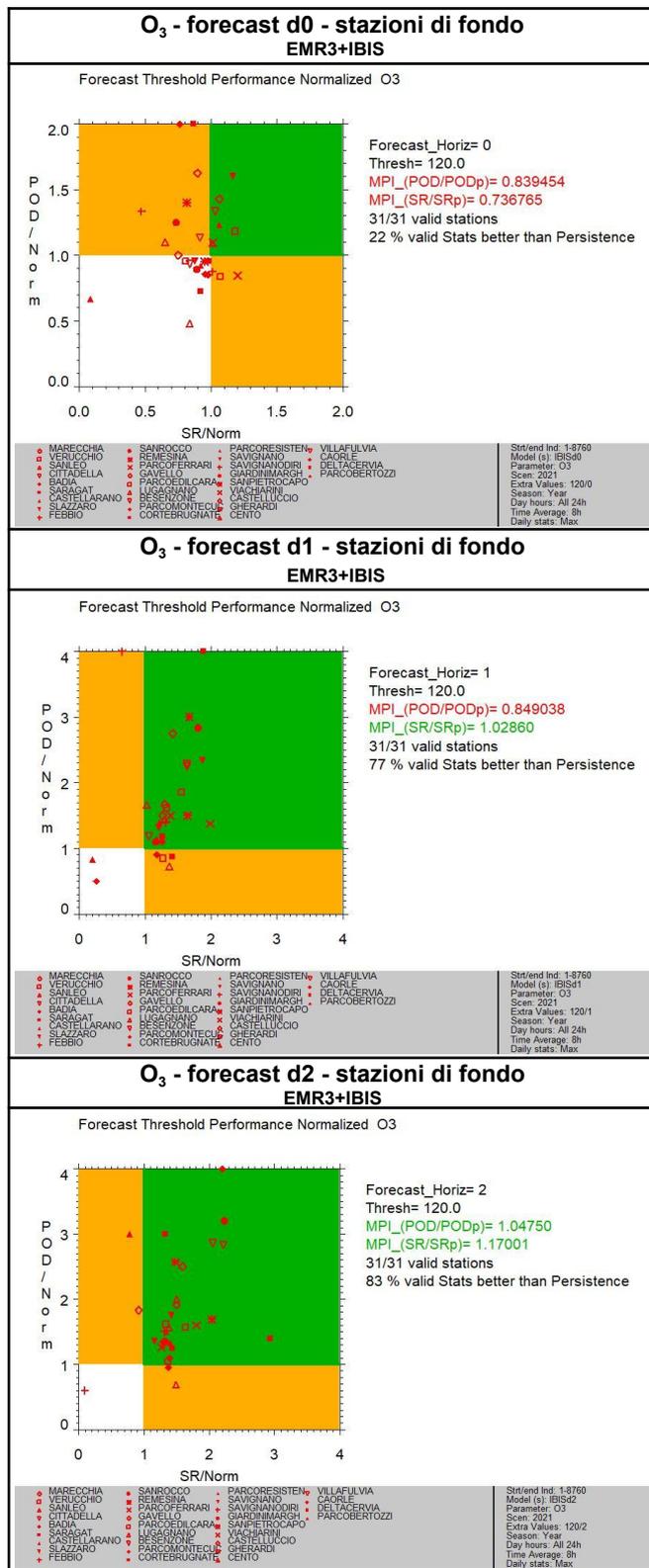


Figura 12: Forecast performance normalized plot per la previsione del O₃, previsioni di EMR3+IBIS, per le scadenze d0, d1 e d2, stazioni di fondo.

Previsioni per le stazioni di traffico

PM10

I grafici relativi a PM10 per le stazioni di traffico vengono mostrati in *Figura 13*. Il modello EMR3+IBIS risulta essere migliore rispetto a quello persistenza per tutte e tre le scadenze temporali.

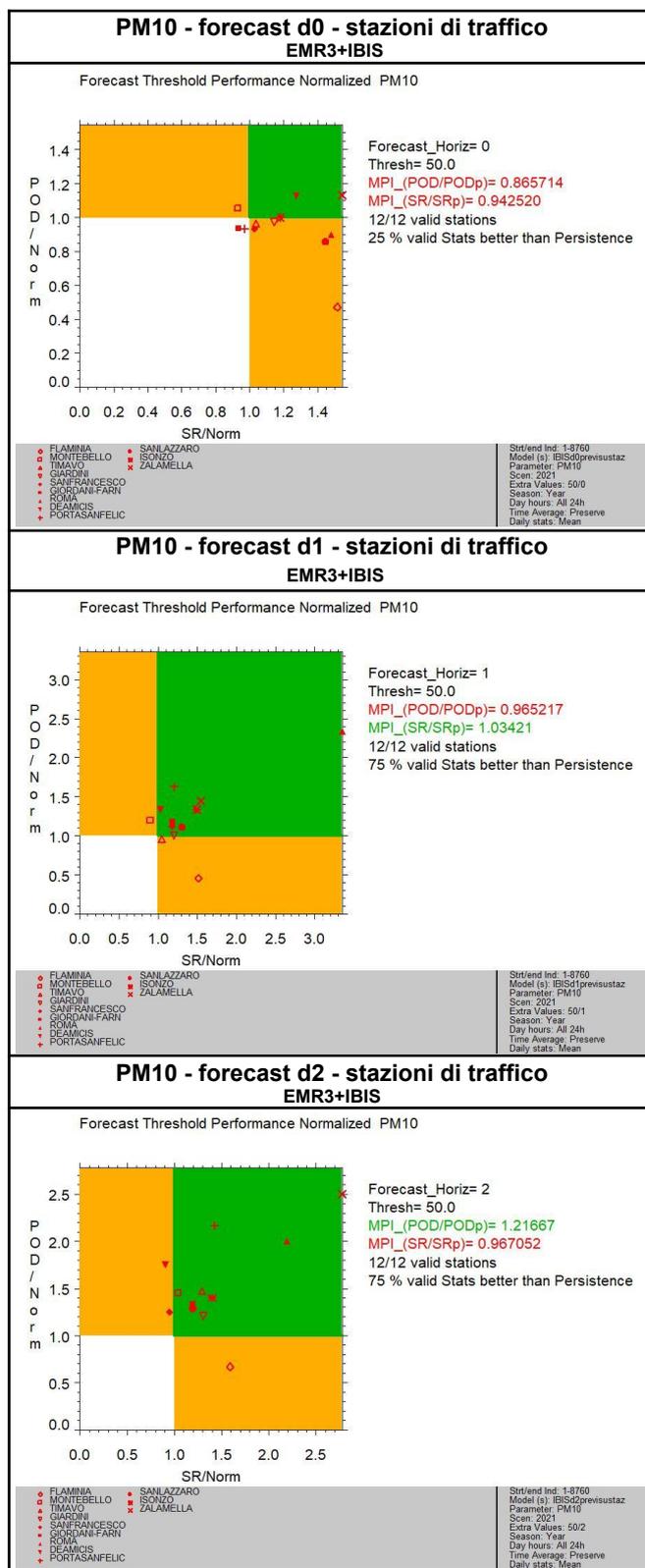


Figura 13: Forecast performance normalized plot per la previsione del PM10, previsioni di EMR3+IBIS, per le scadenze d0, d1 e d2, stazioni di traffico.

8. Sintesi e conclusioni

La catena modellistica di qualità dell'aria operativa in Arpae è stata valutata mediante il software DeltaTool, allo scopo di verificarne l'adeguatezza per finalità di pianificazione e di previsione. La previsione a scala regionale EMR3 è stata valutata e confrontata con la previsione ottenuta dall'accoppiamento con il modulo statistico di post processamento EMR3+IBIS.

Per questo lavoro sono stati considerati i dati ottenuti dal modello e osservati dalle stazioni di misura per l'anno 2021, utilizzando gli indicatori di *assessment* e *forecast* proposti da DeltaTool. Gli inquinanti considerati sono quelli di maggiore interesse per la normativa: PM10, PM2.5, NO₂, O₃.

I grafici relativi al modello EMR3+IBIS evidenziano buone performance di previsione, indice di un buon adattamento dei dati previsti a quelli effettivamente osservati, sia per quanto riguarda gli indicatori di *assessment* sia per quelli di *forecast*.

In generale, dai risultati ottenuti, si evidenzia che l'obiettivo di qualità viene soddisfatto sia per EMR3+IBIS sia per EMR3 per tutti gli inquinanti nella maggior parte dei casi, in particolare per le scadenze d0 e d1. Dal confronto tra i modelli EMR3 e EMR3+IBIS, emerge comunque che le previsioni del modello post-processato sono complessivamente migliori, giustificando il suo utilizzo come principale modello di riferimento per le previsioni di Arpae Emilia-Romagna.

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>.
- Bakar, K. S., and Sahu, S. K. (2015). spTimer: Spatio-Temporal Bayesian Modeling Using R. *Journal of Statistical Software*, 63(15), 1–32. <https://doi.org/10.18637/jss.v063.i15>
- 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_vs3.3_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.
- Sahu S. K., S. Yip, D. M. Holland, 2009. Improved space–time forecasting of next day ozone concentrations in the eastern US, 43, 494–501.
- 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/>

Appendice

IBIS (Inferenza Bayesiana Inquinamento Simulato) è il modulo di post processamento statistico che segue le elaborazioni del modello di analisi e previsione EMR3.

Questo modulo statistico si basa sul lavoro di Sahu et al. (2008) inizialmente ideato per la previsione di ozono e in seguito adattato in Arpae per trattare gli altri inquinanti di interesse. Si tratta di un modello bayesiano gerarchico spazio temporale che supera il problema del cambio di supporto, ovvero il problema del dato puntuale sovrapposto ad un dato areale su griglia.

La formulazione del modello è la seguente:

$$Y_t(s) = Z_t(s) + \epsilon_t(s), \text{ con } \epsilon_t(s) \sim N(0, \sigma_\epsilon^2)$$

dove il dato misurato nel punto s al tempo t $Y_t(s)$ è la somma di un processo latente “vero” Z che si verifica nel punto s al tempo t e di un errore random ϵ , distribuito secondo una funzione Normale $N(0, \sigma_\epsilon^2)$.

Si tratta di un modello gerarchico autoregressivo, tiene cioè conto della possibile dipendenza statistica tra valori osservati precedentemente nel tempo (AR), ed esprime il processo latente Z nel seguente modo:

$$Z_t(s) = \rho Z_{t-1}(s) + \beta_0 + \beta_1 X_t(B_s) + \eta_{0,t}(s), \text{ con}$$

$$(\eta_{0,t}(s_1), \dots, \eta_{0,t}(s_n)) \sim N(0, \sigma_\eta^2 S_\eta(\Phi, \nu)) \forall t$$

dove:

- s indica la stazione
- t indica l'istante temporale considerato
- $\rho Z_{t-1}(s)$ è il termine autoregressivo per modellare l'autocorrelazione delle misurazioni dell'inquinante nelle giornate successive
- β_0 è l'intercetta che varia nello spazio (bias additivo locale e globale)
- $\beta_1 X_t(B_s)$ è il termine regressivo con l'output del modello numerico (bias moltiplicativo globale)
- $\eta_{0,t}(s)$ è un termine di errore che è correlato con lo spazio ma non con il tempo
- $S_\eta(\Phi, \nu)$ è la matrice di correlazione spaziale ottenuta dalla forma generale della funzione di correlazione di Matérn.

Per la stima del modello vengono assunte le seguenti distribuzioni a priori:

$$Z_0 \sim N_n(\mu_0, \sigma_\eta^2 S_\eta)$$

$$\beta \sim N_p(\mu_\beta, \delta_\beta^2 I_n)$$

$$\rho \sim N(\mu_\rho, \delta_\rho^2)$$

$$\sigma_{\epsilon}^2 \sim IG(a, b)$$

$$\sigma_{\eta}^2 \sim IG(a, b)$$

$$\Phi \sim \text{Uniform or Gamma}$$

$$v \sim \text{Uniform}$$

Per poter risolvere l'equazione per la probabilità a posteriori vengono utilizzate tecniche Monte Carlo Markov Chain (MCMC), campionando secondo l'algoritmo di Gibbs. Vengono assunte distribuzioni coniugate a priori (prior conjugate) per tutti i parametri eccetto per Φ e v , in questo modo è possibile campionare dalle distribuzioni "full conditional". Le distribuzioni full conditional di Φ e v invece sono non standard, non è quindi possibile campionare dalle distribuzioni "full conditional". Il pacchetto di R utilizzato (spTimer) fornisce due opzioni per il campionamento di questi parametri corrispondenti alle due distribuzioni a priori.

La previsione spaziale in un nuovo punto e in un nuovo istante temporale nel futuro si basa sulla distribuzione predittiva a posteriori di $Y(s_0, t')$ dove s_0 denota la nuova posizione e t' denota il nuovo istante temporale. Le previsioni vengono ottenute campionando dalla distribuzione predittiva a posteriori.