

RIAT+: uno strumento integrato per la definizione delle politiche ottime di qualità dell'aria a scala regionale

Gianfreda R., Maffei G., Roncolato D.

TerrAria s.r.l., via Melchiorre Gioia 132, 20125 Milano, r.gianfreda@terraria.com

Deserti M., De Munari E., Stortini M., Veronesi P.

ARPA-Emilia Romagna, Viale Silvani 6, Bologna

Bianchessi N., Carnevale C., Finzi G., Pisoni E., Volta M.,

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università di Brescia, Via Branze 38, 25123 Brescia

Blond N., Clappier A., Markl-Hummel L.

LIVE, ERL7230, CNRS, Strasbourg, France

Thunis P.

European Commission-DG Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, I-21020 Ispra (VA)

RIASSUNTO

RIAT+ è il tool informatico sviluppato all'interno del progetto LIFE+ OPERA che ha l'obiettivo di implementare una metodologia di valutazione integrata ed armonizzata con le politiche nazionali ed europee che supporti le Autorità Locali e regionali nella preparazione ed attuazione di piani di qualità dell'aria volti a ridurre l'esposizione della popolazione e degli ecosistemi a livelli di PM₁₀, NO_x e O₃, al di sotto dei limiti di legge. Lo strumento software RIAT+ è concepito per supportare le autorità regionali nella scelta delle politiche efficienti di riduzione dell'inquinamento atmosferico secondo la seguente metodologia: identificazione dell'area o delle zone dove le condizioni della qualità dell'aria sono critiche, definizione degli indicatori per la selezione di politiche di abbattimento dell'inquinamento atmosferico, selezione delle azioni possibili, uso iterativo dello strumento per valutare l'impatto di differenti soluzioni alternative. RIAT+ è progettato per essere uno strumento modulare, "user friendly", efficiente ed esportabile in qualunque regione europea, isolando le specificità del dominio di applicazione nei database di ingresso al sistema. Lo strumento, all'interno del progetto OPERA, viene testato sulle regioni Emilia Romagna (IT) e Alsazia (FR). Elementi innovativi dello strumento RIAT+ sono l'introduzione delle misure non tecniche, la valutazione degli effetti delle politiche sulle emissioni di gas-serra e la flessibilità dell'ottimizzazione in termini di obiettivi di qualità dell'aria, delle zone di intervento, dei budget settoriali.

1. INTRODUZIONE

In accordo con le strategie comunitarie per la qualità dell'aria, il progetto LIFE+ OPERA (*Operational Procedure for Emission Reduction Assessment*, 2010-2013, www.operatool.eu) ha l'obiettivo di definire ed implementare una metodologia operativa, con la creazione di un sistema informativo di supporto alle decisioni per le Autorità Regionali, cui competono i Piani di qualità dell'aria. Tale strumento, denominato RIAT+ (*Regional Integrated Assessment Tool – sviluppo del prototipo RIAT finanziato Joint Research Centre*), consente di identificare politiche efficaci per la riduzione dell'inquinamento atmosferico e contestualmente dei gas serra, rispettando le normative vigenti e adattando le soluzioni proposte alla realtà locale. La complessità di tale problema cresce quando si ha a che fare con inquinanti, come particolato, ozono e biossido di azoto, che si formano in atmosfera da complesse reazioni chimiche e processi fisici, coinvolgendo le emissioni dei precursori come COV, NO_x, NH₃, PM primario e SO₂. L'elevata concentrazione di tali inquinanti secondari, che rappresenta uno dei problemi più significativi per l'inquinamento dell'aria in alcune aree in Europa ed in particolare in Italia, deve essere affrontata, così come richiesto dalla direttiva EU 2008/50, attraverso la definizione di piani di qualità dell'aria. E' importante che tali piani definiscano azioni di riduzione delle emissioni dei precursori valutandone gli effetti attraverso opportune modellazioni, e considerando sia le non linearità tra abbattimento delle emissioni e riduzione delle concentrazioni degli inquinanti, sia il costo di implementazione delle misure stesse.

A tale scopo esistono modelli di gestione integrata dell'inquinamento dell'aria (IAM - *Integrated Assessment Model*); si tratta di modelli che, con vari approcci, integrano i dati sulle sorgenti inquinanti (ovvero l'inventario emissivo), il loro contributo alle concentrazioni atmosferiche (ed eventualmente gli effetti in termini di esposizione umana/ambientale), con informazioni sulle potenziali misure per la riduzione delle emissioni ed i relativi costi di implementazione. Obiettivo di tali approcci è quello di fornire le possibili soluzioni al problema dei livelli critici di inquinamento atmosferico tenendo conto di tutti aspetti (benefici e costi)

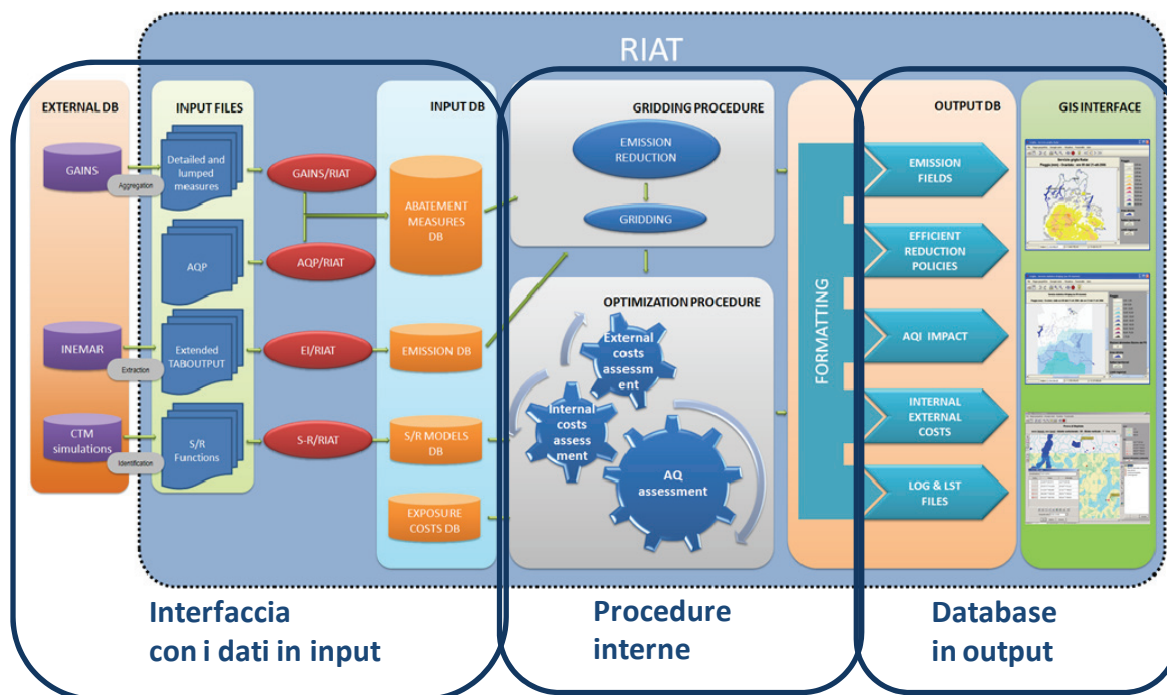
A scala europea negli ultimi anni sono stati sviluppati diversi IAM per affrontare in maniera strutturata problemi del genere (RAINS/GAINS di IIASA è l'esempio più importante) e in seguito sono stati adattati a scala nazionale (ad esempio RAINS-Italy) ed a scala locale. In questo

contesto si inserisce lo strumento RIAT+, che si occupa della scala locale/regionale e vuole supportare il decisore nelle sue valutazioni, a partire dal contesto nazionale/europeo in cui il dominio di studio è inserito. All'interno del progetto OPERA, è in corso l'applicazione di RIAT+ a due regioni, Alsazia (FR) ed Emilia-Romagna (IT).

2. IL SISTEMA RIAT

Per meglio comprendere il progetto OPERA e in particolare l'applicativo RIAT+ che ne è l'elemento centrale è utile descrivere il sistema prototipale RIAT (sviluppato per il JRC - Joint Research Centre - nell'ambito di un finanziamento di Regione Lombardia).

Figura 1 – Schema architetturale del sistema RIAT: input, procedure e output



RIAT nasce come strumento per valutare le politiche ottime di miglioramento della qualità dell'aria a scala regionale. L'architettura del sistema, come mostrato (Figura 1), consta di tre parti principali: (1) l'interfaccia con i dati di input, (2) l'insieme delle procedure interne di ottimizzazione e (3) le politiche ottime di qualità dell'aria, gli scenari emissivi e degli indicatori di qualità dell'aria, i costi di implementazione in uscita.

Gli effettivi dati di partenza del sistema vengono acquisiti tramite l'interfaccia del sistema, e sono i seguenti:

- l'inventario delle emissioni (INEMAR, nel caso ad esempio di alcune regioni italiane);
- una lista di possibili misure tecniche di riduzione e delle relative caratteristiche (costi, penetrazione in un certo anno ed efficienza di riduzione delle emissioni) – quale ad esempio GAINS;
- una "mappatura" tra l'inventario emissivo e l'inventario delle misure tecniche di riduzione;
- Le funzioni Sorgente/Recettore (S/R), modellizzate con ANN (Artificial Neural Networks), ovvero reti neurali artificiali, che legano le riduzioni delle emissioni di precursori e le concentrazioni degli inquinanti. Tali funzioni sono identificate processando gli input-output di opportune simulazioni di un sistema modellistico (tipicamente un CTM – *Chemical Transport Model*) e che descrivono la relazione non lineare tra le variabili di controllo (riduzioni delle emissioni dei precursori) e gli obiettivi di qualità dell'aria (concentrazione degli inquinanti secondari).

Sempre tramite interfaccia viene fornito un dominio spaziale grigliato, mentre input "indiretti" sono il modello di trasporto e diffusione e la meteorologia, necessari per l'addestramento e la definizione dei modelli S/R. Le funzioni S/R in RIAT sono definite su base annuale.

Le procedure interne rappresentano la parte operativa del sistema e sono costituite dall'ottimizzatore e da una serie di pre-processor, che preparano le emissioni e le misure tecniche per il modulo di ottimizzazione. Il fulcro del sistema è costituito da un ottimizzatore, in grado di risolvere un problema di ottimizzazione multi-obiettivo in cui le variabili di decisione sono le misure tecniche di abbattimento.

Per procedere con l'ottimizzazione vera e propria è necessario definire: - gli indicatori di qualità dell'aria (AQI), - quali misure di riduzione si vogliono indagare (decisioni), - l'area su cui si vuole ottimizzare e - il metodo di risoluzione del problema tra un'analisi costi-efficacia ed una multi-obiettivo. Gli AQI considerati dal sistema RIAT sono: la media annua di PM10, la media annua di PM25, il SOMO35 e l'AOT40 per l'ozono. Gli anni considerati per le politiche di riduzione sono 2010, 2015 e 2020.

Al termine dell'ottimizzazione è poi possibile effettuare l'analisi dei risultati (ovvero le politiche ottime individuate da RIAT), sia in forma spaziale (mappe di emissioni e di AQI sulla griglia del dominio di ottimizzazione), sia in forma tabellare (grado di implementazione delle politiche, riduzione delle emissioni e costi, aggregati a livello di macrosettore o dettagliati sulle tecnologie individuate dall'ottimizzatore).

Il tool RIAT è stato sviluppato utilizzando tecnologie *open-source*, integrandolo con prodotti ad uso gratuito quale Google Earth, con l'obiettivo di produrre uno strumento gratuito che non richieda costi di licenza di software a supporto. L'applicativo è caratterizzato da una struttura modulare, è aperto alla personalizzazione per le differenti situazioni regionali ed è utilizzabile tramite un'interfaccia *user-friendly*.

3. OPERA ED IL SISTEMA RIAT+

Il sistema RIAT+ mantiene gli obiettivi di base di RIAT, con l'ambizione di renderlo uno strumento operativo applicabile in qualunque regione Europea, apportando significativi miglioramenti e generalizzazioni all'esistente tool.

In particolare, RIAT+ consente di utilizzare tutti gli indici di qualità dell'aria segnalati dall'UE: oltre agli AQI già implementati in RIAT (media annua di PM10 e di PM25, SOMO35 e AOT40), calcola ad esempio anche la media annua di NO₂, il massimo giornaliero della media sulle 8 ore per l'ozono, il numero di giorni di superamento della soglia del PM10... Per quanto riguarda inoltre la modalità di considerare l'AQI sul dominio oltre alla media spaziale semplice, è stata introdotta la possibilità di conteggiare le singole celle che superano una certa soglia, per meglio simulare la minimizzazione del numero di superamenti normativi nel territorio considerato.

RIAT+ ha quindi l'obiettivo di identificare le politiche ottime a livello locale, che da un lato soddisfino gli standard di qualità dell'aria nazionali/regionali dettati dall'Unione Europea verificando che nel contempo portino ad una riduzione dei gas serra, e che dall'altro usino le emissioni locali, le peculiarità meteorologiche del territorio e le caratteristiche tecnologiche ed i vincoli socio-economici del contesto locale.

Per quanto riguarda i database delle misure, in RIAT+ si sono introdotte e "trattate" da un punto di vista metodologico le misure non tecniche; difatti le politiche di abbattimento delle emissioni di precursori che possono essere utilizzate in RIAT+, si dividono in misure tecnologiche (TM, come ad esempio gli standard EURO delle autovetture) e misure non tecniche (NTM, come ad esempio l'incentivazione all'utilizzo delle biciclette). Si tratta di una delle più significative innovazioni di RIAT+ che consente di valutare anche queste specifiche politiche che una Autorità Ambientale può mettere in campo a livello locale, per realizzare il cosiddetto *behavioural change*. Sempre sul fronte delle misure, RIAT+ è in grado di valutare le misure relative al traffico, differenziandone l'applicazione nei tratti autostradali rispetto alle strade extra-urbane e urbane.

Le funzioni S/R (costruite sempre con l'approccio delle reti neurali) sono state generalizzate in modo da gestire in maniera più adeguata gli inquinanti stagionali come l'ozono e il PM. Ciò viene ottenuto principalmente attraverso l'addestramento stagionale delle reti che modellizzano i vari indicatori di qualità dell'aria.

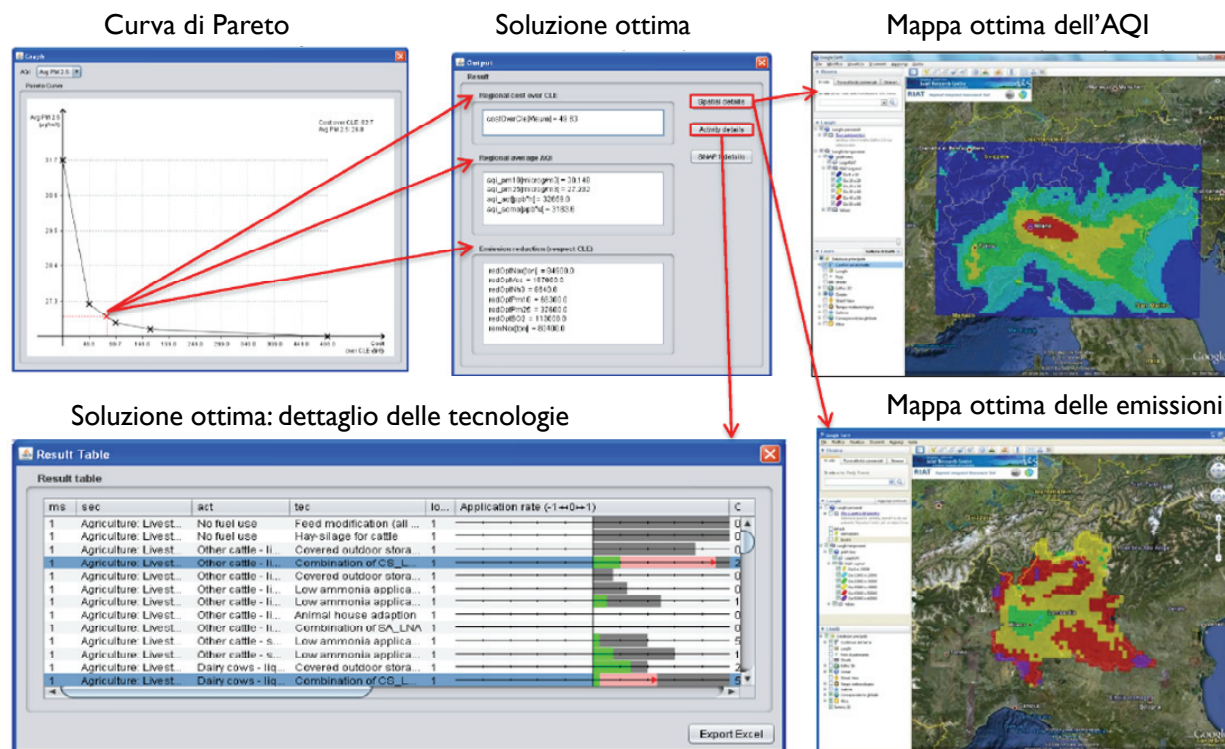
Significative migliorie sono state introdotte anche nel modulo dell'ottimizzazione: - sono stati efficientati, rispetto a RIAT, i tempi di calcolo (RIAT+ è in grado di portare a termine la procedura di ottimizzazione in pochi minuti), - è stata migliorata e generalizzata la gestione dell'ottimizzazione multi-inquinante. L'applicativo RIAT+ comprende anche una modalità definita "scenario" che

permette all'utente la diretta applicazione delle misure senza effettuare la procedura di ottimizzazione, utile ad esempio per valutare l'efficacia di misure già pianificate.

Viene inoltre calcolato il bilancio emissivo dei gas serra associato alle politiche ottime, calcolato ex-post al termine della procedura di ottimizzazione.

Notevoli sforzi si sono fatti sul versante output: in particolare ora gli output (AQI, emissioni, costi) si possono visualizzare sia sulla griglia di riferimento che integrare sui differenti confini amministrativi (comuni, province...), in base al dettaglio spaziale richiesto. Rispetto a RIAT, da un punto di vista informatico il modulo geografico di navigazione degli output è integrato all'interno del tool RIAT+ agevolando il lavoro di analisi dell'utente.

Figura 2 – Esempificazione degli output nel prototipo RIAT+



L'applicativo RIAT+ sarà a disposizione in una prima versione testata sulle due regioni di studio presentata a novembre di quest'anno a Strasburgo durante la Seconda Conferenza Annuale del progetto OPERA. La versione finale di RIAT+ insieme alla documentazione tecnica, la *user guide* ed i risultati delle due applicazioni regionali saranno messi a disposizione a settembre 2013.

4. RISULTATI ESEMPLIFICATIVI

In questa sezione si mostrano alcuni risultati preliminari dell'applicazione in Emilia Romagna, uno dei due domini in fase di studio, della metodologia RIAT/RIAT+ nel modulo CREER (Costi Riduzione Emissioni Emilia-Romagna) del progetto NINFA-Extended.

I principali step necessari ad implementare la metodologia proposta sono:

- (1) definizione, addestramento e validazione sul dominio dell'Emilia-Romagna dei modelli sorgente-recettore (S/R) che legano emissioni e concentrazioni (in particolare il PM10 nel primo bimestre dell'anno) attraverso le reti neurali; le reti sono identificate a partire dalle simulazioni bimestrali del modello CTM CHIMERE per scenari emissivi diversi;
- (2) l'applicazione dell'ottimizzazione multi-obiettivo per la scelta del set efficiente di tecnologie di abbattimento dell'inquinamento atmosferico e la sua applicazione al dominio dell'Emilia-Romagna.

I due precedenti step hanno richiesto una serie articolata di attività preparatorie:

- l'elaborazione della base dati delle emissioni sia all'interno che all'esterno del dominio di ottimizzazione a partire dal database delle emissioni comunali INEMAR Emilia Romagna 2007, e dal database delle emissioni provinciali ISPRA 2005;

- le simulazioni eseguite con il sistema NINFA per il PM10 rispetto agli opportuni scenari emissivi;
- l'elaborazione della base dati delle misure: si sono utilizzati i dati delle tecnologie disponibili per l'Italia messi a disposizione dallo IASA - GAINS <http://gains.iasa.ac.at> relativi allo scenario NEC2007 baseline, current policy (NEC report nr. 6).

4.1 LE SIMULAZIONI CON IL MODELLO DETERMINISTICO CHIMERE

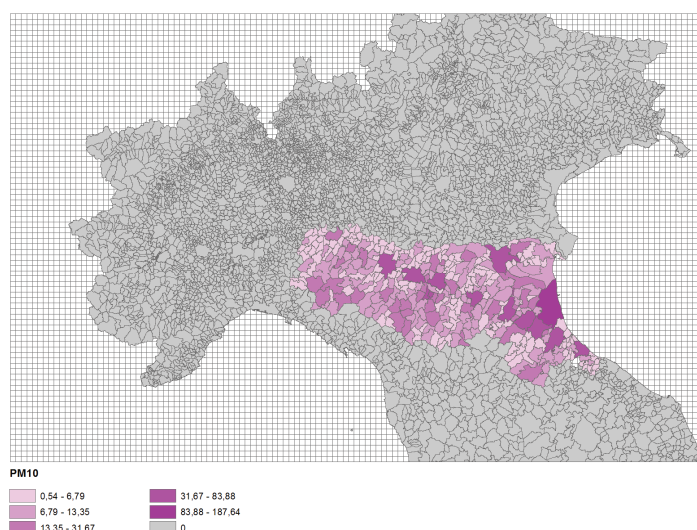
Per identificare i modelli sorgente recettore, è necessario creare un set di simulazioni con il modello deterministico CTM (Chemical Transport Model) CHIMERE.

Il dominio di simulazione considerato con il modello CHIMERE è rappresentato in Figura 3 e comprende il Nord Italia, mentre il dominio di ottimizzazione ovvero quello di applicazione delle politiche ottime di riduzione delle emissioni è rappresentato dalla regione Emilia Romagna.

Le principali caratteristiche delle simulazioni effettuate con CHIMERE sono le seguenti:

- Numero celle orizzontali: 128x82 con risoluzione di 5x5km²;
- Risoluzione verticale 8 livelli (fino a 500hPa)
- Meteorologia: gennaio-febbraio 2007
- Emissioni: CLE2010 incrementate del 10% sul dominio
- Condizioni al contorno: CHIMERE a scala europea per lo stesso periodo.

Figura 3 – Dominio di simulazione modellistico, con la rappresentazione a colori, all'interno del dominio di ottimizzazione, delle emissioni areali (comunali) bimestrali di PM10 (INEMAR, 2007), in tonnellate



Al fine di addestrare le reti neurali (modello sorgente-recettore prescelto) con differenti *pattern* emissivi, si sono simulati i seguenti 11 scenari emissivi con il modello CHIMERE:

- il caso base *Current Legislation* al 2010 [Wagner et., al. 2007], incrementato (in termini di emissioni) del 10%,

ed altri dieci scenari ottenuti riducendo in varia misura le emissioni dei precursori (NO_x, NH₃, SO₂, PM10, VOC) tra i due seguenti livelli:

- basse riduzioni di emissioni: media tra lo scenario di *Current Legislation* e quello relativo alla applicazione delle migliori tecnologie disponibili (rispettivamente CLE e MFR al 2015),
- alte riduzioni di emissioni: applicazione delle migliori tecnologie disponibili (MFR al 2020).

La riduzione contemporanea di più precursori è stata progettata seguendo le indicazioni di uno studio condotto sulla Valle Padana che ha evidenziato e quantificato le principali interazioni tra i precursori e le concentrazioni di PM10 utilizzando la tecnica *Factor Analysis* [Carnevale et al., 2010]. Nella creazione di questo dataset si è ipotizzato che le emissioni areali e puntuali vengano sommate cella per cella.

L'indicatore di qualità dell'aria considerato (sia per la creazione dei modelli sorgente-recettore, che in ottimizzazione) è la media bimestrale (su gennaio-febbraio) del PM10.

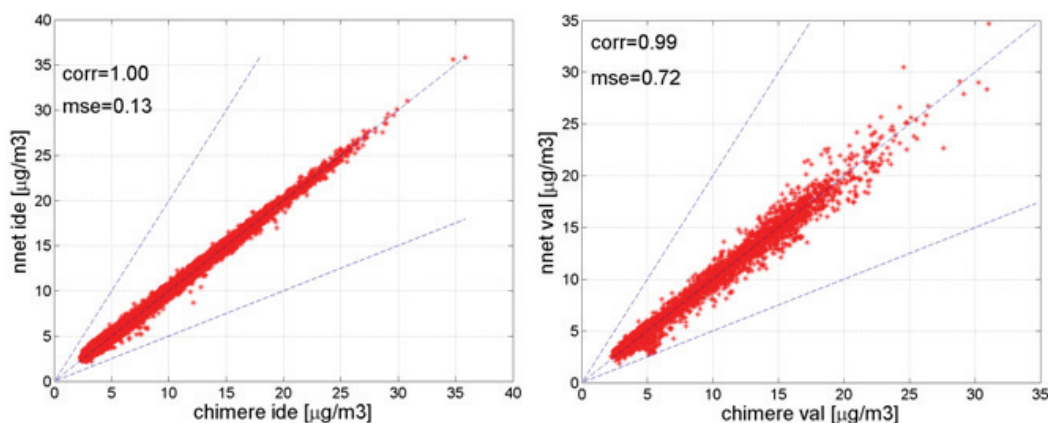
4.2 LE RETI NEURALI

I modelli sorgente recettore utilizzati sono reti neurali, identificate utilizzando come input le emissioni dei precursori, e come output le corrispondenti concentrazioni calcolate dal modello Chimere.

Le reti utilizzate sono di tipo *feed-forward* [Hagan et al., 1994]: sono state testate differenti configurazioni di rete, scegliendo alla fine la migliore configurazione possibile (utilizzando il *mean squared error* come cifra di merito).

Con la miglior rete identificata, sono stati poi calcolati due *scatter* (Figura 4) di identificazione (utilizzando l'80% dei dati) e validazione (utilizzando il rimanente 20% dei dati) confrontando le medie bimestrali di PM10 calcolate da CHIMERE (asse x) e i rispettivi valori simulati dalle reti neurali (asse y). Ogni punto dello *scatter* dunque rappresenta una cella del dominio appartenente al *pattern* di identificazione (Figura 4 a sinistra) o al *pattern* di validazione (Figura 4 a destra), e descrive la media bimestrale di PM10 per quella cella. Si noti come i punti siano, in entrambi i casi (sia identificazione che validazione) molto vicini alla bisettrice, mostrando dunque buona capacità delle reti neurali di riprodurre i valori di PM10 simulati da CHIMERE. Ciò è anche confermato dall'elevato valore della *correlazione* (0.99) e dal basso *MSE* (errore quadratico medio), che nel caso della validazione è di circa 0.72.

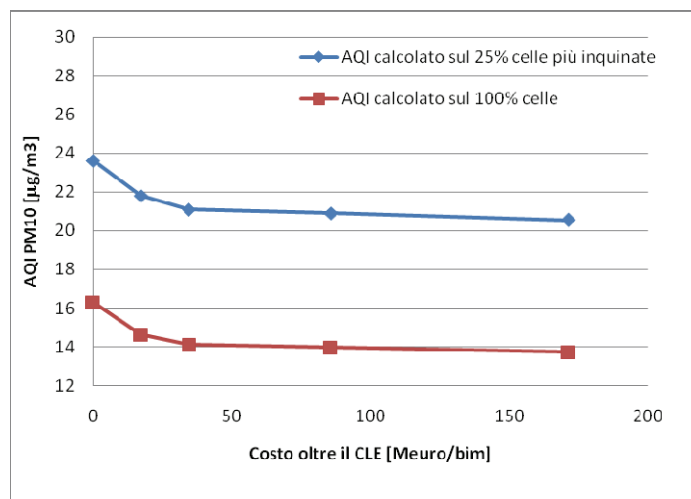
Figura 4 – scatter plot di identificazione (sinistra) e validazione (destra), che mostrano il confronto tra i risultati ottenuti dal modello deterministico (asse x) e il modello a reti neurali (asse y)



4.3 I RISULTATI DELL'OTTIMIZZAZIONE

Dopo aver identificato e validato i modelli S/R è possibile risolvere il problema multi-obiettivo.

Figura 5 – frontiera di Pareto per il caso della media bimestrale del PM10 dell'Emilia Romagna a partire dal CLE 2020

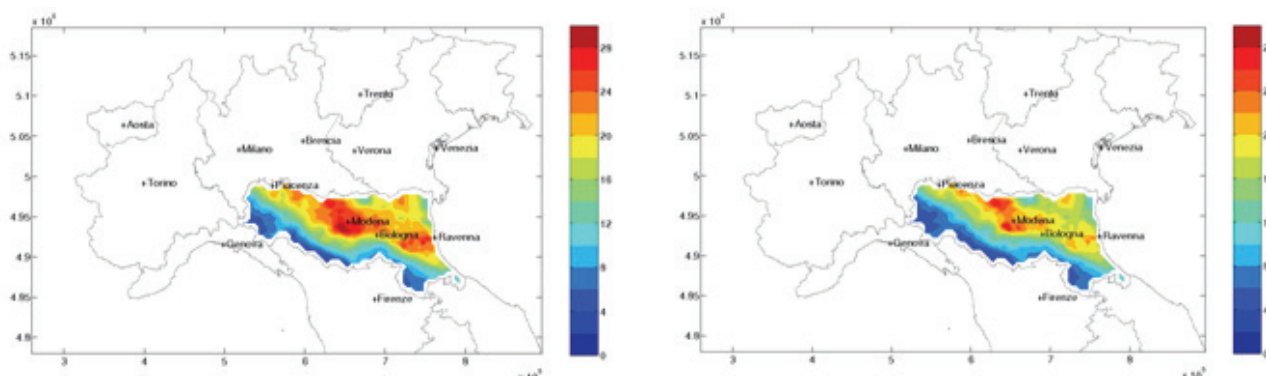


La Figura 5, a titolo di esempio, mostra le frontiere di Pareto relative al PM₁₀, ottenute calcolando la media delle concentrazioni sull'intero territorio regionale (linea rossa) o sulla porzione più inquinata (25% delle celle a maggiore concentrazione di PM₁₀) in blu.

Il costo massimo delle politiche di controllo è stato stimato per questa prima applicazione pari a circa 170 milioni di Euro. E' interessante notare come un costo limitato (20% del costo massimo, pari a circa 35 milioni) consenta di ottenere la quasi totalità della riduzione possibile dell'AQI.

Le mappe in Figura 6 mostrano invece la distribuzione geografica delle concentrazioni di PM₁₀ medie bimestrali ottenute per lo scenario CLE2020 (sinistra) ed il terzo punto della curva di Pareto riportata in Figura 5. Si nota che gli interventi atti a ridurre l'indicatore di qualità dell'aria relativamente al PM₁₀ sono maggiormente efficaci nella porzione di pianura, dove sono maggiori le emissioni di precursori.

Figura 6 – Mappa di PM₁₀ media bimestrale ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), per il punto della frontiera relativa a politiche a costo nullo (CLE2020, sinistra) e politiche corrispondenti al 20% del massimo costo interno (destra).



5. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

L'importanza di strumenti integrati, per la valutazione delle politiche della qualità dell'aria per gli inquinanti secondari a scala regionale, è un tema centrale della discussione attuale, in virtù della situazione di non rispetto dei limiti da parte di alcune regioni italiane ed in particolare di quelle del Bacino Padano, e della revisione in corso della direttiva UE sulla qualità dell'aria. RIAT+ in tal senso rappresenta un possibile utile strumento, per affrontare in maniera "integrata" questo percorso valutativo, e l'applicazione preliminare su tre regioni differenti (due italiane: Lombardia ed Emilia Romagna ed una francese: Alsazia) può contribuire a definire una piattaforma di scambio di approcci metodologici, politiche ottime e costi economici dell'abbattimento delle emissioni inquinanti in una logica di non conflittualità con il tema dei cambiamenti climatici.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il professor Giorgio Guariso del Politecnico di Milano per i suggerimenti che hanno contribuito a migliorare la qualità del lavoro.

BIBLIOGRAFIA

- Aben J., Hettelingh J.-P., Schopp W., *Rains-nl: An integrated assessment model to support dutch air quality policy making*. In: *Proc. 19th Intern. Conf. Informatics for Environmental Protection*, pp. 513-517, 2003.
- Amann M., Bertok I., Borken-Kleefeld J., Cofala, J., Heyes C., Hglund-Isaksson L., Klimont Z., Nguyen B., Posch M., Rafaj P., Sandler R., Schpp W., Wagner F., Winiwarter W., 2011 *Cost-effective control of air quality and greenhouse gases in europe: Modeling and policy applications*. *Environmental Modelling & Software* 26 (12), 1489-1501, 2011.
- Bessagnet B., L. Menut, G. Curci, A. Hodzic, B. Guillaume, C. Liousse, S. Moukhtar, B. Pun, C. Seigneur, M. Schulz, *Regional modeling of carbonaceous aerosols over Europe - Focus on Secondary Organic Aerosols* *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2009.
- Bessagnet B., A. Hodzic, R. Vautard, M. Beekmann, S. Cheinet, C. Honoré, C. Liousse and L. Rouil, *Aerosol modeling with CHIMERE - preliminary evaluation at the continental scale*, *Atmospheric Environment*, 2004.
- Carnevale C., Decanini E., Volta M., *Design and validation of a multiphase 3d model to simulate tropospheric pollution*, *Science of The Total Environment*, 390, 166-176, 2008.

Carnevale C., Finzi G., Guariso G., Pisoni E., Volta M., *Surrogate models to compute optimal air quality planning policies at a regional scale*, Environmental Modelling and Software 34, 44-50, 2012.

Carnevale C., Finzi G., Pisoni E. e Volta M., *Neuro-fuzzy and neural network systems for air quality control*, Atmospheric Environment, 2009.

Carnevale C., Pisoni E., Volta M., *A multi-objective nonlinear optimization approach to design effective air quality control policies*, Automatica 44, 1632-1641, 2008.

Carnevale C., Pisoni E. e Volta M., *A non-linear analysis to detect the origin of PM10 concentrations in Northern Italy*, Science of the Total Environment, 409, 182-191, 2010.

Castelletti A., Galelli S., Ratto M., Soncini-Sessa R., Young P., *A general framework for dynamic emulation modelling in environmental problems*, Environmental Modelling & Software, 2012.

Cuvelier C., Thunis P., Vautard R., Amann M., Bessagnet B., Bedogni M., Berkowicz R., Brandt J., Brocheton F., Builtjes P., Carnavale C., Denby B., Douros J., Graf A., Hellmuth O., Hodzic A., Honor C., Jonson J., Kerschbaumer A., de Leeuw F., Minguzzi E., Moussiopoulos N., Pertot C., Peuch V., Pirovano G., Rouil L., Sauter F., Schaap M., Stern R., Tarrason L., Vignati E., Volta M., White L., Wind P., Zuber A., *Citydelta: A model intercomparison study to explore the impact of emission reductions in european cities in 2010* Atmospheric Environment 41, 189-207, 2002.

D'Elia I., Bencardino M., Ciancarella L., Contaldi M., Vialletto G., *Technical and non-technical measures for air pollution emission reduction: The integrated assessment of the regional air quality management plans through the italian national model*, Atmospheric Environment 43, 6182-6189, 2009.

Deutsch F., Mensink C., Vankerkom J., Janssen L., *Application and validation of a comprehensive model for PM10 and PM2.5 concentrations in Belgium and Europe*, Applied Mathematical Modeling 32, 1501-1510, 2008.

Dommen J., Prevot A., Baertsch-Ritter N., Maffei G., Longoni M., Gruebler F., Thielmann A., *High-resolution emission inventory of the lombardy region: Development and comparison with measurements*, Atmospheric Environment 37 (29), 4149-4161, 2003.

Ehrgott M., *Multicriteria Optimization*, 2000, Springer.

Finzi G., Silibello C., Volta M., *Evaluation of urban pollution abatement strategies by a photochemical dispersion model*, International Journal of Environment and Pollution 14 (1-6), 616-624, 2000.

Gabusi V., Pisoni E., Volta M., *Factor separation in air quality simulations*, Ecological Modelling 218, 383-392, 2008.

Hagan M., Menhaj M., *Training feed-forward networks with the Marquardt algorithm*, IEEE Transactions on Neural Networks 5, 989-993, 1994.

Janssen S., Ewert F., Hongtao L., Athanasiadis I., Wien J., Therond O., Knapen M., Bezlepkina I., Alkan-Olsson J., Rizzoli A., Belhouche Svensson M., van Ittersum M., *Defining assessment projects and scenarios for policy support: Use of ontology in integrated assessment and modeling*, Environmental Modelling & Software 24, 1491-1500, 2009.

Mediavilla-Sahagun A., ApSimon H., *Urban scale integrated assessment of options to reduce pm10 in London towards attainment of air quality objectives*, Atmospheric Environment 37, 4651-4665, 2003.

Oxley T., ApSimon H., *Space, time and nesting integrated assessment models*, Environmental Modelling & Software 22, 1732-1749, 2007.

Pisoni E., Carnevale C., Volta M., *Multi-criteria analysis for PM10 planning*, Atmospheric Environment, 43, 4833-4842, 2009.

Reis S., Nitter S., Friedrich R., *Innovative approaches in integrated assessment modelling of european air pollution control strategies - implications of dealing with multi-pollutant multi-effect problems*, Environmental Modelling & Software 20, 1524-1531, 2005.

Sokhi R., Jose R. S., Kitwiroon N., Fragkou E., Perez J., Middleton D., *Prediction of ozone levels in london using the mm5-cmaq modeling system*, Environmental Modelling & Software 21, 566-576, 2006.

Syri S., Karvosenoja N., Lehtilä A., Laurila T., Lindfors V., Tuovinen J.-P., *Modeling the impacts of the finnish climate strategy on air pollution*, Atmospheric Environment 36, 3059-3069, 2002.

Thunis P., Cuvelier C., Roberts P., White L., Nyrni A., Stern R., Kerschbaumer A., Bessagnet B., Bergstrom R., Schaap M., *Evaluation of a Sectoral Approach to Integrated Assessment Modeling - Second Report. Tech. rep., EURODELTA*, EUR 24474 EN, Publications Office of the European Union, JRC59501, 2010.

Wagner F., Amann M., Schoepp W., *The GAINS optimization module as of 1 February 2007. Tech. rep.*, International Institute for Applied Systems Analysis, 2007.