



LINEA PROGETTUALE 2

Organizzazione e realizzazione della sorveglianza ambientale nelle aree di indagine

AZIONE 4

Sviluppo di sistemi modellistici avanzati
per la valutazione di situazioni complesse

Rapporto finale

Arpa Emilia-Romagna
Giovanni Bonafè, Marco Deserti, Enrico Minguzzi, Mauro Rossi

Marzo 2010

www.moniter.it

Il progetto Monitor: organizzazione di un sistema di sorveglianza ambientale e valutazione epidemiologica nelle aree circostanti gli impianti di incenerimento in Emilia-Romagna, è promosso dagli assessorati Politiche per la salute e Ambiente, riqualificazione urbana della Regione, in collaborazione con Arpa

Progetto: MONITER

Linea Progettuale n. 2: ORGANIZZAZIONE E REALIZZAZIONE DELLA SORVEGLIANZA AMBIENTALE NELLE AREE DI INDAGINE

Azione n.4: SVILUPPO DI SISTEMI MODELLISTICI AVANZATI PER LA VALUTAZIONE DI SITUAZIONI COMPLESSE

Autori: G.Bonafè, M.Deserti, E.Minguzzi, M.Rossi

Introduzione

Obiettivo dell'azione era la messa a punto di uno strumento modellistico per lo studio delle ricadute di inquinanti primari in prossimità di una sorgente emissiva, anche in condizioni orograficamente e meteorologicamente complesse. Il modello deve quindi essere non stazionario, deve gestire inquinanti gassosi e aerosol, condizioni di calma di vento, domini a orografia complessa. Focus del modello è vicino alla sorgente emissiva, entro un raggio compreso tra le centinaia di metri e le decine di chilometri. Il sistema modellistico deve includere un modulo meteorologico e deve essere fruibile da operatori ARPA delle Sezioni Provinciali.

Il modello deve permettere, alla fine di ciascuna campagna di misura Monitor, di dare supporto all'interpretazione dei dati ottenuti dal monitoraggio.

L'azione si articola nelle seguenti attività: rassegna dei modelli esistenti e selezione del modello; acquisizione e sviluppo del modello; sviluppo dell'interfaccia meteo; applicazione all'inceneritore selezionato, a supporto dell'interpretazione dei dati misurati; formazione degli operatori ARPA per l'applicazione del modello; supporto agli utenti (documentazione, forum, ecc), anche a supporto della scrittura delle Linee Guida.

Requisiti del sistema modellistico

Per il sistema modellistico avanzato da implementare si sono individuati i seguenti requisiti primari: focus all'area di ricaduta in prossimità della sorgente emissiva, entro un raggio compreso tra le centinaia di metri e le decine di chilometri; capacità di simulare accuratamente le ricadute in condizioni meteo non stazionarie e con calme di vento; disponibilità di una versione di test.

La necessità di dotarsi di un modello non stazionario che gestisca domini a orografia complessa e condizioni di calma di vento porta ad orientarsi verso modelli di dispersione di inquinanti di tipo lagrangiano a particelle o a *puff*.

Rassegna dei modelli e selezione del modello

Prendendo come riferimento la rassegna di modelli resa disponibile dal progetto COST 728 e alcune indicazioni avute da tecnici e ricercatori, si è stilata una lista di modelli lagrangiani. Di ciascuno dei modelli è stata valutata l'adeguatezza per i nostri scopi, cioè innanzitutto il rispetto dei tre requisiti primari.

Questi gli esiti di tale valutazione: FLEXPART, LPDM, SILAM e HYSPLIT sono adatti per applicazioni a grande scala/mesoscala, ma non a scala locale/urbana; SPRAY è un lagrangiano, utilizzato anche in Italia per applicazioni su terreno complesso, p.es. valutazione dell'impatto di un impianto di incenerimento; LODI è un lagrangiano sviluppato dal LLNL statunitense, per motivi di sicurezza nazionale le procedure per il rilascio di una versione di prova potrebbero essere complesse; PLPM è un lagrangiano che consente di fare valutazioni a risoluzioni soddisfacenti, ma richiede tempi di calcolo piuttosto lunghi; CALPUFF è un modello a puff non stazionario, che si interfaccia con il pre-processore meteo CALMET; GILTT è una soluzione analitica all'equazione di dispersione di inquinanti in atmosfera, sviluppata dal Prof.Tirabassi del CNR; l'algoritmo non è ancora implementato in un prodotto maturo; LAPMOD è un lagrangiano, adatto per applicazioni a scala locale su terreni complessi; si interfaccia con il pre-processore meteo CALMET.

Dunque i modelli SPRAY, CALPUFF e LAPMOD superano la prima selezione. Nessuno dei tre modelli soddisfa di per se stesso tutti i requisiti richiesti, si impone perciò uno sforzo di implementazione ed adattamento. Tale constatazione esclude dalla competizione CALPUFF, che è fornito gratuitamente ma senza implementazioni *ad hoc*.

ARPA-SIMC ha indetto un'indagine di mercato per l'implementazione della catena modellistica, invitando dunque i due possibili concorrenti ARIANET e ENVIROWARE, sviluppatori e distributori rispettivamente di SPRAY e LAPMOD, a presentare un'offerta. All'invito ha risposto solamente ENVIROWARE, con una proposta che è risultata conforme alle richieste, ed è quindi stata approvata.

Implementazione del sistema modellistico selezionato

Il sistema si compone di sei elementi: il *dataset* LAMA; il modulo CACHI; il modulo per le emissioni LAPEMI; il modello LAPMOD; il modulo di post-processing LAPOST; l'interfaccia web AQWEB. Vediamoli nel dettaglio.

Il modello lagrangiano Lapmod

LAPMOD è un modello Lagrangiano a particelle, tridimensionale e non stazionario, adatto a simulare la dispersione in atmosfera di sostanze inerti o radioattive, emesse sia in fase gassosa sia in forma di aerosol. Le particelle utilizzate per il calcolo sono spostate nell'atmosfera per effetto del vento e della turbolenza atmosferica. Ciascuna particella trasporta una frazione della massa d'inquinante emessa.

All'interno dello strato di rimescolamento, la traiettoria di ciascuna particella è data dalla successione di diversi spostamenti che dipendono dalle condizioni meteorologiche locali. Lo spostamento nell'intervallo di tempo dipende dal vento medio locale e da una componente casuale la cui evoluzione è descritta dall'equazione di Langevin. Sopra lo strato di rimescolamento, le fluttuazioni di velocità delle particelle seguono per le tre componenti l'equazione di Langevin per condizioni omogenee. Una particella all'interno dello strato superficiale può perdere una parte della sua massa a causa della deposizione secca o umida.

La concentrazione in corrispondenza dei recettori è calcolata come la somma dei contributi di tutte le particelle presenti all'interno del dominio della simulazione.

LAPMOD è un'evoluzione dei modelli lagrangiani a particelle PDM (Bianconi *et al.*, 1999) e PLPM (Ferrario *et al.*, 2002), ed è utilizzato da JRC-UE e ISPRA per la gestione delle emergenze nucleari. Il modello è stato validato con i dataset sperimentali Kincaid, Indianapolis e Praire Grass.

Il dataset meteo Lama

Un modello meteorologico è uno strumento che, partendo dallo stato dell'atmosfera in un certo istante, ne descrive l'evoluzione risolvendo numericamente le equazioni fluidodinamiche. In pratica, l'atmosfera o una sua porzione viene suddivisa con una griglia tridimensionale: per ciascuna cella viene stimato il valore medio dei principali parametri atmosferici (temperatura, pressione, vento, umidità e altri) all'istante iniziale, e il modello simula numericamente l'evoluzione di questi parametri.

Uno strumento di questo tipo può essere usato sia per produrre previsioni, sia per ricostruire lo stato dell'atmosfera nel passato. In questo caso, il modello può tenere conto delle osservazioni disponibili, e sono state sviluppate tecniche specifiche (assimilazione dati) per mantenere piccole le discrepanze tra i valori osservati e quelli simulati. Il dataset LAMA (Limited Area Meteorological Analysis) è stato prodotto con una tecnica di questo tipo, sfruttando le simulazioni operative del modello meteorologico COSMO e le osservazioni della rete meteorologica internazionale.

COSMO è un modello meteorologico ad area limitata non idrostatico, sviluppato dai servizi

meteorologici di Germania, Svizzera, Italia, Grecia e Polonia. E' il modello di riferimento italiano per le previsioni del tempo a breve termine.

Il dominio delle simulazioni operative dell'implementazione italiana di COSMO copre un'area di circa 2000x2000 km², con una risoluzione orizzontale di circa 7km e 40 livelli verticali. Oltre a descrivere esplicitamente i meccanismi di trasporto e termodinamici a grande scala, COSMO contiene schemi di parametrizzazione per tenere conto dei fenomeni che avvengono all'interno delle singole celle: formazione delle nubi e della precipitazione, convezione a piccola scala, radiazione, diffusione turbolenta, strato atmosferico superficiale, suolo, interazione suolo-atmosfera.

Il modulo meteo CACHI

CACHI (Cosmo Analysis Calmet-High-resolution-Integrated) è un'implementazione ad alta risoluzione (0.1-1km) *on-demand* di CALMET, che elabora i dati LAMA effettuando un *downscaling* su domini locali (5-20km), per ricostruire l'input meteo necessario a Lapmod, cioè campi tridimensionali di vento e temperatura e campi bidimensionali dei parametri della turbolenza. Opzionalmente, Cachi parametrizza alcuni effetti locali propri dei terreni a orografia complessa: *slope effect*, *kinematic effect*, *blocking effect*, minimizzazione della divergenza.

Il modulo di pre-elaborazione delle emissioni Lapemi

Il modulo di pre-elaborazione delle emissioni Lapemi consente all'utente di generare l'input emissivo orario necessario per Lapmod, a partire da informazioni sulle modulazioni emissive giornaliere, settimanali e annuali.

Il modulo di post-elaborazione Lapost

Il modulo di post-elaborazione Lapost consente all'utente di elaborare i dati in uscita dalle simulazioni Lapmod, per calcolare sulla griglia regolare di output alcuni indici statistici quali massimi, medie, percentili su base oraria, giornaliera o annuale.

L'interfaccia web AQWeb

L'intera catena modellistica è controllabile da remoto, tramite il *web service* AQWeb. Gli utenti accedono con un proprio utente e password personale. AQWeb consente di controllare l'intera catena modellistica da remoto. Inoltre l'interfaccia web include un semplice GIS, che permette all'utente di visualizzare i risultati su mappa e di esportarli in formati compatibili con i più diffusi GIS. Ad oggi ci sono 31 utenti registrati su AQWeb.

Formazione e supporto agli utenti

Il 19 marzo 2009 si è tenuta a Bologna una giornata di formazione per i potenziali utenti del sistema modellistico lagrangiano AQWeb-Lapmod, 21 tecnici di ARPA Emilia Romagna. Ai partecipanti sono state distribuite alcune dispense di supporto. Le lezioni hanno fornito ai partecipanti le nozioni fondamentali per: comprendere i presupposti teorici alla base del modello Lapmod; capire l'architettura della catena modellistica e i metodi applicati per costruire l'input meteo; utilizzare l'interfaccia web, dalla configurazione della simulazione fino alla visualizzazione, elaborazione ed esportazione dei risultati. A fine corso i partecipanti hanno compilato un modulo di gradimento, esprimendo in generale soddisfazione, ma anche la necessità di svolgere qualche esercitazione pratica. Purtroppo il tempo limitato non ha consentito di soddisfare quest'esigenza.

Oltre alla formazione iniziale, agli utenti del sistema modellistico AQWeb-Lapmod viene fornito da ARPA-SIMC supporto telefonico e attraverso posta elettronica. Inoltre è attivo un forum on-line dedicato, che dà la possibilità di consultare gli sviluppatori di Enviroware e gli amministratori del sistema di ARPA-SIMC, e consente lo scambio di esperienze e consigli tra utenti.

Applicazione al caso dell'inceneritore di Granarolo (Bologna)

Configurazione delle simulazioni

Il modello lagrangiano Lapmod è stato applicato anche alla simulazione delle ricadute dell'impianto di incenerimento di Granarolo (Bologna), per i due periodi di campagne di misura, estiva ed invernale. In entrambi i casi si sono simulate le specie chimiche gassose NO_x , SO_x , NH_3 , utilizzando in ingresso il dato emissivo semiorario fornito dalle misure in continuo al camino. Anche temperatura e velocità di uscita dei fumi sono dati misurati forniti a passo semiorario.

L'input meteo tridimensionale è prodotto dal modulo Cachi, su un dominio di 25km di lato, includente i punti di campionamento. Trattandosi di un dominio prevalentemente pianeggiante, in Cachi non sono state attivate le parametrizzazioni degli effetti locali propri dei terreni a orografia complessa.

Le simulazioni Lapmod estiva e invernale sono state impostate con le medesime configurazioni: i due camini sono trattati come emissioni puntuali "*buoyant*", nel senso che alle emissioni è applicato lo schema parametrico di Webster e Thomson per calcolare il *plume rise*; è applicato lo schema di Rezacova e Sokol (2000) per il calcolo dell'*entrainment*.

Si sottolinea che in tali simulazioni sono considerate solo le emissioni uscenti dai due camini delle caldaie di combustione dell'inceneritore. Non sono incluse né le emissioni estranee all'impianto di incenerimento stesso, né le altre emissioni ascrivibili all'attività dell'impianto (trasporto e stoccaggio dei rifiuti, ecc.), né le concentrazioni di fondo dovute ad emissioni esterne al dominio di calcolo. Inoltre non sono considerate trasformazioni chimiche.

Simulazione estiva

Le isolinee di concentrazione media hanno una forma leggermente allungata secondo le direzioni prevalenti dei venti, cioè parallelo all'asse appenninico. Tuttavia vi sono anche ricadute associabili a venti provenienti dalla pianura a nord e dalla collina a sud. La zona di massima ricaduta include l'impianto stesso. Ciò suggerisce che le concentrazioni più elevate al suolo corrispondano a condizioni atmosferiche di vivace rimescolamento verticale e venti deboli, o calma di vento.

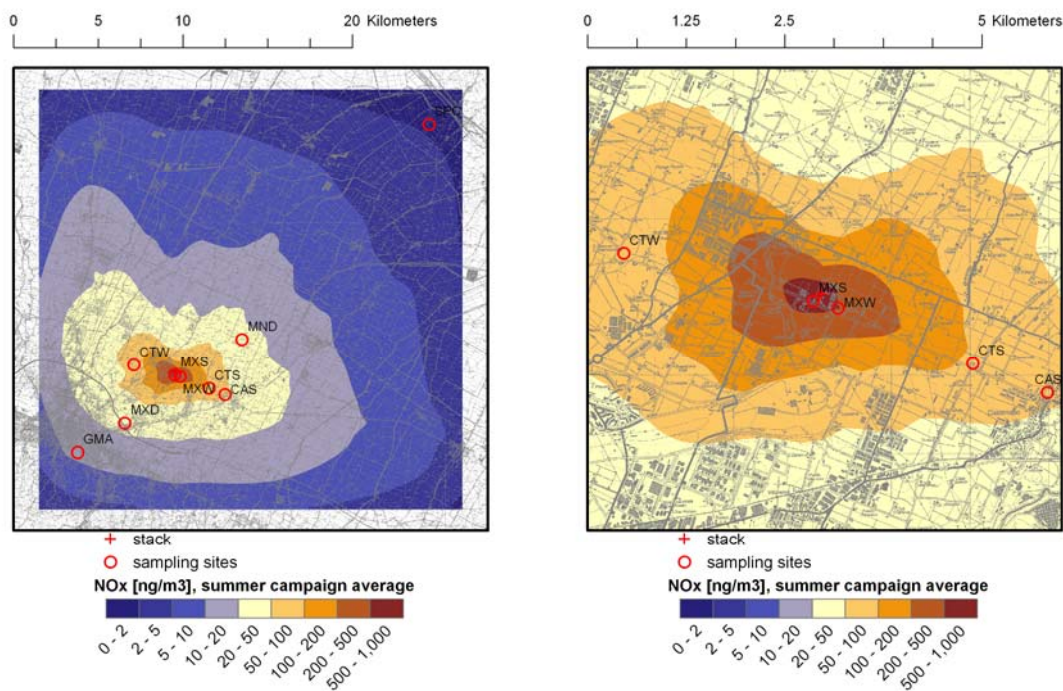


Figura 1 - Concentrazione medie di NOx calcolate per il periodo della campagna estiva. A sinistra, l'intero dominio di integrazione; a destra, in dettaglio l'area di massima ricaduta prossima all'impianto.

L'andamento orario delle concentrazioni mostra una marcata modulazione giorno/notte, specie nei siti più prossimi all'impianto. Il modello simula concentrazioni nettamente più alte nelle ore centrali della giornata, quando la forte insolazione determina le condizioni di spiccata convezione termica cui si accennava poc'anzi.

Le differenze tra inquinanti nella forma delle isolinee e degli andamenti orari sono determinate dalle differenze nell'andamento temporale delle emissioni. In particolare, gli ossidi di zolfo mostrano una marcata discontinuità emissiva, che ha un evidente riscontro nell'episodicità delle ricadute al suolo nei punti recettori.

Simulazione invernale

Come in estate, anche in inverno le isolinee di concentrazione assumono una forma oblunga parallela all'asse appenninico. In questo caso prevalgono però le ricadute associate ai venti provenienti dai quadranti occidentali, rispetto alle ricadute associate ai venti orientali. L'area di massima ricaduta include l'impianto stesso, ma stavolta si allunga fino a lambire l'insediamento urbano di Castenaso. Si nota la quasi totale assenza di ricadute nella pianura a nord e nord-est dell'impianto, associabili a venti provenienti dalla collina.

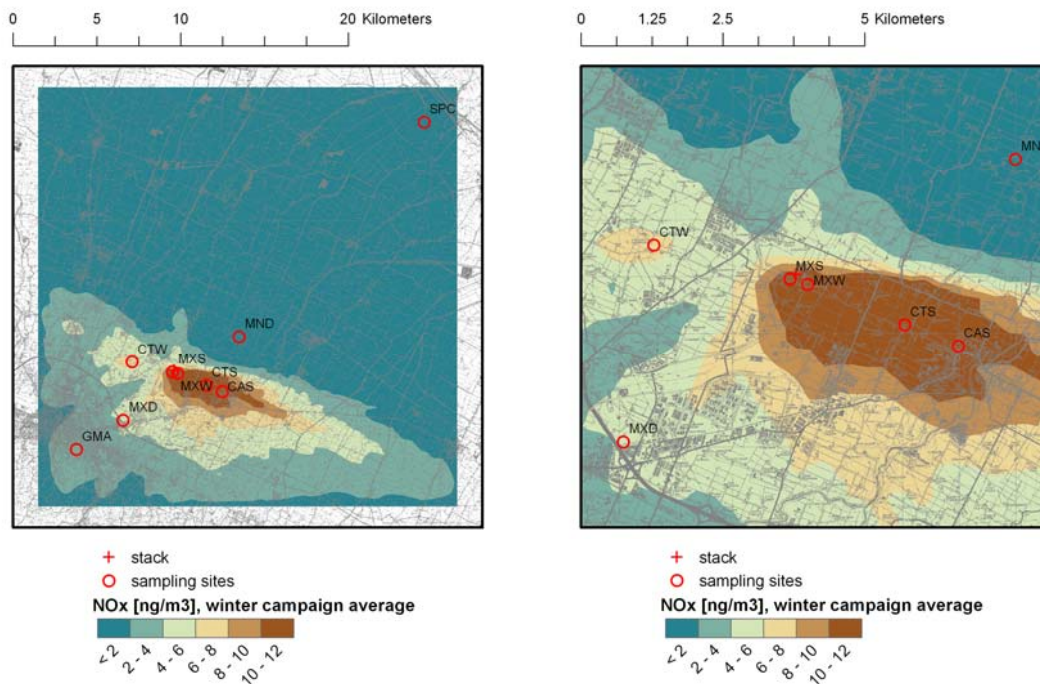


Figura 2 - Concentrazione medie di NO_x calcolate per il periodo della campagna invernale. A sinistra, l'intero dominio di integrazione; a destra, in dettaglio l'area di massima ricaduta prossima all'impianto.

Le condizioni meteo che determinano le massime ricadute al suolo sono caratterizzate da un vivace rimescolamento verticale. Poiché tali condizioni sono meno frequenti nella stagione invernale, non stupisce che le concentrazioni medie invernali siano nettamente più basse rispetto a quelle simulate per la campagna estiva.

Correlazioni tra recettori

Le simulazioni Lapmod consentono di verificare la bontà della scelta dei siti di campionamento, almeno per quanto riguarda i criteri di selezione basati sulle ricadute dell'inceneritore. I siti di campionamento MXW e MXS (rispettivamente, massimo invernale "supersito Frullo est" e massimo estivo) erano stati selezionati perché si riteneva probabile che fossero inclusi, rispettivamente, nell'area di massima ricaduta invernale ed estiva. Nelle mappe si vede che effettivamente MXW ricade nell'area di massima ricaduta invernale, e che MXS ricade nell'area di massima ricaduta estiva.

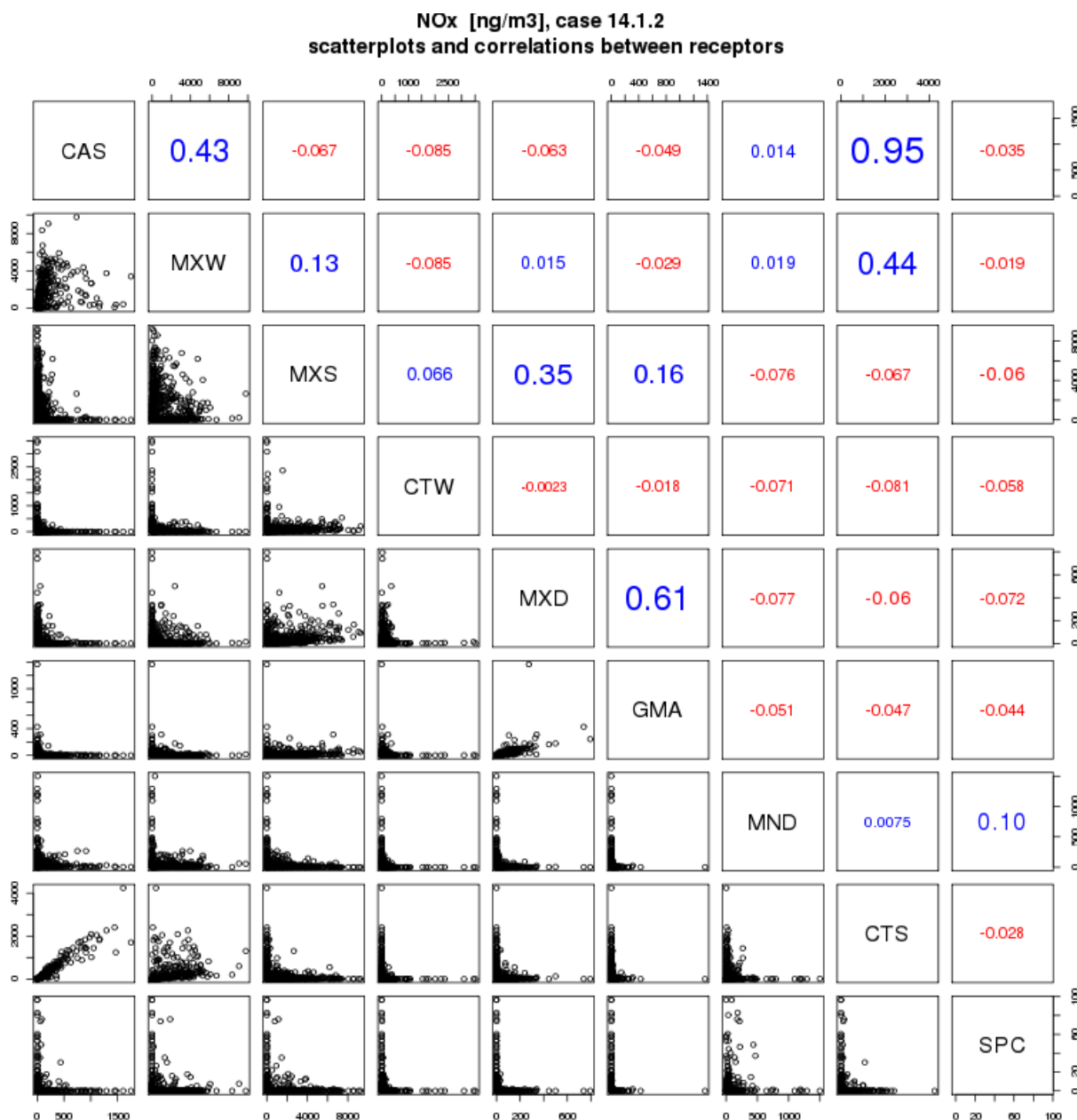


Figura 3 – Campagna estiva: matrice delle correlazioni tra recettori, calcolate rispetto agli andamenti orari simulati di NOx. Nella diagonale i codici identificativi dei recettori; sotto, gli scatter-plot delle coppie di recettori; sopra, i rispettivi indici di correlazione di Pearson (in rosso se negativi, in blu se positivi e con dimensioni dei caratteri proporzionali all'indice stesso)

I siti di campionamento CTW e CTS (controllo invernale “Calamosco” e controllo estivo) erano stati selezionati come siti di controllo, rispettivamente invernale ed estivo. Ciò significa che si riteneva improbabile che ricadute dei fumi provenienti dall'impianto di incenerimento interessassero simultaneamente i recettori MXW e CTW, o i recettori MXS e CTS. Effettivamente le correlazioni tra MXW e CTW e tra MXS e CTS sono risultate praticamente nulle. Tali considerazioni confermano la bontà della scelta di quei quattro siti di campionamento.

Allargando lo sguardo agli altri siti, si nota che in estate MXW, CAS (“Castenaso”) e CTS sono spesso interessati simultaneamente dalle ricadute dell'impianto (correlazioni superiori a 0.4), pur trovandosi a qualche chilometro di distanza l'uno dall'altro. Analoga considerazione vale per i siti MXD (massimo del dominio “Pianeta”) e GMA (“Giardini Margherita”), in area urbana.

In inverno le correlazioni tra siti sono generalmente più basse, probabilmente perché il pennacchio si allarga di meno (c'è meno turbolenza) ed è quindi meno probabile che interessi simultaneamente siti posti a qualche chilometro l'uno dall'altro. Invece risultano fortemente correlati i due siti più prossimi al camino (MXS e MXW), distanti tra loro poche centinaia di metri e probabilmente interessati simultaneamente da episodi di ricadute del pennacchio corrispondenti a calme di vento.

Conclusioni

L'obiettivo dell'azione era mettere a punto uno strumento modellistico per lo studio delle ricadute di inquinanti primari in prossimità di una sorgente emissiva, anche in condizioni orograficamente e meteorologicamente complesse.

In seguito a una rassegna dei modelli esistenti, alla selezione dei più adatti tra questi, e ad un'indagine di mercato, è stato selezionato il modello lagrangiano Lapmod di Enviroware. E' stata poi implementata una catena modellistica includente, oltre a Lapmod, il modulo meteo Cachi, il pre-processore delle emissioni Lapemi, il post-processore Lapost. Il sistema è installato presso ARPA-SIMC, ed è accessibile agli utenti ARPA attraverso l'interfaccia web ad accesso protetto AQWeb.

In una giornata di corso 21 tecnici ARPA sono stati addestrati all'uso del sistema modellistico AQWeb-Lapmod. Ad essi è fornito supporto tramite opportuna documentazione e attraverso un forum gestito da ARPA-SIMC.

Dunque, l'obiettivo dell'azione è stato raggiunto.

Il modello lagrangiano è stato applicato alle campagne di misura Monitor, per simulare le ricadute dell'inceneritore del Frullo. I risultati confermano che gli impatti più marcati sono in prossimità dell'impianto, nella stagione estiva, nelle ore centrali della giornata. L'analisi delle correlazioni tra gli andamenti simulati nei diversi punti di campionamento conferma la bontà della scelta dei siti.

Bibliografia

Baldauf, M. and J.-P. Schulz, 2004. *Prognostic Precipitation in the Lokal Modell (LM) of DWD*. COSMO Newsletter, Deutscher Wetterdienst. No. 4, 177-180.

Bianconi R., Mosca S. and Graziani G. (1999) *PDM: A Lagrangian particle model for atmospheric dispersion*. European Commission, EUR 17721 EN, 63pp.

Bowen, B.M., J.M. Dewart, and A.I. Chen, 1983 '*Stability Class Determination: A Comparison for one site*' Proceedings 6th Symposium on Turbulence and Diffusion, AMS, Boston, MA, 211-214.

Carvalho J.C., Degrazia G.A., Anfossi.D., Trini Castelli S.; *Simulation of Copenhagen tracer diffusion experiment by means of a Lagrangian particle model*. Hybrid Methods in Engineering, Vol. 1, n. 4, 309-327, 1999

Cheinet, S., 2002 '*The parameterization of clear and cloudy convective boundary layers*' Ph.D. Thesis, Ecole Polytechnique, Paris, France.

Draxler, R.R. and Rolph, G.D., 2003. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.

Draxler, R.R. and Rolph, G.D., 2003. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY, Website (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.

Fay B., Glaab H., Jacobsen I., and Klein.; '*Air Pollution Forecasts of the German Weather Service*

for IMIS', Kerntechnik 69, No. 5-6, 209-213 (2004)

Fay B., Glaab H., Jacobsen I., and Klein.; 'Air Pollution Forecasts of the German Weather Service for IMIS', Kerntechnik 69, No. 5-6, 209-213, (2004)

Galmarini S. et al., 'Ensemble Dispersion Forecasting - Part I: Concept Approach and Indicators. Part II: Application and Evaluation', Atmospheric Environment 38, 4607-4632 (2004)

Galmarini S. et al., 'Ensemble Dispersion Forecasting - Part I: Concept Approach and Indicators. Part II: Application and Evaluation', Atmospheric Environment 38, 4607-4632 (2004)

Glaab H., Fay B., and Jacobsen I., 'Evaluation of the Emergency Dispersion Model at the Deutscher Wetterdienst using ETEX Data', Atmospheric Environment 32, 4359-4366 (1998)

Jongen, S., Bonafè, G., 2006 'LAMI verification for air quality forecast and assessment purposes' Report interno ARPA-SIM. Disponibile su:
www.arpa.emr.it/cms3/documenti/_cerca_doc/meteo/ambiente/report_lm_verif_fv.pdf

Louis, J., 1979 'A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere'. Boundary-Layer Meteorology, 187-202.

Louis, J., Tiedke, M., Geleyn, J., 1982 'A short history of the pbl parametrization at ECMWF' ECMWF Workshop on Planetary Boundary Layer parametrization, 59-80.

Mellor, G., Yamada, T., 1974 'A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers' Journal of Atmospheric Science, 31, 1791-1806.

Mesinger, F., Arakawa, A., 1976 'Numerical methods used in atmospheric models' WMO, GARP publication series, 17

Modelling for Regulatory Purposes. Disponibile su:
www.harmo.org/Conferences/Proceedings/_Crete/publishedSections/p317.pdf

Pernigotti, D., Sansone, M., Ferrario, M., 2005 'Validation of one-year LAMI model re-analysis on the Po valley, Northern Italy. Comparison to Calmet model output on the sub-area of Veneto region' Proceedings of the 10th Int. Conf. on Harmonisation within Atmospheric Dispersion

Reuter, 1970 'Die Ausbreitungsbedingungen von Luftverunreinigungen in Abhängigkeit von meteorologischen Parametern' Arch. Met. Geog. Biokl. A, 19: 173-186.

Ritter, B, Geleyn, J.F., 1992 'A Comprehensive Radiation Scheme for Numerical Weather Prediction Models with Potential Applications in Climate Simulations' Monthly Weather Review, 120, 303-325

Rolph, G.D., 2003. Real-time Environmental Applications and Display sYstem (READY) Website (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.

RTI CTN_ACE (2004): *I modelli per la valutazione e gestione della qualità dell'aria nelle aree urbane ed a scala locale.*

RTI CTN_ACE 4/2001, (2001). "Linee guida per la selezione e l'applicazione dei modelli di dispersione atmosferica per la valutazione della qualità dell'aria".

Seinfeld J.H. and Pandis S.N. (1998) *Atmospheric chemistry and physics. From air pollution to climate change*, John Wiley & Sons.

Stappeler, J., Doms, G., Schättler, U., Bitzer, H.W., Gassmann, A., Damrath, U., Gregoric, G., 2003 'Meso-gamma scale forecasts using the nonhydrostatic model LM' Meteorology and Atmospheric Physics, 82, 75-96

Tiedtke, M., 1989 'A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models' Monthly Weather Review, 117, 1779-1799.

Tinarelli G., Anfossi D., Bider M., Ferrero E. and Trini Castelli S: *A new high performance version*

of the Lagrangian particle dispersion model SPRAY, some case studies.; Air Pollution Modelling and its Application XIII, Gryning S.E. and Batchvarova E. Eds., Plenum Press, New York, 23, 499-506, 1999.

Tinarelli G., Anfossi D., Bider M., Ferrero E. and Trini Castelli S.; *A new high performance version of the Lagrangian particle dispersion model SPRAY, some case studies.* Air Pollution Modelling and its Application XIII, Gryning S.E. and Batchvarova E. Eds., Plenum Press, New York, 23, 499-506, 1999

Troen, I., Mahrt, L., 1986 'A simple model of the atmospheric boundary layer: Sensitivity to surface evaporation' *Boundary-Layer Meteorology*, 37, 129–148.

Vitali L., F. Monforti, R. Bellasio, R. Bianconi, V. Sacchero, S. Mosca and G. Zanini (2006) *Validation of a Lagrangian dispersion model implementing different kernel methods for density reconstruction.* *Atmospheric Environment*, 40, 40, 8020-8033.

Zanini G., R. Bellasio, R. Bianconi, L. Delle Monache, R. Lorenzini, S. Mosca and S. Peverieri (2000) *Photochemical modelling using lagrangian particle models. a new approach*, 23rd NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution and its

Zanini G., R. Bellasio, R. Bianconi, L. Delle Monache, R. Lorenzini, S. Mosca, F. Monforti-Ferrario, S. Peverieri, L. Vitali (2002) *PLPM (Photochemical Lagrangian Particle Model) : Formulation and preliminary Validation.* Eight International Conference on Harmonisation within Atmospheric Modelling for Regulatory Purposes. Sofia (Bulgaria) 14-17 October 2002