

## Sistema modellistico multiscala per la simulazione di dispersione di inquinanti in atmosfera

Massimo Muraro<sup>1</sup>, Matteo Giorcelli<sup>2</sup>, Stefano Bande<sup>1</sup>, Alessio D'Allura<sup>2</sup>, Sandro Finardi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Arpa Piemonte, Area Previsione e Monitoraggio Ambientale, Via Pio VII 9, Torino,  
m.muraro@arpa.piemonte.it

<sup>2</sup>ARIANET, Via Gilino 9, Milano

### RIASSUNTO

*Negli ultimi anni l'Area Previsione e Monitoraggio Ambientale di Arpa Piemonte ha implementato un sistema completo di trasporto, dispersione e trasformazione chimica di inquinanti in atmosfera, in grado di produrre simulazioni di campi tridimensionali di concentrazione su tutto il territorio regionale, con elevata risoluzione e su base oraria. Il sistema è stato progettato con un architettura modulare, in modo da favorire, da un lato, differenti implementazioni e, dall'altro, nuovi sviluppi ed aggiornamenti che, a partire dalla versione iniziale, sono stati introdotti per migliorarne le prestazioni. Tale sistema è stato utilizzato in versione diagnostica di lungo periodo per svolgere attività a supporto della Regione Piemonte e delle Province, relativamente agli specifici compiti in materia di qualità dell'aria. A partire dall'anno 2006 la catena modellistica è stata implementata operativamente in versione prognostica, in grado quindi di produrre quotidianamente le previsioni di concentrazione al suolo dei principali inquinanti atmosferici. Il sistema modellistico è sottoposto a verifica ed aggiornamento continui ed è prevista a breve anche una sua implementazione in modalità diagnostica near real time.*

### ARCHITETTURA DEL SISTEMA MODELLISTICO

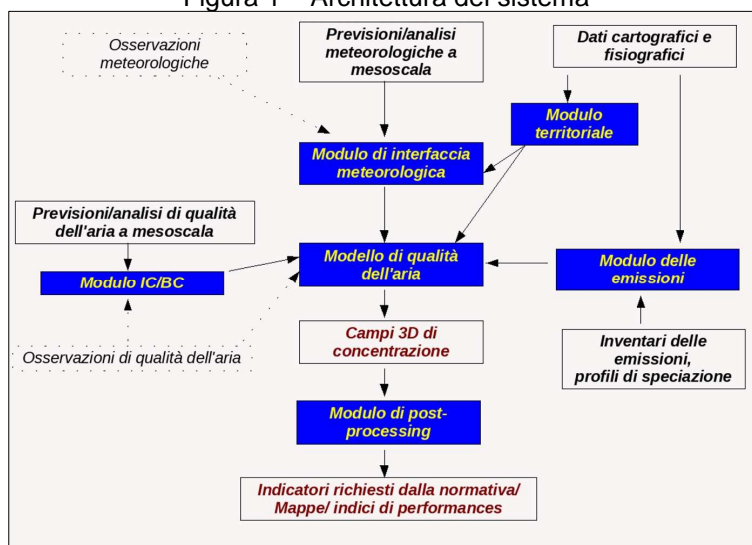
Negli ultimi anni una delle principali attività svolte dall'Area Previsione e Monitoraggio ambientale nell'ambito della modellistica di qualità dell'aria è stata incentrata sullo sviluppo ed implementazione di un sistema modellistico, basato sull'applicazione dei modelli euleriani di trasporto, dispersione e trasformazione chimica di inquinanti in atmosfera (*Chemical Transport Models*), in grado di produrre simulazioni di campi tridimensionali di concentrazione dei principali inquinanti atmosferici su tutto il territorio regionale, con elevata risoluzione. In fig. 1 è rappresentata schematicamente l'architettura della catena modellistica. Il cuore del sistema è rappresentato dal modello di qualità dell'aria, il modello euleriano di chimica e trasporto *FARM* (Gariazzo, 2007). Il modello *FARM*, sviluppato dalla società ARIANET con la quale ARPA collabora nelle attività legate alla modellistica di qualità dell'aria, tratta tutti gli inquinanti atmosferici normati ( $O_3$ ,  $NO_2$ ,  $NO_x$ ,  $PM_{10}$ ,  $PM_{25}$ ,  $CO$ ,  $SO_2$ , benzene), implementa meccanismi chimici di varia complessità per il trattamento della fotochimica e del particolato, è in grado di lavorare su domini ad orografia complessa in modalità multiscala, con più griglie innestate di differenti risoluzioni, tratta la chimica in fase acquosa ed eterogenea, oltre ai processi di deposizione secca ed umida.

Implementare un modello di chimica e trasporto significa tuttavia non solo applicare il modello in sé, ma piuttosto organizzare e gestire una rete di codici di calcolo in modo integrato. Il sistema modellistico utilizza infatti in ingresso molteplici *dataset*, che componenti specifiche elaborano in modo da produrre, sui domini di simulazione, tutti i dati in ingresso necessari al modello di qualità dell'aria. In sintesi i principali elementi che compongono il sistema possono essere riassunti in:

- un modulo territoriale, che a partire dalle basi dati territoriali costruisce i campi dei parametri geofisici territoriali sui domini di simulazione;
- un modulo di interfaccia meteorologico che, a partire dai dati meteorologici di ingresso (osservazioni al suolo ed in quota e/o campi tridimensionali, previsti o analizzati, di modelli meteorologici a mesoscala) costruisce, sui domini di simulazione, i campi meteorologici tridimensionali e bidimensionali di turbolenza utilizzati dal modello di qualità dell'aria;
- un modulo delle emissioni che, a partire dagli inventari delle emissioni disponibili sui domini di simulazione, costruisce i campi bidimensionali orari dei ratei di emissione per tutte le specie chimiche trattate dal modello di qualità dell'aria;
- il modulo per le condizioni iniziali ed al contorno, che a partire dai campi tridimensionali di concentrazione di un modello di qualità dell'aria a mesoscala e/o dai dati chimici osservati, prepara i campi di condizioni iniziali ed al contorno sui domini di simulazioni;
- un modulo di post-processing che elabora i campi tridimensionali di concentrazione per produrre campi aggregati di indicatori e mappe tematiche.

Il sistema modellistico è stato progettato con un'architettura il più possibile modulare, in modo da limitare l'interdipendenza tra i singoli moduli che lo compongono, rendendo così agevoli sia gli sviluppi ed i miglioramenti, sia, soprattutto, differenti implementazioni, che possono essere effettuate modificando o sostituendo uno più moduli, ma senza modificare la struttura generale. Attualmente esistono due differenti implementazioni del sistema: la versione diagnostica di lungo periodo (Bande et al., 2007) e la versione prognostica (Finardi et al., 2008, Bande et al., 2007), brevemente descritte nei capitoli successivi.

Figura 1 – Architettura del sistema



Architettura generale del sistema modellistico multiscale per la simulazione di dispersione di inquinanti in atmosfera.

### IMPLEMENTAZIONE DIAGNOSTICA DI LUNGO PERIODO

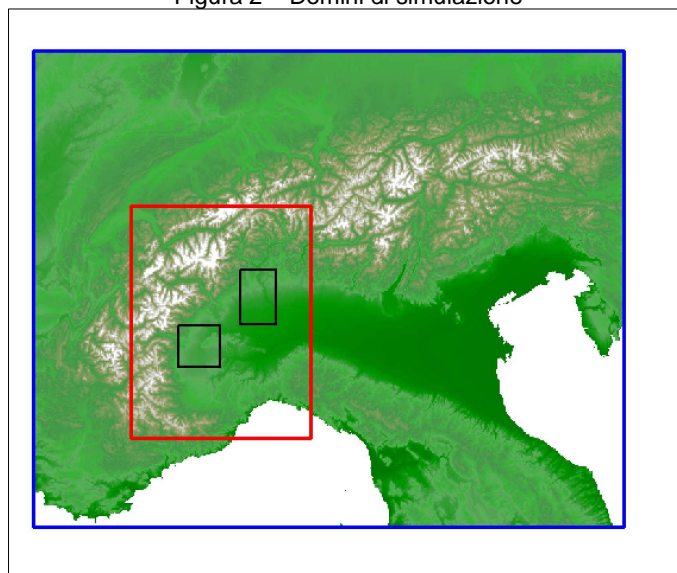
Il sistema modellistico in versione diagnostica di lungo periodo è stato sviluppato da Arpa Piemonte per supportare Regione Piemonte nell'effettuazione della Valutazione Annuale della Qualità dell'Aria (nel seguito VAQA) sul territorio regionale, in ottemperanza ai compiti istituzionali previsti dalla normativa nazionale e comunitaria. A partire dall'anno 2005, ogni anno, entro il mese di giugno, vengono effettuate le simulazioni relative alla VAQA dell'anno precedente; le simulazioni sono condotte con cadenza oraria su un dominio che comprende oltre all'intera regione Piemonte anche la Valle d'Aosta, si spinge fino alle province di Genova e Savona a sud ed include ad est la parte più orientale della Lombardia, fino all'area milanese, con una risoluzione orizzontale di quattro chilometri (fig.2). Verticalmente il dominio è sviluppato su dodici livelli che ricoprono integralmente il Planetary Boundary Layer (PBL), con una risoluzione maggiore negli strati più bassi dell'atmosfera. Per facilitarne ed ottimizzarne la gestione, la simulazione annuale, una volta definite tutte le configurazioni, viene effettuata con un approccio modulare, in modo che la simulazione complessiva risulti come composizione di moduli intermedi, ciascuno relativo all'intero dominio di calcolo ma con intervalli temporali ridotti di cinque giorni.

Il modulo meteorologico utilizza in questa implementazione un approccio diagnostico. Le variabili termiche e dinamiche del PBL (temperatura, componenti orizzontali e componenti verticali del vento), sono ottenute con *Minerve* (Aria Technologies, 2001) modello diagnostico *mass-consistent* basato sulla conservazione della massa e sulla minimizzazione della divergenza del campo di vento, a partire dall'ampia dotazione di dati provenienti dalle osservazioni della rete meteoidrografica di ARPA, dalle misure delle stazioni del *Global Telecommunication System (GTS)* e dalle elaborazioni della modellistica numerica di *European Centre for Medium range Weather Forecast (ECMWF)*. I parametri di turbolenza e le velocità di deposizione secca per le diverse specie chimiche vengono calcolati a partire dai campi prodotti da *Minerve* dal modulo di interfaccia *GAP/SURFPRO* (Finardi *et al*, 2005) con parametrizzazioni basate sulla teoria di *Monin-Obukhov* e sui metodi di bilancio energetico superficiale. I campi bidimensionali dei ratei di emissione per tutte le specie chimiche trattate dal modello di qualità dell'aria, modulati temporalmente su base oraria vengono prodotti dal modello delle emissioni *EMMA* (Arianet, 2005) a partire dall'Inventario Regionale delle Emissioni in Atmosfera (I.R.E.A) aggiornato all'anno della simulazione (o relativo al più recente aggiornamento) con dettaglio su macrosettore, settore ed attività secondo le categorie *SNAP* (classificazione *CORINAIR*), opportunamente integrato con le informazioni riguardanti gli inventari emissivi dei territori confinanti e compresi nel dominio di calcolo (*INEMAR* per la Lombardia, Inventario Regionale della Valle d'Aosta, *CORINAIR* per le altre regioni italiane ed *EMEP* per le regioni estere). Le condizioni al contorno vengono predisposte a partire dalle simulazioni di analisi condotte su scala continentale con il modello *CTM CHIMERE* messe a disposizione dal servizio *Prev'Air* (<http://www.prevoir.org>), all'interno delle quali vengono assimilati, con uno schema di interpolazione per correzioni successive (Bratseth, 1986), le osservazioni di qualità dell'aria provenienti dalle stazioni di rilevamento disponibili nel dominio di calcolo.

Per le VAQA relative agli anni 2004, 2005, 2006 il modello *FARM* è stato utilizzato con schema chimico *SAPRC90* (Carter, 1990) e modulo semplificato *aero0* (EMEP, 2003) per il trattamento del particolato atmosferico. A partire dalla VAQA relativa all'anno 2007, la disponibilità di una versione parallela del codice, basata sul paradigma *OpenMP*, permetterà da un lato l'implementazione del più aggiornato meccanismo

chimico *SAPRC99* (Carter, 2000) e del più completo modulo *aero3* (Binkowski, 1999) per il particolato, più dispendiosi in termini computazionali, dall'altro l'utilizzo tecniche di assimilazione in continuo mediante la tecnica del *nudging* (Kalnay, 2003) dei dati di concentrazione rilevati ad ogni ora di simulazione. A valle delle simulazioni di dispersione, il modulo di post-elaborazione calcola i campi degli indicatori di lungo periodo necessari per effettuare la valutazione del territorio in relazione allo stato di qualità dell'aria, ed effettua una prima verifica delle prestazioni del sistema, con particolare riferimento agli obiettivi di qualità per la modellizzazione richiesti dalla normativa nazionale e comunitaria.

Figura 2 – Domini di simulazione



Domini di simulazione del sistema modellistico: in blu dominio di background *g1* (implementazione prognostica), in rosso dominio regionale *g2* (implementazione prognostica e diagnostica) ed in nero domini *target g3* e *g4*.

### IMPLEMENTAZIONE PROGNOSTICA

A partire dall'anno 2006 la catena modellistica è stata implementata operativamente in versione prognostica (Finardi et al., 2008) per effettuare quotidianamente la previsione dei livelli di concentrazione al suolo dei principali inquinanti atmosferici.

La catena modellistica prognostica è un sistema multiscala, in grado di effettuare le simulazioni di qualità dell'aria su differenti domini a differente risoluzione. A partire da un dominio di *background* a bassa risoluzione, tramite la tecnica delle griglie innestate (*two-way nesting*), viene effettuata la discesa di scala su sotto-domini ad alta risoluzione (*domini target*). L'approccio multiscala permette di simulare le dinamiche di dispersione, trasporto e trasformazione degli inquinanti nei *domini target* considerando nel contempo anche gli effetti delle sorgenti emissive localizzate al loro esterno e descrivendo meglio i fenomeni di accumulo caratterizzati da più grandi scale spaziali (ad esempio legati allo smog fotochimico).

Il sistema modellistico è attualmente applicato a quattro domini computazionali (fig.2): un dominio di *background*, *g1*, che include tutto il bacino padano adriatico, l'arco alpino ed i principali rilievi appenninici, con una risoluzione orizzontale di 8 km, un dominio, *g2*, che comprende l'intera regione Piemonte e corrisponde a quello utilizzato per le VAQA e due sotto-domini *target*, *g3* e *g4*, ad alta risoluzione (1 km), centrati rispettivamente sull'area metropolitana torinese e sulla provincia di Novara. Il dominio di *background g1* è stato introdotto recentemente per migliorare la descrizione dei possibili apporti di inquinante che avvengono su area vasta e che nella versione iniziale, in cui erano presenti solo i domini *g2*, *g3* e *g4*, non venivano descritti con sufficiente accuratezza attraverso le condizioni al contorno, definite dai risultati di simulazioni modellistiche a scala europea, effettuate dal modello CHIMERE continentale.

L'implementazione prognostica del sistema differisce dall'implementazione diagnostica di lungo periodo, oltre che per i domini di calcolo, nel modulo per le condizioni al contorno, nel quale vengono usate le previsioni del modello CHIMERE fornite da *Prev'Air* e non le analisi con assimilazione dei dati osservati, e soprattutto nella componente meteorologica. La catena modellistica prognostica utilizza infatti come dati meteorologici di ingresso i campi di previsione prodotti dal modello meteorologico non idrostatico ad area limitata *COSMO-17* (versione italiana del modello *COSMO-MODEL*, sviluppato all'interno del *COntortium for Small-scale MOdelling*, <http://www.cosmo-model.org/>), acquisito quotidianamente dall'Area Previsione e Monitoraggio Ambientale di ARPA nelle attività operative del Centro Funzionale. I campi meteorologici prodotti da *COSMO-17* al suolo e sui livelli del modello vengono processati dal modulo di interfaccia

GAP/TINT/SURFFPRO (Finardi et al., 2005) che provvede ad effettuare l'interpolazione spaziale su ciascun dominio di calcolo, a riportare su base oraria i campi sul livello del modello, disponibili con scadenza trioraria, ed a calcolare, analogamente a quanto fatto nel sistema diagnostico, i parametri di scala del PBL con teoria di similarità e parametrizzazioni basate sul bilancio energetico superficiale.

Il modello FARM viene utilizzato operativamente con lo schema chimico SAPRC90 e modulo *aero0* per il particolato atmosferico. È stata implementata anche una versione sperimentale che, sfruttando la versione parallela del modello, utilizza i più completi e raffinati meccanismi SAPRC99 ed *aero3*.

Il sistema prognostico produce quotidianamente le previsioni di qualità dell'aria relative ai medesimi inquinanti trattati nel sistema diagnostico, per il giorno in corso ed i due giorni successivi, con risoluzione temporale oraria. La catena operativa è organizzata in due principali fasi: nella prima vengono acquisiti e processati i dati di ingresso (condizioni al contorno, emissioni e meteorologia) su tutti i domini di calcolo, nella seconda vengono effettuate le simulazioni di qualità dell'aria, con due corse parallele di FARM in modalità *two-way nesting*, una per ogni dominio *target*. Al termine di ogni giorno di simulazione (per il primo verso le 8.30 ora locale, per il secondo verso le 9.30 ora locale e per il terzo verso le 10.30 ora locale), il modulo di post-elaborazione calcola, se previsti, gli indicatori di legge, l'indice di qualità dell'aria previsto sull'area metropolitana torinese (Bande et al., 2007b) ed effettua la disseminazione dei dati. La catena operativa prognostica viene utilizzata anche come componente *server* di un sistema più ampio di monitoraggio e controllo della qualità dell'aria, completato da ulteriori componenti *client*, attualmente collocate e gestite presso la Provincia di Torino e la Provincia di Novara.

## CONCLUSIONI E FUTURI SVILUPPI

Il sistema modellistico sviluppato è sottoposto a continui processi di verifica delle prestazioni (Bande et al., 2007), con confronti *osservato/simulato*, basati sia su indici statistici di performance, sia su analisi di serie storiche di lungo periodo o relative a periodi di inquinamento acuto. L'architettura modulare permette di aggiornare ogni componente del sistema per ottimizzarne e migliorarne le prestazioni sulla base dei risultati ottenuti nella verifica. L'introduzione di un ulteriore e più ampio dominio di background nella versione prognostica, l'introduzione di metodi di assimilazione sequenziali continui come il *nudging* nella versione diagnostica, così come il passaggio a schemi chimici più complessi in entrambe, ne sono un esempio.

Infine è attualmente in fase di realizzazione l'implementazione del sistema in modalità diagnostica *near real time*, in grado di fornire operativamente e quotidianamente i campi di concentrazione relativi al giorno precedente. Il sistema sarà simile a quello utilizzato nelle simulazioni diagnostiche di lungo periodo, cioè dovrà basarsi sull'uso delle osservazioni meteorologiche e di qualità dell'aria rese disponibili dalla rete di monitoraggio regionale, ma nel contempo dovrà fare uso del sistema a griglie innestate in modalità *two-way nesting*, con un dominio di *background g1* ed un dominio regionale *g2*, per meglio cogliere gli effetti a scala locale dell'inquinamento sovra-regionale. L'estensione del dominio di calcolo rende necessario modificare ulteriormente il modulo meteorologico, in modo da disporre di un moderno e più completo sistema di analisi meteorologica ad alta risoluzione.

## Bibliografia

- ARIA Technologies, *MINERVE wind field model - General design manual - Version 7.0*, 2001, ARIA Tech. Report.
- ARIANET, *EMMA (EMGR/make) – User's guide – Version 3.5*, 2005, Arianet R2005.08
- Bande S., Clemente M., De Maria R., Muraro M., Piccolo M.E., Arduino G., Calori G., Finardi S., Radice P., Silibello C.e Brusasca G., *The modelling system supporting Piemonte region yearly air quality assessment*, 2007, Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Urban Air Quality, Cyprus, 27-29 March 2007
- Bande S., Clemente M., De Maria R., Muraro M., Finardi S., Giorcelli M., Morselli M.G., *Multiscale modelling system for pollutant concentration predictions in urban areas*, 2007b, Atti workshop on "Air pollution in urban areas Torino - Milano - Lyon - London", Torino November 7, 2007
- Bratseth, A. M., *Statistical interpolation by means of successive corrections*, 1986, Tellus, 38A, 439-447
- Carter W.P., *A detailed mechanism for the gas-phase atmospheric reactions of organic compounds*, 1990, Atmos. Environ., 24A, 481-518.
- Carter, W.P., *Documentation of the SAPRC99 chemical mechanism for VOC reactivity assessment*, 2000, <ftp://ftp.cert.ucr.edu/pub/carter/pubs/s99txt.pdf>
- Finardi S., De Maria R., D'Allura A., Cascone C., Calori G. e Lollobrigida, F., *A Deterministic Air Quality Forecasting System For Torino Urban Area*, 2005, Environmental Modelling and Software, 23, 344-355
- Finardi S., Baklanov A., Clappier A., Fay B., Joffre S., Karppinen A., Ødegård V., Slørdal L. H., Sofiev M., Sokhi R. S., Stein A., *Improved interfaces and meteorological pre-processors for urban air pollution models*, 2005, FUMAPEX Report D5.2-3, Milan, Italy, 55 pp, available at <http://fumapex.dmi.dk>
- Gariazzo C., Silibello C., Finardi S., Radice P., Piersanti A., Calori G., Cucinato A., Perrino C., Nussio F., Cagnoli M., Pelliccioni A., Gobbi G.P., 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.
- Binkowski F. S., *The aerosol portion of Models-3 CMAQ*, 1999, EPA-600/R-99/030, National Exposure Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, 10-1-10-16.
- Kalnay E., *Atmospheric Modeling, Data Assimilation, and Predictability*, 2003, Cambridge PRESS.