

## **Sistemi di analisi e previsione della qualità dell'aria con la modellistica: esperienze in campo diagnostico e prognostico**

Angelino Elisabetta\* & Roberto Sozzi<sup>§</sup>

\*ARPA Lombardia –Settore Aria e Agenti Fisici , Via Restelli 3/1, 20125 Milano (MI)

<sup>§</sup>ARPA Lazio – Divisione Atmosfera e Impianti, v. Garibaldi 114, 02100 Rieti (RI)

### **RIASSUNTO**

*L'impiego di modelli matematici nel campo dell'inquinamento atmosferico è ormai consolidato da più di mezzo secolo, tuttavia nel corso degli anni le modalità e le finalità delle applicazioni si sono modificate notevolmente in relazione alle richieste cognitive e normative via via emergenti, alla disponibilità di macchine di calcolo progressivamente più prestanti, nonché alla messa a punto di strumenti sempre più accurati nella modellazione dei processi atmosferici. Anche grazie al riconoscimento da parte della normativa delle potenzialità di un utilizzo congiunto di misure e modelli, recentemente si è incrementato il numero di esperienze di applicazione di modelli matematici finalizzate alla valutazione, previsione e gestione della qualità dell'aria, non solo presso istituti di ricerca ma anche presso agenzie di protezione ambientale. La relazione intende fornire un esempio delle potenzialità raggiunte ad oggi dai sistemi modellistici, illustrando alcune esperienze maturate in campo diagnostico e prognostico.*

### **INTRODUZIONE**

I modelli matematici rappresentano degli strumenti di conoscenza e di semplificazione della realtà e sono pertanto in continua trasformazione con il mutarsi dei fenomeni che intendono descrivere. Questo è certamente ancora più vero nel campo dell'inquinamento atmosferico, nel quale si è assistito ad una notevole evoluzione delle problematiche di interesse. Se si pensa dagli anni '60 ad oggi, l'attenzione in Italia si è spostata da inquinanti primari, quali il biossido di zolfo prima (anni '70-'80) al monossido di carbonio e ossidi di azoto poi (anni '80-'90), a inquinanti secondari come l'ozono all'inizio degli anni '90 e successivamente il particolato. Anche rispetto a quest'ultima classe di inquinanti l'interesse, tuttora vivo, è mutato negli anni, non più limitato alla determinazione della massa totale di particolato, quanto alla conoscenza delle frazioni granulometriche più fini (PM10, ora PM2,5) e della sua composizione chimica (metalli, frazioni organiche, frazioni carboniose etc.). Tale evoluzione ha certamente condizionato le priorità di sforzi da investire nel campo del monitoraggio ma anche in quello della modellazione, imponendo l'esigenza di dotarsi di sistemi modellistici in grado di trattare in modo nel più possibile accurato i processi di formazione e trasformazione degli inquinanti di interesse. Ma se la richiesta cognitiva si è andata via via modificando anche l'offerta di servizi ed informazioni disponibili dalle simulazioni modellistiche ha registrato significativi avanzamenti a cui hanno contribuito vari fattori quali:

- la messa in commercio di strumenti hw/sw sempre più potenti che hanno consentito tempi macchina sostenibili anche per simulazioni su lungo periodo, domini di calcolo più estesi e/o risoluzioni più fini;
- la disponibilità di dati più completi ad es. passando da stime di emissioni per singoli comparti, tipicamente traffico e riscaldamento, a inventari completi, da informazioni meteo puntuali a campi disponibili anche gratuitamente da sistemi modellistici terzi etc.);
- l'avvento e la diffusione massiccia di tecniche di comunicazione che hanno permesso scambio esperienze conoscenze, facilitazione nel condividere risoluzione di problemi ma anche dati, campi etc.;
- l'aumento della conoscenza nel campo della chimica-fisica dell'atmosfera.

Tali condizioni hanno permesso di disporre di risultati più agevolmente utilizzabili in modo complementare a quelli derivanti da strumenti di conoscenza più tradizionali, quali le reti, e da quelli di nuova generazione, quali i satelliti. Ne è conseguito un riconoscimento sempre più esplicito da parte della normativa (specie dopo la direttiva 96/62/CE, ma ulteriormente accentuato dalla recente direttiva 2008/50/CE, di prossimo recepimento) dell'importanza di un loro utilizzo nel completamento e spazializzazione delle misure realizzate dalle reti di monitoraggio, nella realizzazione di studi per la conoscenza dello stato di qualità dell'aria di un territorio e nella predisposizione di piani di risanamento, nel fornire l'informazione al pubblico circa lo stato attuale della qualità dell'aria ma anche l'evoluzione prevista (Denby et al. (2008)).

### **SISTEMI MODELLISTICI E PRINCIPALI APPLICAZIONI**

Una catena modellistica per la qualità dell'aria, sia di tipo diagnostico che prognostico, si compone in genere di almeno tre elementi essenziali:

- una componente meteorologica, costituita da un modello meteorologico (prognostico o diagnostico) che prepara i campi tridimensionali e bidimensionali delle variabili che descrivono lo stato della parte bassa della troposfera, necessari al trasporto e alla dispersione degli inquinanti in aria;

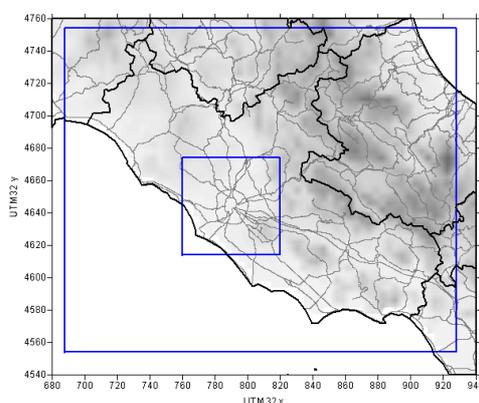
- una componente emissiva che si incarica di fornire al resto del sistema modellistico tutte quelle informazioni necessarie a caratterizzare le varie emissioni presenti nell'area di interesse;
- una componente dispersiva, costituita da un modello diagnostico di trasporto, diffusione, trasformazione e deposizione al suolo delle specie inquinanti, che, sulla base delle caratteristiche fisiche della parte bassa della troposfera (stato medio delle masse d'aria e livello della turbolenza) e delle emissioni presenti nel dominio spaziale di interesse, tenendo conto delle condizioni presenti e/o previste ai contorni dello stesso, effettua la ricostruzione e/o le previsioni della distribuzione spaziale e dell'andamento temporale dei vari inquinanti di interesse.

Esistono in Italia vari sistemi modellistici in uso e ciò che li distingue sono le diverse combinazioni di modelli inclusi in queste tre componenti. Solo limitandosi alla classe di catene modellistiche di modelli meteorologici a mesoscala e modelli di chimica e trasporto (CTM) in uso in Italia, la casistica è complessa. I modelli CTM FARM o SPRAY combinati con i modelli meteorologici MINERVE O RAMS sono per esempio inclusi nella catena messa a punto nel progetto nazionale MINNI (National integrated model to support atmospheric pollution International negotiation) <http://www.minni.org>, e nelle catene utilizzate presso Valle d'Aosta e Lombardia e dalla società ARIANET in altre realtà italiane. I modelli CTM FARM e SPRAY sono invece applicati in combinata con i modelli LAMI e MINERVE presso l'ARPA Piemonte. SPRAY3 combinato con RAMS è invece utilizzato presso il CNR/ISAC di Torino, mentre BOLCHEM è il sistema in uso presso il CNR/ISAC di Bologna. Il modello CTM CHIMERE è utilizzato accoppiato con il modello LAMI presso ARPA Emilia Romagna e presso ARPA Umbria, mentre accoppiato con il modello MM5 da CETEMPS (Università dell'Aquila); i modelli CTM TCAM e CALGRID vengono invece applicati in combinata con vari modelli meteorologici (RAMS, MM5, CALMET) presso l'Università di Brescia. Esperienze di applicazioni del modello CTM CAMx sono invece state condotte presso CESI, ARPA Veneto e AMMA (Agenzia Mobilità e Ambiente di Milano). Se poi si andasse a considerare le applicazioni finalizzate a valutazioni di ricadute di inquinanti primari ante-post operam da singoli impianti industriali o da infrastrutture, in tal caso la casistica di modelli utilizzati sarebbe ancora più ampia. Evidentemente una rassegna di tutti i modelli in uso richiederebbe una trattazione articolata e al di là degli obiettivi della relazione, tuttavia si rimanda alla recentissima rassegna condotta nell'ambito del COST Action 728 (COST, 2008), alle estese attività di rassegna svolte nei due trienni di attività (1999-2004) dai gruppi di lavoro Gruppi di Lavoro del progetto APAT-CTN-ACE (Centro Tematico Nazionale - Atmosfera Clima Emissioni) o alla ricognizione delle esperienze modellistiche relative al particolato svolte o in corso presso le Regioni e le APPA/ARPA svolte nel 2005-2006 dai Gruppi di Lavoro istituiti dalla Commissione Nazionale per l'Emergenza Inquinamento Atmosferico (CNEIA), istituita al Ministero dell'Ambiente [http://www2.minambiente.it/Sito/settori\\_azione/iar/iam/qualita\\_aria/cneia/](http://www2.minambiente.it/Sito/settori_azione/iar/iam/qualita_aria/cneia/). Tali rassegne mettono in luce un'evoluzione negli utilizzi dei modelli, prima soprattutto applicati presso enti di ricerca e soggetti privati, ora utilizzati in modo più diffuso anche presso diverse Agenzie di Protezione dell'Ambiente. Le applicazioni, spesso in passato finalizzate alla ricostruzione di episodi sono intraprese ora sempre più frequentemente per ottemperare alle modalità di gestione e valutazione della qualità dell'aria, di reporting e comunicazione richieste dalla normativa, nel rispetto di requisiti metodologici e prestazionali indicati dalla stessa. Si sta transitando da un'applicazione "una tantum" all'utilizzo, in più casi, routinario con la messa a punto di servizi quotidiani, in analogia a quelli previsionali forniti in modo più collaudato dai servizi meteo regionali. L'evoluzione dei servizi di valutazione e previsione della qualità dell'aria sta infatti andando verso una implementazione operativa di modelli CTM applicati in cascata a modelli meteorologici, che impatta sulle scelte prettamente modellistiche, ma anche di gestione dei dati e di tipo organizzativo. Nell'applicazione in operativo di una catena modellistica tutti i dati richiesti per la simulazione devono essere estratti dai vari database in tempi sufficientemente brevi e con procedure per lo più automatizzate per poter essere direttamente fruibili e aggiornati all'avvio dell'applicazione. Per la qualità dell'aria solitamente le applicazioni vengono lanciate con una periodicità giornaliera, la tempistica di avvio in cascata dei vari modelli, pre-post processor che compongono la catena viene cadenzata opportunamente in base ai tempi di rilascio e aggiornamento dei dati, dei tempi di calcolo dei moduli, della scadenza entro cui è necessario garantire il risultato finale. In sede europea sono state supportate varie iniziative per promuovere lo sviluppo e la messa a punto di sistemi di analisi e previsione (es. COST ES0602, FP5 project FUMAPEX and FP6 project GEMS) col risultato che in tutta Europa sono in stato operativo e pre-operativo vari sistemi di questo tipo (<http://www.chemicalweather.eu>, Baklanov, 2007) Questa via è stata percorsa recentemente anche da alcuni gruppi di modellistica Italiani. Presso CETEMPS (Università dell'Aquila) il sistema prima citato viene utilizzato per fornire previsioni su due giorni (<http://pumpkin.aquila.infn.it/forechem/>), "Quale Aria" è invece un sistema prototipale di previsione di qualità dell'aria incluso in MINNI, il sistema NINFA viene correntemente utilizzato da ARPA ER per previsioni a 72 ore di ozono, PM10 ed NOx, mentre un sistema modellistico a multi-scala viene applicato da ARPA PI per fornire previsioni per la città di Torino e la Provincia di Novara. A titolo di esempio si riportano due esperienze, la prima condotta in campo prognostico da ARPA Lazio e la seconda in campo diagnostico da ARPA Lombardia.

## IL SISTEMA DI PREVISIONE DELLA CITTÀ DI ROMA

Con circa 3.5 milioni di abitanti, Roma è la maggiore città italiana e presenta uno stato di qualità dell'aria caratterizzato da elevati valori di ozono in estate, da superamenti del limite di legge della concentrazione media giornaliera di  $PM_{10}$  nella stagione invernale e da valori elevati di  $NO_2$ , il tutto a causa principalmente del traffico autoveicolare, anche se il riscaldamento domestico degli edifici ed il contributo degli aeroporti e delle industrie non va trascurato. Dal 2007 ARPA Lazio ha avviato lo sviluppo di un sistema di analisi e previsione dello stato di qualità dell'aria per la città di Roma che ha iniziato la sua attività pre-operativa nell'estate del 2008 e che verrà completato nel 2009 da un sistema di analisi near-real time. Tale sistema è costruito a partire dalle esperienze precedenti (Baklanov et al., 2007; Finardi et al., 2008), tenendo conto di recenti studi realizzati nella stessa area (Gariazzo et al., 2007; Silibello et al., 2008). Il sistema previsionale è costruito attorno a quattro componenti: un pre-processore delle emissioni (EMMA), un modello meteorologico prognostico non idrostatico (RAMS), un modulo di interfaccia (GAP/SurfPRO) per la stima dei parametri di dispersione ed un modello di trasporto chimico euleriano (FARM). Questi modelli sono connessi rispettivamente all'inventario delle emissioni, ai dati geografici e fisiografici ed alle previsioni meteorologiche a grande scala. La configurazione del sistema modellistico previsionale è basata su due nested domains (Figura 1): un dominio regionale che include l'intera regione Lazio (con risoluzione di 4 km) ed un dominio metropolitano centrato sull'area urbana di Roma (con risoluzione di 1 km).

Figura 1. Domini spaziali considerati nel sistema di analisi e previsione della qualità dell'aria per la città di Roma



Il modello RAMS, impiegando altri due domini con risoluzione 16 e 32 km, realizza il downscaling delle circolazioni a mesoscala a partire dalle previsioni triorarie NCEP GFS. La turbolenza atmosferica ed i parametri di dispersione vengono stimati dai campi meteorologici medi e dai dati di land cover ad alta risoluzione. Le condizioni iniziali per FARM si basano sulle previsioni del giorno precedente, mentre le condizioni al contorno sono fornite da un sistema operativo a livello nazionale basato sui medesimi modelli (<http://www.aria-net.eu/QualeAria>). Le emissioni considerate derivano dall'inventario regionale aggiornato all'anno corrente e da altre informazioni presenti. Speciale attenzione è stata posta al traffico veicolare che derivano dall'inventario nazionale per la circolazione extraurbana, mentre le emissioni cittadine derivano direttamente dai flussi di traffico (Gariazzo e al. (2007) e Silibello e al. (2008)) basati sul post-processing degli output del modello di traffico di ATAC. I tassi di emissione di VOC e di PM orari richiesti da FARM sono stati poi disaggregati nelle specie considerate dal meccanismo chimico in fase gassosa e dal modulo considerato da FARM per trattare l'aerosol.

Si è iniziato a verificare l'attendibilità del sistema modellistico a partire dall'autunno/inverno 2008 per determinare (limitatamente a  $PM_{10}$  e  $NO_2$ ) confrontando le concentrazioni dei principali inquinanti osservate dalla rete di monitoraggio coi valori previsti. Un esempio a dimostrazione dell'attendibilità delle previsioni è dato dall'episodio accaduto nel periodo natalizio (Figura 2, i numeri rappresentano i valori rilevati dalla rete di monitoraggio). Il 20 dicembre 3 dei 10 sensori di  $PM_{10}$  superavano il limite di  $50 \mu g/m^3$  e per la stessa giornata il sistema modellistico indicava la presenza di poche zone (colore giallo-arancione) dove erano possibili tali valori mentre la maggior parte del territorio stava entro i limiti. La concentrazione di  $PM$  aumenta il 21 dicembre sia secondo la rete di monitoraggio che secondo il modello, evidenziando un allargamento delle zone interessate dai superi. La situazione peggiora nei giorni 22-24, quando il modello prevede il superamento dei limiti su tutto l'area urbana, cosa confermata dai dati della rete di monitoraggio. Durante questo episodio sono stati ottenuti dal modello buoni risultati anche per i valori massimi giornalieri di  $NO_2$ .

Una valutazione più estensiva del sistema modellistico conferma la congruenza generale tra valori previsti e misurati sia per il  $PM_{10}$  che per  $NO_2$ , come si vede in Figura 3, dove le linee oblique rappresentano i limiti di accettabilità prescritti dalla legislazione comunitaria.

Figura 2. Confronto tra la concentrazione (in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) media giornaliera di PM10 prevista dal modello (campi colorati) e misurate (valori numerici) a Roma nel periodo 20-23 Dicembre 2008. All concentrations are expressed

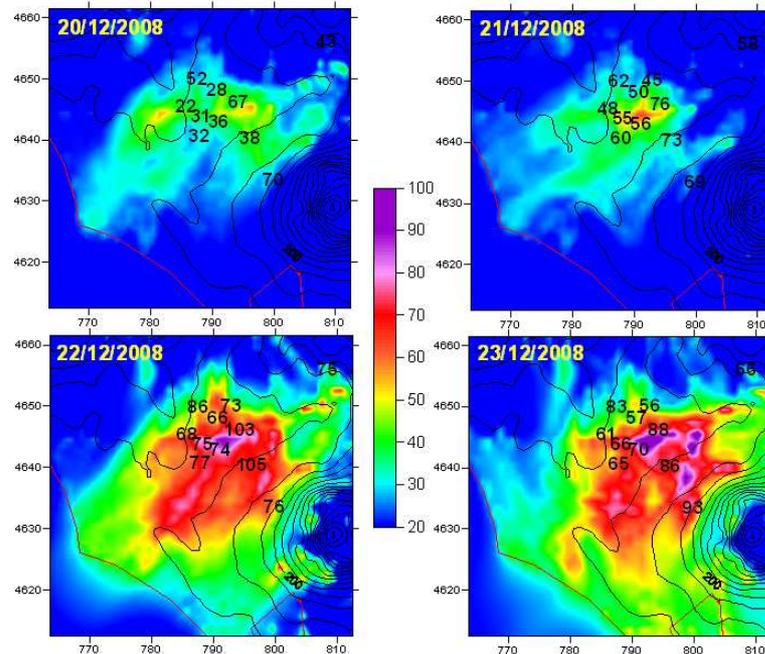
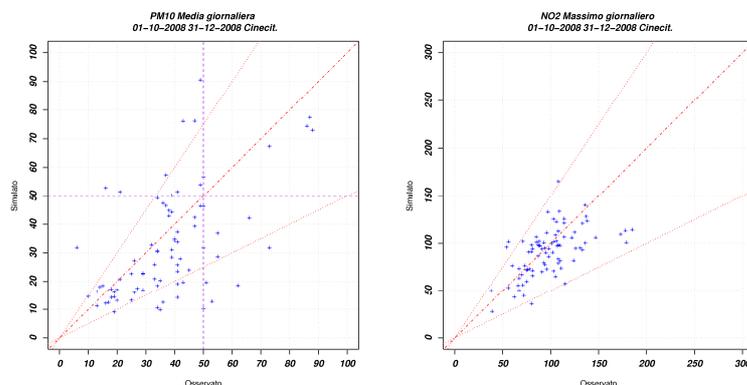


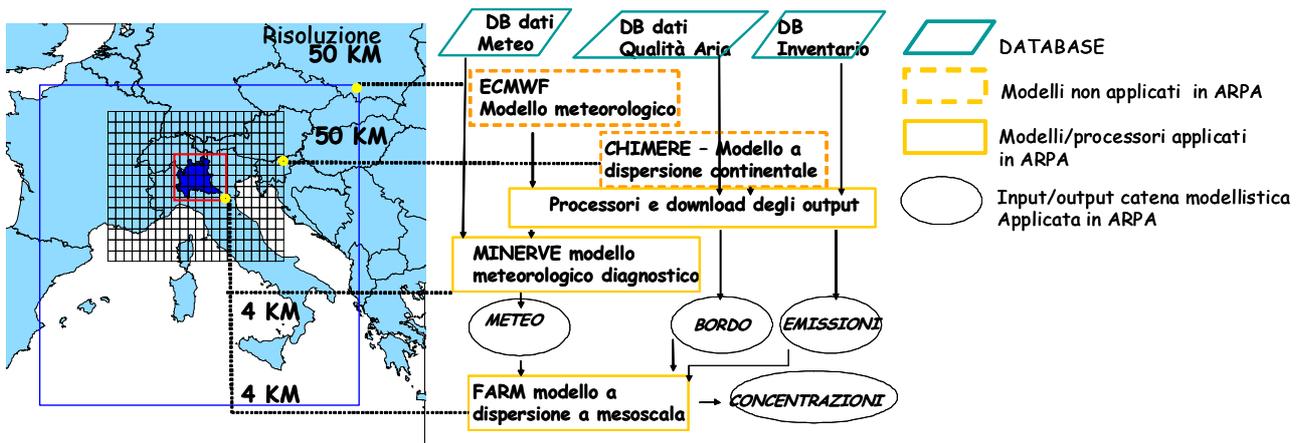
Figure 3. Scatter plot tra previsioni (asse y) e misure (asse x) della concentrazione media giornaliera di PM10 (a sinistra) e della concentrazione massima di  $\text{NO}_2$  (a destra) in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  alla stazione di background urbano di Cinecittà.



### IL SISTEMA MODELLISTICO DI ARPA LOMBARDIA

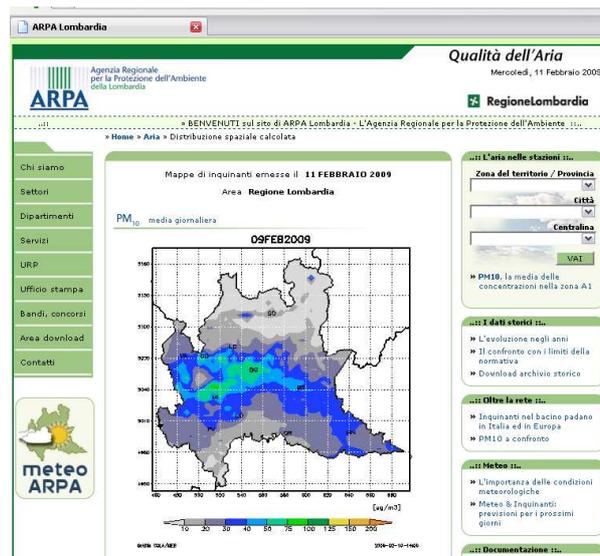
Il cuore del sistema modellistico utilizzato presso ARPA Lombardia (Silibello et al., 2007) è rappresentato dal modello euleriano chimico-dispersivo FARM (Flexible Air quality Regional Model). Il sistema include diversi moduli tra cui il modello diagnostico per la ricostruzione dei campi di vento, temperatura ed umidità MINERVE ed il modello per la stima dei parametri che descrivono la turbolenza atmosferica SURFPRO. Il sistema viene applicato a più scopi, quali l'analisi dell'impatto sulla qualità dell'aria di scenari emissivi, la ricostruzione di episodi critici di ozono e particolato PM10. Inoltre dall'inizio del 2007 il sistema viene utilizzato in modalità operativa di "tempo quasi reale" o Near Real Time (NRT) per la costruzione e la pubblicazione sul sito di ARPA di mappe di inquinamento giornaliere. Questo servizio è basato sull'applicazione quotidiana di una catena di modelli/processori (figura 4) allo scopo di ottenere i migliori risultati da una combinazione di diversi modelli innestati su più scale. Il dominio di calcolo su cui viene applicato il sistema modellistico operativo presso ARPA Lombardia ( $244 \times 236 \text{ km}^2$ , 4 km di passo) copre la regione Lombardia e parzialmente alcune regioni confinanti. Il modello è inizializzato alla mezzanotte di ogni giorno, con condizioni iniziali che, mediante una procedura di assimilazione tengono conto dei dati misurati. I dati utilizzati per le condizioni al contorno e iniziali provengono da simulazioni a grande scala del modello Prev'air – CHIMERE ([www.prevair.org](http://www.prevair.org)); i dati di emissione dall'inventario regionale delle emissioni (INEMAR), dall'inventario nazionale 2003 (APAT/ISPRA) e dall'inventario europeo EMEP 2003.

Figure 4. Sistema modellistico in operativo presso ARPA Lombardia per l'applicazione Near Real Time



Un esempio dell'interfaccia web è riportata in Figura 5. Ogni giorno l'utente può scaricare dal sito ARPA ([http://www.arpalombardia.it/qaria/doc\\_DistribSpazialeCalcolata.asp](http://www.arpalombardia.it/qaria/doc_DistribSpazialeCalcolata.asp)) la mappa del massimo giornaliero di NO<sub>2</sub> e di ozono e la media giornaliera di PM<sub>10</sub> riferite a due giorni prima.

Figura 5. Esempio di schermata dell'applicazione Near Real Time



Le simulazioni quotidiane vengono poi utilizzate a fine anno per la Valutazione Modellistica Annuale di Qualità dell'Aria. Per armonizzare al meglio le concentrazioni misurate con quelle calcolate, vengono utilizzate opportune tecniche di assimilazione, basate su algoritmi che fanno sì che in un intorno di alcuni punti di misura, scelti in modo da essere rappresentativi di un'area sufficientemente ampia, i valori calcolati siano corretti interpolandoli con il valore misurato, in modo da compensare eventuali errori sistematici nel calcolo. La valutazione dei risultati si basa sul confronto quantitativo tra i dati di concentrazione misurati dalle postazioni di monitoraggio di qualità dell'aria ed i dati simulati estratti per la cella della griglia di calcolo in corrispondenza delle coordinate delle stazioni, sul confronto grafico tra i campi di concentrazione al suolo ottenuti per i diversi inquinanti, sull'analisi della distribuzione temporale delle concentrazioni misurate e calcolate. Le postazioni della rete di qualità dell'aria della Lombardia sono state scelte in base alla tipologia di stazioni, alla distribuzione geografica ed alla completezza della serie di dati 2007. Le prestazioni vengono valutate mediante l'utilizzo di indici statistici e facendo riferimento agli obiettivi di qualità per la modellizzazione stabiliti dalla normativa nazionale e comunitaria. La figura 6 presenta le concentrazioni medie annuali 2007 misurate presso le postazioni (in ascissa) e quelle estratte dalla simulazione annuale (ordinata) per la cella corrispondente. Ogni punto si riferisce ad una singola postazione. Si segnala che i punti tendono a disporsi lungo la bisettrice (misurato = calcolato) tanto più il misurato si avvicina al calcolato; il cono tratteggiato rappresenta l'intervallo di qualità dei dati stabilito dalla normativa per il PM<sub>10</sub> pari a +/-

50% per la media su base annuale. Per il particolato PM10 si evidenzia una tendenza alla sottostima da parte del modello dei valori medi giornalieri, figura 8, e medi annuali, figura 7, mentre l'introduzione delle tecniche di assimilazione è molto efficace e consente di portare i valori attorno alla bisettrice (a dx). Tuttavia per quasi tutte le postazioni il modello fornisce risultati che rientrano nell'intervallo di qualità dei dati stabilito dalla normativa ( $\pm 50\%$ ) per la media sul periodo. La distribuzione spaziale delle concentrazioni medie annuali di PM10 è fornita dalla figura 6 che riporta i campi di concentrazione al suolo.

Figura 6. mappa delle concentrazioni di PM10

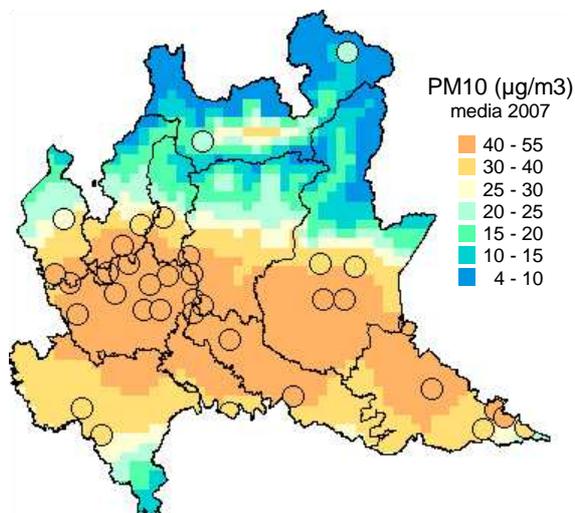


Figura 7 - diagramma di dispersione delle concentrazioni medie annuali relative al 2007 di PM10 misurate e simulate con (sx) e senza (dx) tecniche di assimilazione

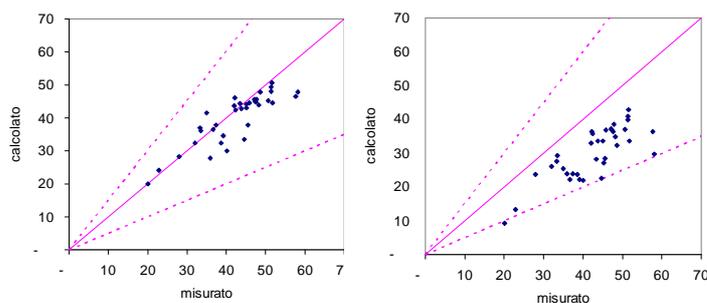


Figura 8 - Concentrazioni di PM10 medie giornaliere misurate presso la stazione di Milano Pascal e simulate con (dx) e senza (sx) tecniche di assimilazione



## Bigliografia

- AAVV Overview of existing integrated (off-line and on-line) mesoscale meteorological and chemical transport modeling systems in Europe, [www.cost728.org](http://www.cost728.org) Maggio 2008
- Baklanov, A., Hänninen, O., Slørdal, L. H., Kukkonen, J., Bjergene, N., Fay, B., Finardi, S., Hoe, S. C., Jantunen, M., Karppinen, A., Rasmussen, A., Skouloudis, A., Sokhi, R. S., Sørensen, J. H., (2007) Integrated systems for forecasting urban meteorology, air pollution and population exposure. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 855–874, 2007 ([www.atmos-chem-phys.net/7/855/2007/](http://www.atmos-chem-phys.net/7/855/2007/))
- Denby B, Larssen S, Guerriero C, Douros J, Moussiopoulos N, Fragkou L, Gauss M, Olesen H, Miranda A. I. (2008) Guidance on the use of models for the European air quality directive, ETC/ACC report
- Finardi, S., De Maria, R., D'Allura, A., Cascone, C., Calori, G., and Lollobrigida, F., (2008) A Deterministic Air Quality Forecasting System For Torino Urban Area, Italy. *Env. Modelling and Software*, 23, 344-355
- Gariazzo, C., Silibello, C., Finardi, S., Radice, P., Piersanti, A., Calori, G., Cecinato, A., Perrino, C., Nussio, F., Pelliccioni, A., Gobbi, G.P. and Di Filippo, P. (2007) A gas/aerosol air pollutants study over the urban area of Rome using a comprehensive chemical transport model, *Atmospheric Environment*, 41, 7286–7303.
- Silibello, C., Calori, G., Brusasca, G., Giudici, A., Angelino, E., Fossati, G., Peroni, E. & Buganza, E., Modelling of PM10 concentrations over Milano urban area: validation and sensitivity analysis of two aerosol modules, *Environmental Modelling & Software*, 23 (3), pp. 333–343, 2008.
- Silibello C., Brusasca G., Piersanti A., Radice P., Bolignano A., Sozzi R., Nussio F., Tasco C., and Gariazzo C. (2008). Future emission scenario analysis over rome urban area using coupled traffic assignment and chemical transport models. *Proceedings of the 12th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*. October 6th-9th, 2008, Cavtat, Croatia.