



**Regione Toscana**

**Consorzio LaMMA**



**Convenzione tra Regione Toscana e Consorzio  
LaMMA per l'applicazione di modelli  
meteodiffusionali nell'ambito del Progetto  
"PATOS 2"**

***VALUTAZIONE DEL CONTRIBUTO  
ALL'INQUINAMENTO DA PM<sub>10</sub> DERIVANTE DA  
UNA DELLE PRINCIPALI SORGENTI  
INDUSTRIALI IN TOSCANA***

**Autori:**

*Caterina Busillo*

*Francesca Calastrini*

*Giovanni Gualtieri*

*5 Giugno 2009*

# Indice

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Ringraziamenti</b>   | <b>3</b>  |
| <b>Introduzione</b>   | <b>4</b>  |
| <b>1. L'Approccio modellistico</b>                                | <b>6</b>  |
| 1.1 Archivio meteorologico  | 6         |
| 1.2 Il modello WRF  | 7         |
| 1.3 Velocità del vento: confronto stime-misure                    | 8         |
| 1.3.1 <i>Analisi delle serie storiche</i>                         | 10        |
| 1.3.2 <i>Indicatori statistici</i>                                | 13        |
| <b>2. Specifiche di applicazione</b>                              | <b>16</b> |
| 2.1 Il dominio di calcolo   | 16        |
| 2.2 Gli scenari emissivi  | 16        |
| 2.3 I <i>run</i> effettuati                                       | 19        |
| <b>3. Analisi dei risultati</b>                                   | <b>21</b> |
| 3.1 Le concentrazioni medie                                       | 21        |
| 3.2 Le serie storiche in corrispondenza dei siti di campionamento | 31        |
| 3.3 Confronto stime-misure  | 34        |
| <b>Conclusioni</b>  | <b>39</b> |

## **Ringraziamenti**

Per la realizzazione di questo studio si ringrazia l'Ing. Marcello Ceccanti dell'ARPAT, Servizio di Piombino, che ha fornito i dati relativi alle misure di emissione dai camini della centrale termoelettrica ENEL di Torre del Sale.

Si ringraziano inoltre i gruppi di ricerca di Chimica (Prof. Udisti) e di Fisica (Prof. Lucarelli) dell'Università di Firenze, che hanno collaborato al presente studio nella fase di confronto tra le stime modellistiche e le misure di concentrazione di elementi traccianti riconducibili alla sorgente industriale in esame, effettuate nell'ambito del progetto PATOS1.

## Introduzione

Questo studio costituisce il proseguimento del lavoro relativo all'applicazione modellistica finalizzata alla valutazione della dispersione in atmosfera delle emissioni inquinanti derivanti dalla centrale termoelettrica ENEL ubicata in località Torre del Sale, presso Piombino (LI), svolto nell'ambito del progetto PATOS 1. Tale applicazione modellistica è stata condotta utilizzando i dati emissivi forniti dall'Inventario Regionale IRSE e, come *input* meteorologico, le stime dell'archivio LaMMa relative all'anno 2002. In questo modo sono state ottenute indicazioni di massima sull'impatto sul territorio regionale delle concentrazioni di biossido di zolfo ( $\text{SO}_2$ ), degli ossidi di azoto ( $\text{NO}_x$ ), delle polveri ( $\text{PM}_{10}$ ), derivanti dalla centrale termoelettrica di Torre del Sale, nonché degli inquinanti secondari  $\text{SO}_4$ ,  $\text{NO}_3$  ed  $\text{HNO}_3$ .

Nell'ambito del progetto PATOS 2, lo studio del contributo alle concentrazioni di fondo derivante dalla centrale ENEL viene affrontato utilizzando come dati di emissione i valori delle concentrazioni di  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{SO}_2$  ed  $\text{NO}_x$  misurati ora per ora allo sbocco del camino. Il periodo di riferimento coincide con la campagna di misura prevista per il Progetto PATOS 1 (dall'1 ottobre 2005 al 30 settembre 2006); in questo modo è possibile effettuare un confronto tra le concentrazioni stimate e i valori di traccianti significativi misurati durante il periodo di campionamento.

L'approccio modellistico utilizzato nei due studi (relativi ai progetti PATOS 1 e PATOS 2) è analogo, sebbene, per motivi legati all'aggiornamento dell'archivio meteorologico LaMMa, per fornire l'*input* meteo a CALMET, nel primo caso la catena modellistica ha previsto l'uso del modello RAMS (anno 2002), mentre nel secondo sono state utilizzate le stime del modello WRF (periodo 2005-2006); in entrambi i casi la risoluzione finale del modello CALMET è di 2 Km. Anche la configurazione del modello di dispersione CALPUFF è analoga nei due casi, prevedendo l'utilizzo del meccanismo chimico per inquinanti secondari debolmente reattivi MESOPUFF2 per la stima di  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{NO}_3$  ed  $\text{HNO}_3$ , mentre le polveri sono state trattate come inerti.

Sono state effettuate tre simulazioni, a fronte dello stesso scenario meteo e di tre scenari emissivi differenti. Per ottenere un confronto con i risultati del precedente studio, sono stati effettuati due *run*, rispettivamente con dati emissivi IRSE aggiornati al 2005 e con dati medi ottenuti dalle misure al camino. E' stato poi eseguito un terzo *run*, in cui i dati di emissione misurati sono stati forniti al modello CALPUFF con dettaglio orario.

In sintesi, i risultati prodotti riguardano le concentrazioni al suolo di  $PM_{10}$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $HNO_3$ ,  $NO_3$  ed  $SO_4$  e consistono in mappe di isoconcentrazione media annua; inoltre, per il solo  $SO_2$  sono state elaborate le medie stagionali (semestre freddo, da ottobre a marzo; semestre caldo, da aprile a settembre).

In corrispondenza dei sette siti di campionamento sono state estratte le serie storiche delle concentrazioni orarie di  $SO_2$  e di  $SO_4$  per poter effettuare un confronto con elementi traccianti riconducibili alla sorgente industriale in esame.

## 1. L'Approccio modellistico

L'approccio modellistico adottato nel presente studio è analogo a quello seguito nell'ambito del precedente progetto PATOS 1. Anche in questo caso, la catena modellistica CALMET-CALPUFF viene alimentata dalle stime fornite dall'Archivio meteorologico RAMS/WRF, messo a punto presso il LaMMA: nel periodo ottobre 2005 – settembre 2006 le stime archiviate sono relative al modello WRF.

Di seguito vengono brevemente illustrate le principali caratteristiche dell'Archivio meteorologico RAMS/WRF e del modello prognostico WRF, mentre per la descrizione dei modelli CALMET e CALPUFF si rimanda al precedente studio.

Attualmente è in corso un processo di validazione delle stime modellistiche archiviate: in particolare, viene di seguito riportato il confronto tra le stime di vento e i dati misurati presso alcune stazioni a terra considerate idonee per il processo di validazione.

### 1.1 Archivio meteorologico

L'archivio meteorologico sviluppato presso il LaMMA è costituito da variabili estratte quotidianamente a partire dalle previsioni del servizio meteo regionale. Tale archivio, iniziato nel dicembre 2000, ha subito una serie di modifiche nel corso del tempo; in particolare, per il servizio operativo è stato utilizzato il modello RAMS fino al mese di agosto 2006, mentre successivamente è stato adottato il modello WRF.

Per effettuare studi ed applicazioni modellistiche per un periodo superiore ad un anno, tuttavia, è stato ritenuto opportuno operare con stime ottenute unicamente dal modello WRF, alla risoluzione di 10 Km; allo scopo, la stessa configurazione del modello adottata per il servizio meteo operativo è stata applicata per stimare le variabili meteo, nel periodo che va dal primo marzo 2004 al primo settembre 2006. Inoltre, in cascata, è stato applicato il modello CALMET, allo scopo di riscalare le stime ad una risoluzione di 2 Km.

In questo modo sono stati popolati due database omogenei, a due diverse risoluzioni, con differenti coperture territoriali.

Il primo database è ottenuto direttamente dalle stime prodotte dal modello WRF, con risoluzione di 10 Km ed una copertura che comprende l'intero territorio nazionale: il periodo temporale coperto parte dal primo marzo 2004 ad oggi.

Il database ad alta risoluzione, pari a 2 Km, è costituito dalle stime del modello CALMET, alimentato dal modello WRF (a 10 Km). Il dominio spaziale comprende il

territorio della regione Toscana, mentre il periodo temporale è di poco inferiore a quattro anni, da marzo 2004 a dicembre 2007.

Di seguito è riportata la mappa del dominio territoriale relativo al database ad alta risoluzione (2 Km).



**Fig. 1** – Dominio territoriale relativo all'archivio meteorologico ad alta risoluzione (2 Km).

## 1.2 Il modello WRF

Il modello WRF-NMM (*Weather Research and Forecasting - Nonhydrostatic Mesoscale Model*) è stato sviluppato dalla NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) e da NCEP (*National Centre for Environmental Prediction*) in modo da costituire lo stato dell'arte nel campo della simulazione atmosferica e risultare uno strumento flessibile, portabile ed efficiente.

Il sistema è costituito da:

1. Risolutore delle equazioni fluido-dinamiche, le cui caratteristiche sono:
  - Equazioni di Navier-Stokes non idrostatiche (con opzione per ipotesi idrostatica) per fluido compressibile.
  - Sistema di coordinate verticali ibrido: "*terrain-following*" e "*sigma-pressure*".
  - Griglia *staggerata* Arakawa E-grid.
  - Stesso passo temporale per tutti i termini.
  - La dinamica conserva un elevato numero di termini del primo e del secondo ordine, tra cui energia ed entropia.
  - Non è ancora implementata la possibilità di *nesting* delle griglie.
  - Propagazione orizzontale con schema "*forward-backward*".
  - Propagazione verticale delle onde sonore con "*Implicit Scheme*".
  - Avvezione orizzontale e verticale conservative (fino ai termini del secondo ordine).
  - Diffusione laterale e verticale. La diffusione verticale nel *Boundary Layer* e nell'atmosfera libera si esplicita attraverso lo schema del terreno e lo schema "Mellor-Yamada-Janjic". Quella laterale è formulata attraverso l'approccio non lineare di Smagorinsky (con parametro di controllo pari al quadrato della costante di Smagorinsky).
2. Modelli fisici interagenti con il risolutore NMM attraverso una interfaccia *standard*.
  - Microfisica.
  - Schema radiativo ad onda lunga.
  - Schema radiativo ad onda corta.
  - Parametrizzazione fenomeni convettivi.
  - Modello di interazione con la superficie.
3. Inizializzazione *standard* delle condizioni iniziali ed al contorno da dati provenienti da modelli globali o regionali.
4. Assimilazione dati con schema variazionale "3DVar".

### 1.3 Velocità del vento: confronto stime-misure

L'approccio modellistico adottato per la stima delle variabili dell'Archivio meteorologico prevede una verifica attraverso il confronto con i corrispondenti dati misurati; di seguito vengono riportati il confronto relativo alle stime di vento e i dati misurati presso alcune stazioni a terra considerate idonee per il processo di validazione.

La verifica riguarda l'archivio WRF (10 Km) e l'archivio CALMET ad alta risoluzione (2 Km) dall'1 marzo 2004 al 31 dicembre 2007.

Nonostante la presenza di numerose stazioni meteorologiche sul territorio regionale, da un attento esame dei dati di vento misurati nel periodo di interesse, sono state scelte soltanto sette stazioni, sulla base delle caratteristiche dell'anemometro e dei tempi di misura: in effetti, molte stazioni sono state scartate a causa dell'altezza dell'anemometro (ad es. 3 m) o della modalità di misura (ad es. campionata su alcuni minuti ma mediata su base trioraria o esaoraria). La verifica è stata condotta prendendo unicamente in esame i valori di velocità del vento stimati al primo livello (10 m), in quanto nel periodo di interesse non erano disponibili misure in quota.

**Tab. 1** – *Caratteristiche delle stazioni meteorologiche prese in esame per il confronto.*

| <b>NOME</b>      | <b>PROV.</b> | <b>PERIODO</b>          | <b>LATITUDINE</b> | <b>LONGITUDINE</b> |
|------------------|--------------|-------------------------|-------------------|--------------------|
| SESTO FIORENTINO | FI           | 04/06/2003 - 31/12/2008 | 11.202            | 43.819             |
| XIMENIANO        | FI           | 16/07/2004 - 31/12/2008 | 11.256            | 43.778             |
| LIVORNO          | LI           | 25/11/2003 - 31/12/2008 | 10.305            | 43.547             |
| PIOMBINO         | LI           | 10/12/2004 - 31/12/2008 | 10.583            | 42.925             |
| GROSSETO         | GR           | 04/11/2004 - 31/12/2007 | 11.100            | 42.792             |
| FOLLONICA        | GR           | 11/11/2005 - 31/12/2008 | 10.767            | 42.935             |
| CARRARA          | MS           | 06/04/2005 - 31/12/2008 | 10.048            | 44.037             |

Nella tabella 1 sono riportate le principali caratteristiche delle stazioni meteorologiche selezionate per il confronto; per ciascuno dei sette siti sono state prese in esame le serie storiche della velocità del vento stimata dal modello CALMET e dal modello WRF, in modo da evidenziare i miglioramenti apportati dal processo di *downscaling*.

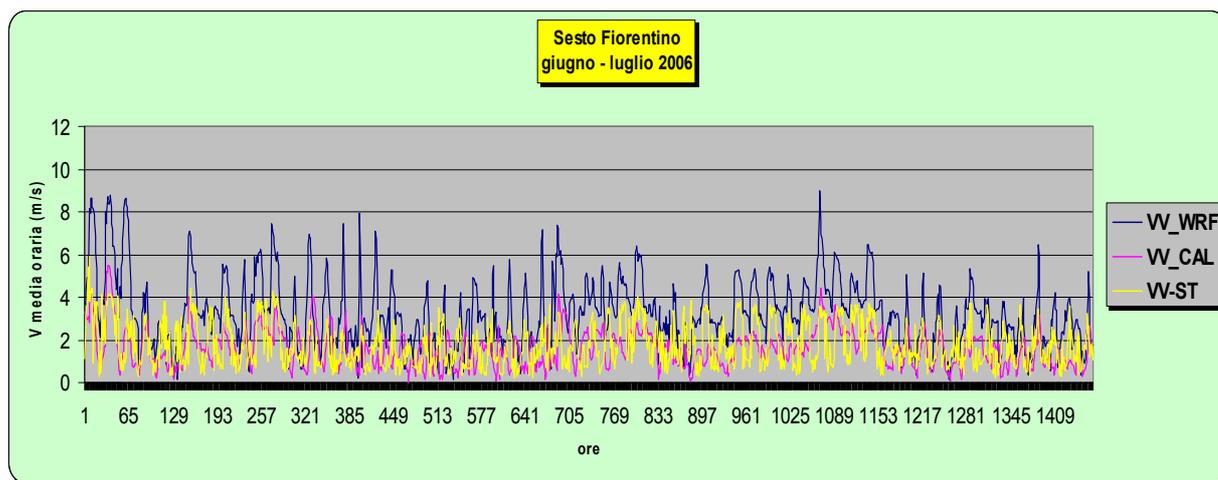
Per ciascuno dei sette siti selezionati, sono state confrontate la serie storica dei dati di velocità del vento misurati (in seguito indicata come *VV\_ST*), la serie storica delle stime ottenute da WRF (indicata come *VV\_WRF*) ed infine la serie storica delle stime ottenute da CALMET (indicata come *VV\_CAL*). Le serie storiche di stime e misure su base oraria sono state poi elaborate per ottenere valori mediati su base giornaliera e su base mensile, in modo da poter effettuare un confronto anche con serie storiche di dati accorpate. Per completare l'analisi, sono stati inoltre elaborati alcuni indicatori statistici, quali il coefficiente di correlazione, il *Bias*, il *RMSE*, l'*Index of agreement*.

### 1.3.1 Analisi delle serie storiche

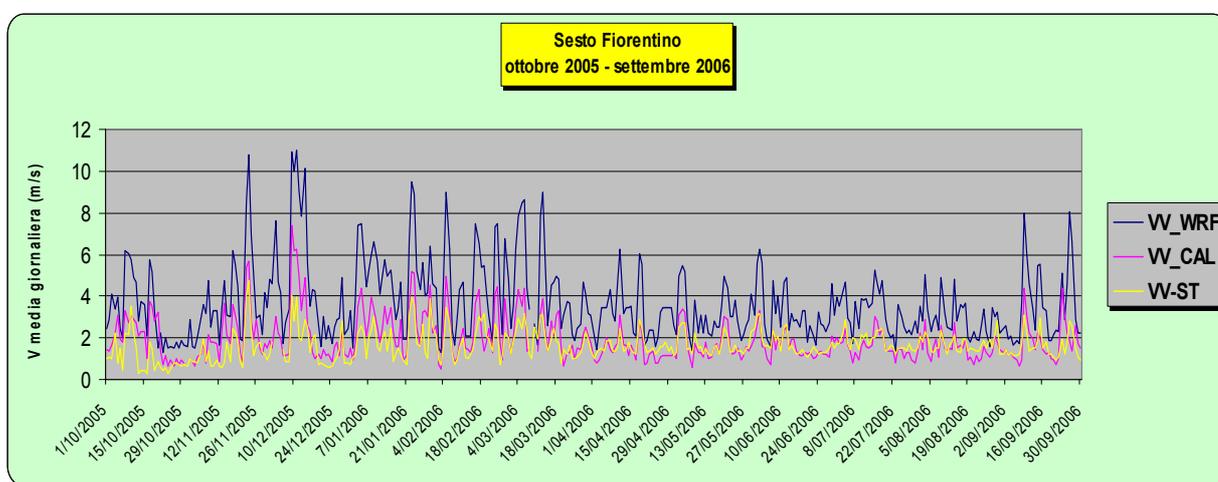
Da una prima analisi delle serie storiche, si distinguono due andamenti diversi nei due siti dell'entroterra (Sesto Fiorentino e Ximeniano) e nei cinque siti costieri: per motivi di sintesi sono riportati unicamente i grafici di Sesto Fiorentino (Figg. 2-4) e di Livorno (Figg. 5-7), relativi al periodo ottobre 2005 – settembre 2006 per le serie accorpate (giornaliere e mensili) e al bimestre giugno-luglio 2006 per le serie orarie.

Per quanto riguarda i siti dell'entroterra, osservando le serie storiche orarie, si nota come la velocità del vento stimata da WRF, pur riproducendo in modo discreto l'andamento temporale della serie relativa ai dati misurati, è decisamente maggiore rispetto a valori massimi misurati; viceversa, le stime prodotte da CALMET sono in maggiore accordo con i dati misurati, evidenziando quindi i miglioramenti apportati dal processo di *downscaling*. L'accordo tra stime ottenute da CALMET e misure migliora ulteriormente considerando le serie ottenute dai dati accorpate, in termini di medie giornaliere e di medie mensili. In particolare, si può notare come la stima della velocità media mensile ottenuta da CALMET sia in generale in accordo con i dati misurati, evidenziando una limitata sovrastima nei mesi invernali e un ottimo accordo nella restante parte dell'anno; viceversa, le stime ottenute da WRF sono sempre decisamente maggiori rispetto ai dati misurati. Considerazioni del tutto analoghe possono essere fatte per l'intero periodo considerato (2004-2007) e per l'altro sito collocato nell'entroterra (Firenze-Ximeniano).

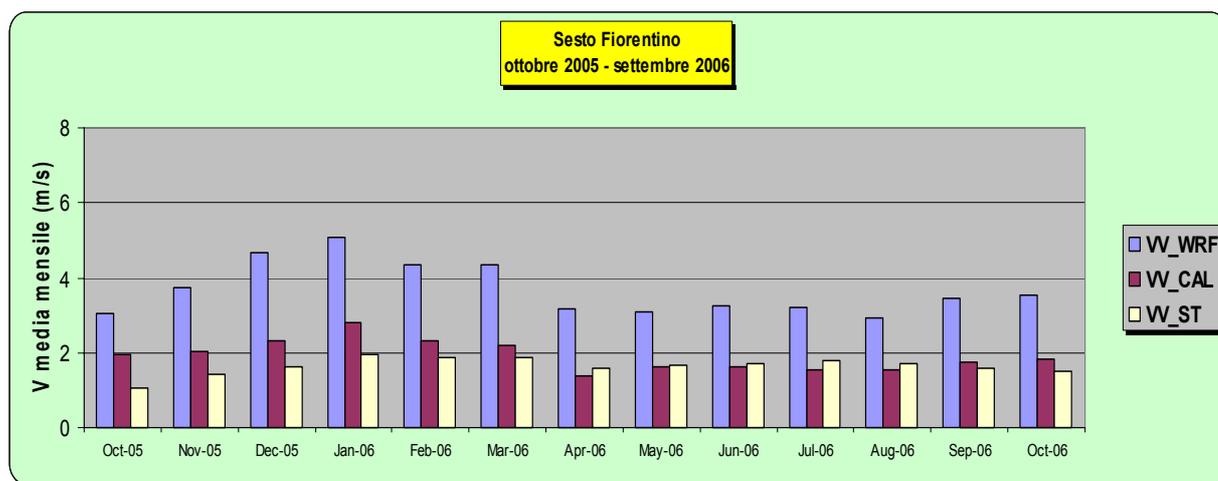
In generale, nei siti costieri l'effetto dovuto al *downscaling* è minore, come si può notare in particolare confrontando le stime di velocità del vento prodotte da WRF e da CALMET nel sito di Livorno (Figg. 5-7). In termini di velocità media mensile, WRF tende a sovrastimare i valori misurati, soprattutto nei mesi invernali, mentre CALMET li riproduce discretamente o li sottostima leggermente. Le serie storiche della velocità media giornaliera e oraria evidenziano comunque un buon accordo tra le stime dei due modelli con i dati misurati. In linea di massima, nei siti costieri presi in esame, le stime di WRF riproducono discretamente l'andamento dei valori misurati, mentre il contributo del modello CALMET risulta limitato ad una generale diminuzione del modulo della velocità, diminuzione meno marcata di quanto accade nei siti dell'entroterra.



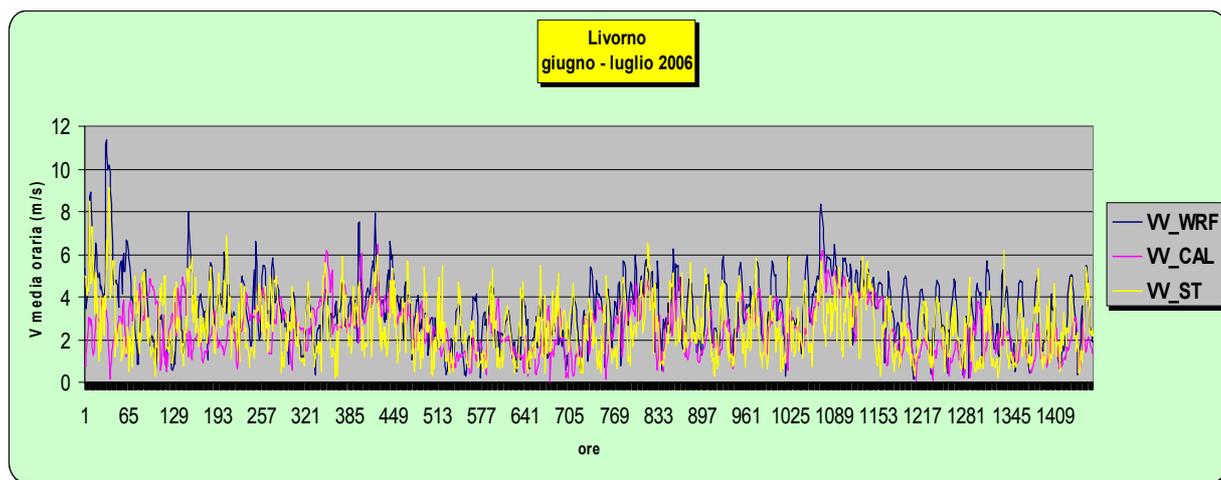
**Fig. 2** – Serie storica su base oraria delle misure di velocità del vento ( $VV_{ST}$ ), delle stime di WRF ( $VV_{WRF}$ ) e delle stime di CALMET ( $VV_{CAL}$ ) nel sito di Sesto Fiorentino.



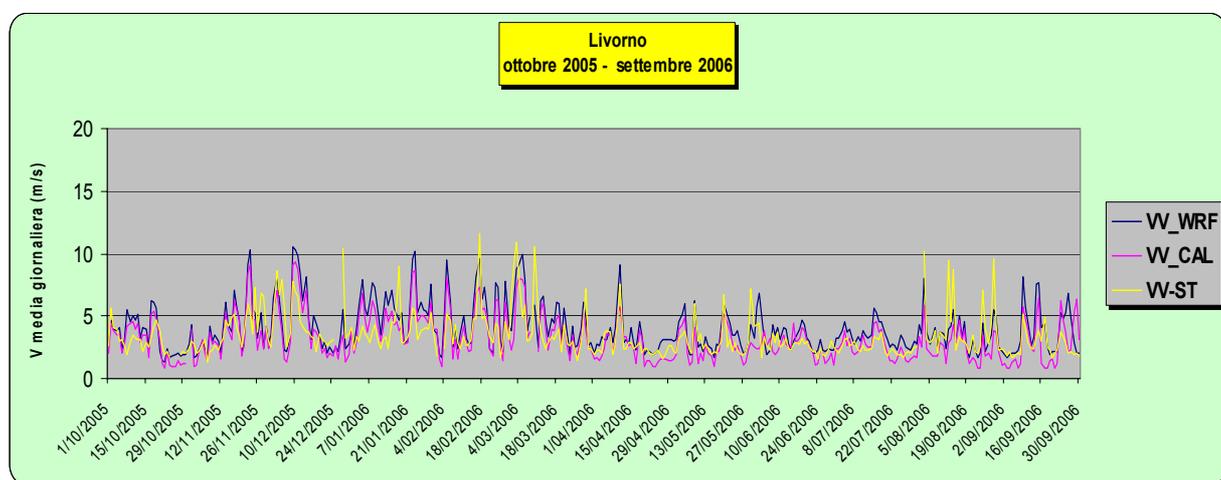
**Fig. 3** – Serie storica su base giornaliera delle misure di velocità del vento ( $VV_{ST}$ ), delle stime di WRF ( $VV_{WRF}$ ) e delle stime di CALMET ( $VV_{CAL}$ ) nel sito di Sesto Fiorentino.



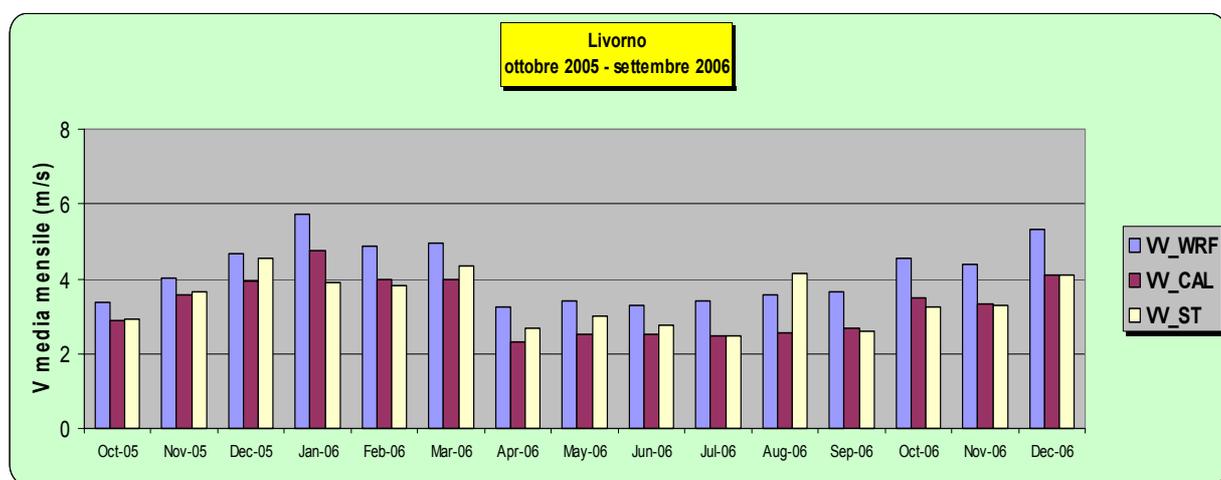
**Fig. 4** – Serie storica su base mensile delle misure di velocità del vento ( $VV_{ST}$ ), delle stime di WRF ( $VV_{WRF}$ ) e delle stime di CALMET ( $VV_{CAL}$ ) nel sito di Sesto Fiorentino.



**Fig. 5** – Serie storica su base oraria delle misure di velocità del vento (VV\_ST), delle stime di WRF (VV\_WRF) e delle stime di CALMET (VV\_CAL) nel sito di Livorno.



**Fig. 6** – Serie storica su base giornaliera delle misure di velocità del vento (VV\_ST), delle stime di WRF (VV\_WRF) e delle stime di CALMET (VV\_CAL) nel sito di Livorno.



**Fig. 7** – Serie storica su base mensile delle misure di velocità del vento (VV\_ST), delle stime di WRF (VV\_WRF) e delle stime di CALMET (VV\_CAL) nel sito di Livorno.

### 1.3.2 Indicatori statistici

Sono stati elaborati alcuni indicatori statistici, quali il coefficiente di correlazione  $\rho$ , lo scarto (o *Bias*), la radice dell'errore quadratico medio (o *RMSE*), e l'indice di accordo (o *Index of Agreement*)  $I$ , di cui di seguito sono riportate le formule.

$$\rho = \frac{1}{\sigma_y \sigma_o} COV(Y, O)$$

$$\text{essendo: } COV(Y, O) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (y_m - \mu_y)(o_m - \mu_o)$$

$$BIAS(Y, O) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (y_m - o_m)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (y_m - o_m)^2}$$

$$I = 1 - \frac{\sum_{m=1}^M (y_m - o_m)^2}{\sum_{m=1}^M (y_m - \mu_y)(o_m - \mu_o)}$$

dove:

- $Y$  : valori stimati;
- $O$  : valori misurati;
- $\mu_y$  : media del valore stimato;
- $\mu_o$  : media del valore misurato;
- $\sigma_y$  : deviazione standard del valore stimato;
- $\sigma_o$  : deviazione standard del valore misurato;
- $M$  : numero di dati utilizzati.

Il coefficiente di correlazione  $\rho$  può variare tra -1 e 1; per valori prossimi ad 1 si ha un ottimo accordo tra i valori stimati e misurati, per valori vicini a 0 le stime sono in totale disaccordo con le misure, per valori prossimi a -1 stime e misure sono anticorrelate. Il *Bias* rappresenta l'errore medio e fornisce indicazioni relative a sovrastime o sottostime del modello. Valori di *Bias* positivi indicano una sovrastima del modello rispetto ai parametri previsti, mentre valori negativi indicano una sottostima. Valori prossimi a zero indicano che non vi è né sovrastima né sottostima mediamente, ma questo potrebbe essere il risultato del reciproco annullamento di errori in eccesso o in difetto (anche grandi in valore assoluto). In questo senso è utile ricorrere al calcolo del *RMSE*, che invece evidenzia l'ampiezza media dell'errore in

valore assoluto. L'*Index of agreement I* può variare tra 1 e 0; valori prossimi ad 1 indicano un ottimo accordo tra i valori stimati e misurati, mentre per valori vicini a 0 le stime sono in totale disaccordo con le misure.

Nella seguente tabella vengono riportati i valori di velocità media del vento,  $\rho$ , *Bias*, *RMSE*, *I*, numero di dati utilizzati, relativi a tutti i siti presi in esame.

**Tab. 2** – Valori di velocità media del vento,  $\rho$ , *Bias*, *RMSE*, *I* per ciascun sito considerato.

| INDICATORE |        | Sesto | Ximen. | Liv.  | Piomb. | Gross. | Foll. | Carr. |
|------------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|
| n° dati    |        | 33427 | 27048  | 31642 | 21064  | 26096  | 13593 | 21928 |
| V media    | WRF    | 3.72  | 3.91   | 4.17  | 4.27   | 4.76   | 4.26  | 4.27  |
|            | CALMET | 1.92  | 2.00   | 3.20  | 3.31   | 2.79   | 2.96  | 3.31  |
|            | Staz.  | 1.59  | 2.17   | 3.28  | 3.30   | 1.63   | 2.21  | 3.30  |
| $\rho$     | WRF    | 0.59  | 0.51   | 0.60  | 0.49   | 0.46   | 0.54  | 0.49  |
|            | CALMET | 0.48  | 0.49   | 0.52  | 0.41   | 0.53   | 0.31  | 0.41  |
| RMSE       | WRF    | 2.82  | 2.60   | 2.30  | 2.53   | 4.08   | 2.99  | 2.53  |
|            | CALMET | 1.38  | 1.22   | 2.11  | 2.33   | 1.99   | 2.00  | 2.33  |
| Bias       | WRF    | 2.12  | 1.67   | 0.91  | 0.98   | 3.15   | 2.18  | 0.98  |
|            | CALMET | 0.33  | -0.22  | -0.06 | 0.07   | 1.20   | 0.74  | 0.07  |
| I          | WRF    | 0.56  | 0.51   | 0.74  | 0.67   | 0.33   | 0.50  | 0.67  |
|            | CALMET | 0.69  | 0.70   | 0.72  | 0.64   | 0.55   | 0.54  | 0.64  |

In generale, si nota una significativa sovrastima da parte del modello WRF rispetto ai dati misurati, sia guardando il valor medio della velocità del vento che gli indici *Bias* (sempre positivo) e *RMSE*; sempre dagli stessi indici si nota un miglior accordo tra le stime di CALMET e le misure, sebbene il miglioramento sia più marcato nei due siti dell'entroterra rispetto a quelli costieri (riduzione di *Bias* e di *RMSE*). Il coefficiente di correlazione  $\rho$  evidenzia l'accordo tra gli andamenti temporali delle serie storiche e non è influenzato da sovrastime o sottostime sistematiche. Considerando che si tratta di valori orari, questo indicatore è in generale discreto per i primi cinque siti, scarso per Follonica e Carrara; da notare che si registrano valori più alti, e quindi migliori, per le stime di WRF rispetto a quelli ottenuti per le stime di CALMET. L'*index of agreement I* evidenzia un notevole miglioramento apportato da CALMET per i siti dell'entroterra, per Grosseto e, in modo minore, per Follonica. Si nota invece un lieve decremento in corrispondenza dei siti di Livorno e Piombino, mentre il sito di Carrara mostra un notevole peggioramento. In generale, l'indice *I* presenta dei valori buoni o discreti, fatta eccezione per il sito di Carrara.

In sintesi, il confronto effettuato tra stime e misure di velocità del vento evidenzia un generalizzato buon accordo in termini di correlazione temporale; per quanto riguarda i valori, il miglioramento apportato dal processo di *downscaling* tramite CALMET è molto evidente nell'entroterra, mentre è poco significativo sulla costa, dove comunque le stime del solo modello WRF sono in buon accordo con i dati misurati.

## 2. Specifiche di applicazione

L'applicazione modellistica nel periodo corrispondente alla campagna di misure del progetto PATOS 1 ha previsto l'utilizzo, come dati di emissione, dei valori delle concentrazioni di PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> ed NO<sub>x</sub> misurati al camino. Nel precedente studio, relativo al periodo 2002, erano state utilizzate le stime dell'inventario regionale IRSE; per effettuare un confronto, a fronte dello stesso scenario meteorologico, nel presente lavoro sono stati effettuati due *run*, rispettivamente con dati emissivi IRSE aggiornati al 2005 e con dati medi ottenuti dalle misure al camino. E' stato poi effettuato un terzo *run*, in cui i dati di emissione misurati sono stati forniti al modello CALPUFF con dettaglio orario.

### 2.1 Il dominio di calcolo

Per l'applicazione modellistica oggetto del presente studio sono state utilizzate le stime dell'Archivio ad alta risoluzione (2 Km) relative al periodo che va da ottobre 2005 a settembre 2006. Il dominio di calcolo, riportato in Fig. 1, presenta un'estensione complessiva di 214x240 Km<sup>2</sup> e ricopre interamente il territorio regionale. Il corrispondente grigliato di calcolo è costituito da 107x120 punti; gli strati verticali sono 12, e vanno da zero a 3200 m dal suolo.

### 2.2 Gli scenari emissivi

Nel precedente studio, effettuato nell'ambito di PATOS 1, sono state utilizzate le stime di emissione fornite dall'inventario IRSE, relative all'aggiornamento 2003 ed al successivo aggiornamento 2005. Di conseguenza, sono stati eseguiti due *run* a fronte dello stesso *input* meteorologico (anno 2002).

Dal momento che il presente studio è relativo al periodo 2005-2006, per effettuare un confronto tra i due diversi anni meteorologici, e soprattutto per valutare l'attendibilità delle stime ottenute dall'inventario IRSE rispetto ai dati di concentrazione misurati allo sbocco dei camini, è stato preso in esame un primo scenario emissivo (run01), relativo alle stime dell'inventario IRSE aggiornato al 2005 (Tab. 3). Le emissioni sono state considerate costanti nel periodo in esame, in quanto l'IRSE non fornisce informazioni dettagliate relative ai periodi in cui gli impianti sono rimasti inattivi.

Per il secondo scenario (run02) sono stati utilizzati i dati di emissione misurati allo sbocco dei camini, relativi al periodo della simulazione; in prima battuta i dati sono stati

accorpate in modo da ottenere valori medi ed effettuare un confronto diretto con i risultati del run01, relativi al primo scenario emissivo (Tab. 4).

**Tab. 3** – Quadro riassuntivo delle caratteristiche delle sorgenti emissive – IRSE 2005 - run01.

| SCENARIO EMISSIVO IRSE (2005) - run01 |                    |          |                    |                     |                         |        |            |           |           |
|---------------------------------------|--------------------|----------|--------------------|---------------------|-------------------------|--------|------------|-----------|-----------|
| camino                                | Coord. UTM Fuso 32 |          | Altezza camino (m) | Diametro camino (m) | Velocità dei fumi (m/s) | T (°K) | PM10 (g/s) | SO2 (g/s) | NOx (g/s) |
|                                       | X (Km)             | Y (Km)   |                    |                     |                         |        |            |           |           |
| C1                                    | 630.858            | 4757.201 | 195                | 6.42                | 5.9                     | 398    | 1.1        | 31.3      | 17.2      |
| C2                                    | 630.858            | 4757.201 | 195                | 6.42                | 6.6                     | 398    | 1.2        | 35.6      | 19.5      |

**Tab. 4** – Quadro riassuntivo delle caratteristiche delle sorgenti emissive – ENEL (ottobre 2005 - settembre 2006) – run02.

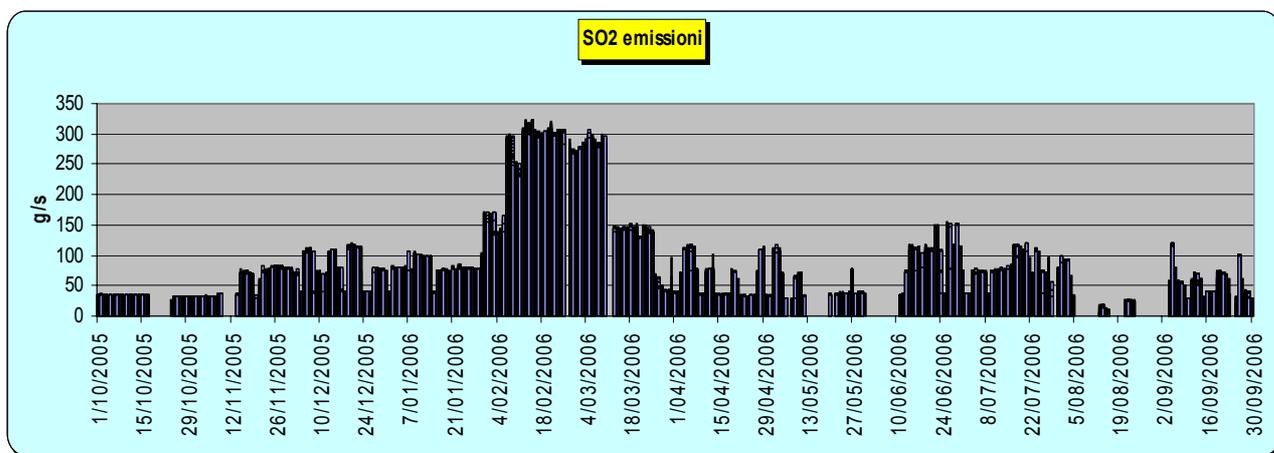
| SCENARIO EMISSIVO ENEL - run02 |                    |          |                    |                     |                         |        |            |           |           |
|--------------------------------|--------------------|----------|--------------------|---------------------|-------------------------|--------|------------|-----------|-----------|
| camino                         | Coord. UTM Fuso 32 |          | Altezza camino (m) | Diametro camino (m) | Velocità dei fumi (m/s) | T (°K) | PM10 (g/s) | SO2 (g/s) | NOx (g/s) |
|                                | X (Km)             | Y (Km)   |                    |                     |                         |        |            |           |           |
| C1                             | 630.858            | 4757.201 | 196                | 5.97                | 6.9                     | 409    | 0.7        | 10.3      | 5.6       |
| C2                             | 630.858            | 4757.201 | 196                | 5.97                | 6.9                     | 409    | 1.9        | 57.8      | 23.6      |

**Tab. 5** – Quadro riassuntivo delle caratteristiche delle sorgenti emissive – ENEL (ottobre 2005 - settembre 2006) – run03.

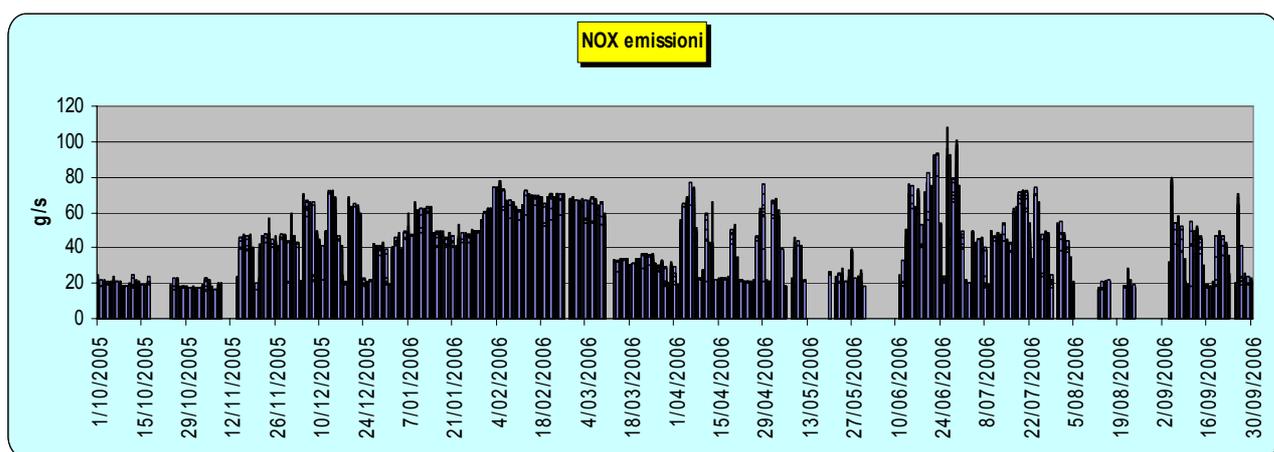
| SCENARIO EMISSIVO ENEL - run03 |                    |          |                    |                     |                         |        |             |             |             |
|--------------------------------|--------------------|----------|--------------------|---------------------|-------------------------|--------|-------------|-------------|-------------|
| camino                         | Coord. UTM Fuso 32 |          | Altezza camino (m) | Diametro camino (m) | Velocità dei fumi (m/s) | T (°K) | PM10 (g/s)  | SO2 (g/s)   | NOx (g/s)   |
|                                | X (Km)             | Y (Km)   |                    |                     |                         |        |             |             |             |
| C1                             | 630.858            | 4757.201 | 196                | 5.97                | 6.9                     | 409    | Variabile/h | Variabile/h | Variabile/h |
| C2                             | 630.858            | 4757.201 | 196                | 5.97                | 6.9                     | 409    | Variabile/h | Variabile/h | Variabile/h |

Il terzo scenario emissivo (run03) sfrutta la possibilità di utilizzare dati di emissione variabili su base oraria, ed è quindi in grado di fornire dei risultati molto dettagliati, rappresentando più fedelmente la situazione reale. In questo modo è possibile evidenziare i periodi in cui lo stabilimento industriale è attivo, produce a regime ridotto o non produce: per motivi di sintesi, nella tabella 6 sono riportate le ore di inattività (emissioni zero da entrambi i camini) e la relativa percentuale mensile, sebbene per elaborare il terzo scenario siano state utilizzate informazioni dettagliate e non accorpate. In tabella 5 sono riportate le caratteristiche delle sorgenti emissive che non variano a livello orario, mentre i valori relativi alle sostanze, variabili ora per ora, sono forniti come *input* al modello CALPUFF attraverso un apposito *file* (PTEMARB.DAT).

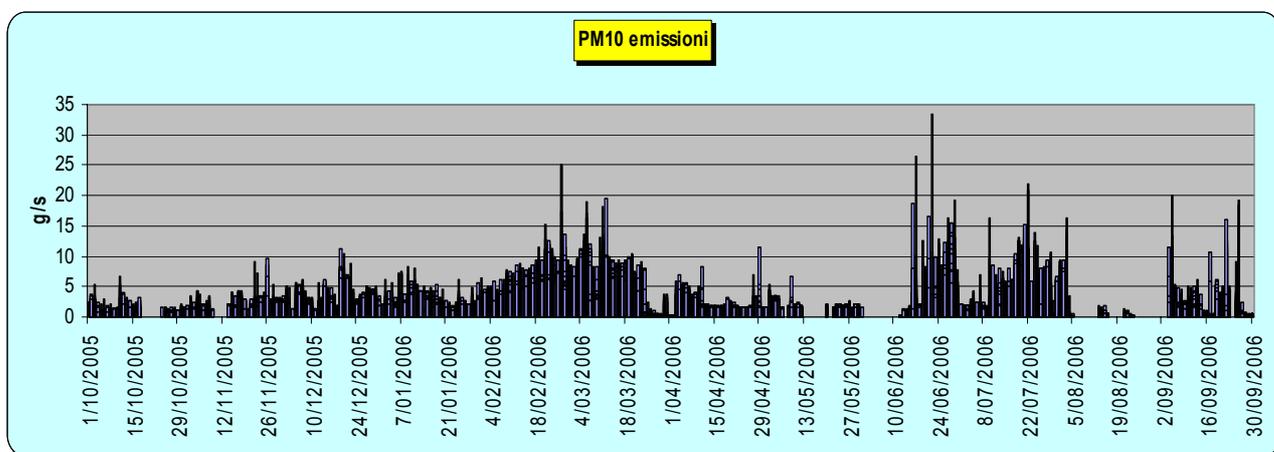
Nelle figure 8-10 sono riportate le emissioni di SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e PM<sub>10</sub>, con dettaglio orario, in termini di somma dei fattori di emissione (g/s) dei due camini.



**Fig. 8** – Emissioni di SO<sub>2</sub>: somma dei fattori di emissione (g/s) allo sbocco dei due camini.



**Fig. 9** – Emissioni di NO<sub>x</sub>: somma dei fattori di emissione (g/s) allo sbocco dei due camini.



**Fig. 10** – Emissioni di PM<sub>10</sub>: somma dei fattori di emissione (g/s) allo sbocco dei due camini.

**Tab. 6** – Sintesi mensile delle ore di inattività (assenza di emissioni da entrambi i camini) nel periodo ottobre2005 – settembre 2006.

| Ore di inattività – sintesi mensile |                   |                     |
|-------------------------------------|-------------------|---------------------|
| Mese                                | Ore di inattività | % ore di inattività |
| Ottobre 2005                        | 202               | 27.2                |
| Novembre 2005                       | 161               | 22.4                |
| Dicembre 2005                       | 26                | 3.5                 |
| Gennaio 2006                        | 36                | 4.8                 |
| Febbraio 2006                       | 83                | 12.4                |
| Marzo 2006                          | 93                | 12.5                |
| Aprile 2006                         | 12                | 1.7                 |
| Maggio 2006                         | 307               | 41.3                |
| Giugno 2006                         | 257               | 35.7                |
| Luglio 2006                         | 94                | 12.6                |
| Agosto 2006                         | 508               | 68.3                |
| Settembre 2006                      | 122               | 16.9                |
| <b>Totale</b>                       | <b>1901</b>       | <b>21.7</b>         |

### 2.3 I run effettuati

I tre *run* effettuati fanno riferimento ad un unico scenario meteorologico (ottobre 2005 - settembre 2006) e a tre differenti scenari emissivi (Tabb. 3-5).

Il meccanismo chimico attivato nelle simulazioni è il MESOPUFF 2 per gli inquinanti debolmente reattivi ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{HNO}_3$ ), mentre le polveri sono state trattate come inerti.

In termini di elaborazioni grafiche, sono state prodotte le mappe delle concentrazioni medie annue di  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{HNO}_3$  e, per il solo  $\text{SO}_2$ , le medie semestrali relative al semestre freddo (ottobre 05 – marzo 06) ed al semestre caldo (aprile 06 – settembre 06). Inoltre, in corrispondenza dei sette siti di campionamento (Tab. 8), sono state elaborate le serie storiche relative alle concentrazioni orarie di  $\text{SO}_2$  e di  $\text{SO}_4$ .

Una sintesi delle specifiche delle simulazioni eseguite e delle relative elaborazioni è riportata nella tabella 7.

Tab. 7– Quadro riassuntivo delle specifiche delle simulazioni eseguite.

| Specifiche delle simulazioni eseguite |                          |                                   |                    |  |                 |                 |
|---------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|--------------------|--|-----------------|-----------------|
| Scenario                              | Periodo                  | Input emissivo                    | Meccanismo chimico | Mappe elaborate  |                 | Serie storiche  |
|                                       |                          |                                   |                    | Media annua  | Media su 6 mesi |                 |
| Run01                                 | 01/10/2005<br>30/09/2005 | IRSE - emissioni costanti         | MESOPUFF 2         | SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , PM <sub>10</sub>   | SO <sub>2</sub> | SO <sub>2</sub> |
| Run02                                 | 01/10/2005<br>30/09/2005 | ENEL - emissioni costanti         | MESOPUFF 2         | SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , PM <sub>10</sub>   | SO <sub>2</sub> | SO <sub>2</sub> |
| Run03                                 | 01/10/2005<br>30/09/2005 | ENEL - emissioni variabili orarie | MESOPUFF 2         | SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , PM <sub>10</sub> ,<br>SO <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> , HNO <sub>3</sub> | SO <sub>2</sub> | SO <sub>2</sub> |

Tab. 8 – Siti di campionamento in corrispondenza dei quali sono state elaborate le serie storiche delle stime delle concentrazioni di SO<sub>2</sub> ed SO<sub>4</sub>.

| Specifiche delle simulazioni eseguite |           |           |                  |                        |          |
|---------------------------------------|-----------|-----------|------------------|------------------------|----------|
| Nome                                  | Località  | Provincia | Ubicazione       | Coordinate UTM Fuso 32 |          |
|                                       |           |           |                  | X (Km)                 | Y (Km)   |
| FI BASSI                              | Firenze   | FI        | Via Bassi        | 683.896                | 4850.571 |
| PO STROZZI                            | Prato     | PO        | Via Strozzi      | 668.194                | 4861.634 |
| PT MONTALE                            | Montale   | PT        | Via Pacinotti    | 662.364                | 4866.774 |
| AR FIORENTINA                         | Arezzo    | AR        | Via Fiorentina   | 732.181                | 4816.658 |
| LU CAPANNORI                          | Capannori | LU        | Via Piaggia      | 626.504                | 4855.534 |
| LI M.GORDATO                          | Livorno   | LI        | Villa M. Gordato | 609.874                | 4818.464 |
| GR URSS                               | Grosseto  | GR        | Via URSS         | 672.665                | 4738.424 |

### 3. Analisi dei risultati

I risultati ottenuti nelle tre simulazioni vengono illustrati attraverso le elaborazioni grafiche relative alle mappe delle concentrazioni medie annue di SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub> ed HNO<sub>3</sub>. Per il solo SO<sub>2</sub> sono riportate anche le medie semestrali del semestre freddo (ottobre 05 – marzo 06) e del semestre caldo (aprile 06 – settembre 06). Inoltre, in corrispondenza dei sette siti di campionamento, sono state elaborate le serie storiche relative alle stime delle concentrazioni orarie di SO<sub>2</sub> e di SO<sub>4</sub>.

#### 3.1 Le concentrazioni medie

Nelle figure 11-16 sono riportate le mappe relative alle concentrazioni medie annue di PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> ed NO<sub>x</sub> ottenute nelle simulazioni effettuate a fronte dei tre scenari emissivi (Tabb. 3-5). In particolare, per i tre inquinanti, i risultati del run01 (IRSE 2005) e del run02 (ENEL - emissioni costanti) sono riportati nelle figure 11-13, mentre quelli relativi al run03 (ENEL - emissioni variabili su base oraria) si trovano nelle figure 14-16 (a sinistra), accanto a quelli degli inquinanti secondari (SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub> ed HNO<sub>3</sub>), riportati a destra. Nelle figure 17-18 sono contrapposte le mappe delle concentrazioni medie su base semestrale di SO<sub>2</sub> ottenute nel run02 (sinistra) e nel run03 (destra): in fig. 17 sono riportati i valori di concentrazione media stimati per il semestre freddo (ottobre 2005 – marzo 2006), mentre in fig. 18 quelli per il semestre caldo (aprile 2006 – settembre 2006).

Per quanto riguarda il PM<sub>10</sub> (Fig. 11 e 15-sinistra), si nota che i risultati ottenuti nei tre *run* sono molto simili: le concentrazioni mostrano valori leggermente superiori per quanto concerne gli scenari 02 e 03; le concentrazioni medie annue sono comunque molto basse (inferiori a 0.02 µg/m<sup>3</sup>) e interessano un'area territoriale limitata, in prossimità della centrale.

Anche le concentrazioni di SO<sub>2</sub> ottenute nei tre *run* (Fig. 12 e 16-sinistra) sono estremamente simili, quasi identiche nel caso delle simulazioni a fronte di emissioni costanti (run01 e run02), con una distribuzione spaziale leggermente diversa nel caso di emissioni variabili su base oraria. Per questo inquinante le concentrazioni medie annue sono decisamente più alte, interessano gran parte del territorio regionale (tra 0.03 e 0.05 µg/m<sup>3</sup>) ed arrivano a valori compresi tra 0.3 e 0.5 µg/m<sup>3</sup> in prossimità della centrale.

Le concentrazioni di NO<sub>x</sub> relative alle stime dell'inventario IRSE (Fig. 13-sinistra) sono di poco superiori a quelle ottenute nelle simulazioni basate sugli scenari 02 e 03 (Fig. 13-

destra e Fig. 14-sinistra). L'area territoriale interessata è limitata e i valori non superano  $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  anche nelle immediate vicinanze dello stabilimento.

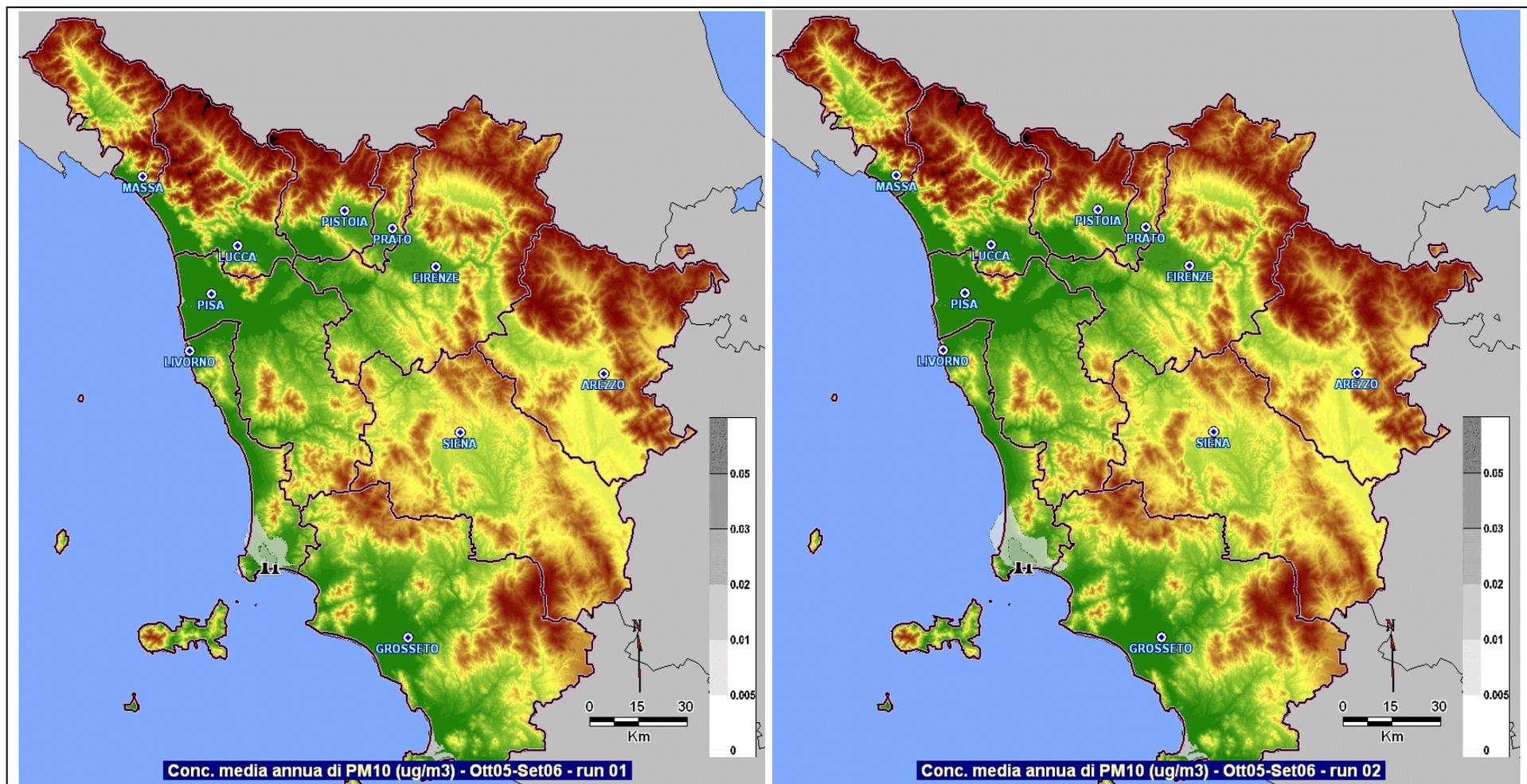
Per quanto riguarda le concentrazioni medie annue degli inquinanti secondari ( $\text{SO}_4$ ,  $\text{NO}_3$  ed  $\text{HNO}_3$ ) riportate nelle figure 14-16 (sinistra), relativi al run03, i valori sono dell'ordine di 2-3  $\text{ng}/\text{m}^3$  per  $\text{NO}_3$  e  $\text{HNO}_3$ , e di poco superiori (5-10  $\text{ng}/\text{m}^3$ ) per  $\text{SO}_4$ .

In generale, il confronto delle mappe delle concentrazioni medie annue di  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{SO}_2$  ed  $\text{NO}_x$  ottenute nelle tre simulazioni evidenzia risultati molto simili, sia in termini di distribuzione spaziale che di livelli di concentrazione.

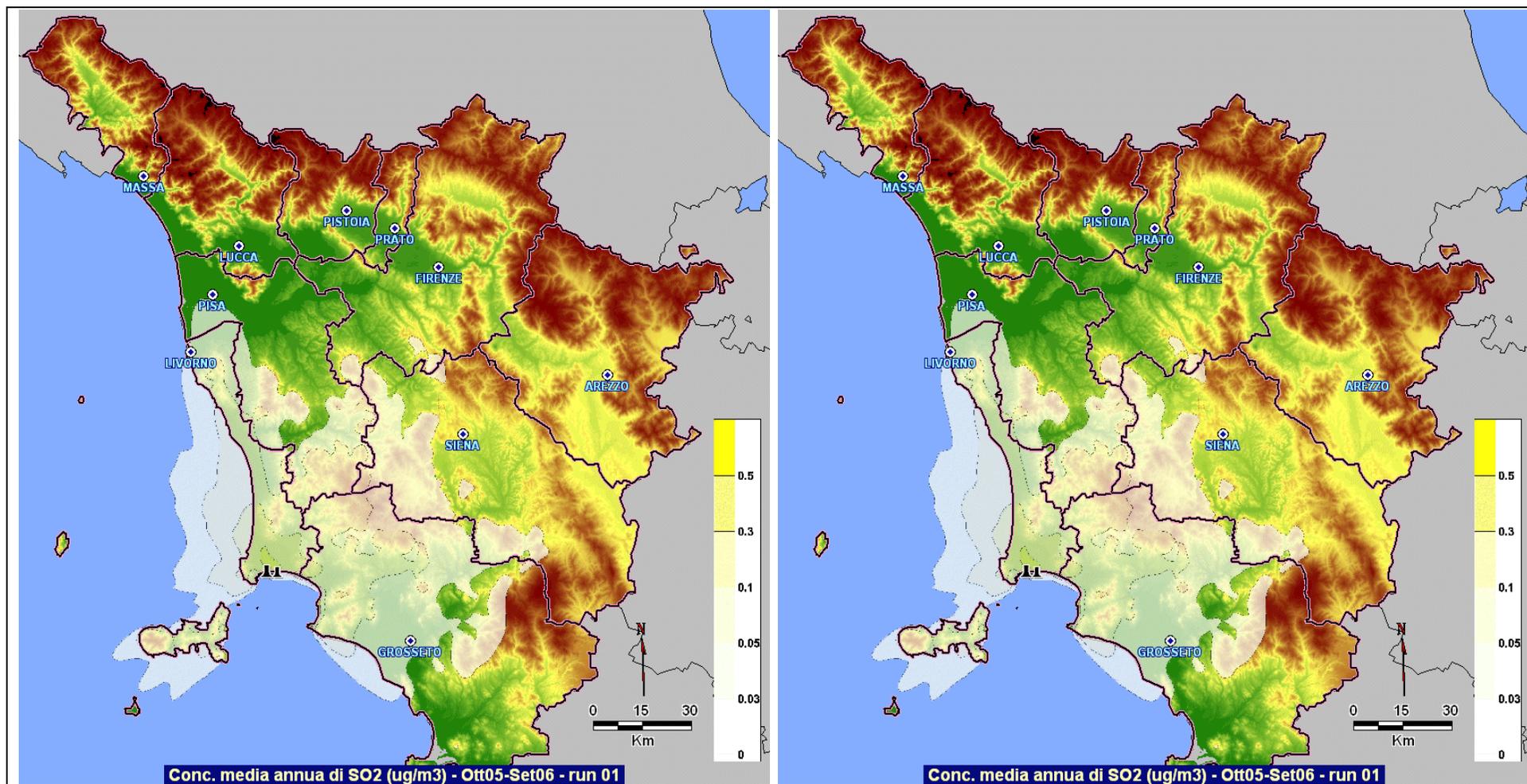
Risultati simili per le simulazioni 01 e 02 mettono in luce la validità – almeno per quanto riguarda la centrale di Torre del Sale – delle stime dell'inventario IRSE aggiornato al 2005. In effetti, lo studio precedente mostrava grosse differenze nelle stime di concentrazione media annua a fronte dei valori di emissione relativi all'IRSE 2003 rispetto a quelli dell'IRSE 2005. Queste considerazioni portano a concludere che le simulazioni modellistiche basate sui valori ottenuti dall'inventario IRSE sono rappresentative della situazione reale, a patto che l'inventario sia debitamente aggiornato e validato.

Per quanto riguarda il confronto tra il secondo ed il terzo *run*, l'utilizzo di emissioni costanti (ottenute dalla media dei dati misurati) o variabili su base oraria non evidenzia sensibili differenze nella stima delle concentrazioni medie annue.

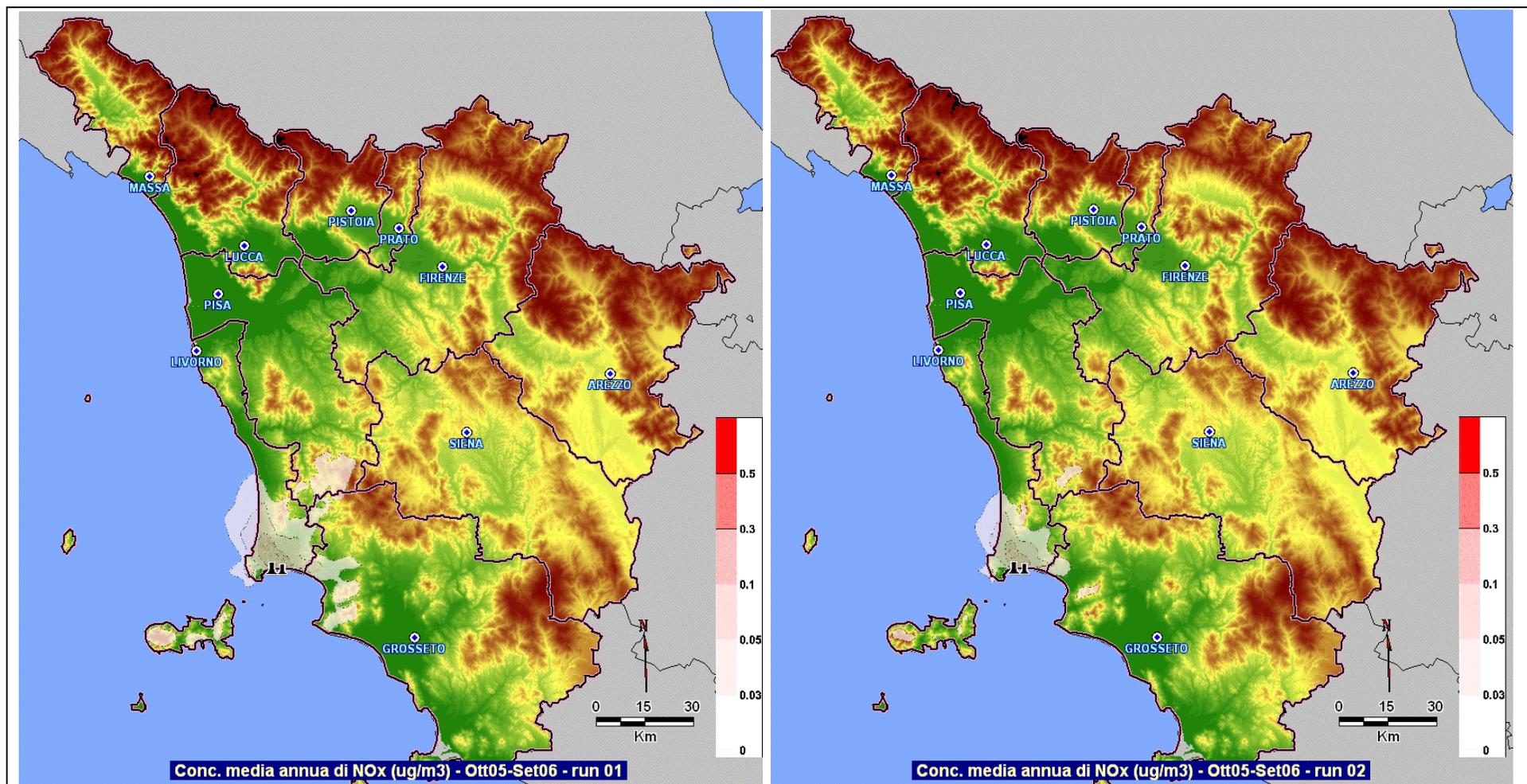
Tuttavia, confrontando le mappe relative alle medie semestrali di concentrazione di  $\text{SO}_2$  (Figg. 17-18), si notano delle importanti differenze, da legare direttamente al diverso carico emissivo nei due semestri, come si evidenzia dall'istogramma relativo alle emissioni di  $\text{SO}_2$  (Fig. 8), oltre che dalla percentuale di ore di inattività (Tab. 6).



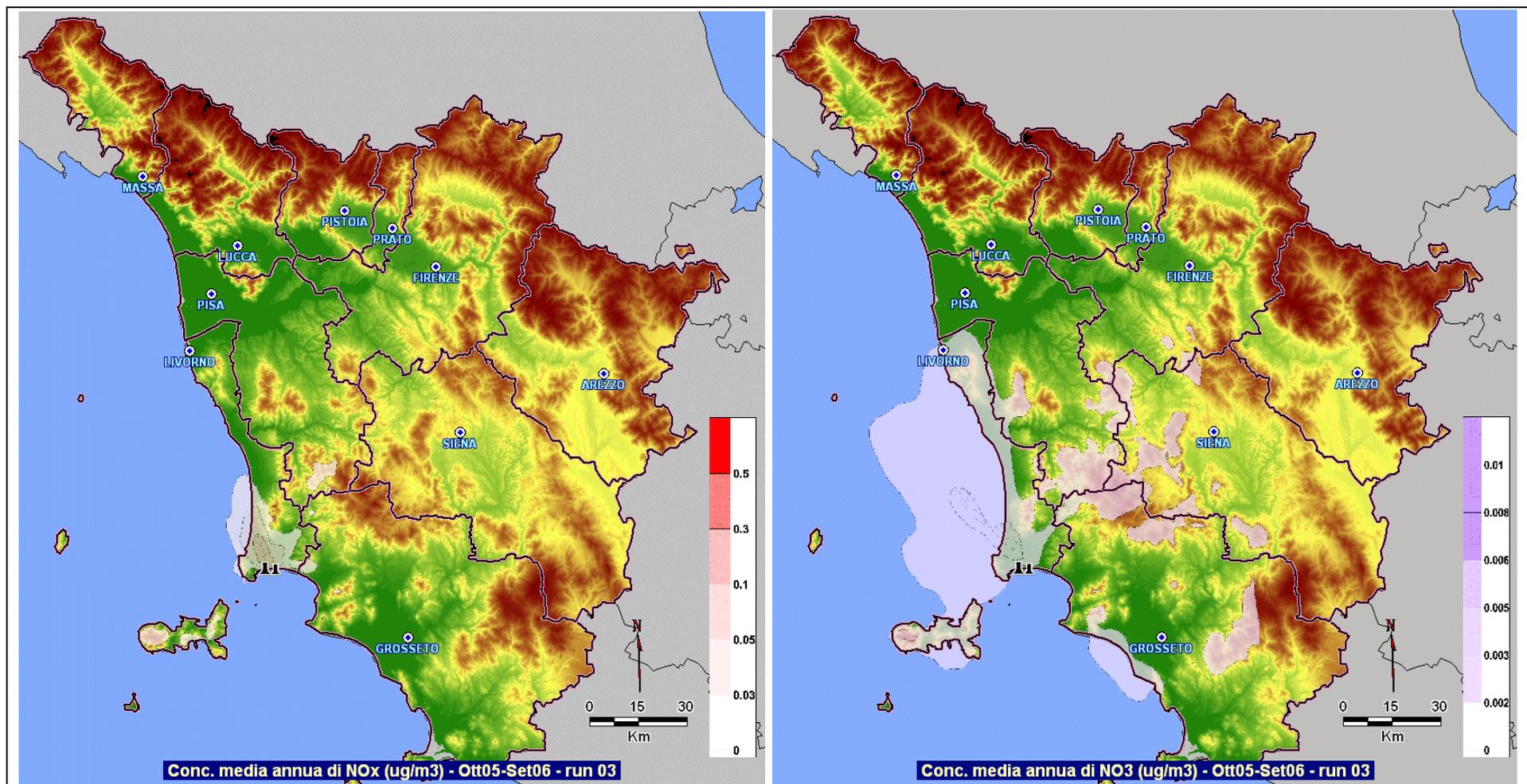
**Fig. 11** – Mappe delle concentrazioni medie annue di PM<sub>10</sub> stimate da CALPUFF relative ai due run con emissioni costanti. Run01: scenario emissivo IRSE 2005 (sinistra) - Run02: scenario emissivo ENEL, emissioni costanti (destra).



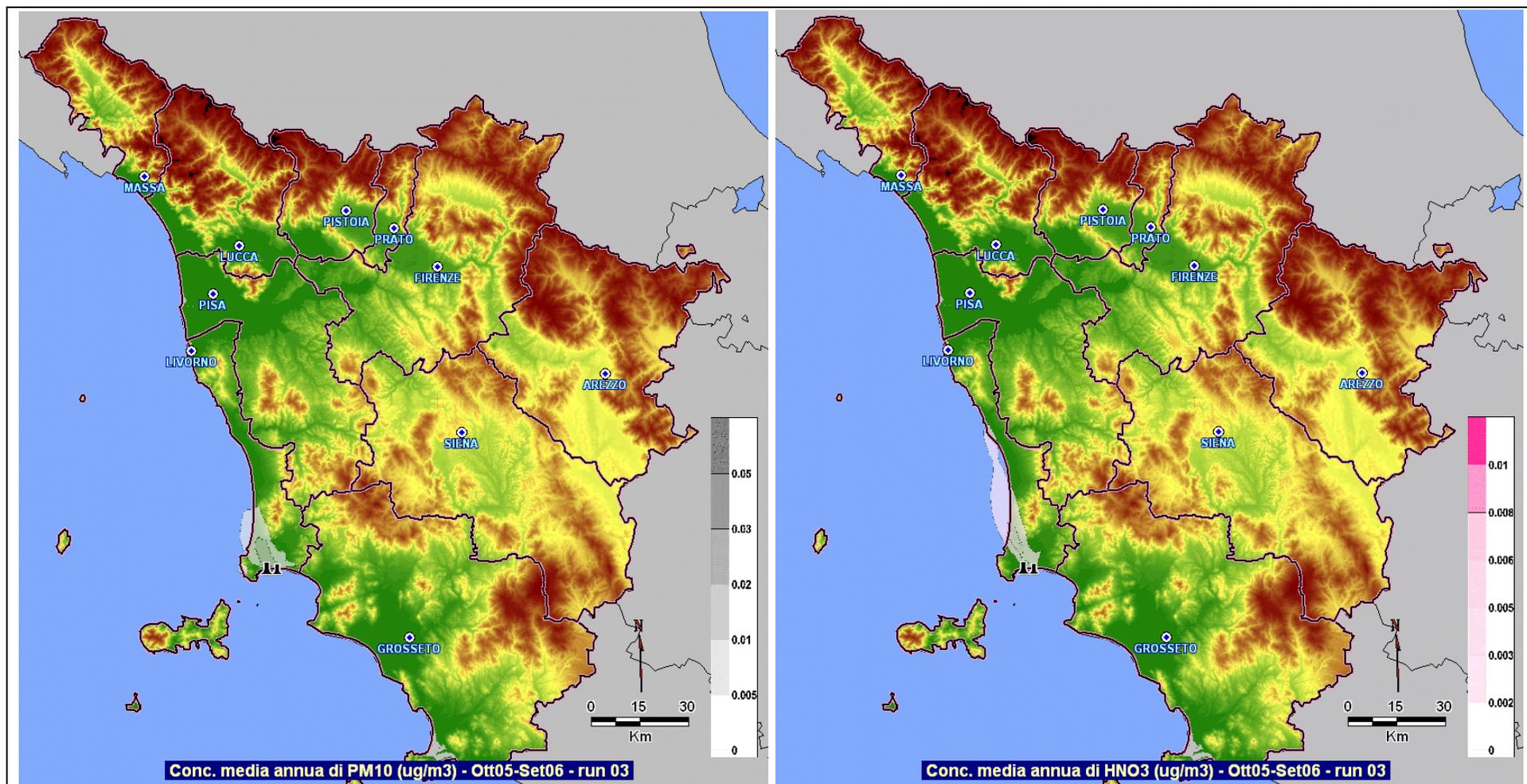
**Fig. 12** – Mappe delle concentrazioni medie annue di SO<sub>2</sub> stimate da CALPUFF relative ai due run con emissioni costanti. Run01: scenario emissivo IRSE 2005 (sinistra) - Run02: scenario emissivo ENEL, emissioni costanti (destra).



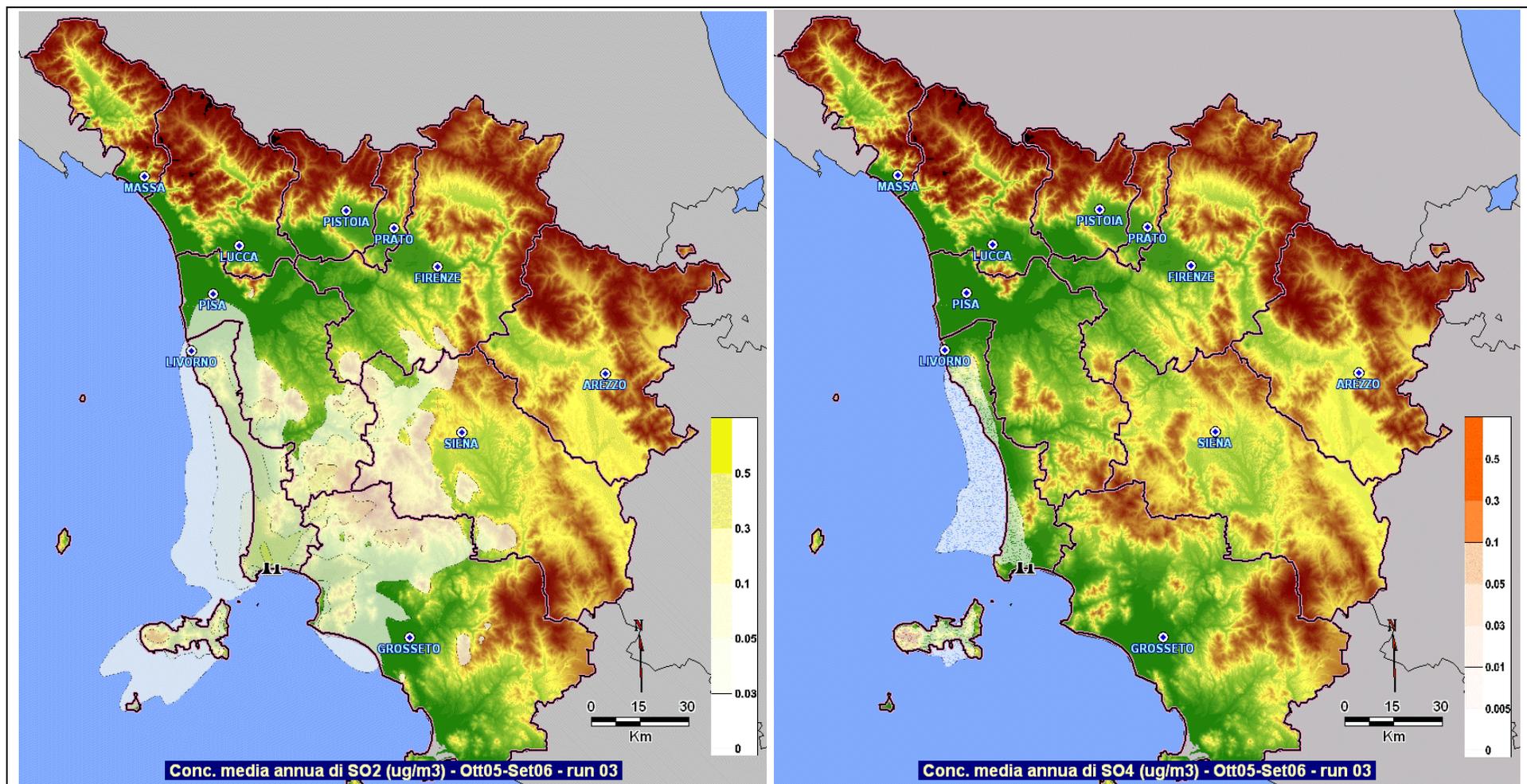
**Fig. 13** – Mappe delle concentrazioni medie annue di NO<sub>x</sub> stimate da CALPUFF relative ai due run con emissioni costanti. Run01: scenario emissivo IRSE 2005 (sinistra) - Run02: scenario emissivo ENEL, emissioni costanti (destra).



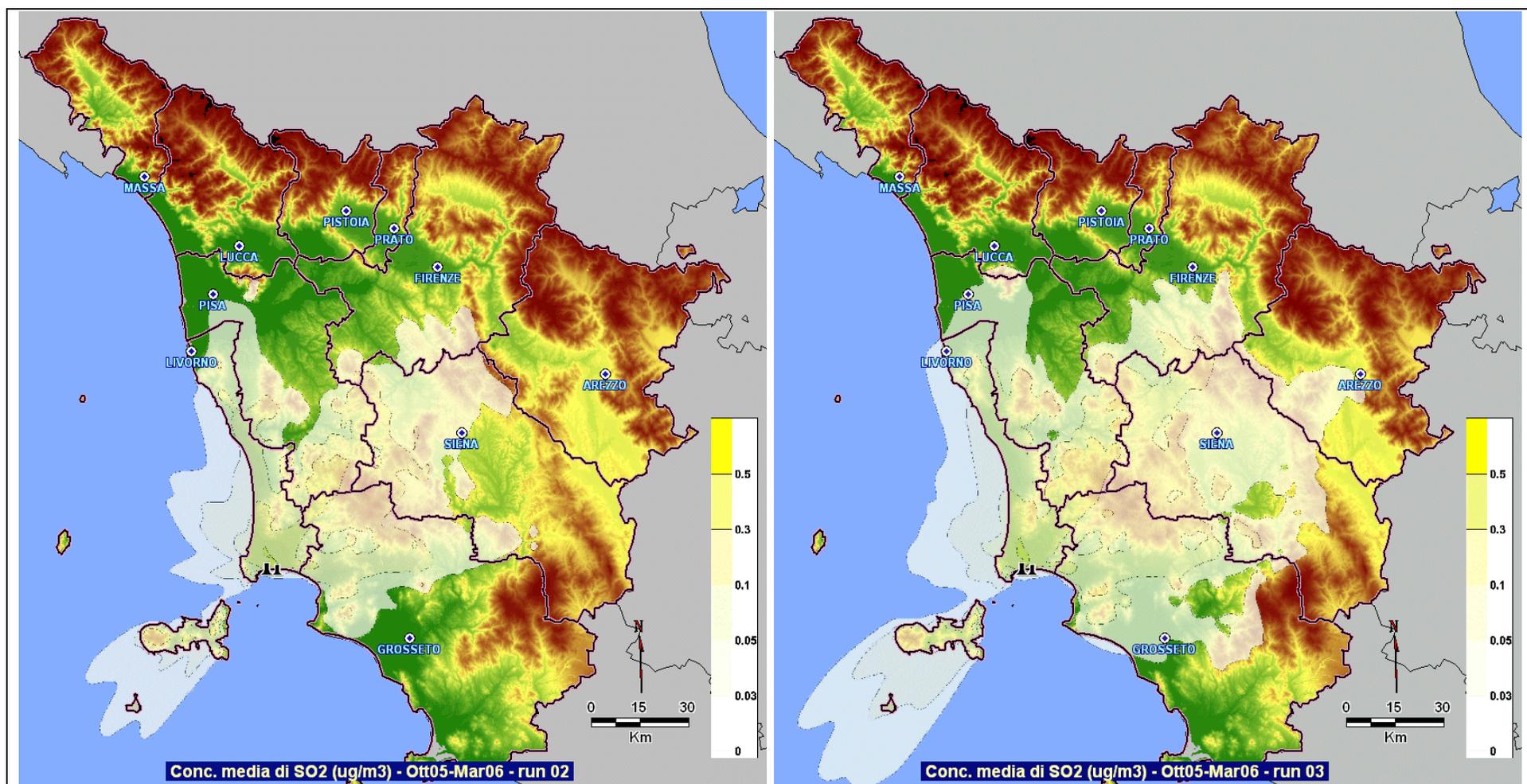
**Fig. 14** – Mappe delle concentrazioni medie annue stimate da CALPUFF relative al Run03: scenario emissivo ENEL, emissioni variabili su base oraria.  
 Mappa delle concentrazioni medie annue di NO<sub>x</sub> (sinistra) - Mappe delle concentrazioni medie annue di NO<sub>3</sub> (destra).



**Fig. 15** - Mappe delle concentrazioni medie annue stimate da CALPUFF relative al Run03: scenario emissivo ENEL, emissioni variabili su base oraria.  
Mappa delle concentrazioni medie annue di PM<sub>10</sub> (sinistra) - Mappe delle concentrazioni medie annue di HNO<sub>3</sub> (destra).

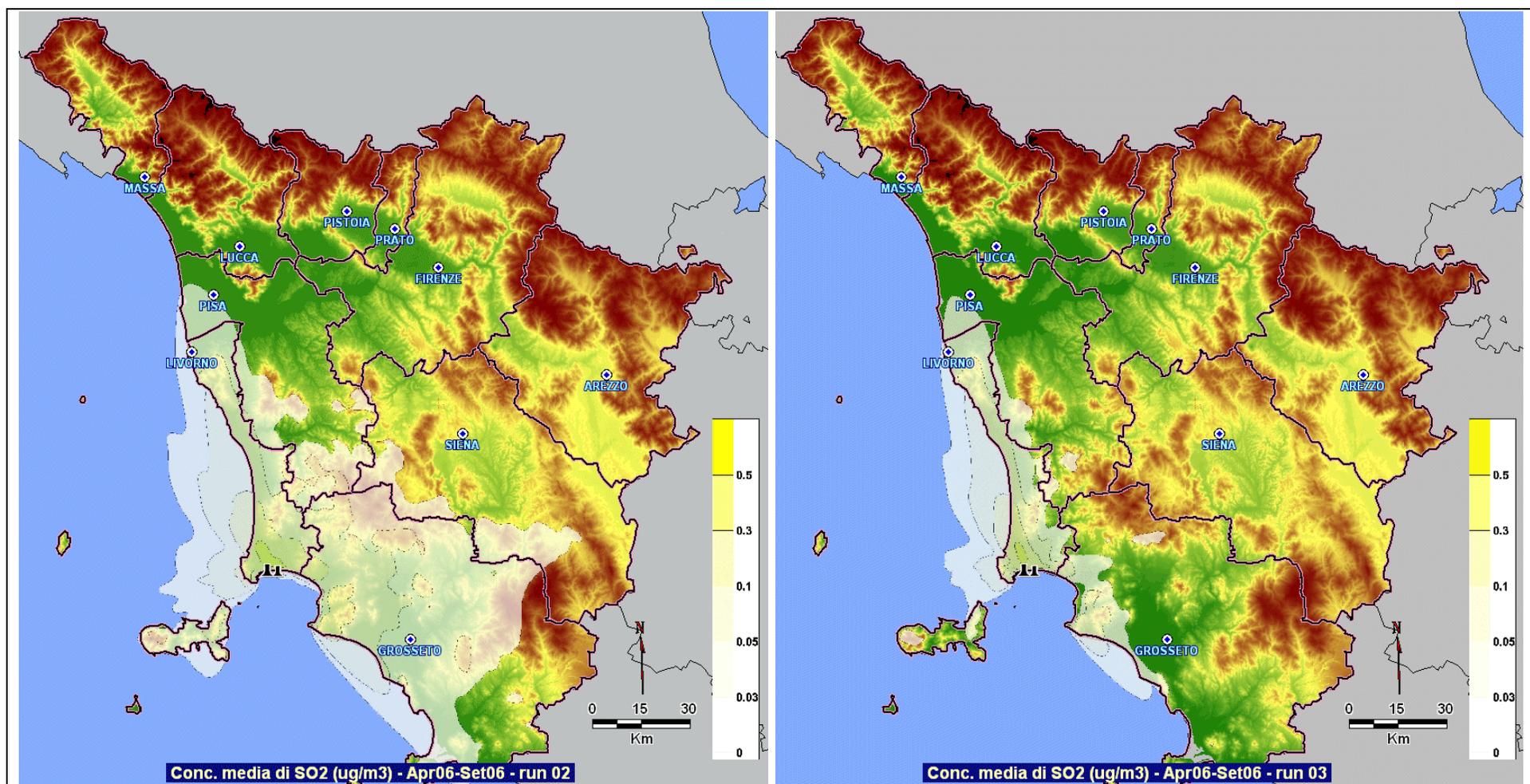


**Fig. 16** – Mappe delle concentrazioni medie annue stimate da CALPUFF relative al Run03: scenario emissivo ENEL, emissioni variabili su base oraria.  
Mappa delle concentrazioni medie annue di SO<sub>2</sub> (sinistra) - Mappe delle concentrazioni medie annue di SO<sub>4</sub> (destra).



**Fig. 17** – Mappe delle concentrazioni medie semestrali di SO<sub>2</sub> stimate da CALPUFF relative ai run 02 e 03 – Semestre freddo: ottobre 2005-marzo 2006.

Run02: scenario emissivo ENEL, emissioni costanti (sinistra) - Run03: scenario emissivo ENEL, emissioni variabili su base oraria (destra).



**Fig. 18** – Mappe delle concentrazioni medie semestrali di SO<sub>2</sub> stimate da CALPUFF relative ai run 02 e 03 – Semestre caldo: aprile 2006-settembre 2006.  
Run02: scenario emissivo ENEL, emissioni costanti (sinistra) - Run03: scenario emissivo ENEL, emissioni variabili su base oraria (destra).

## 3.2 Le serie storiche in corrispondenza dei siti di campionamento

In corrispondenza dei sette siti di campionamento (Tab. 8) sono state elaborate le serie storiche relative alle stime delle concentrazioni orarie di SO<sub>2</sub> e di SO<sub>4</sub>.

In particolare, per permettere un confronto tra le simulazioni relative allo scenario emissivo 2 (emissioni costanti) e allo scenario 3 (emissioni variabili), sono state riportate le serie storiche relative alle concentrazioni medie giornaliere di SO<sub>2</sub> nei sette siti (Fig. 19 – run02, Fig. 20 – run03).

Il confronto tra le serie storiche evidenzia come nel run02 i valori dei picchi siano in generale inferiori rispetto a quelli raggiunti nel run03: in quest'ultimo i valori più alti si verificano nel mese di febbraio, mentre nel run02 i valori più alti sono distribuiti in modo uniforme nell'intero periodo. Nelle figure 21 e 22 sono contrapposte le emissioni (in termini di somma dai due camini) e le concentrazioni medie orarie stimate nei siti di Firenze e di Livorno: anche se nel mese di febbraio si presenta il maggior carico emissivo, non c'è una completa corrispondenza con le concentrazioni stimate nei due siti, che dipendono strettamente dalle condizioni meteorologiche e dalla posizione geografica.

La serie storica relativa al sito di Prato è molto simile a quella di Montale e di Firenze e, in misura minore, a quella di Arezzo. Presso i siti di Livorno e Grosseto si registrano i valori di picco più alti: le serie storiche dei due siti non sono correlate, come si può intuire considerando la loro posizione geografica rispetto alla sorgente emissiva. In generale, comunque, i valori di concentrazione media giornaliera di SO<sub>2</sub> sono bassi, inferiori a 3 µg/m<sup>3</sup> a Livorno ed inferiori ad 1 µg/m<sup>3</sup> nei siti dell'entroterra.

Nei grafici delle Figg. 23 e 24 sono riportate le serie storiche delle concentrazioni di SO<sub>2</sub> e di SO<sub>4</sub> nei siti di Firenze e di Livorno, rispettivamente, relative al run03. Analizzando le serie storiche delle concentrazioni medie su base giornaliera, si può notare un'esatta corrispondenza temporale dei picchi; in particolare, nel sito di Firenze i valori di SO<sub>4</sub> sono mediamente inferiori di 15-20 volte rispetto ai corrispondenti valori di SO<sub>2</sub>, mentre nel sito di Livorno lo sono di 5-10 volte.

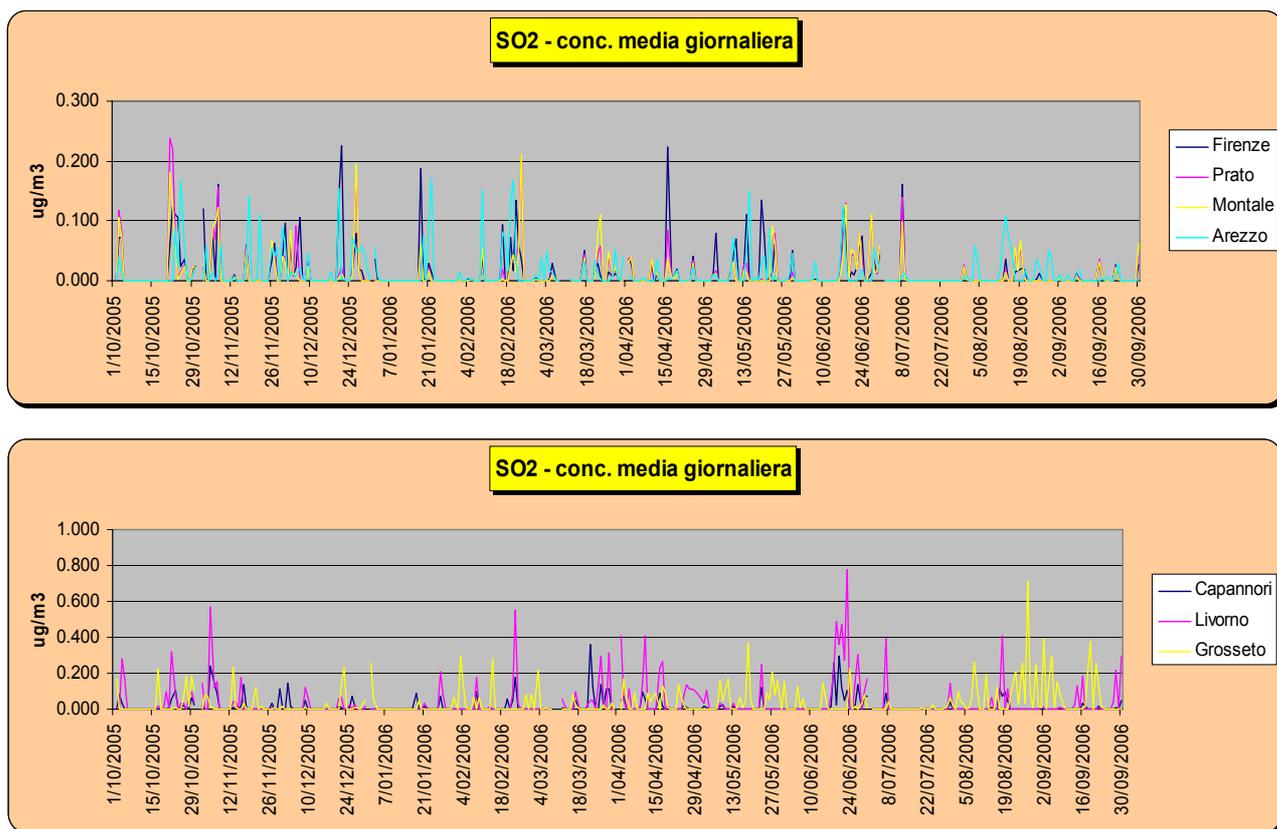


Fig. 19 – Serie storica su base giornaliera delle concentrazioni di SO<sub>2</sub> nei sette siti di campionamento relative al Run02 (ENEL - emissioni costanti).

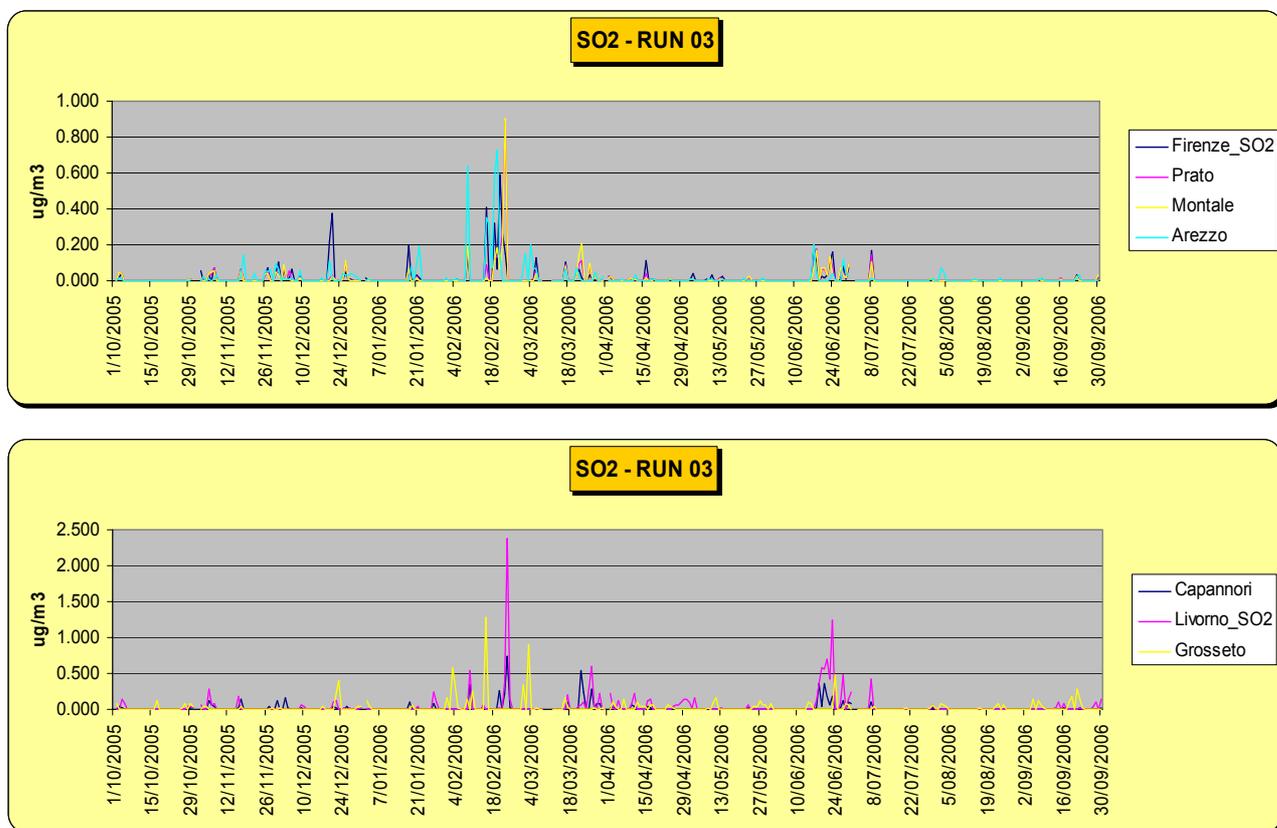


Fig. 20 – Serie storica su base giornaliera delle concentrazioni di SO<sub>2</sub> nei sette siti di campionamento relative al Run03 (ENEL - emissioni variabili).

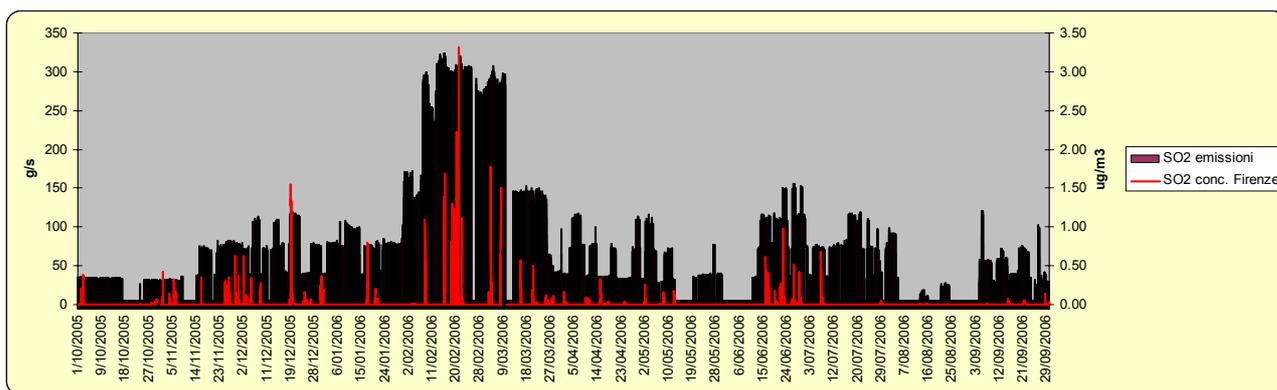


Fig. 21 – Emissioni (somma dei due camini) e concentrazioni orarie nel sito di Firenze.

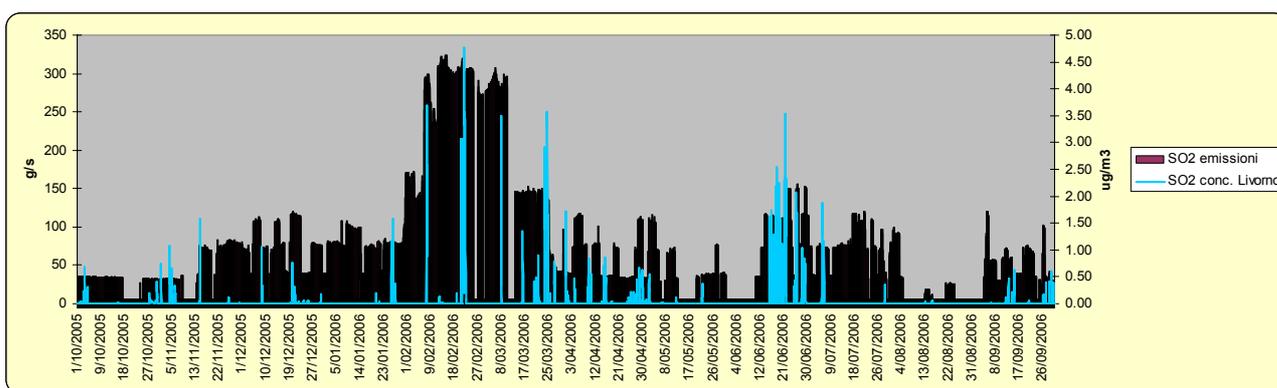


Fig. 22 – Emissioni (somma dei due camini) e concentrazioni orarie nel sito di Livorno.

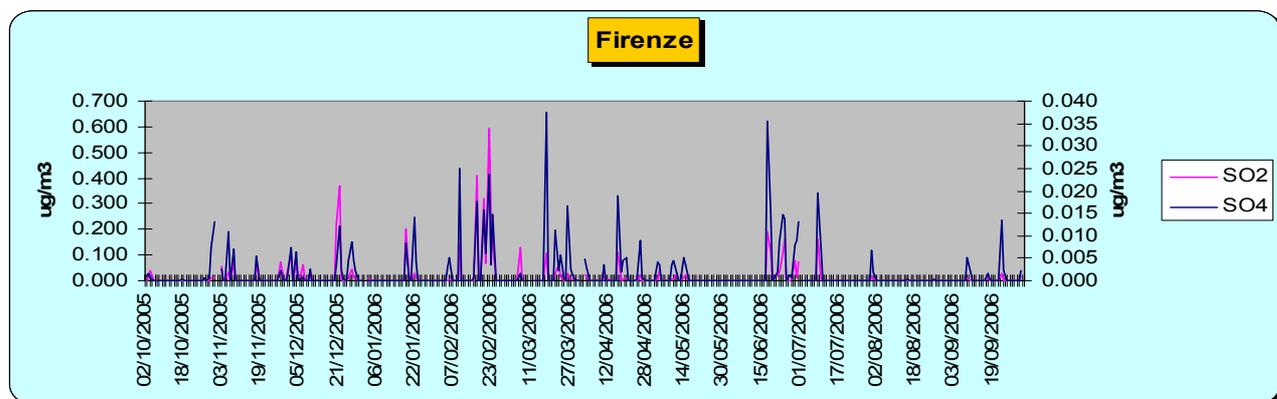


Fig. 23 – Serie storica su base giornaliera delle concentrazioni di SO<sub>2</sub> e di SO<sub>4</sub> – Firenze.

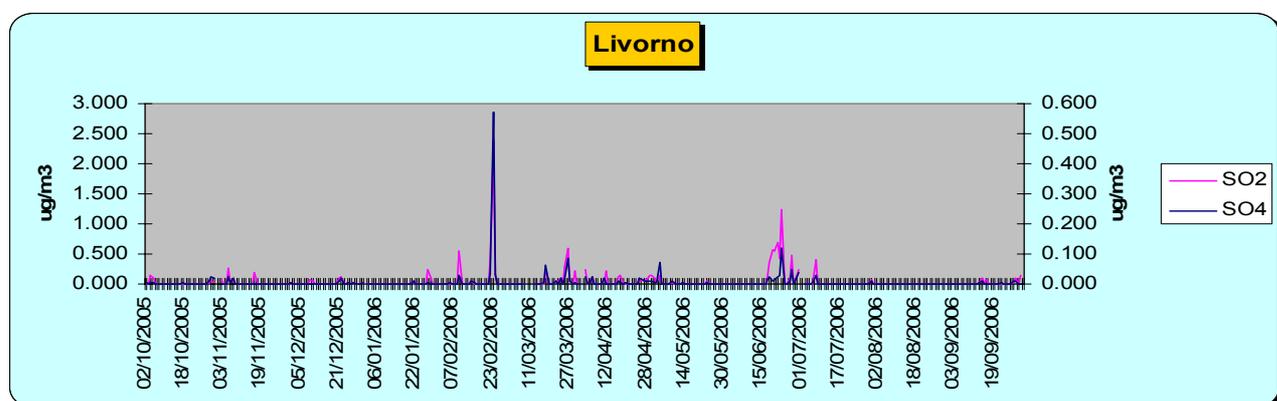


Fig. 24 – Serie storica su base giornaliera delle concentrazioni di SO<sub>2</sub> e di SO<sub>4</sub> - Livorno.

### 3.3 Confronto stime-misure

In ultimo, le concentrazioni medie giornaliere di SO<sub>2</sub> ed SO<sub>4</sub> stimate dal modello in corrispondenza dei sette siti di campionamento sono state confrontate con i valori misurati negli stessi siti.

Le misure di concentrazione utilizzate nel presente studio sono state effettuate nell'ambito del progetto PATOS 1 dall'Università di Firenze, in particolare dai gruppi di ricerca di Chimica (Prof. Udisti) e di Fisica (Prof. Lucarelli).

Le stime di SO<sub>4</sub> sono state confrontate direttamente con le misure dello stesso inquinante, mentre le stime di SO<sub>2</sub> sono state contrapposte alle misure di vanadio (V), individuato come tracciante delle attività industriali che utilizzano olio combustibile (in cui rientra la centrale termoelettrica di Torre del Sale). Si deve però segnalare che, pur trattandosi di un valido indicatore, questo elemento non individua univocamente la sorgente emissiva oggetto di studio: va infatti considerato l'apporto dovuto alle attività industriali di Livorno, nonché il contributo derivante dalle attività portuali ed in particolare dalle emissioni delle navi. Inoltre, non si può escludere un apporto di questo inquinante derivante anche da aree esterne alla regione Toscana.

Nelle Figg. 25–38 sono riportati i grafici, sito per sito, delle concentrazioni medie giornaliere di SO<sub>4</sub> stimate e misurate, e di seguito i grafici delle concentrazioni medie giornaliere di SO<sub>2</sub> e di V.

I grafici relativi al confronto delle concentrazioni medie giornaliere di SO<sub>4</sub> mostrano notevoli differenze tra i valori delle misure e quelli delle stime (oltre due ordini di grandezza); inoltre, in molti casi (come per Prato, Montale e Livorno) i periodi di campionamento non coincidono con i picchi di concentrazione stimati dal modello.

Negli altri casi si possono individuare alcuni episodi in cui esistono delle corrispondenze tra i picchi di SO<sub>4</sub> stimati e misurati e, contemporaneamente, di SO<sub>2</sub> e di V. Ad esempio, considerando le concentrazioni nel sito di Firenze (Figg. 25 e 26), si possono individuare gli episodi del 17 e 24 giugno 2006: la direzione prevalente del vento in quei giorni era sud-ovest, in accordo con l'ipotizzato apporto di masse d'aria dalla costa. Ovviamente non è possibile scindere il contributo dovuto alla centrale di Torre del Sale da quello attribuibile alle attività industriali e portuali di Livorno.

Anche per Arezzo (4/03/2006), Capannori (22/03/2006-27/03/2006) e Grosseto (10/02/2006) si può tentare di individuare alcuni episodi in cui picchi di SO<sub>2</sub>, di SO<sub>4</sub> e di V si verificano in corrispondenza di vento proveniente da sud, sud-ovest e nord-ovest rispettivamente.

In ogni caso, il contributo derivante dalle emissioni della centrale ENEL di Torre del Sale è modesto se paragonato ai valori di  $SO_4$  misurati. Si può quindi ipotizzare che il contributo delle altre sorgenti emissive presenti sul territorio regionale (in particolare le industrie situate a Livorno e le attività portuali) e gli apporti extraregionali contribuiscano in modo sicuramente determinante ai valori delle concentrazioni di fondo dei solfati.

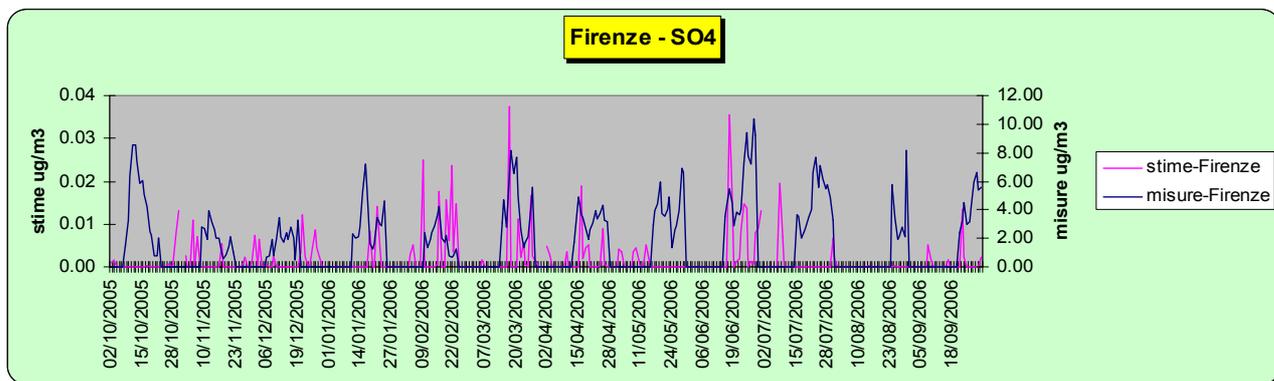


Fig. 25 –Concentrazioni medie giornaliere stimate e misurate di  $SO_4$  - Firenze.

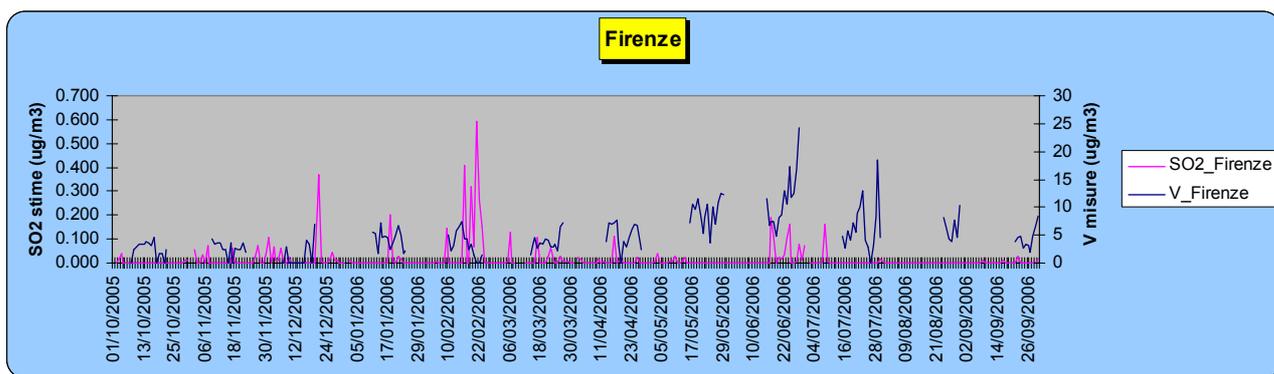


Fig. 26 – Concentrazioni medie giornaliere di  $SO_2$  (stime) e di V (misure) - Firenze.

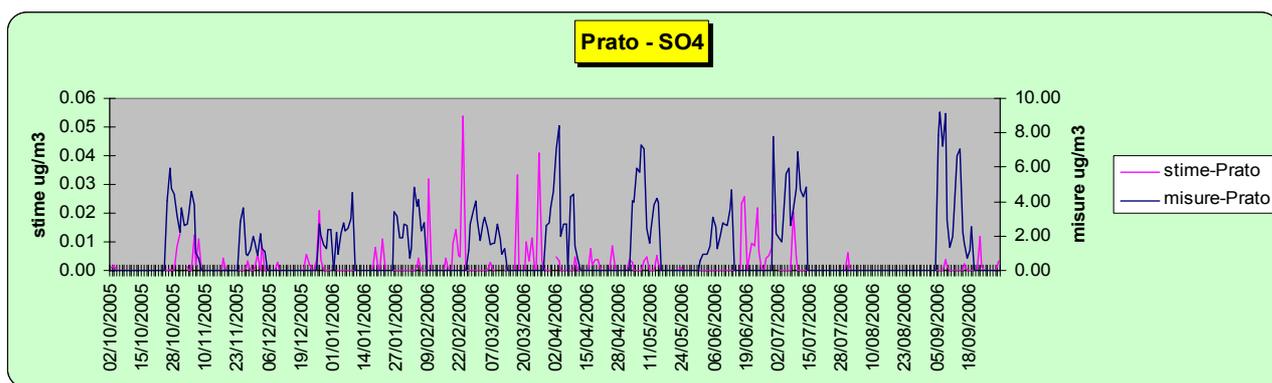


Fig. 27 – Concentrazioni medie giornaliere stimate e misurate di SO<sub>4</sub> - Prato.

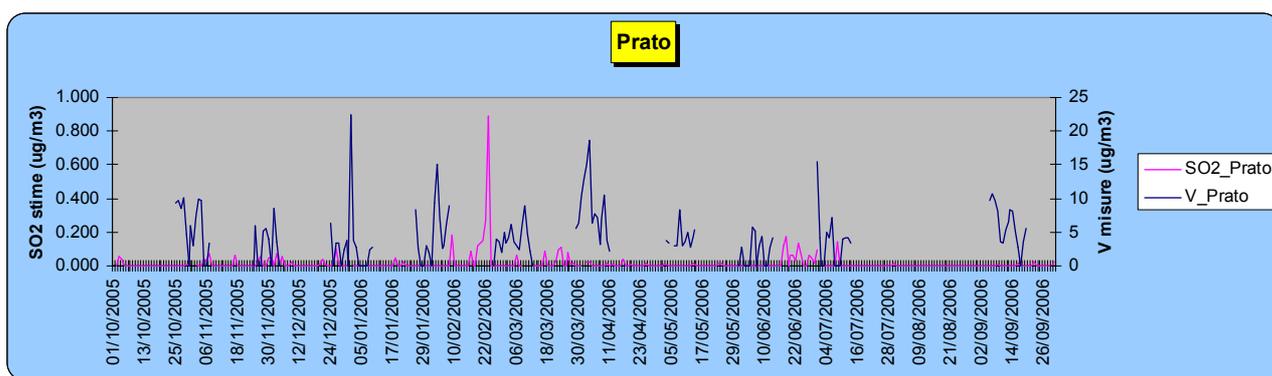


Fig. 28 – Concentrazioni medie giornaliere di SO<sub>2</sub> (stime) e di V (misure) - Prato.

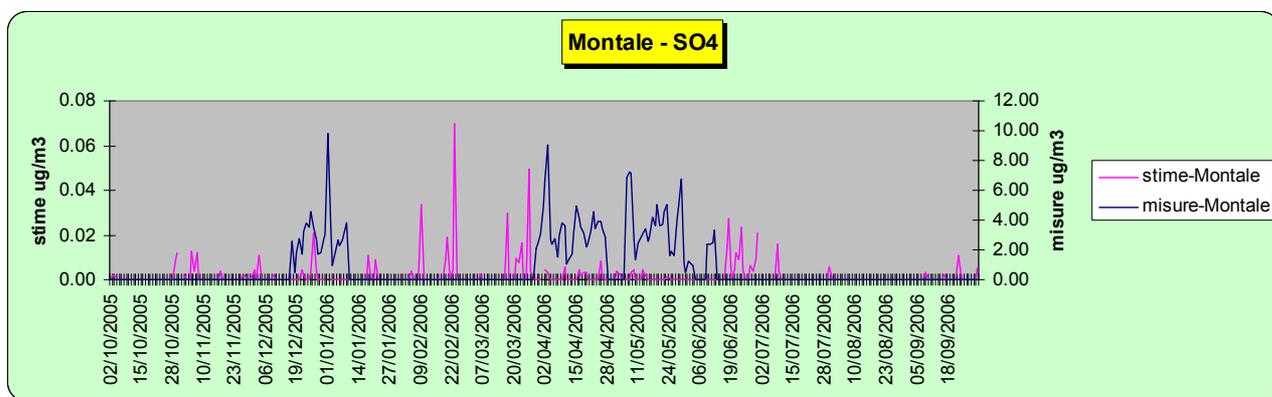


Fig. 29 – Concentrazioni medie giornaliere stimate e misurate di SO<sub>4</sub> - Montale.

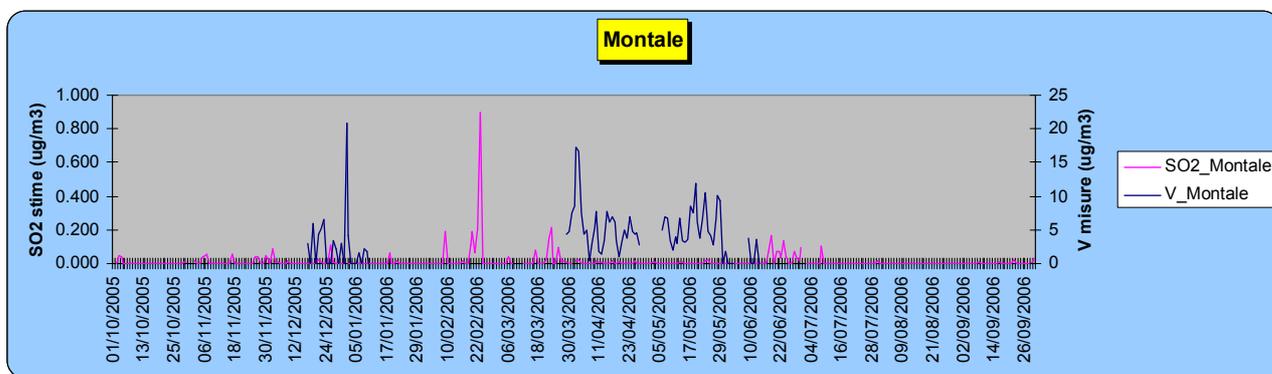


Fig. 30 – Concentrazioni medie giornaliere di SO<sub>2</sub> (stime) e di V (misure) - Montale.

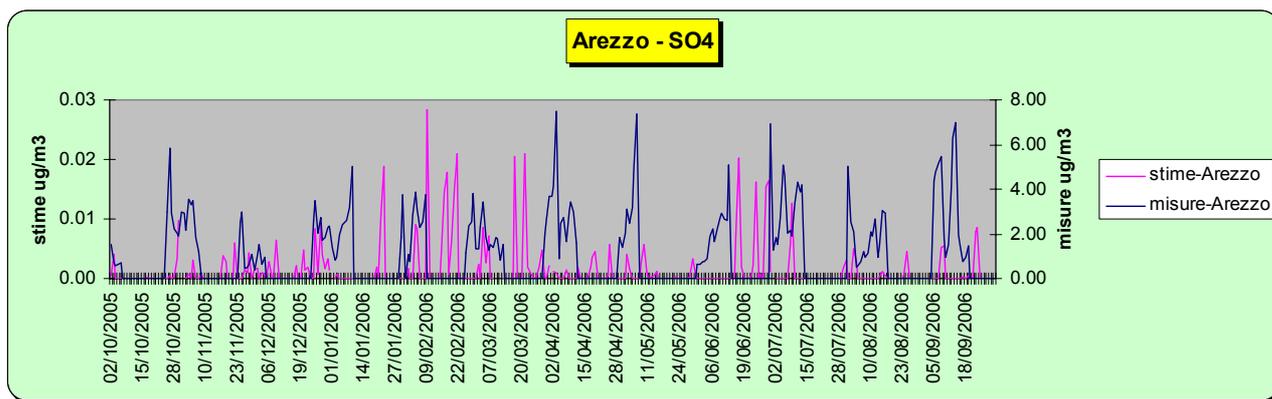


Fig. 31 – Concentrazioni medie giornaliere stimate e misurate di SO<sub>4</sub> - Arezzo.

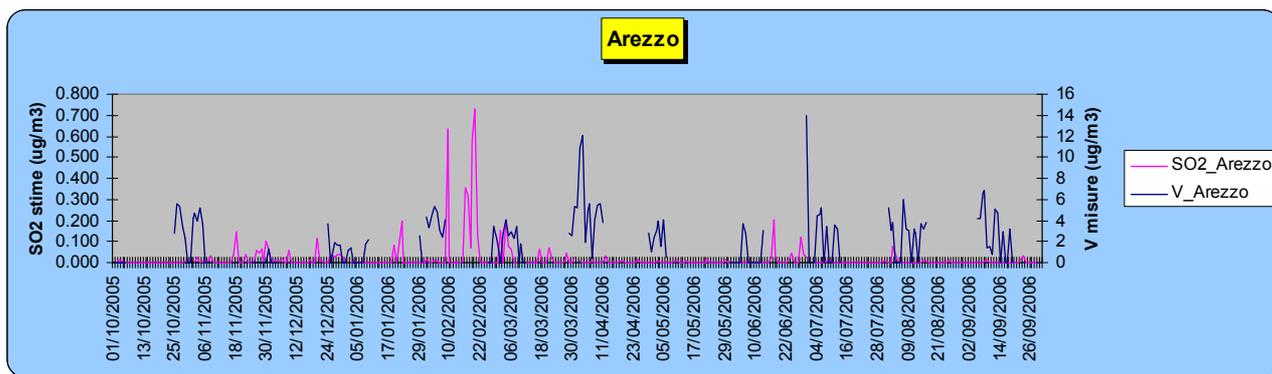


Fig. 32 – Concentrazioni medie giornaliere di SO<sub>2</sub> (stima) e di V (misura) - Arezzo.

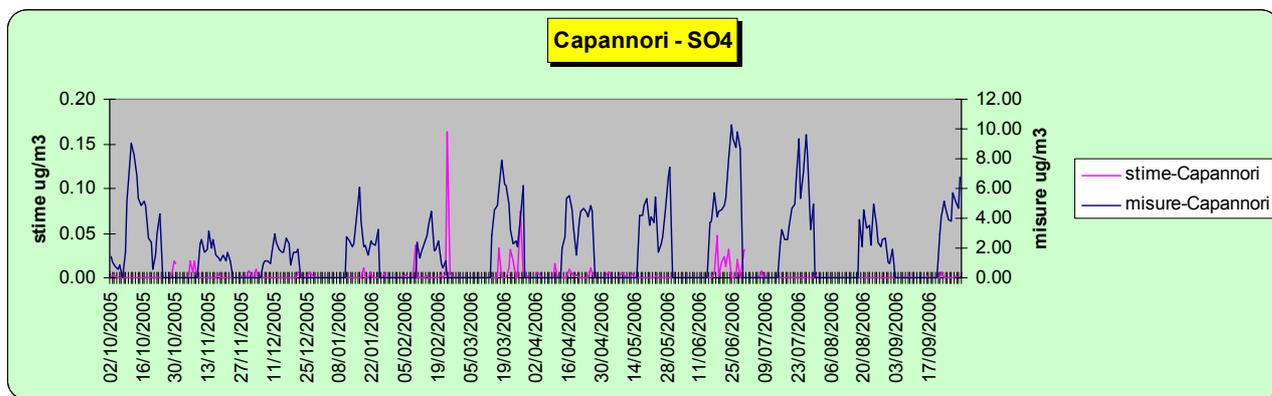


Fig. 33 – Concentrazioni medie giornaliere stimate e misurate di SO<sub>4</sub> - Capannori.

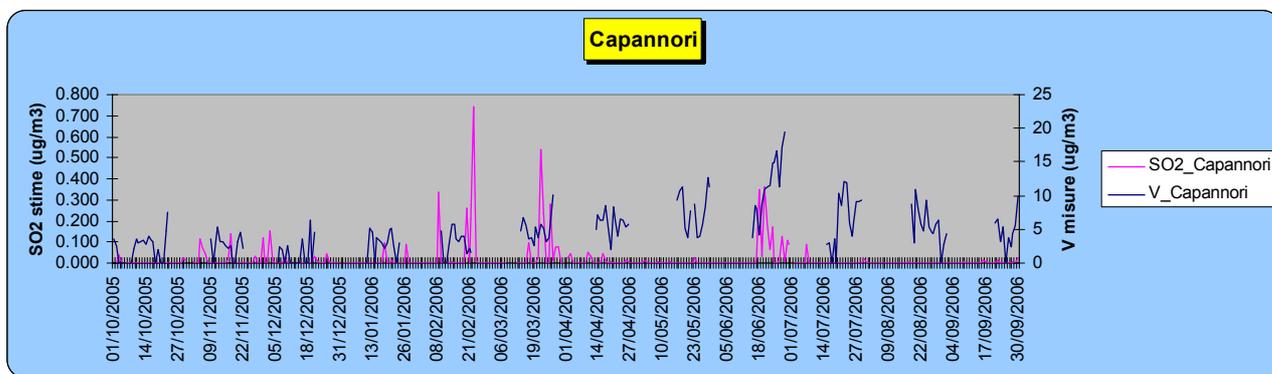


Fig. 34 – Concentrazioni medie giornaliere di SO<sub>2</sub> (stima) e di V (misura) - Capannori.

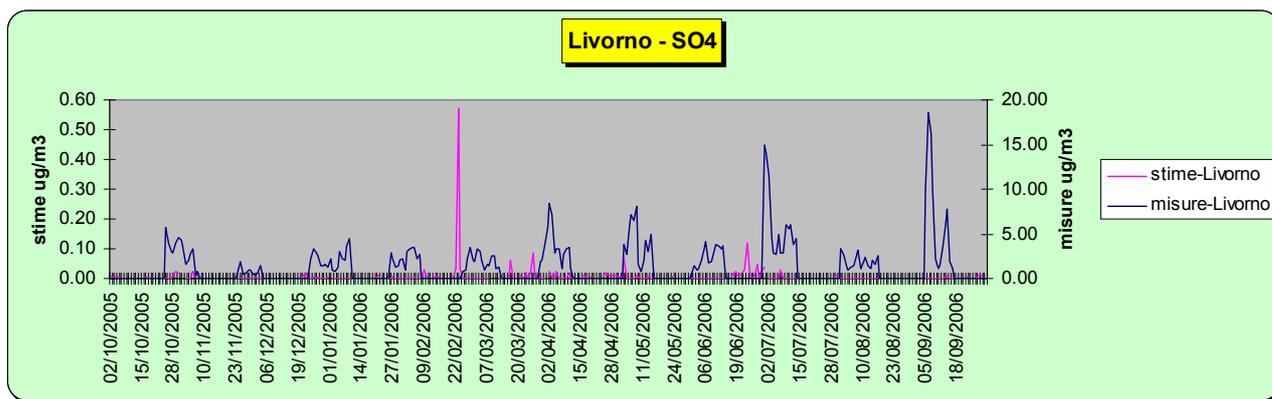


Fig. 35 – Concentrazioni medie giornaliere stimate e misurate di  $SO_4$  - Livorno.

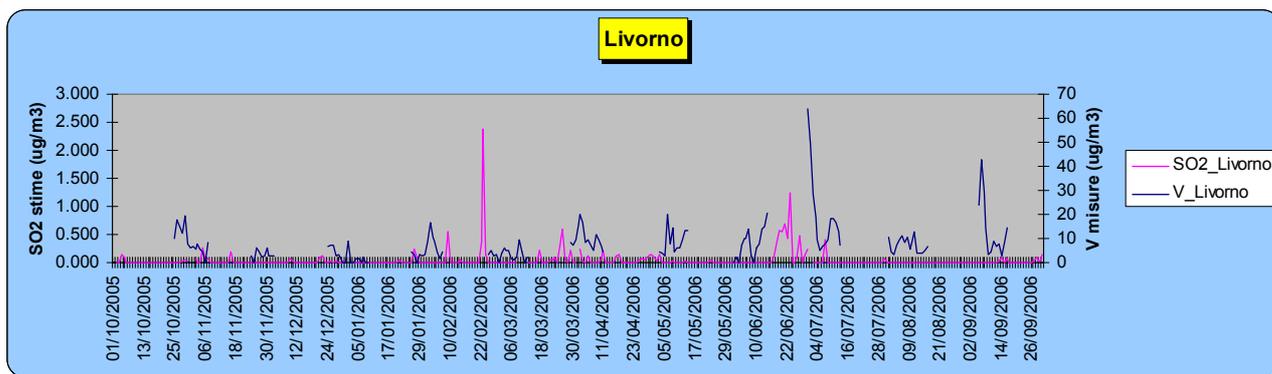


Fig. 36 – Concentrazioni medie giornaliere di  $SO_2$  (stime) e di V (misure) - Livorno.

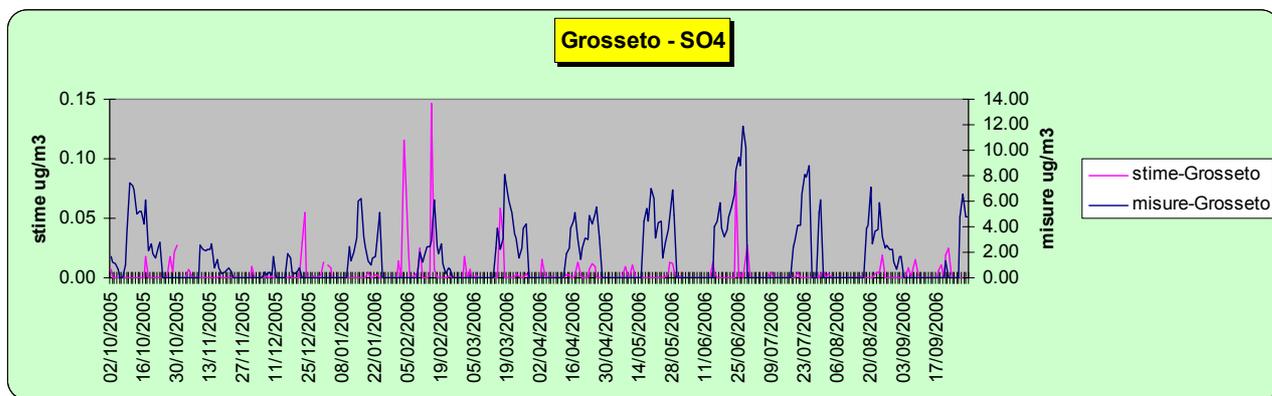


Fig. 37 – Concentrazioni medie giornaliere stimate e misurate di  $SO_4$  - Grosseto.

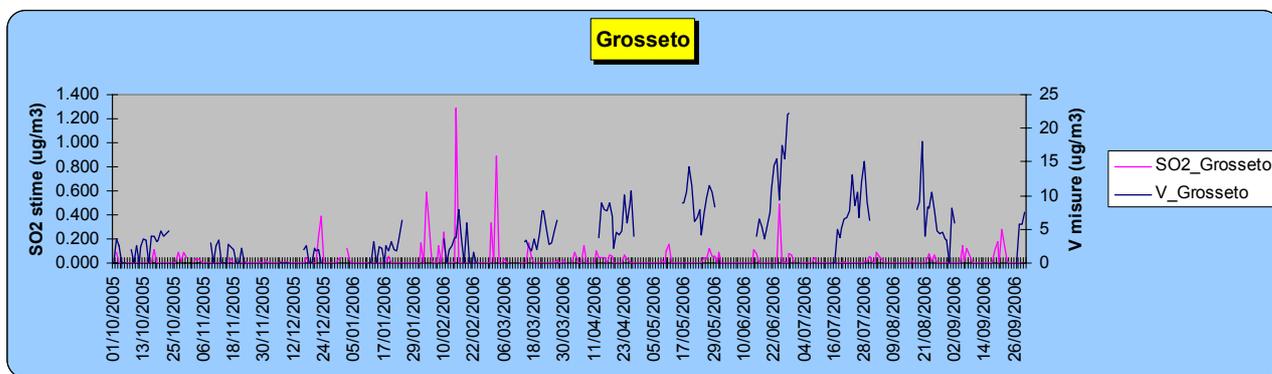


Fig. 38 – Concentrazioni medie giornaliere di  $SO_2$  (stime) e di V (misure) - Grosseto.

## Conclusioni

Questo studio, finalizzato alla valutazione della dispersione in atmosfera delle emissioni inquinanti derivanti dalla centrale termoelettrica ENEL di Torre del Sale presso Piombino (LI), nel periodo ottobre 2005 - settembre 2006, si propone come proseguimento e completamento del precedente lavoro, svolto nell'ambito del progetto PATOS 1.

L'approccio modellistico adottato è analogo a quello seguito nell'ambito del precedente progetto. Anche in questo caso la catena modellistica CALMET-CALPUFF è stata alimentata dalle stime fornite dall'Archivio meteorologico RAMS/WRF, messo a punto presso il LaMMA: in particolare, nel periodo ottobre 2005 - settembre 2006 le stime archiviate sono relative al modello WRF. Sono state quindi illustrate le principali caratteristiche del modello WRF, alcuni risultati del processo di validazione attualmente in corso, il confronto tra le stime di vento e i dati misurati presso alcune stazioni meteorologiche.

Nell'ambito del presente progetto PATOS 2, l'applicazione modellistica - condotta nel periodo corrispondente alla campagna di misure di PATOS 1 - ha previsto l'utilizzo, come dati di emissione, dei valori delle concentrazioni di PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> ed NO<sub>x</sub> misurati allo sbocco del camino. Nel precedente studio, relativo al periodo 2002, erano state utilizzate le stime dell'inventario regionale IRSE; per effettuare un confronto, a fronte dello stesso scenario meteorologico, sono stati effettuati due *run*, rispettivamente con dati emissivi IRSE aggiornati al 2005 e con dati medi ottenuti dalle misure al camino. È stato poi effettuato un terzo *run*, in cui i dati di emissione misurati sono stati forniti al modello CALPUFF con dettaglio orario.

I risultati ottenuti nelle tre simulazioni sono stati presentati attraverso le elaborazioni grafiche relative alle mappe delle concentrazioni medie annue di SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub> ed HNO<sub>3</sub>. Per il solo SO<sub>2</sub> sono state riportate anche le medie semestrali del semestre freddo (ottobre 05 - marzo 06) e del semestre caldo (aprile 06 - settembre 06). Inoltre, in corrispondenza dei sette siti di campionamento, sono state elaborate le serie storiche relative alle concentrazioni orarie di SO<sub>2</sub> e di SO<sub>4</sub>.

Per quanto riguarda il PM<sub>10</sub>, i risultati ottenuti nei tre *run* sono molto simili: le concentrazioni medie annue sono molto basse (inferiori a 0.02 µg/m<sup>3</sup>) e interessano un'area territoriale limitata, in prossimità della centrale. Anche le concentrazioni di SO<sub>2</sub> ottenute nei tre *run* sono estremamente simili, quasi identiche nel caso delle simulazioni a fronte di emissioni costanti (run01 e run02), con una distribuzione spaziale leggermente diversa nel caso di emissioni variabili su base oraria. Per questo inquinante

le concentrazioni medie annue sono decisamente più alte, interessano gran parte del territorio regionale (tra 0.03 e 0.05  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ed arrivano a valori compresi tra 0.3 e 0.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  in prossimità della centrale. Le concentrazioni di  $\text{NO}_x$  relative alle stime dell'inventario IRSE sono di poco superiori a quelle ottenute nelle simulazioni basate sugli scenari 02 e 03 (dati misurati). L'area territoriale interessata è limitata ed i valori non superano 0.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  anche nelle immediate vicinanze dello stabilimento. Per quanto riguarda le concentrazioni medie annue degli inquinanti secondari ( $\text{SO}_4$ ,  $\text{NO}_3$  ed  $\text{HNO}_3$ ), i valori sono molto bassi, dell'ordine di 2-3  $\text{ng}/\text{m}^3$  per  $\text{NO}_3$  e  $\text{HNO}_3$ , e di poco superiori (5-10  $\text{ng}/\text{m}^3$ ) per  $\text{SO}_4$ .

In generale, il confronto delle mappe delle concentrazioni medie annue di  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{SO}_2$  ed  $\text{NO}_x$  ottenute nelle tre simulazioni evidenzia risultati molto simili, sia in termini di distribuzione spaziale che di livelli di concentrazione. Risultati simili per le simulazioni 01 e 02 mettono in luce la validità – almeno per quanto riguarda la centrale di Torre del Sale – delle stime dell'inventario IRSE aggiornato al 2005; in effetti lo studio precedente mostrava grosse differenze nelle stime delle concentrazioni medie annue a fronte dei valori di emissione relativi all'IRSE 2003 rispetto all'IRSE 2005. Queste considerazioni portano a concludere che le simulazioni modellistiche basate sui valori ottenuti dall'inventario IRSE sono rappresentative della situazione reale, a patto che l'inventario sia debitamente aggiornato e validato.

Per quanto riguarda il confronto tra il secondo ed il terzo *run*, l'utilizzo di emissioni costanti (ottenute dalla media dei dati misurati) o variabili su base oraria non evidenzia sensibili differenze nella stima delle concentrazioni medie annue. Tuttavia, confrontando le mappe relative alle medie semestrali di concentrazione di  $\text{SO}_2$ , si notano delle importanti differenze, da legare direttamente al diverso carico emissivo nei due semestri, come si evidenzia dall'istogramma relativo alle emissioni di  $\text{SO}_2$  ed anche dalla percentuale di ore di inattività.

In corrispondenza dei sette siti di campionamento sono state elaborate le serie storiche relative alle concentrazioni orarie di  $\text{SO}_2$  e di  $\text{SO}_4$ . La serie storica relativa al sito di Prato è molto simile a quella di Montale e di Firenze e, in misura minore, a quella di Arezzo. Presso i siti di Livorno e Grosseto si registrano i valori di picco più alti: le serie storiche dei due siti non sono correlate, come si può intuire considerando la loro posizione geografica rispetto alla sorgente emissiva. In generale, comunque, i valori di concentrazione media giornaliera di  $\text{SO}_2$  sono bassi, inferiori a 3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a Livorno e inferiori a 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  nei siti dell'entroterra. Il confronto tra le serie storiche evidenzia come nel run02 (emissioni costanti) i valori dei picchi siano in generale inferiori rispetto a quelli

raggiunti nel run03 (emissioni variabili su base oraria): in quest'ultimo i valori più alti si verificano nel mese di febbraio, mentre nel run02 i valori più alti sono distribuiti in modo uniforme nell'intero periodo.

Analizzando le serie storiche delle concentrazioni medie su base giornaliera di SO<sub>2</sub> e di SO<sub>4</sub>, si può notare un'esatta corrispondenza temporale dei picchi; in particolare, nel sito di Firenze i valori di SO<sub>4</sub> sono mediamente inferiori di 15-20 volte rispetto ai corrispondenti valori di SO<sub>2</sub>, mentre nel sito di Livorno lo sono di 5-10 volte.

In ultimo, le concentrazioni medie giornaliere di SO<sub>2</sub> e di SO<sub>4</sub> stimate dal modello in corrispondenza dei sette siti di campionamento sono state confrontate con i valori misurati negli stessi siti. Le stime di SO<sub>4</sub> sono state confrontate direttamente con le misure dello stesso inquinante, mentre le stime di SO<sub>2</sub> sono state contrapposte alle misure di vanadio (V), individuato come tracciante delle attività industriali che utilizzano olio combustibile (in cui rientra la centrale termoelettrica di Torre del Sale). Si deve però segnalare che, pur trattandosi di un valido indicatore, questo elemento non individua univocamente la sorgente emissiva oggetto di studio: va infatti considerato l'apporto dovuto alle attività industriali di Livorno, nonché il contributo derivante dalle attività portuali ed in particolare dalle emissioni delle navi. Inoltre non si può escludere un apporto di questo inquinante derivante anche da aree esterne alla regione Toscana.

I grafici relativi al confronto delle concentrazioni medie giornaliere di SO<sub>4</sub> mostrano notevoli differenze tra i valori delle misure e quelli delle stime (oltre due ordini di grandezza); inoltre, in molti casi (come per Prato, Montale e Livorno) i periodi di campionamento non coincidono con i picchi di concentrazione stimati dal modello. Negli altri casi si possono individuare alcuni episodi in cui esistono delle corrispondenze tra i picchi di SO<sub>4</sub> (stimati e misurati), di SO<sub>2</sub> e di V e, contemporaneamente, la direzione di provenienza del vento è compatibile con l'apporto di masse d'aria dalla zona in esame. Ovviamente non è possibile scindere il contributo dovuto alla centrale di Torre del Sale da quello attribuibile ad altre attività industriali o alle attività portuali.

In ogni caso, il contributo derivante dalle emissioni della centrale ENEL di Torre del Sale è modesto se paragonato ai valori di SO<sub>4</sub> misurati; si può quindi ipotizzare che il contributo delle altre sorgenti emissive presenti sul territorio regionale (in particolare le industrie situate a Livorno e le attività portuali) e gli apporti extraregionali contribuiscano in modo sicuramente determinante ai valori delle concentrazioni di fondo dei solfati.