



**Regione Toscana**

**Provincia di Livorno**



**LaMMA / FMA**

**Convenzione per un incarico per la predisposizione e  
applicazione di modelli meteo-diffusionali per la valutazione  
della qualità dell'aria**

***Relazione finale***

**Autori:**

*Francesca Calastrini*

*Giovanni Gualtieri*

*8 luglio 2003*

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>2</b>
<b>1. Presentazione del sistema integrato di modelli meteodiffusionali</b>	<b>4</b>
1.1 Sviluppo del sistema di modelli meteodiffusionali	4
1.2 L'archivio meteorologico RAMS	5
1.3 Il modello CALMET	6
1.4 Il modello CALPUFF	7
<b>2. Sviluppo dell'interfaccia RAMS-CALMET ed implementazione nel sistema del modello CALPUFF</b>	<b>9</b>
2.1 Schema operativo del sistema integrato di modelli	9
2.2 Funzionamento dell'unità "1 - RAMS"	10
2.3 Funzionamento dell'unità "2.1 - RAMS-CALMET"	11
2.4 Funzionamento dell'unità "3 - CALMET"	12
2.5 Integrazione del modello CALPUFF	13
2.6 Funzionamento dell'unità "4 - CALPUFF"	14
<b>3. Applicazione della filiera di modelli RAMS-CALMET-CALPUFF nell'area della provincia di Livorno</b>	<b>15</b>
3.1 Dominio di studio	15
3.2 Applicazione dei modelli RAMS-CALMET nell'area di studio	16
3.3 Applicazione del modello CALPUFF nell'area di studio	17
3.4 Modalità <i>long-term</i>	18
3.5 Risultati delle simulazioni	19
3.5.1 <i>Analisi dei risultati di CALMET</i>	19
3.5.2 <i>Analisi dei risultati di CALPUFF</i>	22
3.5.3 <i>Confronto tra le stime di concentrazione ed i dati misurati</i>	30
<b>Conclusioni e prospettive</b>	<b>33</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>34</b>
<b>Appendice</b>	<b>35</b>
<b>Installazione e configurazione dell'interfaccia grafica CALMET-CALPUFF-CALPOST e relativa esecuzione dei casi-studio</b>	<b>35</b>
1. L'interfaccia grafica CALMET-CALPUFF-CALPOST	35
2. Contenuto del CD-Rom consegnato ad ARPAT	39
3. Alcuni problemi d'installazione e di configurazione	40

## Introduzione

Nell'ambito della convenzione tra Provincia di Livorno, ARPAT e LaMMA/FMA dal titolo "Convenzione per un incarico per la predisposizione e applicazione di modelli meteo-diffusionali per la valutazione della qualità dell'aria", firmata in data 08.07.2002 e cofinanziata dalla Regione Toscana, LaMMA/FMA ha configurato un sistema di modelli meteo-diffusionali finalizzati alla valutazione dello stato di qualità dell'aria.

Il sistema utilizza un archivio di variabili meteorologiche elaborate dal modello RAMS, il modello CALMET – utilizzato come post-processore meteorologico del modello RAMS – ed il modello di dispersione CALPUFF, preposto alla simulazione del trasporto e della diffusione degli inquinanti.

L'implementazione del sistema di modelli ha richiesto lo sviluppo di una specifica interfaccia tra le uscite dell'archivio RAMS e il modello meteo CALMET, indispensabile strumento di conversione e riformattazione dei dati RAMS per il modello diffusionale CALPUFF.

La convenzione, oltre alla predisposizione del sistema di modelli, ne prevede l'applicazione nelle due aree di studio di Livorno e di Rosignano Marittimo. Inoltre, è previsto il confronto tra le stime ottenute dal modello diffusionale CALPUFF e i dati di concentrazione misurati dalle stazioni chimiche presenti nelle due zone.

Nell'applicazione del sistema di modelli sono state prese in esame le maggiori sorgenti industriali presenti sul territorio. I dati di emissione utilizzati sono quelli dell'inventario regionale IRSE e attengono alle sorgenti di tipo puntuale.

Gli inquinanti modellizzati sono il biossido di zolfo ( $\text{SO}_2$ ) e gli ossidi di azoto ( $\text{NO}_x$ ).

Sono stati presi in esame due differenti periodi temporali, uno per una applicazione *short-term*, finalizzata alla determinazione della configurazione migliore per i modelli CALMET-CALPUFF, e l'altro per una applicazione in modalità *long-term*, con cui è possibile valutare le concentrazioni medie degli inquinanti oggetto di studio.

In prima battuta è stato esaminato un periodo temporale limitato, compreso tra il 23 ed il 28 febbraio 2002. Questo caso-studio è stato utilizzato per configurare i modelli CALMET e CALPUFF in modo da riprodurre nella maniera migliore sia i campi meteo che le concentrazioni degli inquinanti, comparando anche i tre diversi approcci chimici implementati all'interno di CALPUFF (trattazione degli inquinanti come inerti, utilizzazione del meccanismo MESOPUFF-II, oppure del meccanismo ARM3/RIVAD).

Dopo aver effettuato la configurazione nell'area in esame, il sistema di modelli è stato messo a punto per realizzare applicazioni in modalità *long-term*: in particolare, è stato preso in esame un periodo di tre mesi, compreso tra il 1° febbraio 2002 e il 30 aprile 2002.

Per quanto riguarda il confronto tra le stime dei modelli e le misure, LaMMA/FMA ha ricevuto da ARPAT i dati della rete di monitoraggio operativa nelle due aree di studio, comprendente sia le stazioni meteo che quelle chimiche.

Sempre in riferimento alle attività previste nell'ambito della convenzione in oggetto, LaMMA/FMA ha avviato con ARPAT una proficua collaborazione scientifica, che si è concretizzata – sia attraverso contatti telefonici o via *E-mail* che attraverso incontri di lavoro – con la fornitura da parte di LaMMA/FMA degli eseguibili dei modelli implementati, delle informazioni e di quant'altro necessario all'acquisizione delle conoscenze, da parte di ARPAT, per il loro più corretto utilizzo, nonché delle uscite prodotte in ultimo dall'applicazione di tali modelli.

LaMMA ha inoltre provveduto a fornire ad ARPAT una versione opportunamente testata dell'interfaccia grafica in ambiente Windows dei modelli CALMET, CALPUFF e CALPOST (il post-processore grafico di CALPUFF), che viene liberamente distribuita via *internet*. L'interfaccia è stata inoltre configurata sull'area in esame a fronte dei medesimi casi-studio svolti nel corso del presente lavoro.

Il presente documento è sostanzialmente suddiviso in tre sezioni. Nella prima, dopo una presentazione del sistema di modelli, vengono analizzati dettagliatamente le procedure ed i programmi realizzati per l'elaborazione dei dati di *input* e di *output*. La seconda sezione è invece incentrata sull'applicazione del sistema di modelli RAMS-CALMET-CALPUFF nelle due aree di studio di Livorno e di Rosignano Marittimo, nelle due modalità *short-term* e *long-term*. Infine, in appendice è fornita una breve descrizione dell'interfaccia grafica dei modelli CALMET, CALPUFF e CALPOST, testata e configurata sul territorio in esame.

# 1. Presentazione del sistema integrato di modelli meteorodiffusionali

## 1.1 Sviluppo del sistema di modelli meteorodiffusionali

Presso il LaMMA è stato realizzato un sistema modellistico finalizzato alla valutazione dell'inquinamento atmosferico. Tale sistema è basato sull'implementazione della catena di modelli EPA CALMET, CALPUFF e CALGRID, e presenta lo schema riportato in Fig. 1.

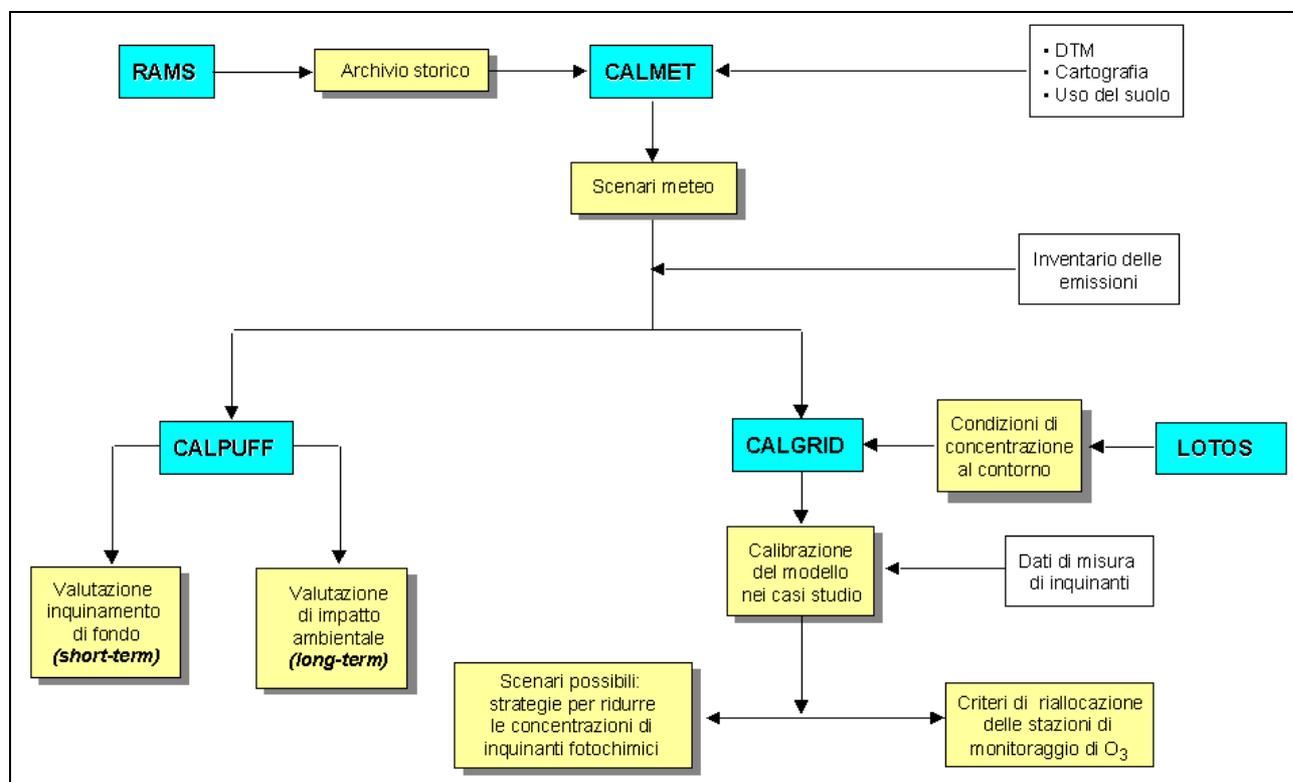


Fig. 1 - Schema del sistema integrato di modelli meteorodiffusionali RAMS-CALMET-CALPUFF/CALGRID.

Per la caratterizzazione dei parametri atmosferici è previsto l'utilizzo dei dati del modello meteorologico RAMS [4], elaborati quotidianamente e organizzati in uno specifico archivio a cura del LaMMA. I dati relativi alle emissioni delle sostanze inquinanti sono ottenuti dall'Inventario Regionale delle Sorgenti di Emissioni in aria ambiente (IRSE), messo a punto dalla Regione Toscana [9].

Il sistema integrato di modelli si propone per studiare in modo completo la diffusione di varie tipologie di inquinanti: il preprocessore CALMET [6] – opportunamente interfacciato in modo da riorganizzare i formati delle stime del

modello RAMS – dovrà fornire gli *input* meteorologici ai due modelli diffusionali, CALPUFF [7], indicato per gli inquinanti inerti (primari), e CALGRID [8], utilizzato per i fotochimici (secondari), ed in particolare per l'ozono.

Lo sviluppo e l'implementazione sull'intero territorio regionale del presente sistema di modelli e la sua integrazione con l'inventario IRSE, nonché la messa a punto dell'archivio di variabili meteorologiche estratte da RAMS, costituisce parte di una convenzione tuttora in essere tra LaMMA e Regione Toscana. Un primo risultato di tale convenzione, ha prodotto i documenti riportati in [1] e [2].

Il presente lavoro prevede lo studio dell'andamento di inquinanti inerti – o debolmente reattivi – per cui è stata utilizzata la catena di modelli RAMS-CALMET-CALPUFF: non verrà quindi illustrata la parte inerente a CALGRID, dato che la trattazione di inquinanti fotochimici esula dal presente incarico.

## **1.2 L'archivio meteorologico RAMS**

Il modello meteorologico RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*) è stato sviluppato a partire dagli anni '70 dalla *Colorado State University* e dalla *Mission Research Corporation-Aster Division* [4].

La scelta di utilizzare RAMS come modello meteorologico di *input* per i modelli diffusionali CALGRID e CALPUFF è giustificata dal fatto che si tratti di un modello a fisica completa (non idrostatico), in cui può essere descritta con notevole accuratezza la superficie terrestre, il che consente quindi una rappresentazione estremamente consistente della struttura dei bassi strati dell'atmosfera. Tale modello è utilizzabile sia in modalità prognostica che diagnostica.

RAMS è utilizzato in modo operativo presso il LaMMA per le previsioni meteorologiche regionali [5]. Quotidianamente, da tali previsioni vengono estratti i valori stimati delle variabili meteorologiche identificate come quelle di maggior interesse per i modelli diffusionali. Tali variabili vengono estratte nella forma di una serie di profili verticali, il che consente in definitiva di avere una descrizione tridimensionale delle caratteristiche dei bassi strati dell'atmosfera sull'intero territorio regionale. L'intervallo temporale con cui tali profili vengono forniti è di un'ora.

Questo archivio si propone come strumento di supporto per quei Soggetti, pubblici e privati, che svolgono valutazioni di impatto ambientale o studi climatologici sul territorio regionale. Il numero e il tipo di variabili meteorologiche archiviate, nonché le specifiche dei loro formati – e quindi l'architettura dell'archivio in senso lato – sono stati infatti pensati col preciso obiettivo di agevolare l'utilizzo di quei modelli diffusionali – come CALPUFF e CALGRID – che richiedono in ingresso un'accurata

descrizione dei campi meteorologici sull'intero dominio tridimensionale di studio, descrizione che diviene possibile solo qualora le specifiche dei formati siano quelle fornite da preprocessori meteorologici tipo CALMET.

È proprio in tal senso che si colloca la realizzazione dell'interfaccia tra le uscite dell'archivio RAMS e il preprocessore meteo CALMET: i dati dell'archivio RAMS risultano infatti predisposti per esser forniti in ingresso al preprocessore meteo CALMET, e quindi fornire l'inizializzazione meteorologica per i modelli CALPUFF e CALGRID.

Per una descrizione dettagliata delle principali caratteristiche dell'archivio RAMS si rimanda al documento in [1]. In essa vengono evidenziate le caratteristiche delle due differenti versioni dell'archivio che sono state fin qui realizzate: la prima versione – che è stata operativa dal 15 dicembre 2000 al 31 dicembre 2001 – è caratterizzata da una risoluzione spaziale di  $10 \times 10 \text{ Km}^2$  e da 9 livelli verticali, e fornisce i valori di 7 variabili meteo; la seconda – operativa a decorrere dal 1° gennaio 2002 – prevede una risoluzione spaziale di  $4 \times 4 \text{ Km}^2$  e 12 livelli verticali, fornendo i valori di 15 variabili meteo.

### **1.3 Il modello CALMET**

Per inizializzare CALMET possono essere utilizzati sia i dati delle variabili atmosferiche acquisite da stazioni a terra e dei radiosondaggi, sia le stime di profili verticali delle variabili ottenute da modelli meteorologici ad area limitata; nel caso in esame viene utilizzato il modello meteorologico RAMS.

Molto spesso non è tuttavia possibile reperire dati meteorologici adeguati, per l'assenza di stazioni nell'area o per la scarsa qualità dei dati rilevati: l'archivio delle variabili meteo ottenute da RAMS consente allora di ovviare a questo problema.

In realtà, come vedremo negli esempi di applicazione riportati nel capitolo 5, l'utilizzo di stime da modello rispetto a misure da stazione non compensa semplicemente l'eventuale mancanza di dati misurati, ma porta ad una migliore descrizione dei campi di vento e delle variabili legate alla turbolenza. Infatti, mentre il preprocessore meteo CALMET è un semplice interpolatore, il modello meteo RAMS stima con accuratezza i campi di vento e le variabili che caratterizzano la turbolenza con una buona copertura territoriale e soprattutto anche sulla dimensione verticale, fornendo le stime delle variabili come campi tridimensionali.

Un altro vantaggio della scelta di inizializzare CALMET con le variabili meteo ottenute da RAMS consiste nella possibilità di utilizzarlo sia in modalità diagnostica – cioè per realizzare scenari meteorologici riferiti a periodi temporali pregressi –, sia in

modalità prognostica – cioè per effettuare previsioni di variabili meteo (ad esempio direzione e intensità del vento) che influenzano in maniera determinante la diffusione degli inquinanti in atmosfera.

## **1.4 Il modello CALPUFF**

Il modello CALPUFF, indicato per applicazioni relative agli inquinanti inerti, è un modello a "puff" gaussiani, non stazionario, in grado di simulare il trasporto, la diffusione e la deposizione degli inquinanti inerti anche in presenza di orografia complessa e per calme di vento. Il modello risulta particolarmente versatile in quanto può operare a scale spaziali molto diverse (da pochi Km a centinaia di Km), sia per applicazioni di tipo *short-term* che *long-term*.

Per applicazioni *short-term*, vengono definiti dei casi di studio relativi ad alcuni giorni, rappresentativi di condizioni meteorologiche ricorrenti o particolarmente significative per le problematiche connesse alla diffusione degli inquinanti: in questo caso le stime di concentrazione degli inquinanti devono essere considerate come concentrazioni tipiche o peggiori, ma non come valori medi. Questo tipo di approccio può essere utilizzato sia per effettuare la calibrazione dei modelli – come nel nostro caso – sia per effettuare valutazioni di impatto ambientale di una o più sorgenti.

Nel caso in cui si renda necessario stimare valori di concentrazione medi su periodi temporali rappresentativi (ad es. un anno), è possibile applicare il CALPUFF in modalità *long-term*. Il modello può essere utilizzato, analogamente ad ISC, per valutazioni che riguardano le ricadute prodotte da sorgenti in un'area limitata, in presenza di differenti condizioni di turbolenza atmosferica; in questa modalità devono essere forniti in ingresso i dati meteorologici di una singola stazione (dati a terra e profili in quota). In molti casi, tuttavia, l'area di studio presenta una morfologia (orografia complessa, presenza del mare) tale da non poter essere rappresentata correttamente con una sola stazione meteorologica: in questo caso l'*input* meteo deve essere fornito da CALMET, in modo da avere una corretta rappresentazione meteorologica dell'area in esame. Le stime di concentrazione si ottengono come medie delle concentrazioni stimate per ogni ora della simulazione. In questa modalità è inoltre possibile tener conto anche di un numero elevato di sorgenti (fino a 100 camini), che emettono le sostanze inquinanti con variazione oraria. Questo tipo di approccio è molto gravoso da un punto di vista informatico, visto che gestisce una notevole mole di dati, ma in molti casi è l'unica alternativa possibile ad elaborazioni *short-term* su casi studio mirati.

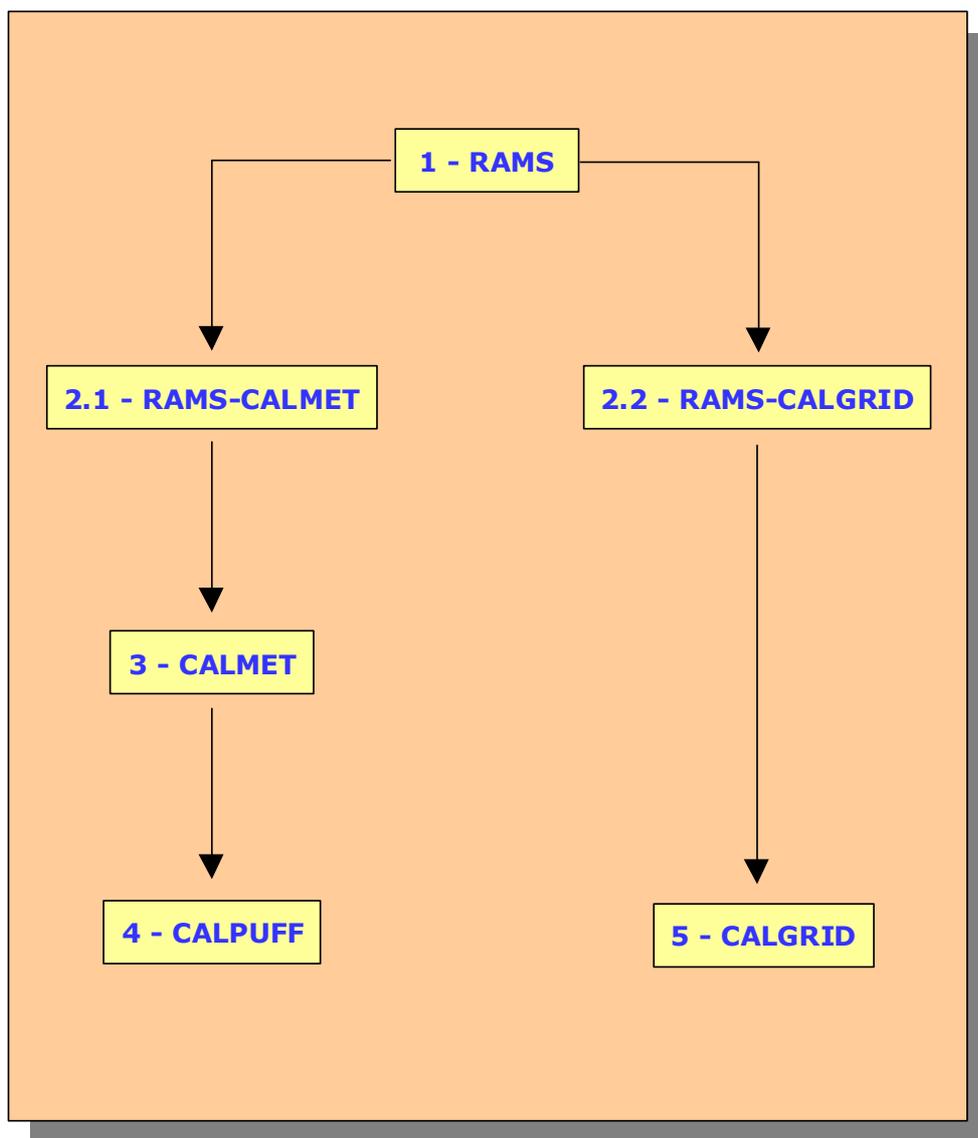
Il modello CALPUFF, oltre a trattare gli inquinanti come inerti, può trattare alcune reazioni chimiche attraverso due diversi meccanismi chimici: MESOPUFF-II, che riguarda reazioni che coinvolgono  $\text{NO}_x$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_4$  e ARM3/RIVAD, che tratta  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_4$ . Per ciascuno degli inquinanti modellizzati, vengono fornite sia le stime di concentrazione che i flussi di deposizione secca e umida. In definitiva si ottengono tre *file* binari, rispettivamente per le stime di concentrazione, dei flussi di deposizione secca e dei flussi di deposizione umida.

Attraverso il postprocessore CALPOST possono essere eseguite operazioni di estrazione di stime orarie, per un inquinante alla volta, di medie giornaliere, mensili o su di un numero di ore a piacere. Le stime di concentrazione (o di flusso di deposizione) vengono fornite sia in formato ASCII, sia in formato ".GRD", automaticamente visualizzabile dal programma di mappatura grafica SURFER [10].

## 2. Sviluppo dell'interfaccia RAMS-CALMET ed implementazione nel sistema del modello CALPUFF

### 2.1 Schema operativo del sistema integrato di modelli

Per implementare in termini informatici il sistema integrato di modelli meteorodiffusionali RAMS-CALMET-CALPUFF/CALGRID è necessario sviluppare lo schema operativo illustrato in Fig. 2.



**Fig. 2** - Schema operativo del sistema integrato di modelli meteorodiffusionali RAMS-CALMET-CALPUFF/CALGRID.

Tale schema si compone di una serie di specifiche unità funzionali – o blocchi –, tra di loro interconnesse secondo una precisa logica sequenziale, finalizzata ad implementare in termini informatici il diagramma a blocchi generale del sistema di modelli illustrato in Fig. 1.

Ognuna di tali unità funzionali è costituita da specifiche *routine* di calcolo – o moduli – preposte all'esecuzione di tutte le operazioni necessarie, secondo la logica *input/output*. Tali *routine* sono scritte in linguaggio FORTRAN, e si interfacciano quindi perfettamente con i codici di calcolo originari dei modelli EPA CALMET, CALPUFF e CALGRID, anch'essi scritti in linguaggio FORTRAN. Per ognuna di tali unità funzionali sono inoltre previsti degli specifici *file* di controllo, da compilare prima di eseguire ogni singolo *run*, attraverso i quali è possibile immettere tutti i principali parametri d'esecuzione, e quindi gestire la singola sessione di lavoro.

In particolare, a partire dai dati dell'archivio RAMS, all'interno del sistema è prevista la realizzazione *ex-novo* di due specifiche interfacce, la prima (RAMS-CALMET) finalizzata all'utilizzo del modello CALPUFF e la seconda (RAMS-CALGRID) all'utilizzo del modello CALGRID.

Nell'ambito della presente attività di lavoro, l'attenzione sarà espressamente incentrata sull'interfaccia RAMS-CALMET, e più precisamente sulle unità funzionali **"1-RAMS"**, **"2.1-RAMS-CALMET"** e **"3-CALMET"**. La loro esecuzione in sequenza permette l'estrazione dei dati dall'archivio RAMS (unità **"1-RAMS"**), la loro riformattazione nei formati richiesti da CALMET (unità **"2.1-RAMS-CALMET"**) e in ultimo la loro rappresentazione grafica sul territorio in termini di campi meteo continui (unità **"3-CALMET"**), creando al tempo stesso l'inizializzazione meteorologica per la successiva esecuzione dei modelli diffusionali CALPUFF e CALGRID.

### 2.2 Funzionamento dell'unità **"1 - RAMS"**

L'unità **"1-RAMS"** rappresenta il primo elemento funzionale della catena operativa che costituisce il sistema integrato di modelli (Fig. 3).

Scopo dell'unità **"1-RAMS"** è quello di effettuare l'estrazione dall'archivio RAMS di tutte le informazioni meteorologiche necessarie in ingresso al modello CALMET. E' necessario preliminarmente sia scegliere quale versione dell'archivio RAMS utilizzare, che specificare se si intende in seguito utilizzare CALMET+CALPUFF oppure il solo CALGRID *by-passando* CALMET. In definitiva, l'unità **"1-RAMS"** effettua il "ritaglio" dall'archivio RAMS dei sottodomini spaziale e temporale prescelti, aggregando le informazioni stazione per stazione e giorno per giorno in *file* meteo singoli.

Di seguito è riportato lo schema dettagliato dell'unità "1-RAMS".

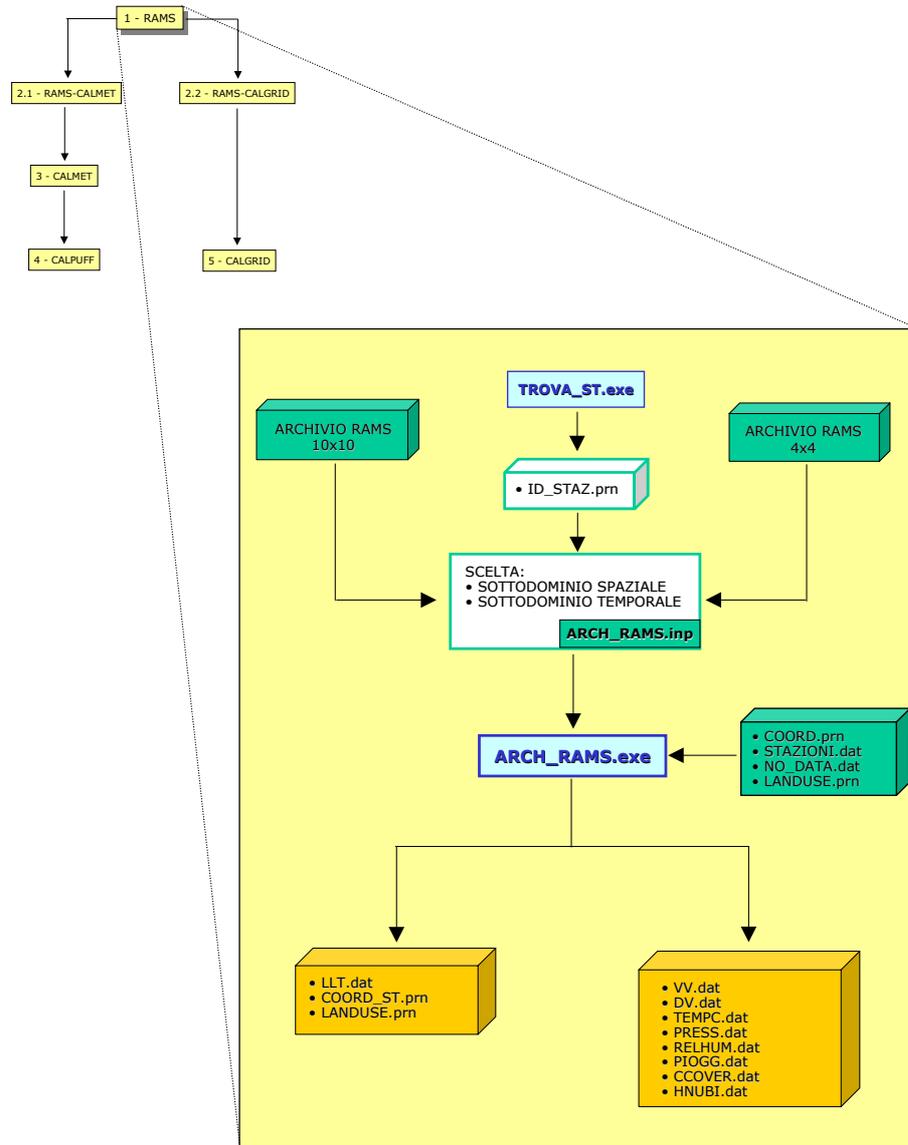


Fig. 3 - Schema operativo di dettaglio dell'unità "1-RAMS".

### 2.3 Funzionamento dell'unità "2.1 - RAMS-CALMET"

L'unità "2.1 - RAMS-CALMET" rappresenta in termini informatici la vera e propria interfaccia tra il modello RAMS e il modello CALMET: essa infatti deve essere eseguita a valle dell'unità "1-RAMS" e prima dell'unità "3-CALMET". Più precisamente, una volta estratti i profili meteo dall'archivio RAMS ed effettuato il "ritaglio" dei sottodomini spaziale e temporale prescelti (attraverso "1-RAMS"), tale unità predispone queste informazioni nei formati richiesti in ingresso da CALMET. Tali

informazioni sono riassumibili in due gruppi di *file*: quelli descrittivi del territorio e quelli meteorologici.

Nella catena operativa del sistema integrato di modelli, l'unità "2.1 - RAMS-CALMET" occupa la posizione funzionale illustrata in Fig. 2; successivamente è riportato lo schema dettagliato di questa unità.

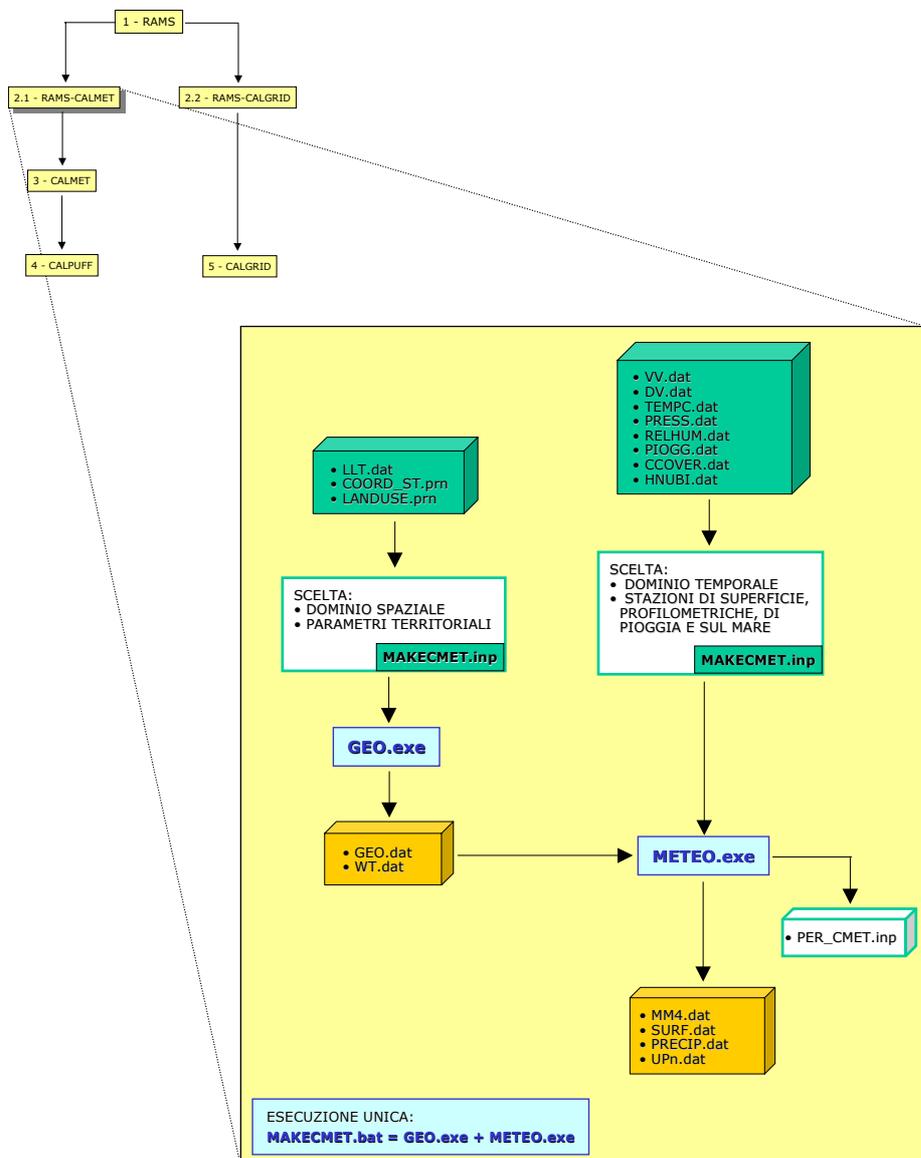


Fig. 4- Schema operativo di dettaglio dell'unità "2.1 - RAMS-CALMET".

## 2.4 Funzionamento dell'unità "3 - CALMET"

L'unità "3 - CALMET" consente l'esecuzione del modello CALMET in accordo con le specifiche di applicazione proprie di tale modello. Una volta preparati i *file* di *input*

richiesti da CALMET attraverso l'unità "1 - RAMS", essa produce infatti in uscita il file **CALMET.dat** nel formato binario *standard* dei file tipo "CALMET.dat".

Nella catena operativa del sistema integrato di modelli, l'unità "3 - CALMET" occupa la posizione funzionale illustrata in Fig. 2; di seguito lo schema dettagliato.

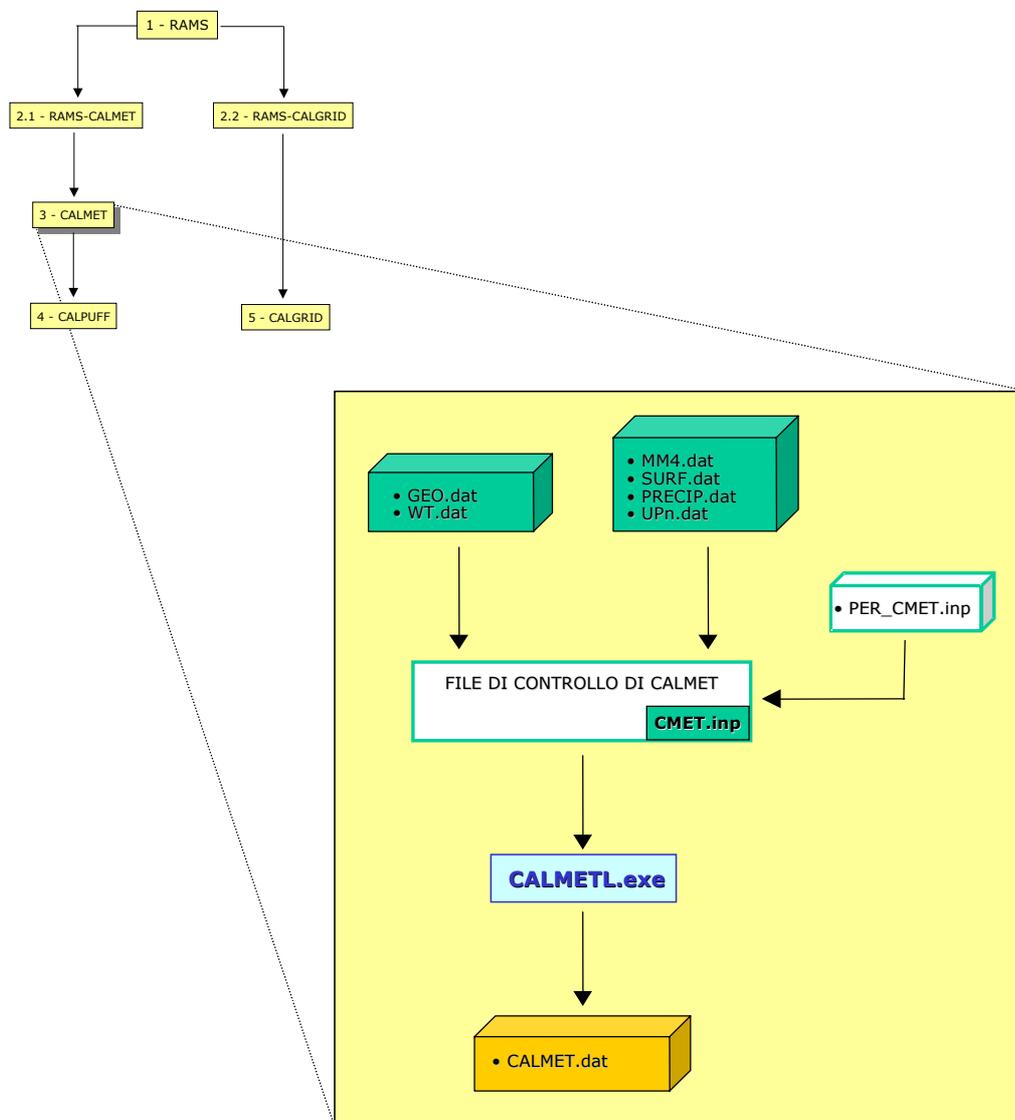


Fig. 5 - Schema operativo di dettaglio dell'unità "3 - CALMET".

## 2.5 Integrazione del modello CALPUFF

Dopo aver completato l'interfaccia RAMS-CALMET, attraverso lo sviluppo delle unità funzionali "1-RAMS", "2.1-RAMS-CALMET" e "3-CALMET", il passo successivo è stato quello di implementare all'interno del sistema il modello CALPUFF. L'integrazione di CALPUFF, in accordo con lo schema illustrato in Fig. 1, rappresenta il

passo conclusivo per il completamento del percorso operativo RAMS-CALMET-CALPUFF. In termini di unità funzionali (Fig. 2), tutto ciò si è tradotto nello sviluppo dell'unità "4 - CALPUFF", con la quale ha termine l'intero percorso "1-RAMS" → "2.1-RAMS-CALMET" → "3-CALMET" → "4-CALPUFF".

## 2.6 Funzionamento dell'unità "4 - CALPUFF"

L'unità funzionale "4 - CALPUFF" consente l'esecuzione del modello CALPUFF in accordo con le specifiche di applicazione proprie di tale modello.

L'unità "4 - CALPUFF" va eseguita in sequenza all'unità "3 - CALMET", da cui riceve in ingresso il file **CALMET.dat**. Una specifica sezione dell'unità "4 - CALPUFF" è dedicata alla preparazione dei file di *input* per CALPUFF relativi alle emissioni.

Di seguito è riportato lo schema dettagliato dell'unità "4 - CALPUFF".

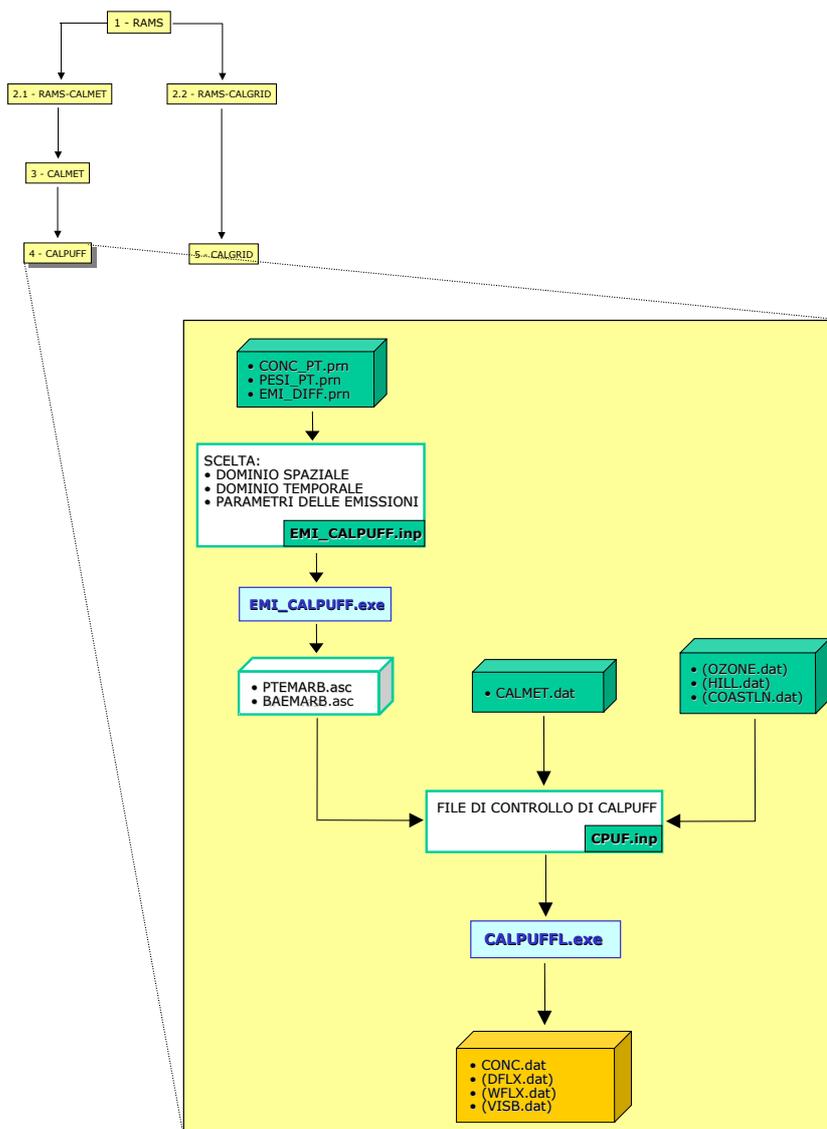


Fig. 6 - Schema operativo di dettaglio dell'unità "4 - CALPUFF".

### 3. Applicazione della filiera di modelli RAMS-CALMET-CALPUFF nell'area della provincia di Livorno

In questo capitolo sono illustrati i principali risultati ottenuti nell'applicazione dei modelli RAMS-CALMET-CALPUFF nelle aree di Livorno e Rosignano: in particolare, sono presentate le modalità di configurazione della filiera dei modelli sia per il caso-studio *short-term* che per quello *long-term*, ed illustrati i risultati ottenuti, attraverso mappe georeferenziate che rappresentano l'andamento orario del vento e delle concentrazioni degli inquinanti in esame, nonché i valori medi di tali concentrazioni, ottenuti dall'applicazione *long-term*.

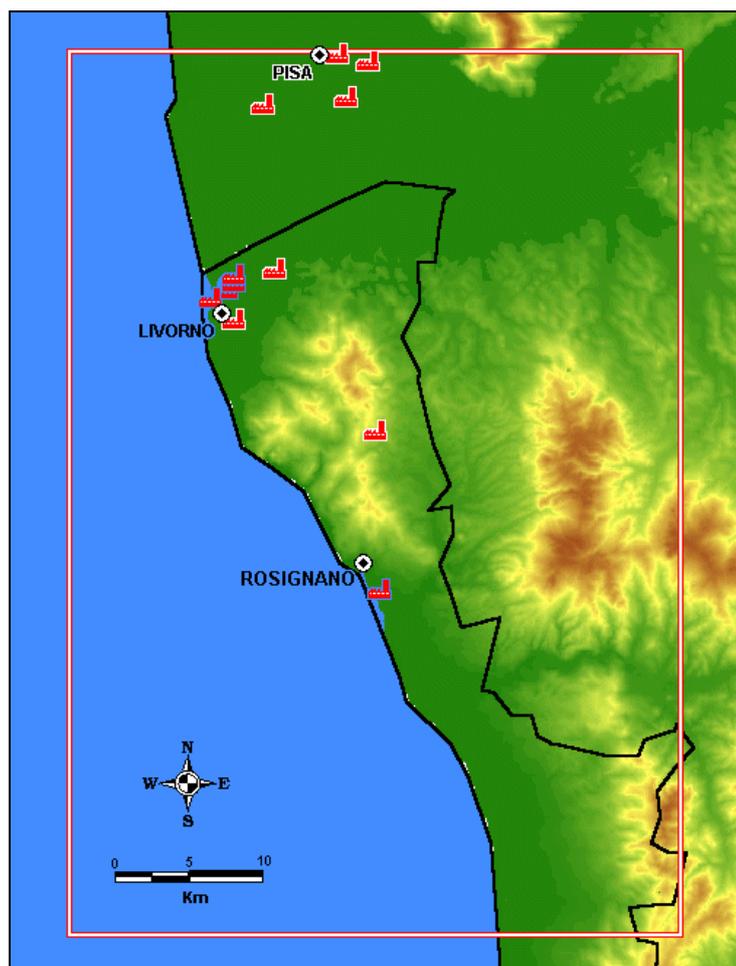
In prima battuta, è stato esaminato un periodo temporale limitato, compreso tra il 23 ed il 28 febbraio 2002. Tale modalità *short-term* è stata utilizzata per configurare i modelli CALMET e CALPUFF in modo da riprodurre nella maniera migliore sia i campi meteo che le concentrazioni degli inquinanti, in quest'ultimo caso comparando anche i tre diversi approcci chimici implementati all'interno di CALPUFF: trattazione degli inquinanti come inerti, utilizzazione del meccanismo MESOPUFF2, oppure del meccanismo ARM3/RIVAD.

Una volta individuata la configurazione migliore, il sistema di modelli è stato applicato per un periodo di tre mesi, dal 1° febbraio al 30 aprile 2002: sono stati stimati, per ciascuno degli inquinanti in esame e per i tre approcci chimici disponibili, i valori di concentrazione media su tre mesi, valori medi ottenuti processando le 2136 ore della simulazione e facendo la media dei valori di concentrazione orari. Trattandosi di un procedimento piuttosto gravoso, i dettagli di questa applicazione verranno discussi di seguito in uno specifico paragrafo.

#### 3.1 Dominio di studio

La convenzione prevede lo studio delle concentrazioni di inquinanti emessi dalle principali sorgenti industriali nelle aree di Livorno e Rosignano: dal momento che le ricadute delle sostanze in questione – come si è potuto appurare in un precedente studio incentrato sulle aree di Livorno e Piombino [11] – coinvolgono porzioni di territorio decisamente superiori a quelle occupate dai due centri urbani, il dominio spaziale scelto per la presente applicazione è costituito da un'area rettangolare di 60x40 km<sup>2</sup> centrato sulla provincia di Livorno e comprendente i due centri urbani oggetto di studio, nonché una porzione di territorio della provincia di Pisa, come illustrato in figura 7.

Nella mappa riportata in figura 7, oltre ai centri urbani di Livorno, Rosignano e Pisa – al confine nord del dominio – sono rappresentati i principali stabilimenti industriali. Le informazioni relative alle caratteristiche dei camini, alle quote emesse dai vari stabilimenti, ed alla loro disaggregazione temporale – informazioni indispensabili per il funzionamento di CALPUFF – sono state ottenute dall'inventario IRSE della Regione Toscana. In particolare, i dati utilizzati sono quelli relativi alle grandi sorgenti industriali, aggiornati all'anno 2000.



**Fig. 7** – Mappa geografica dell'area di studio della provincia di Livorno.

## 3.2 Applicazione dei modelli RAMS-CALMET nell'area di studio

All'interno del dominio spaziale di  $60 \times 40 \text{ km}^2$ , costituito da un grigliato di passo 4 km di  $15 \times 10$  celle, ricadono 150 stazioni virtuali dell'archivio RAMS.

Secondo i procedimenti descritti nel capitolo 2, sono stati creati i *file* di *input* per CALMET, sia per quanto riguarda i dati geofisici che quelli meteorologici. In particolare, utilizzando le stime del modello RAMS, sono stati costruiti per CALMET il

*file* delle variabili meteo generalmente rilevate da stazioni a terra (SURF.dat), quelli delle stazioni profilometriche (UPn.dat), e infine il *file* del campo tridimensionale di vento e temperatura (MM4.dat), che deve essere fornito da un modello prognostico a scala regionale, come MM4 o – nel caso in esame - RAMS.

E' da sottolineare che l'utilizzo del *file* con i campi 3-D di vento e temperatura apporta un notevole miglioramento rispetto alla configurazione che prevede solo l'uso delle stazioni a terra e dei profili, in quanto queste non ricoprono per intero il grigliato di calcolo come fa invece il *file* MM4.dat; in tal caso, infatti, per effettuare la ricostruzione dei campi 3-D CALMET opera come un mero interpolatore, aggiungendo incertezze alle variabili stimate da RAMS. A livello internazionale sono note esperienze in cui sono stati utilizzati i campi prodotti dal modello meteo MM4 – infatti esiste un apposito preprocessore per costruire il *file* di *input* a CALMET MM4.dat -, mentre non siamo a conoscenza di altre esperienze che utilizzano il modello RAMS, ed in questo senso l'elaborazione di una apposita interfaccia RAMS-CALMET rappresenta un risultato decisamente innovativo.

La configurazione di CALMET sul territorio è stata effettuata scegliendo i numerosi parametri da impostare in modo da minimizzare, su tutti i punti del grigliato e per tutte le ore di simulazione, le differenze tra le stime RAMS e le stime di CALMET; in questo modo CALMET è stato utilizzato unicamente come formattatore e non come modello di interpolazione, che in questo caso non è necessaria, visto che il grigliato di calcolo coincide con il grigliato dei dati di *input*.

La corretta ricostruzione dei campi di vento, come dei parametri legati a fenomeni di turbolenza e la stima dell'altezza di rimescolamento sono fondamentali per la stima della concentrazione di inquinanti in atmosfera: la corretta configurazione di CALMET rappresenta il primo sostanziale risultato della presente applicazione.

### **3.3 Applicazione del modello CALPUFF nell'area di studio**

Per la configurazione di CALPUFF, oltre all'*input* meteo ottenuto da CALMET, è necessario fornire un *file* relativo alle emissioni: per questo caso-studio sono state prese in esame le emissioni dovute alle principali sorgenti industriali presenti all'interno del dominio, schematizzabili come sorgenti puntuali [9]. CALPUFF è in grado di gestire emissioni derivanti da un numero massimo di 100 camini, caratterizzati da un rateo di emissione con variazione oraria. Come si è visto nel capitolo 2, è stata realizzata un'apposita procedura per la creazione del *file* di emissione nei formati richiesti da CALPUFF, procedura che costituisce una sorta di

interfaccia tra l'inventario delle emissioni IRSE – segnatamente alle sorgenti puntuali – ed il sistema di modelli.

Per l'applicazione relativa al presente caso-studio sono stati presi in esame 59 camini: si tratta di tutti i camini, presenti nell'inventario IRSE e collocati all'interno del dominio di studio, che emettono almeno uno dei tre inquinanti: SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e PM<sub>10</sub>. Quest'ultimo inquinante, non direttamente richiesto nella presente convenzione, è stato comunque modellizzato, per valutare le prestazioni del modello. In effetti, con CALPUFF è possibile trattare le polveri fini come inerti, con la possibilità di effettuare una separazione in più frazioni, in base alle dimensioni medie del particolato – es. PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub> – a patto che siano note le relative quote di emissione. Nel nostro caso, tuttavia, non essendo a disposizione informazioni aggiuntive, l'inquinante è stato inserito solo per valutare la possibilità di trattare, in un solo *run*, più sostanze contemporaneamente.

Una volta messi a punto i principali *file* di *input*, sono stati effettuati alcuni *run* di prova, sia per determinare l'assetto migliore dei vari parametri da impostare nel *file* di controllo di CALPUFF, che per confrontare le stime orarie ottenute con i tre diversi meccanismi chimici (trattazione degli inquinanti come inerti, utilizzando il meccanismo MESOPUFF2, oppure attraverso il meccanismo ARM3/RIVAD).

Da segnalare che nell'intervallo temporale individuato, per effettuare la configurazione non erano presenti precipitazioni; per quanto riguarda l'applicazione long-term, in conformità con la configurazione individuata, non sono stati considerati gli episodi di pioggia. Il sistema CALMET-CALPUFF, in linea di principio, è in grado di effettuare simulazioni in presenza di pioggia, ma la configurazione è alquanto complessa, soprattutto per la scelta del tipo di dati da utilizzare – misure di pluviometri o stime da modello – in quanto si tratta, in entrambi i casi, di dati affetti da notevoli incertezze.

### **3.4 Modalità *long-term***

Dopo aver effettuato la configurazione nell'area in esame, il sistema di modelli è stato messo a punto per realizzare applicazioni in modalità *long-term*: in particolare, è stato preso in esame un periodo di tre mesi, compreso tra il 1° febbraio 2002 e il 30 aprile 2002.

Le principali difficoltà incontrate sono state essenzialmente due: la modalità di trattamento dei dati meteo mancanti e la notevole dimensione dei *file* di *input/output*.

Nel caso in cui il preprocessore CALMET incontri dei dati mancanti in alcune stazioni, compensa interpolando i dati presenti nelle altre stazioni, oppure interpola

tra i dati registrati nelle ore precedenti e successive: nel nostro caso, tuttavia, i dati mancanti si presentano contemporaneamente in tutte le stazioni e per 24 ore, visto che questo corrisponde a situazioni – peraltro piuttosto rare – in cui il modello RAMS non esegue il *run* giornaliero. In queste condizioni CALMET si blocca, oppure “salta” i giorni mancanti attribuendo al giorno successivo la data del giorno mancante: anche questa seconda situazione si presenta inaccettabile, visto che, oltretutto, provoca un disallineamento con il *file* delle emissioni orarie. La soluzione è stata quella di duplicare, nei giorni mancanti, i dati relativi al giorno immediatamente precedente, confidando che questa manipolazione non influisca in maniera importante nella stima delle concentrazioni *long-term*, visto che i dati mancanti sono una percentuale molto bassa rispetto al totale.

Per quanto riguarda la dimensione dei *file* di *input/output* ed i relativi tempi di calcolo, si deve considerare che l'esecuzione della modalità *long-term*, su un dominio di medie dimensioni, caratterizzato da un grigliato di calcolo di 10x15 punti su 12 livelli verticali (quindi in totale da 150x12 punti-RAMS) risulta particolarmente onerosa. Nel caso in esame, i tempi esecuzione per preparare i *file* di *input* per CALMET hanno richiesto alcune ore, il *run* di CALMET solo 15 minuti, con la creazione del *file* binario di *output* (CALMET.dat) pari a 70 MB; per contro, l'esecuzione di CALPUFF ha richiesto 3 ore per ciascuno dei due *run* eseguiti, uno in modalità inerte per SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, l'altro per la modalità MESOPUFF2 per SO<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, HNO<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub>, producendo dei *file* di *output* di 25 MB ciascuno. I tempi di calcolo sono da riferire ad un PC con processore Intel PENTIUM II con 400 MHz di frequenza e 128 MB di RAM.

## **3.5 Risultati delle simulazioni**

### **3.5.1 Analisi dei risultati di CALMET**

Verranno ora presentati i risultati ottenuti nei due casi-studio effettuati con il modello CALMET, per il periodo di tempo, rispettivamente, di 144 ore corrispondente ai giorni 23-28 febbraio 2002, e di 2136 ore corrispondenti ai mesi di febbraio, marzo e aprile 2002.

Come già evidenziato, il primo caso-studio è stato utilizzato per configurare CALMET in modo da minimizzare le differenze con le stime di RAMS: per questo sono state effettuate numerose prove, in modo da ottenere un'analisi di sensibilità rispetto ai numerosi parametri che possono essere modificati per ottenere simulazioni affidabili. Dato che il confronto è stato effettuato per ciascuna delle 144 ore della simulazione, per i 150 recettori del dominio e per ciascuna delle prove corrispondenti

alla modifica di un singolo parametro, è stata elaborata una apposita procedura automatica, da cui si ottengono indicatori statistici per valutare quale configurazione risulta migliore.

Si è ritenuto opportuno effettuare il confronto tra le stime di CALMET e di RAMS, assumendo queste ultime come valori corretti di riferimento, in quanto lo scopo della calibrazione era quello di lasciare inalterati i dati di ingresso, essendo la stessa la scala spaziale dei due modelli, in modo da non aggiungere eventuali incertezze apportate da CALMET.

In questo caso, i dati rilevati da stazioni a terra non sono stati utilizzati per inizializzare CALMET, essendo insufficiente la copertura territoriale e mancando inoltre i dati profilometrici: non avrebbe quindi avuto senso effettuare una calibrazione prendendo questi dati come riferimento. Viceversa, i dati di stazioni a terra vengono utilizzati in fase di validazione del modello RAMS, in modo da apportare modifiche alla configurazione del modello, ma si tratta di operazioni che vengono effettuate sull'intero territorio regionale, e che esulano dal presente lavoro.

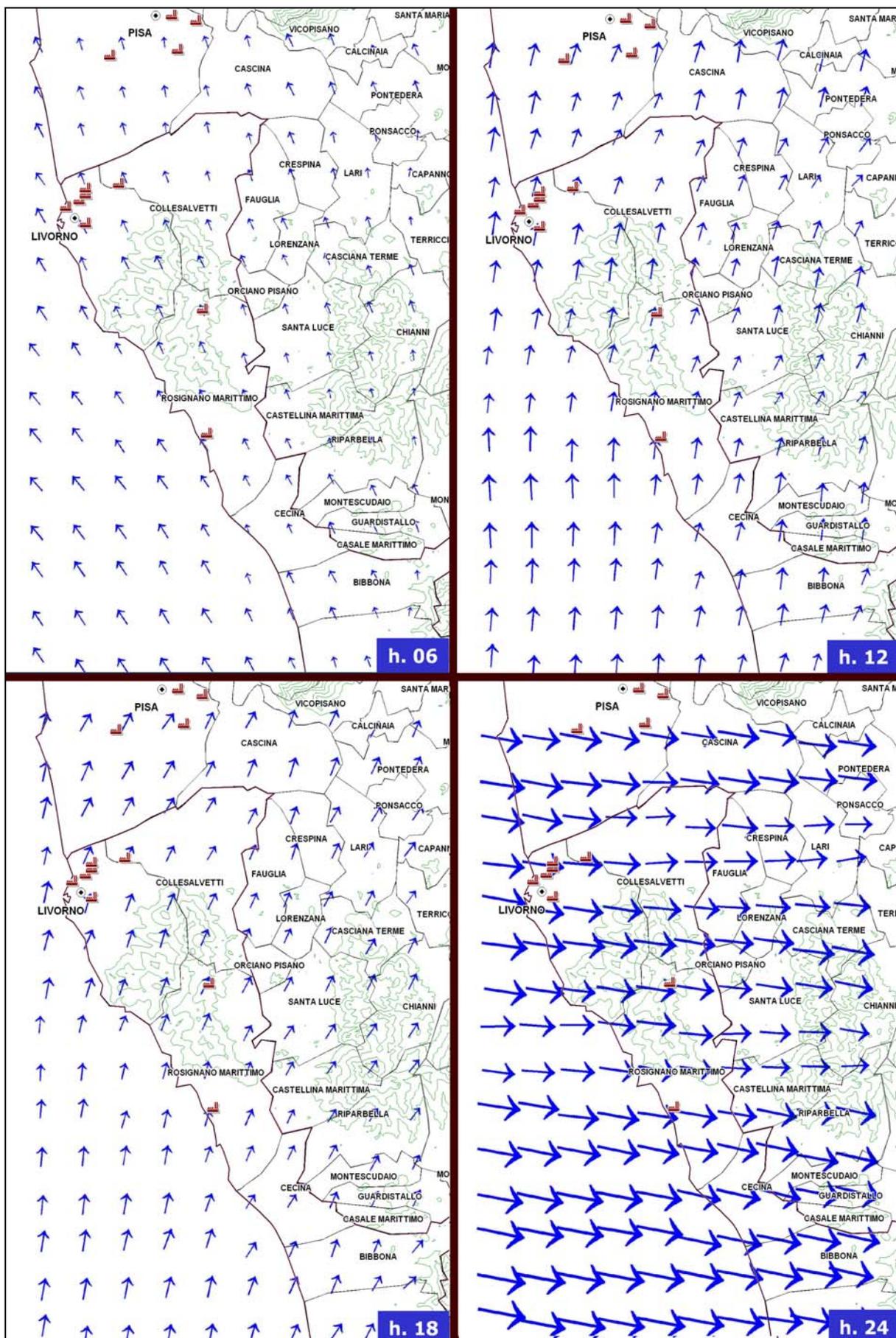
In linea di principio, è possibile estrarre dal file di *output*, CALMET.dat, valori orari, per ciascuna delle 2136 ore di simulazione, dei campi di vento, di temperatura, umidità, su 12 quote, e di altre variabili unidimensionali, quali l'altezza di rimescolamento, la classe di stabilità atmosferica etc. Queste variabili, grazie al post-processore PRTMET [6] ed al visualizzatore grafico SURFER, possono essere elaborate, in modo da ottenere mappe territoriali - utilizzando a tale scopo il *software* GIS MAPINFO [12] - che evidenziano i campi ottenuti.

Si tratta comunque di procedure laboriose, che non sono state automatizzate e che quindi vengono messe in atto se si ritiene opportuno affiancare alle stime delle concentrazioni informazioni meteorologiche aggiuntive.

A titolo di esempio, sono riportate in figura 8 le mappe di vento superficiale relative alle ore 6, 12, 18, 24 del giorno 23 febbraio 2002.

Si può notare come il vento cambi direzione ed intensità nell'arco della giornata, da un regime caratterizzato da venti deboli di direzione SSE nelle prime ore della mattina, a venti moderati da SUD dalle 12 fino al tardo pomeriggio, fino a regimi di vento decisamente più sostenuto, di direzione OVEST, nella notte.

### 3. Applicazione della filiera di modelli RAMS-CALMET-CALPUFF nell'area della provincia di Livorno



**Fig. 8** – Stime dei campi di vento superficiale ottenute da RAMS-CALMET, relative al giorno 23/02/2002 (hh. 06, 12, 18, 24).

### 3.5.2 Analisi dei risultati di CALPUFF

Una volta determinata la configurazione ottimale per CALMET, il caso-studio relativo a 144 ore è stato utilizzato per effettuare *run* comparativi in modo da ottenere un'analisi di sensibilità anche per il modello CALMET.

In particolare, l'attenzione è stata incentrata sulle differenze di concentrazione delle sostanze in esame, SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, che si ottengono applicando la modalità che tratta questi inquinanti come inerti o come debolmente reattivi, e quindi sfruttando i due diversi meccanismi chimici implementati nel modello, MESOPUFF2 e ARM3/RIVAD.

Anche in questo caso, i risultati dei diversi *run* sono stati confrontati, analizzando sia i valori di concentrazione orari, sia i valori medi. In sintesi, i risultati ottenuti si possono riassumere come segue:

- Non ci sono sostanziali differenze tra le stime di concentrazione di SO<sub>2</sub> come inerte, rispetto alle stime ottenute utilizzando i meccanismi chimici MESOPUFF2 e ARM3/RIVAD: in entrambi i casi la concentrazione di SO<sub>4</sub> risulta molto bassa. Questo risultato era prevedibile, considerando che nel periodo in esame non erano presenti precipitazioni, e quindi non si sono verificati fenomeni di dilavamento.
- Per quanto invece riguarda gli ossidi di azoto, la differenza tra la modalità inerte e le altre due che prevedono anche la stima di HNO<sub>3</sub> e NO<sub>3</sub> è più marcata, sia nella stima delle concentrazioni medie su 6 giorni, sia nelle stime orarie, fin dalle prime ore.
- Dal confronto diretto tra i meccanismi chimici MESOPUFF2 e ARM3/RIVAD risulta che non ci sono praticamente differenze per le stime degli ossidi di zolfo, mentre per quanto riguarda gli ossidi di azoto, l'unica differenza rimarcabile deriva esclusivamente dal fatto che il primo meccanismo tratta la somma di NO e NO<sub>2</sub>, e cioè NO<sub>x</sub>, mentre il secondo meccanismo li tratta separatamente.

Terminate le operazioni di configurazione, il sistema di modelli RAMS-CALMET-CALPUFF ha eseguito, per il periodo temporale compreso tra il 1° febbraio ed il 30 aprile, tre *run* relativi alle tre diverse modalità di trattamento degli inquinanti, fornendo per ciascuno di questi sia il file relativo alle concentrazioni che quello relativo alla deposizione secca. Nella modalità di trattazione degli inquinanti, sono state elaborate anche le stime di concentrazione del PM<sub>10</sub>.

Si capisce che la mole di informazioni che possono essere estratte al termine del presente caso-studio è notevole: per ciascuna delle 2316 ore è possibile ottenere i

valori di concentrazione di SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub> su 12 quote verticali, nonché i valori di deposizione secca. Inoltre, sfruttando i *run* che hanno utilizzato i due meccanismi chimici, è possibile stimare i valori di concentrazione e deposizione di SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub> e NO<sub>3</sub>.

Come per CALMET, questi valori possono essere elaborati in modo da essere visualizzati come mappe territoriali di isoconcentrazione dei diversi inquinanti.

A titolo di esempio, di seguito sono riportate le mappe georeferenziate relative alle concentrazioni superficiali di NO<sub>x</sub> – ottenute nella modalità che prevede la trattazione degli inquinanti come inerti – per la giornata del 23 febbraio 2002 (Figg. 9 e 10). Nelle mappe sono riportati anche i campi di vento superficiale.

Nella notte, in presenza di vento debole, le concentrazioni di inquinante sono molto basse – tra 2 e 15 µg/m<sup>3</sup>– ma anche molto estese e spostate rispetto alle sorgenti emmissive, segno evidente che si tratta di concentrazioni trasportate nelle ore precedenti. Successivamente, alle ore 6, il moderato vento superficiale proviene da SSE, mentre i pennacchi di concentrazione assumono una forma allungata in direzione NE, come se il vento provenisse da SO: l'apparente contraddizione si spiega probabilmente con il fatto che alcuni dei camini emettono i fumi a quote elevate - anche superiori a 100 m - e che quindi i pennacchi risentono non tanto del vento superficiale, quanto di quello in quota e, conseguentemente, anche le ricadute al suolo ne sono influenzate. Nelle ore successive, invece, a mano a mano che il vento si intensifica, la direzione del vento superficiale e la forma assunta dalle concentrazioni concordano maggiormente.

Questo esempio può far riflettere sull'importanza di effettuare una buona ricostruzione dei campi di vento anche e soprattutto in termini di vento in quota, in quanto, in molti casi, la sola conoscenza del vento superficiale, ottenuta spazializzando i soli dati da stazioni a terra, può non essere sufficiente a garantire una buona ricostruzione dei campi meteorologici tridimensionali e può quindi portare a conclusioni errate circa la distribuzione della concentrazione di inquinante al suolo.

3. Applicazione della filiera di modelli RAMS-CALMET-CALPUFF nell'area della provincia di Livorno

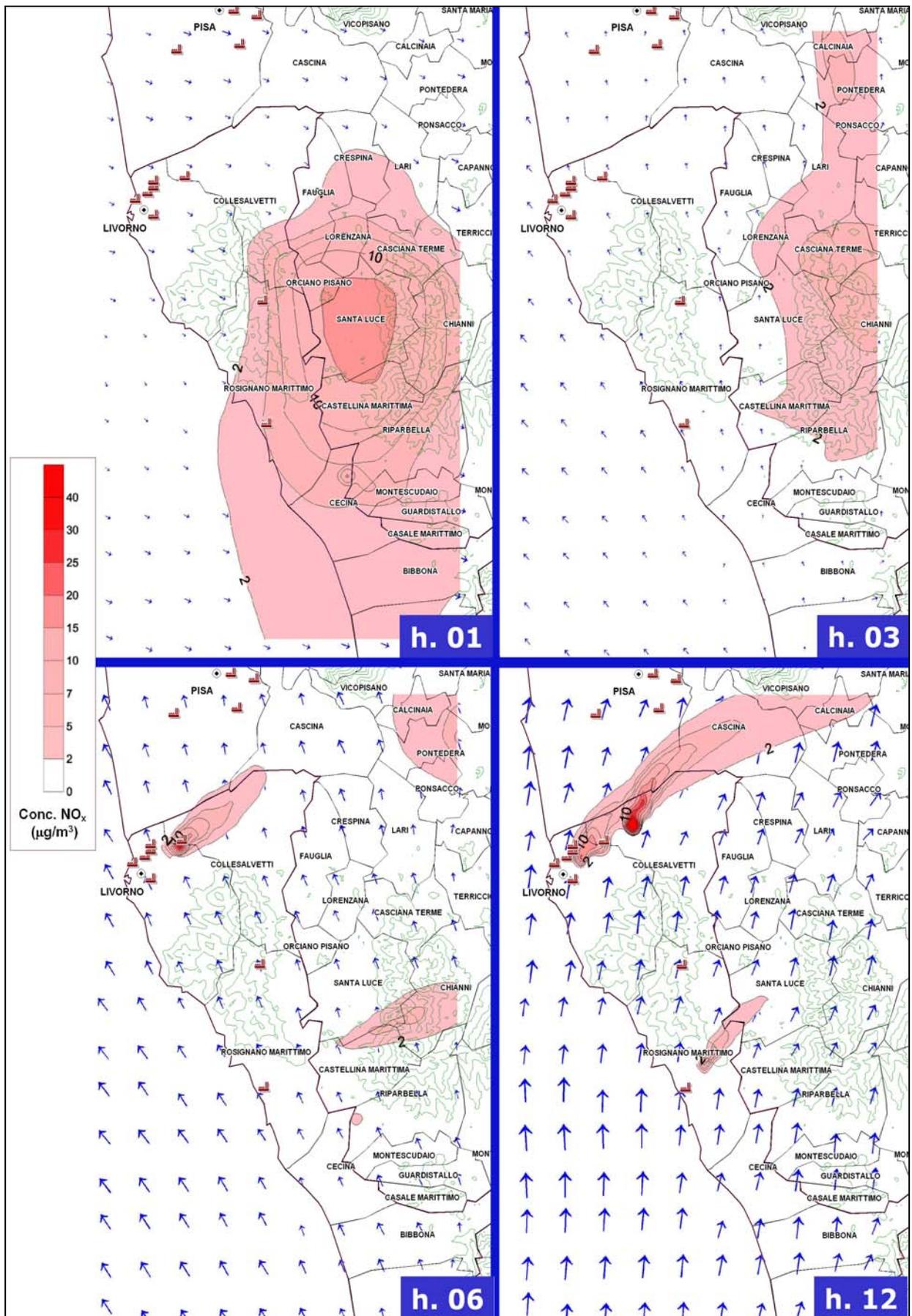


Fig. 9 – Stime dei campi di vento superficiale ottenute da RAMS-CALMET e delle concentrazioni ottenute da CALPUFF relative al giorno 23/02/2002 (hh. 01, 03, 06, 12).

3. Applicazione della filiera di modelli RAMS-CALMET-CALPUFF nell'area della provincia di Livorno

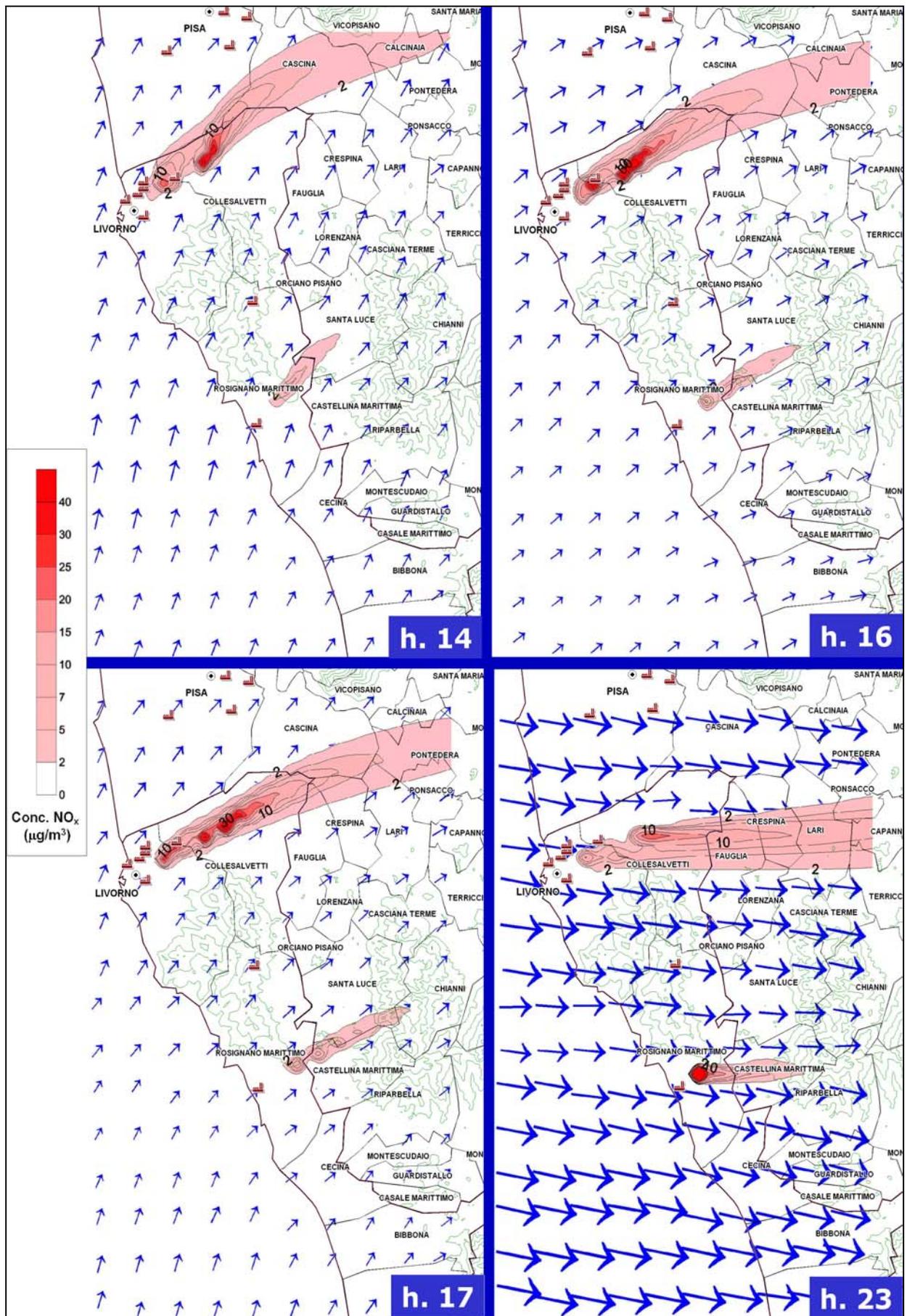
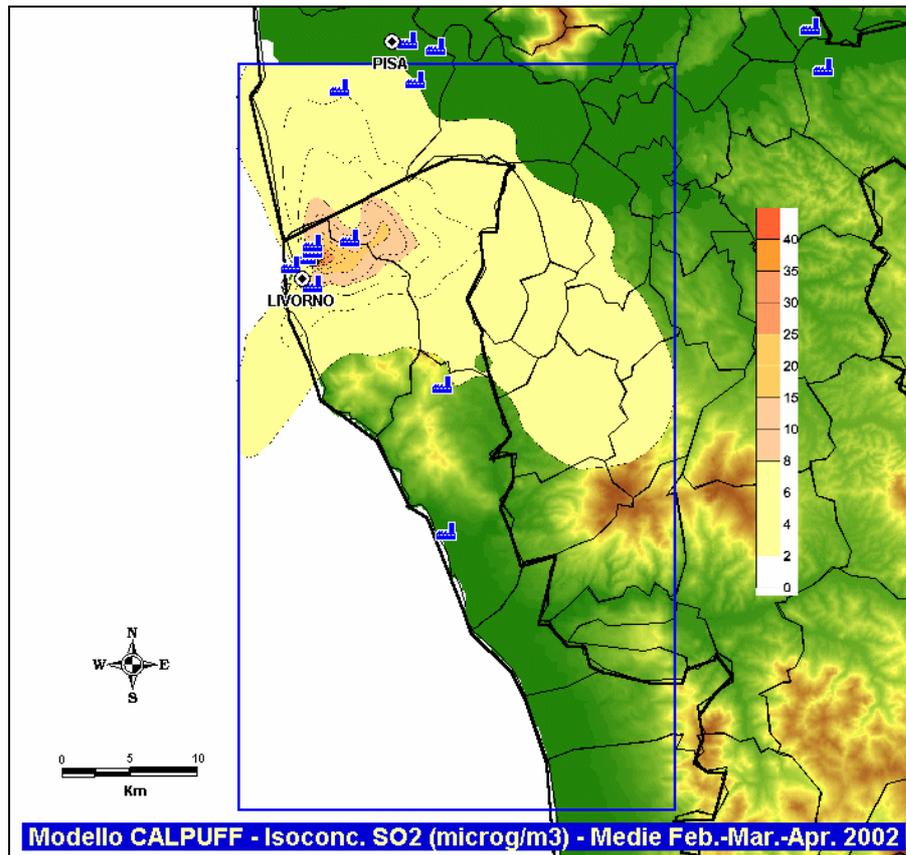


Fig. 10 – Stime dei campi di vento superficiale ottenute da RAMS-CALMET e delle concentrazioni ottenute da CALPUFF relative al giorno 23/02/2002 (hh. 14, 16, 17, 23).

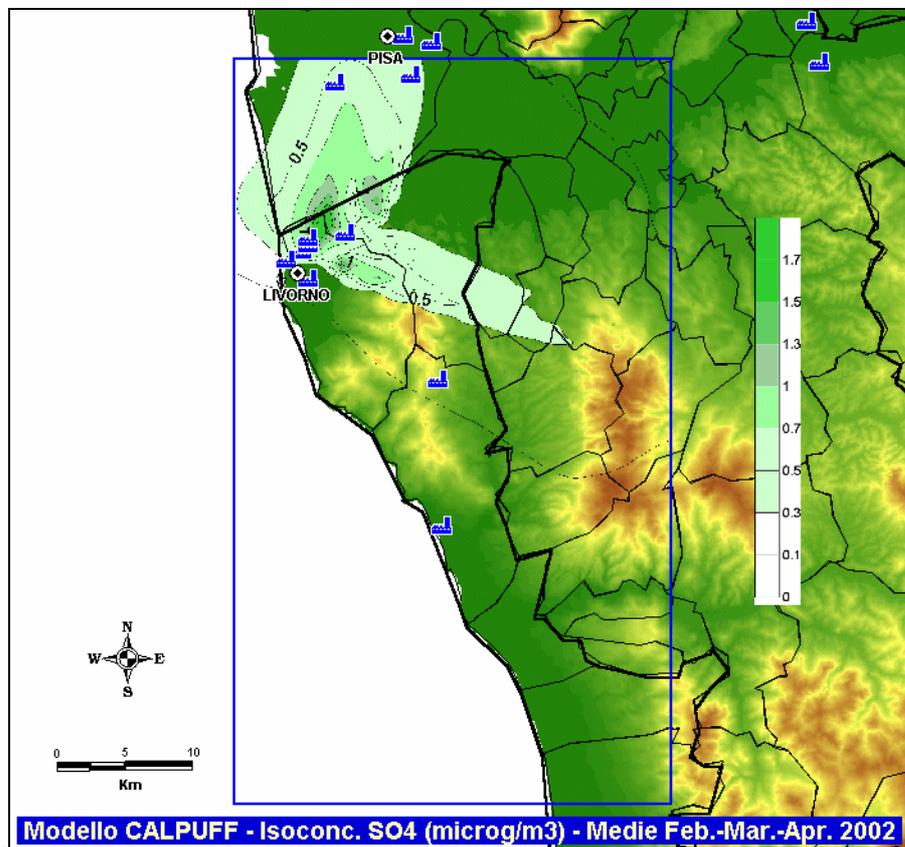
Uno dei principali obiettivi dell'utilizzo del sistema di modelli in modalità *long-term* è quello di ottenere delle stime attendibili delle concentrazioni medie degli inquinanti oggetto di studio. Di seguito sono riportate le mappe che riproducono le concentrazioni medie su tre mesi, espresse in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , degli inquinanti modellizzati, sia come inerti che in base al meccanismo chimico MESOPUFF2: i valori ottenuti con il meccanismo chimico ARM/RIVAD sono praticamente equivalenti a quelli ottenuti con MESOPUFF2, per cui non sono stati riportati.

I principali risultati possono essere sintetizzati nei seguenti punti:

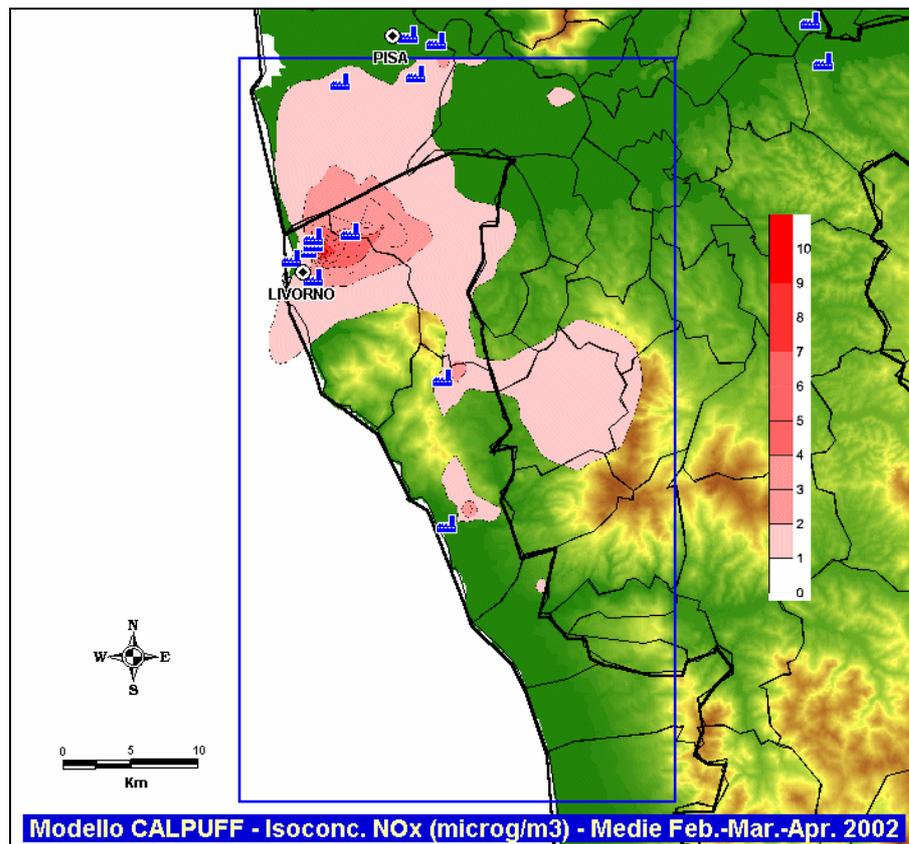
- $\text{SO}_2$ : le concentrazioni medie interessano un'area vasta intorno alla città di Livorno, che si estende nell'entroterra sia a nord-ovest che a sud-est, con valori modesti –  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  –, mentre concentrazioni superiori a  $15\text{-}20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sono circoscritte ad un'area decisamente più limitata, nei pressi degli stabilimenti, e quindi del centro abitato (Fig. 11). Le aree a sud di Livorno, in particolare Rosignano, non sono interessate da concentrazioni rilevabili.
- $\text{SO}_4$ : le concentrazioni di questo inquinante sono estremamente basse, anche nei loro valori massimi nei pressi degli stabilimenti industriali di Livorno, dove non superano i  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Fig. 12).
- $\text{NO}_x$ : le figure 13 e 14 riportano le concentrazioni medie ottenute nella trattazione degli  $\text{NO}_x$  come inerti o con il meccanismo chimico MESOPUFF2; nel secondo caso i valori sono leggermente più bassi, anche se le aree interessate sono all'incirca le stesse. Le aree interessate dalle concentrazioni sono aree nell'entroterra a nord e ad est di Livorno ed a sud-est, in prossimità dei rilievi più alti del dominio: le concentrazioni sono molto basse, dell'ordine di  $1\text{-}2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mentre valori superiori a  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  si trovano solo in un'area limitata intorno al centro urbano di Livorno. Da notare che anche gli stabilimenti presso Rosignano danno un contributo, in un'area limitata a nord-est rispetto agli stabilimenti.
- $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NO}_3$ : questi inquinanti sono stati riportati per completezza, anche se i valori di concentrazione sono estremamente bassi e quindi poco significativi. Le mappe di isoconcentrazione prevedono valori che vanno da  $0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a  $0.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$  per  $\text{HNO}_3$ , mentre i valori riscontrati per  $\text{NO}_3$  vanno da  $0.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a  $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Figg. 15 e 16).
- $\text{PM}_{10}$ : le aree interessate da questo inquinante si trovano nell'entroterra di Livorno, a nord ed a est, con concentrazioni comprese tra  $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e  $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Nell'area urbana si raggiungono i livelli più alti, compresi tra  $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e  $1.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Fig. 17).



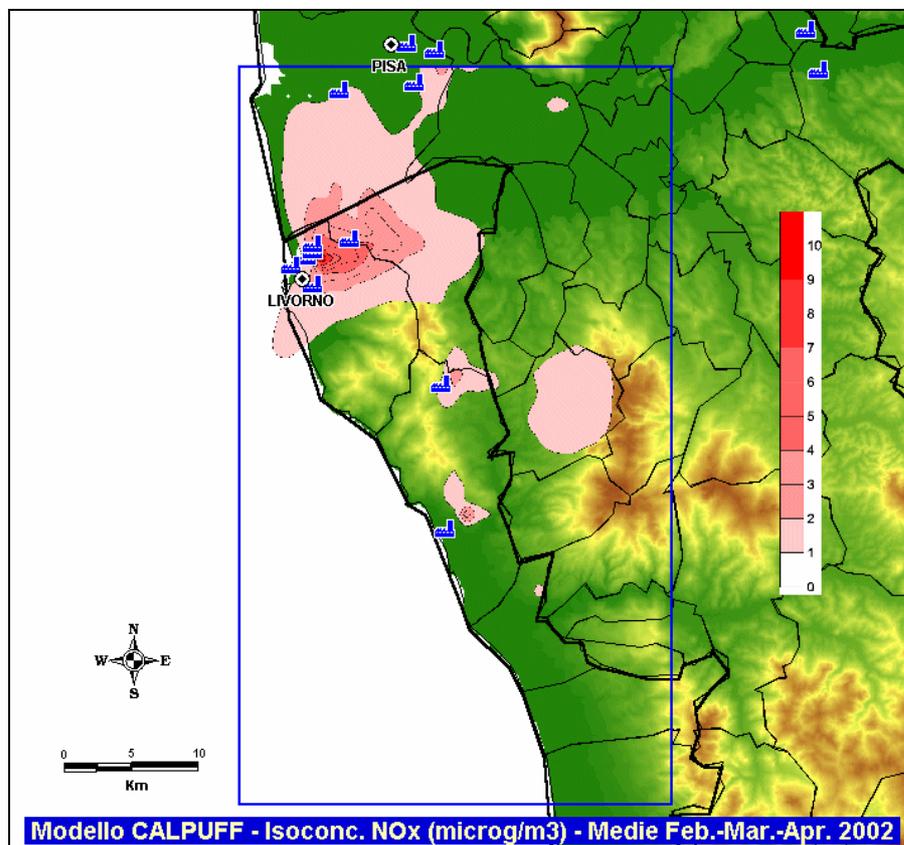
**Fig. 11** – Area di Livorno – Concentrazione media su tre mesi di SO<sub>2</sub> – Caso inerte.



**Fig. 12** – Area di Livorno – Concentrazione media su tre mesi di SO<sub>4</sub> – Meccanismo MESOPUFF2.



**Fig. 13** – Area di Livorno – Concentrazione media su tre mesi di NO<sub>x</sub> – Caso inerte.



**Fig. 14** – Area di Livorno – Concentrazione media su tre mesi di NO<sub>x</sub> – Meccanismo MESOPUFF2.

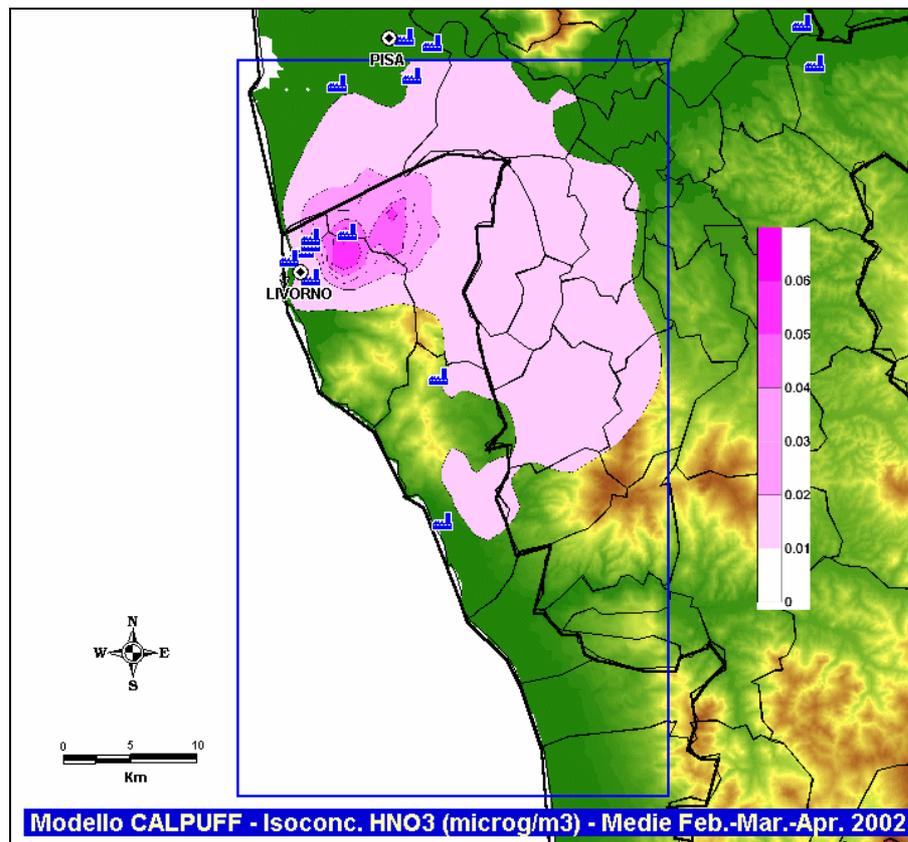


Fig. 15 – Area di Livorno – Concentrazione media su tre mesi di HNO<sub>3</sub> – Meccanismo MESOPUFF2.

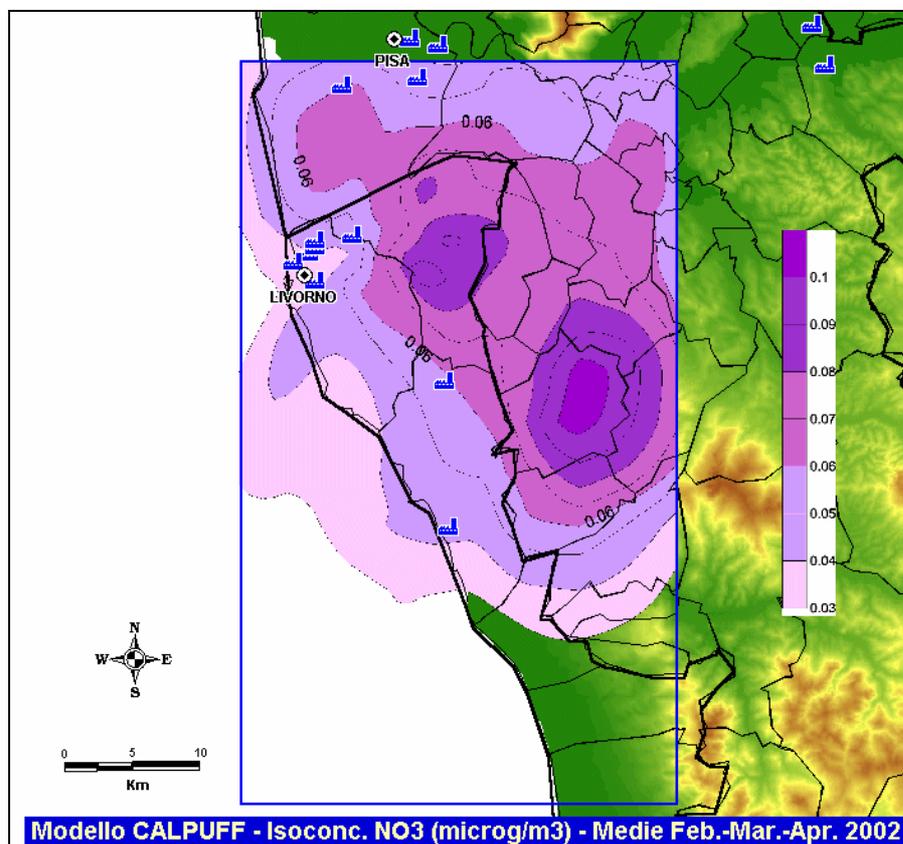


Fig. 16 – Area di Livorno – Concentrazione media su tre mesi di NO<sub>3</sub> – Meccanismo MESOPUFF2.

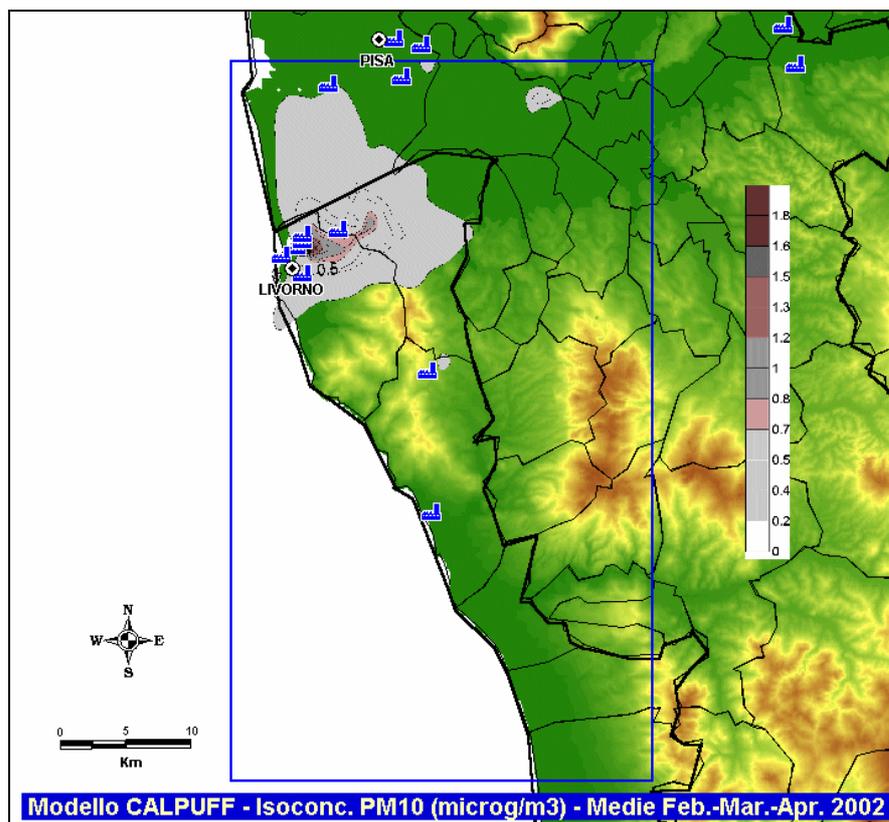


Fig. 17 – Area di Livorno – Concentrazione media su tre mesi di PM<sub>10</sub> – Caso inerte.

### 3.5.3 Confronto tra le stime di concentrazione ed i dati misurati

Le stazioni di monitoraggio della qualità dell'aria, disponibili per il confronto con le stime del modello, si trovano nell'area urbana di Livorno. In relazione ai risultati ottenuti, si è ritenuto opportuno effettuare il confronto per il solo SO<sub>2</sub>, in quanto le concentrazioni di ossidi di azoto dovute a sorgenti industriali non risultano particolarmente elevate a confronto di altri contributi derivanti da sorgenti distribuite – riscaldamento e soprattutto traffico urbano.

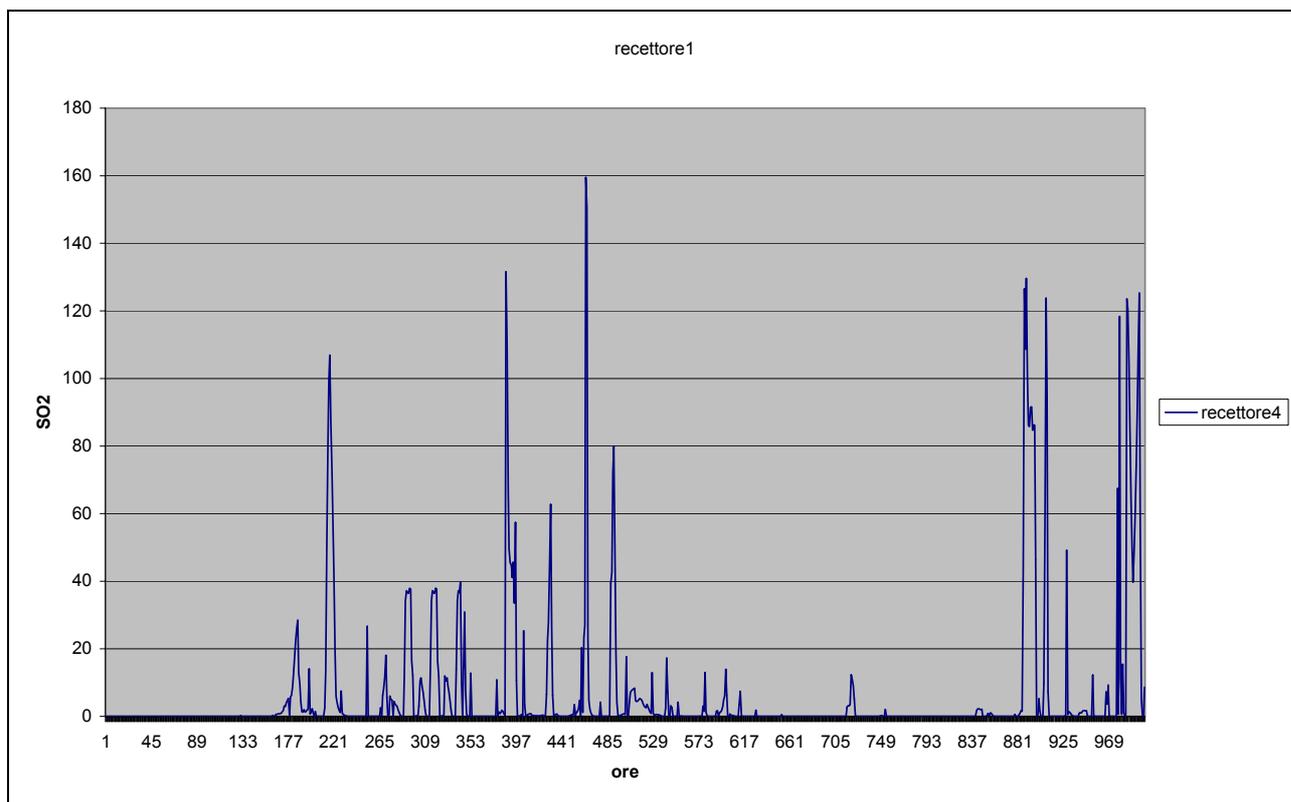
Il confronto con dati rilevati dalle centraline di monitoraggio, messi a disposizione da ARPAT, non risulta comunque facile, in quanto la configurazione dei modelli adottata per lo studio prevede la simulazione degli inquinanti su un dominio di studio piuttosto vasto e, conseguentemente, la risoluzione spaziale risulta non molto elevata (il passo della griglia di calcolo è 4 km per CALMET ed 1 km per CALPUFF). Per ottenere simulazioni caratterizzate da una risoluzione maggiore, e quindi più adatte a modellizzare il comportamento degli inquinanti nelle immediate vicinanze delle sorgenti emmissive, i modelli dovrebbero essere configurati su un dominio molto più piccolo. Inoltre sarebbero necessarie numerose informazioni aggiuntive per modellizzare il comportamento degli effluenti nel centro urbano – dove sono collocate

alcune centraline -, dal momento che proprio il tessuto urbano crea condizioni di microclima e quindi di diffusività atmosferica molto differenti dalla situazione che caratterizza il territorio extraurbano, sia esso ad uso agricolo che adibito a pascolo o coperto da boschi.

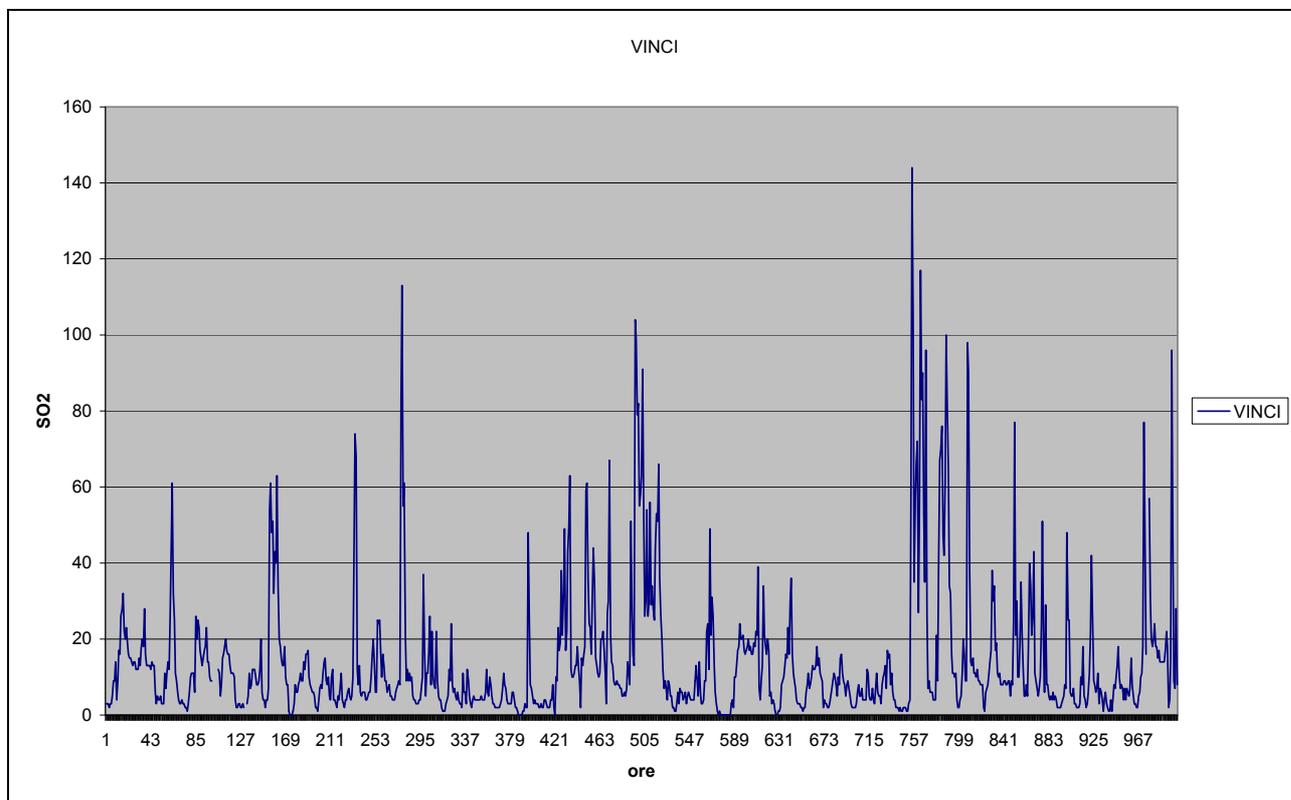
Con queste premesse, non ci si può aspettare che ci sia accordo tra le stime del modello e i dati misurati: tuttavia sono stati confrontati i risultati ottenuti per tre recettori, e cioè in corrispondenza delle centraline ARPAT di via L. da Vinci, di via C. Marx e di via XI Maggio. Per motivi di sintesi, si riportano solo gli andamenti delle concentrazioni stimate e misurate nella stazione di via da Vinci (Figg. 18 e 19).

Gli andamenti temporali delle concentrazioni non sono concordi; tuttavia, nei primi due casi si riscontrano delle similitudini: gli andamenti temporali sono caratterizzati da picchi di concentrazione di poche ore, e l'ordine di grandezza dei picchi è lo stesso nei casi simulati e misurati. La stazione di via Leonardo da Vinci presenta un fondo scala pari a  $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$  per i dati misurati e pari a  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  per le stime, mentre quella di via Marx presenta un fondo scala pari a  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$  per i dati misurati e pari a  $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$  per le stime. Si noti che l'andamento dei dati misurati presso via Leonardo da Vinci mostra un fondo caratterizzato da valori molto minori rispetto ai picchi, fondo che non si riscontra nelle corrispondenti stime.

Queste considerazioni qualitative moderatamente positive, invece, non possono essere fatte per il recettore corrispondente alla stazione di via XI Maggio, più integrata nel tessuto urbano rispetto alle prime due centraline prese in esame: in questo caso le stime prevedono, come nei due casi precedenti, un andamento caratterizzato da picchi di concentrazione elevati, anche un ordine di grandezza superiori rispetto ai modesti valori misurati dalla centralina che, nell'intervallo in esame, presenta valori massimi inferiori a  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



**Fig. 18** – Andamento delle stime di  $\text{SO}_2$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) modellizzate da CALPUFF in corrispondenza della stazione di V. Leonardo da Vinci.



**Fig. 19** – Andamento delle misure di  $\text{SO}_2$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) rilevate dalla stazione di V. Leonardo da Vinci.

## Conclusioni e prospettive

Le attività svolte nell'ambito della presente convenzione hanno avuto come obiettivo primario la messa a punto e la configurazione sul territorio della provincia di Livorno di un sistema modellistico meteo-diffusionale con cui è possibile effettuare valutazioni di impatto o valutazioni di concentrazioni medie derivanti dalle principali sorgenti industriali presenti.

La messa a punto del sistema modellistico ha previsto la realizzazione di una specifica interfaccia tra le uscite dell'archivio RAMS e la catena di modelli CALMET-CALPUFF, nonché lo sviluppo di opportune *routine* per l'elaborazione e la formattazione delle informazioni relative alle sorgenti emmissive, ottenute dall'inventario regionale IRSE.

La configurazione della filiera di modelli sul territorio della provincia di Livorno rappresenta la prima applicazione del sistema in modalità *long-term* (tre mesi): è stato quindi possibile stimare le concentrazioni degli inquinanti in esame, oltre che in termini di concentrazioni orarie – per periodi limitati di tempo – anche come valori medi. È da sottolineare che tali valori medi sono stati ottenuti a valle di un'onerosa procedura che ha richiesto di effettuare, per l'intero periodo, la stima oraria di tutti i campi meteorologici necessari – vento, temperatura, etc. – e delle concentrazioni orarie di ogni singolo inquinante. Questo tipo di approccio, pur essendo molto gravoso da un punto di vista informatico, in molti casi è l'unica alternativa possibile ad elaborazioni *short-term* su casi-studio mirati.

La stima delle concentrazioni medie degli inquinanti in esame rappresenta un primo risultato dell'implementazione e dell'applicazione del sistema di modelli sul territorio regionale. Il sistema realizzato può essere truttavia utilizzato come valido strumento per molteplici altre finalità, sia a livello strettamente tecnico-scientifico, che ad uno più propriamente strategico-politico. Nel primo caso, sono possibili ad esempio applicazioni estese ad altri inquinanti, considerando altre sorgenti di emissione, affinando la descrizione territoriale aumentando la risoluzione spaziale, etc. A livello strategico-politico, il sistema si presta ad esempio per la valutazione dei benefici apportati da possibili piani di risanamento che prevedano un diverso assetto del quadro emissivo, o ad auspicabili strategie di riordino e razionalizzazione delle reti di monitoraggio della qualità dell'aria operanti in ambito regionale. Tutto ciò porta a concludere, quindi, che il sistema modellistico realizzato sia caratterizzato da notevoli potenzialità che ci si auspica di poter sfruttare in futuro.

## Bibliografia

1. **Calastrini F., Gualtieri G.** (2002): *Realizzazione, aggiornamento ed upgrade dell'archivio regionale di dati meteorologici estratti dalle previsioni del modello RAMS* – Convenzione REGIONE TOSCANA - CNR-IBIMET/LAMMA – Firenze, Italia, 20 Novembre 2002.
2. **Calastrini F., Gualtieri G.** (2003): *Realizzazione di una interfaccia tra i dati dell'archivio RAMS e il preprocessore meteo CALMET finalizzata all'applicazione dei modelli diffusionali CALPUFF e CALGRID* – Convenzione Regione Toscana del 27/08/2002 - La.M.M.A. / Regione Toscana, Firenze, Italia, 27 Marzo 2003.
3. **Builtjes P.J.H.** (1992): *The LOTOS - Long Term Ozone Simulation - project. Summary report.* TNO report TNO-MW-R92/240, Delft, Olanda, Ottobre 1992.
4. **Walko R. L., Tremback C. J.** (2001): *RAMS – Regional Atmospheric Modeling System Version 4.3/4.4* – Guida per l'utente, Fort Collins, CO, Stati Uniti, 2001.
5. **LaMMA – Servizio Meteorologico Regionale** (2000): *Il modello meteorologico RAMS* – Rapporto interno, Firenze, Italia, 2000.
6. **Scire J.S., Robe F.R., Fermau M.E., Yamartino R.J.** (1999): *A User's Guide for the CALMET Meteorological Model (version 5.0)* – Earth Tech Inc., Concord, MA, Stati Uniti, Settembre 1999.
7. **Scire J.S., Strimaitis D.G., Yamartino R.J.** (1999): *A User's Guide for the CALPUFF Meteorological Model (version 5.0)* – Earth Tech Inc., Concord, MA, Stati Uniti, Giugno 1999.
8. **Scire J.S., Yamartino R.J., Carmichael G., Chang Y.** (1996): *A User's Guide for the CALGRID Meteorological Model (version 1.6b)* – Earth Tech Inc., Concord, MA, Stati Uniti, Luglio 1996.
9. **Regione Toscana** (2001): *Inventario Regionale delle Sorgenti di Emissione in aria ambiente* - Dip. Politiche Territoriali e Ambientali, Area "Qualità dell'aria, inquinamento acustico, industrie a rischio, inquinamento elettromagnetico", Firenze, Italia, Febbraio 2001.
10. **Golden Software, Inc.** (1999): *Surfer version 7.00* – Golden, CO, Stati Uniti, 25 Agosto 1999.
11. **Calastrini F., Gualtieri G., Guarnieri P.** (2000): *Monitoraggio ambientale della provincia di Livorno* – INTERREG II, Misura 3.1.b1 - LAMMA / REGIONE TOSCANA, Firenze, Italia, 30 Giugno 2000.
12. **MapInfo Corporation** (2002): *User's Guide for MapInfo Professional version 7.0* - One Global View, Troy - New York, Stati Uniti.
13. **Lahey Computer Systems, Inc.** (2002): *Lahey/Fujitsu Fortran 95 User's Guide* – 865 Tahoe Boulevard, Incline Village, NV, Stati Uniti.

## Appendice

# Installazione e configurazione dell'interfaccia grafica CALMET-CALPUFF-CALPOST e relativa esecuzione dei casi-studio

## 1. L'interfaccia grafica CALMET-CALPUFF-CALPOST

Al fine di facilitare l'uso dei modelli integrati CALMET e CALPUFF, nativamente concepiti per lavorare in ambito MS-DOS, è stata da qualche anno sviluppata un'opportuna interfaccia grafica che ne consente l'utilizzo in ambiente Windows. Il lavoro è stato svolto grazie a fondi messi a disposizione da agenzie governative statunitensi ed australiane. Tutto l'occorrente per installare l'interfaccia è scaricabile gratuitamente da *internet*, all'interno del sito della *Earth Tech, Inc.*, all'indirizzo: <http://www.src.com/calpuff/calpuff1.htm>.

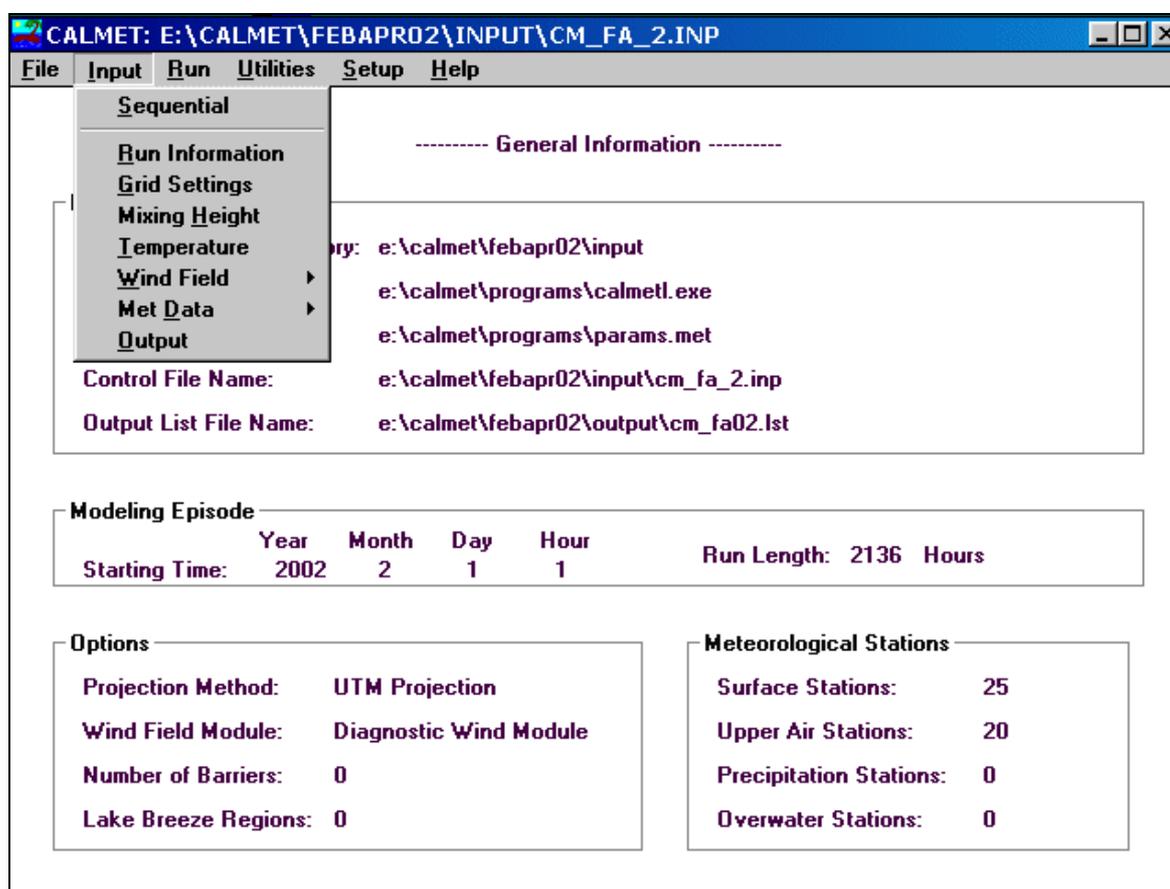
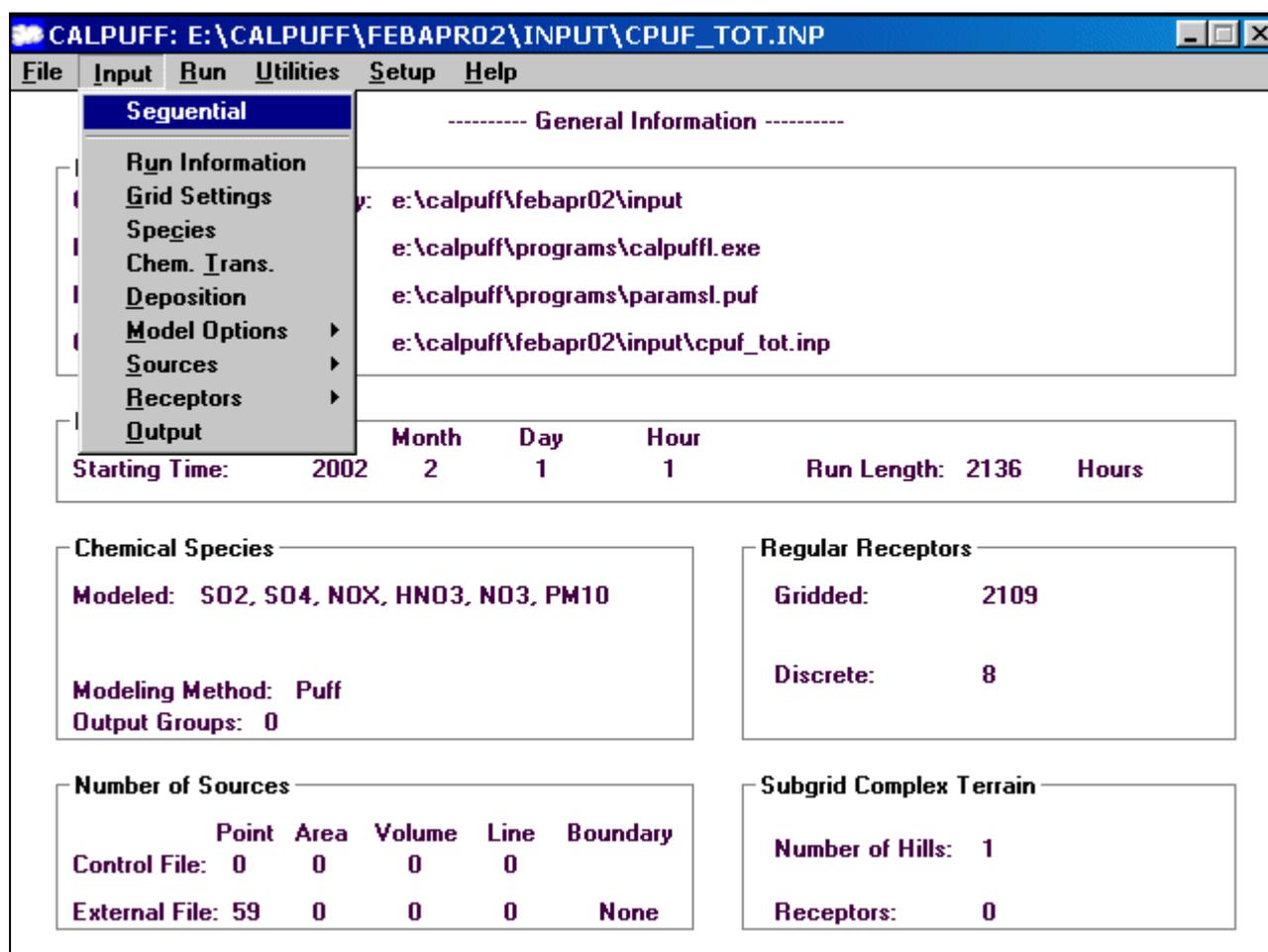


Fig. 20 - Videata dell'ambiente di lavoro dell'interfaccia CALMET con evidenziate le voci del menu principale ("Input").

L'interfaccia in realtà non integra tra di loro i singoli modelli in un ambiente unico, bensì ne consente la gestione e l'esecuzione in modalità separata. In aggiunta all'interfaccia per CALMET e a quella per CALPUFF, è inoltre disponibile un'analogia interfaccia per CALPOST, post-processore grafico di CALPUFF. L'unitarietà dell'interfaccia è comunque conservata per il fatto che i tre distinti moduli grafici siano racchiusi in un unico gruppo, chiamato "CALPUFF", sia per quanto riguarda la loro esecuzione da barra Windows che per quanto si riferisce alla specifica cartella di installazione (tipicamente, "C:\CALPUFF" oppure "C:\Programmi\CALPUFF").

Nelle Figg. 20, 21 e 22 sono illustrate le videate degli ambienti di lavoro, rispettivamente, delle interfacce CALMET, CALPUFF e CALPOST. Nelle stesse figure sono evidenziate le voci del menu principale di ciascuna di esse, e cioè il menu "Input", attraverso il quale l'utente viene guidato sequenzialmente nella preparazione del file di controllo (".INP").



**Fig. 21** - Videata dell'ambiente di lavoro dell'interfaccia CALPUFF con evidenziate le voci del menu principale ("Input").

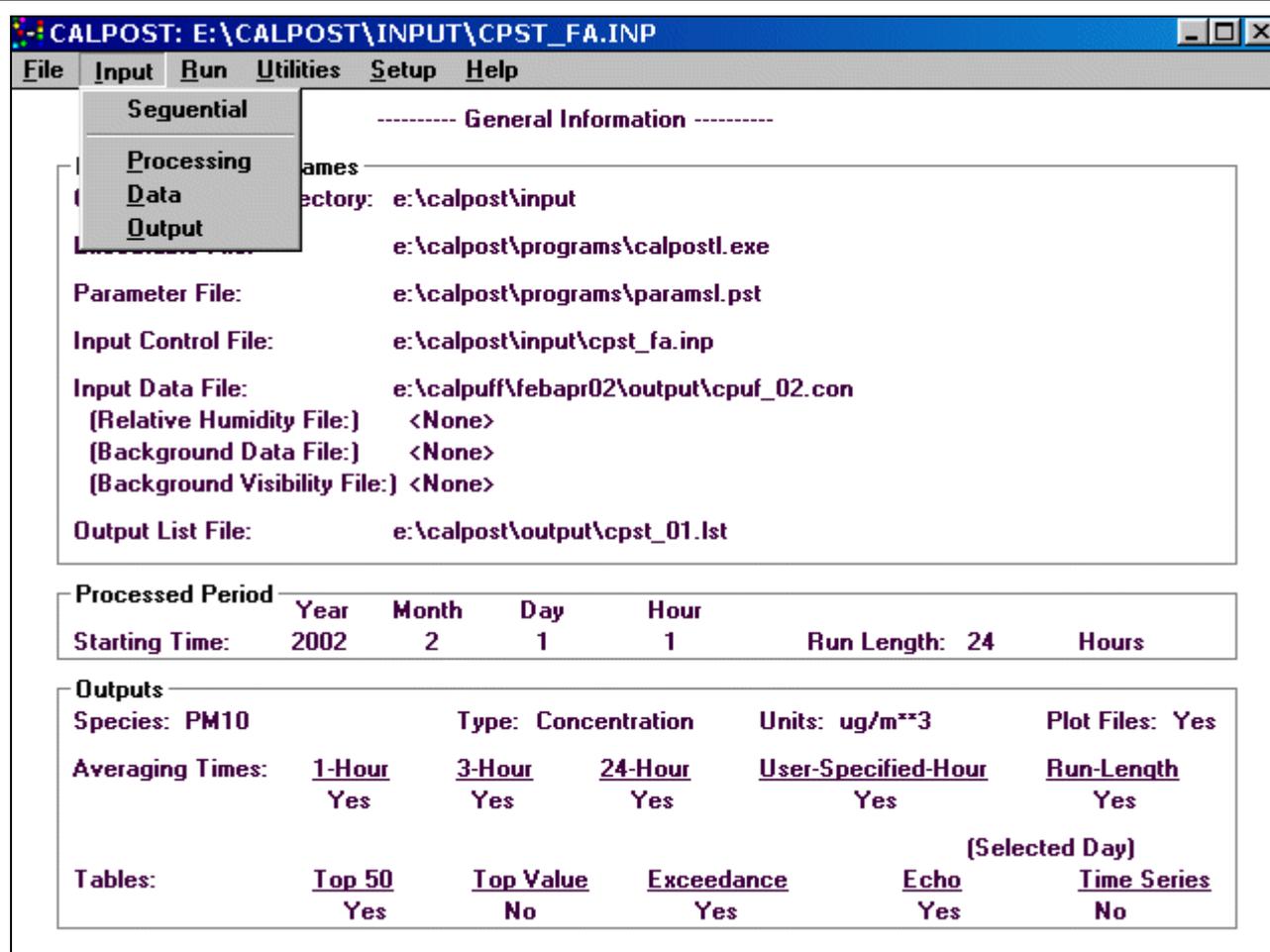


Fig. 22 - Videata dell'ambiente di lavoro dell'interfaccia CALPOST con evidenziate le voci del menu principale ("Input").

Ognuna di tali singole interfacce in realtà risulta ancora fortemente legata all'ambiente MS-DOS dal quale ha tratto origine. Non a caso, ognuno dei singoli moduli di esecuzione, nel momento in cui viene lanciato, lavora in modalità *shell* di DOS, tornando nell'ambiente dell'interfaccia Windows al termine dell'esecuzione del *run*. Attraverso il menu "Run" (Figg. 20-22) l'utente ha comunque la facoltà di specificare quale, tra i vari eseguibili preventivamente compilati del programma in questione, utilizzare nella fase di *run*. E' inoltre possibile specificare quale *file* dei parametri ("PARAMS.MET", "PARAMS.PUF", "PARAMS.PST", rispettivamente) utilizzare corrispondentemente all'eseguibile prescelto, il che risulta particolarmente utile soprattutto se il *run* in questione richiede delle specifiche che eccedano i limiti massimi definiti dal file dei parametri predefinito: ad es., può risultare necessario aumentare il numero dei punti del grigliato di calcolo (NXG ed NYG) oppure quello dei livelli verticali (NZP), o ancora aumentare il numero delle sorgenti puntiformi di emissione (NSR2), etc.

In sintesi, ognuna di tali interfacce agevola l'uso dei diversi modelli in quanto consente all'utente di creare attraverso delle finestre di dialogo Windows i corrispondenti file di controllo (rispettivamente, "CALMET.INP", "CALPUFF.INP" e "CALPOST.INP"), operazione decisamente lunga e laboriosa se fatta attraverso un qualunque *editor* di Windows. Oltre che creare *ex novo* un *file* di controllo, l'interfaccia consente anche di aprirne uno già esistente e quindi eventualmente di modificarne alcuni parametri (menu "File").

Ma probabilmente il maggiore punto di forza di tale interfaccia è costituito dalla possibilità di effettuare la verifica degli errori accidentalmente prodotti durante l'introduzione dei valori per ogni singola grandezza. La verifica degli errori viene effettuata in due fasi: la prima avviene passo passo, nel corso dell'introduzione sequenziale dei valori, e riguarda il campo di definizione di ogni singola grandezza; la seconda, più complessa, avviene nel momento in cui si lancia il *run* del modello, allorché viene verificata la congruenza di tutti i valori nel loro insieme. Oltretutto, risulta piuttosto agevole la localizzazione degli errori, in quanto viene prodotta una sorta di rapporto, che in forma di tabella informa della grandezza in cui è stato riscontrato l'errore, il suo corretto campo di definizione, e la sua localizzazione all'interno dell'interfaccia: per di più, cliccando sulla cella contenente il nome della variabile in questione, il *tool* rimanda interattivamente al punto dell'interfaccia in cui tale variabile compare, in modo da modificarne il valore erroneamente assegnatole.

Non mancano tuttavia dei palesi limiti, non solo legati allo stile in parte obsoleto col quale sono stati realizzati i singoli elementi grafici dell'interfaccia, quanto soprattutto limiti funzionali. In primo luogo, ogni singola interfaccia si limita a creare o importare un file di controllo, ad effettuare la verifica di congruenza di tutti i valori introdotti nello stesso file di controllo, e infine a lanciare l'eseguibile principale del modello. Mancano cioè degli specifici *tool* di preparazione o di gestione dei dati in ingresso, così come dei post-elaboratori dei risultati ottenuti, sia di tipo numerico-statistico che grafico. In definitiva, quindi, tale interfaccia mantiene il carattere di essenzialità dell'ambiente DOS originario dei singoli modelli, limitandosi ad effettuare tutti i calcoli matematici necessari ed affidando a *software* specifici tutte le post-elaborazioni grafiche.

Altra pecca non da poco è quella legata alla codifica dei nomi dei *file*, che rimane rigidamente legata allo *standard* DOS di 8+3 caratteri al massimo, e che quindi limita fortemente nell'uso di nomi di *file* o di cartelle di estensione maggiore o che includano spazi, etc.

Le tre interfacce sono provviste ciascuna di un *help* – specifico di ogni singola finestra di dialogo, e quindi di ogni gruppo omogeneo di variabili – che illustra il significato di ogni grandezza, il suo campo di definizione e il suo nome originale all'interno del codice del programma. Tale *help* risulta tuttavia non del tutto esaustivo, nel senso che – rispetto ai manuali originali dei programmi – non tutte le grandezze vengono citate e descritte.

## **2. Contenuto del CD-Rom consegnato ad ARPAT**

Come prestabilito nelle linee-generalì del presente progetto, uno degli obiettivi da perseguire è il fattivo concretizzarsi di una collaborazione operativa tra LaMMA ed ARPAT relativamente all'utilizzo dei modelli CALMET e CALPUFF. In quest'ottica si inquadra quindi la predisposizione da parte di LaMMA di tutto il materiale necessario ad installare e configurare sul territorio regionale l'interfaccia in questione, opportunamente testata. Tale interfaccia è stata inoltre predisposta per effettuarne un'esecuzione completa negli stessi casi-studio del territorio della provincia di Livorno già svolti nel corso dell'intero progetto.

A tale scopo è stato quindi preparato un CD-Rom contenente tutto il materiale in questione, come mostrato nella videata presentata in Fig. 23.



**Fig. 23** – Videata dell'albero delle cartelle che costituiscono il contenuto del CD-Rom consegnato ad ARPAT per l'installazione, la configurazione e l'esecuzione dell'interfaccia CALMET-CALPUFF-CALPOST.

Il materiale è racchiuso nella sottocartella "LaMMA", pensata – in fase di installazione presso ARPAT – come cartella che dovrà essere inserita all'interno di quella principale dell'interfaccia (e cioè "...\\CALPUFF").

Il CD-Rom contiene i singoli moduli di installazione delle tre interfacce Windows relative ai modelli CALMET, CALPUFF e CALPOST (sottocartella "Programmi da installare") e i manuali originali dei modelli CALMET e CALPUFF (sottocartella "Manuali").

L'esecuzione delle singole interfacce grafiche relativamente ai medesimi casi-studio svolti nel corso del presente lavoro sono invece racchiusi in sottocartelle specifiche ("CALMET", "CALPUFF" e "CALPOST"). Ognuna di esse include la sottocartella del caso-studio analizzato ("FebApr02", relativa al *run* di 3 mesi compreso tra i mesi di Febbraio ed Aprile 2002) e quella contenente i corrispondenti moduli di esecuzione ("Programs"). Le sottocartelle dei casi-studio "FebApr02" comprendono a loro volta una sottocartella con i *file* di *input* ed una con quelli di *output*.

### **3. Alcuni problemi d'installazione e di configurazione**

L'installazione su PC delle tre interfacce CALMET, CALPUFF e CALPOST non presenta in generale grossi problemi sulle principali piattaforme Windows correnti (XP, 2000 e 98). Più che altro – come già riferito – può risultare fastidioso per chi desideri installare il programma in una cartella che ecceda gli 8 caratteri di lunghezza (ad es., "C:\\Programmi\\") esser costretti a ricorrere alla troncatura in 8 caratteri, utilizzando il simbolo tilde ("~") e finendo per installare il tutto in "C:\\Progra~1\\".

Ma, al di là di simili piccoli "fastidi", l'inconveniente maggiore che si incontra nell'uso di tale interfaccia è il fatto che il funzionamento dei tre eseguibili DOS CALMET, CALPUFF e CALPOST dipenda fortemente dalla particolare piattaforma Windows che si utilizza. Più precisamente, tali eseguibili funzionano senza problemi su Windows 98 e su Windows 2000, mentre non funzionano su Windows NT e soprattutto su XP (sia versione "*Home edition*" che "*Professional*"), il che costituisce un grosso problema considerando l'oramai elevata diffusione corrente di Windows XP. L'unica strada per risolvere il problema è quella di ricompilare sulla macchina in cui è installata l'interfaccia ognuno dei singoli eseguibili CALMET, CALPUFF e CALPOST, utilizzando a tal scopo il loro specifico compilatore nativo, e cioè il compilatore *Lahey Fortran* [13].

Altro inconveniente incontrato nell'utilizzo dell'interfaccia riguarda il separatore decimale, nel senso che l'utilizzo della virgola come separatore decimale ingenera degli errori nei valori delle grandezze utilizzate. Ciò risulta evidente in particolare nel momento in cui, tramite l'interfaccia, si apra un file di controllo (.INP) precedentemente realizzato: durante la verifica sequenziale, appare immediatamente il messaggio di errore che avverte dell'incongruenza del valore introdotto per la prima variabile reale oggetto di verifica. Occorre quindi modificare le impostazioni di Windows sul proprio PC in modo tale da assegnare il punto come separatore decimale (codifica anglosassone).

Piuttosto marginali risultano invece alcuni piccoli problemi dovuti al disallineamento tra le ultime versioni dei programmi e le precedenti. Ad esempio, le tre interfacce richiedono un formato della data costituito da quattro cifre, mentre gli eseguibili di CALMET, CALPUFF e CALPOST della penultima versione richiedono invece un formato costituito da due cifre. Altro problemino facilmente risolvibile, sempre legato al disallineamento tra le versioni degli eseguibili, è localizzabile nel valore di alcune variabili. Ad esempio, nell'eseguire CALMET penultima versione, è possibile assegnare il valore nullo a "NZPRN2" (numero di livelli verticali da stampare nel file ".LST"), mentre nell'interfaccia tale valore deve essere maggiore di zero.