



**Fondazione per la Meteorologia Applicata**

***Determinazione di una metodologia  
per la caratterizzazione  
meteoclimatica di un sito***

***Applicazioni nell'area di Pisa, Prato  
e Lucca***

**Autori:**

*Caterina Busillo*

*Francesca Calastrini*

*Giovanni Gualtieri*

*20 aprile 2004*

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
<b>1. Inquadramento del problema</b>	<b>4</b>
1.1 Gli indicatori climatologici	4
1.2 Utilizzo di modelli meteo prognostici e diagnostici	5
1.3 Il Sistema Informativo Geografico "WINDROSE-GIS"	6
<b>2. Base metodologica dello studio</b>	<b>7</b>
2.1 Condizioni di instabilità atmosferica	8
2.2 Condizioni neutre	8
2.3 Condizioni di stabilità atmosferica	8
2.4 Condizioni di inversione termica	8
2.5 Classi di stabilità di Pasquill	9
2.6 Altezza di miscelamento	10
2.7 Metodi per stimare l'altezza di miscelamento	11
<b>3. L'approccio modellistico: RAMS e CALMET</b>	<b>15</b>
3.1 Il modello meteorologico RAMS	15
3.2 L'archivio meteorologico RAMS	16
3.3 Il modello CALMET	18
<b>4. Applicazione all'area di Pisa</b>	<b>20</b>
4.1 Dominio di studio e base dati	20
4.2 Applicazione del modello CALMET	21
4.3 Analisi dei risultati	23
4.4 Regime anemologico e classi di stabilità	23
4.4.1 <i>Dominio esteso</i>	25
4.4.2 <i>Dominio CALMET</i>	32
4.5 Altezza di miscelamento	37
<b>5. Applicazione all'area di Prato</b>	<b>48</b>
5.1 Dominio di studio e base dati	48
5.2 Regime anemologico e classi di stabilità	50
5.2.1 <i>Stazione di Baciacavallo</i>	50
5.2.2 <i>Stazioni virtuali RAMS</i>	51
5.3 Altezza di miscelamento	54
<b>6. Applicazione all'area di Lucca</b>	<b>60</b>
6.1 Dominio di studio e base dati	60
6.2 Regime anemologico e classi di stabilità	61
6.3 Altezza di miscelamento	63
<b>Conclusioni</b>	<b>70</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>71</b>



# Introduzione

In questo lavoro vengono illustrate le metodiche messe a punto dal laboratorio LaMMA nell'ambito delle azioni attuative del D.C.R. n. 24 del 30/01/02, "Sostegno all'adozione di piani e programmi di azione e integrati per il miglioramento della qualità dell'aria", ed in particolare della scheda-progetto dal titolo "Determinazione di una metodologia per la caratterizzazione meteorologica di un sito", di cui il LaMMA rappresenta il referente tecnico. In particolare sarà presentata nel dettaglio l'applicazione di tali metodiche, incentrata su un'area che comprende la parte nord della provincia di Pisa.

Il progetto prevede l'analisi delle principali variabili meteorologiche per la realizzazione di indicatori climatologici sintetici, quali la frequenza delle classi di stabilità, le JFF (*Joint Frequency Function*) e le relative rose dei venti, oltre ad una analisi anemologica stagionale ed alla stima dell'altezza di miscelamento. Queste analisi possono rappresentare una base per la valutazione delle condizioni meteorologiche più ricorrenti nell'area in esame, ed in particolare di quelle più favorevoli all'accumulo in atmosfera delle sostanze inquinanti.

La base-dati per l'analisi anemologica e per la stima delle classi di stabilità atmosferica è costituita dai dati di velocità e direzione del vento, nonché di radiazione solare, rilevati da una stazione a terra localizzata in prossimità dell'area in esame, ed integrati dalle stime delle variabili ottenute dal modello meteorologico RAMS.

Le stime del modello RAMS sono utilizzate per inizializzare il modello meteo CALMET, con cui è possibile ottenere una riscalatura dei dati meteorologici, oltre che la stima di alcune variabili, quali ad esempio l'altezza di miscelamento, che altrimenti dovrebbe essere calcolata tramite algoritmi non direttamente applicabili in tutte le condizioni di stabilità atmosferica.

Lo studio relativo all'individuazione ed alla stima delle variabili meteorologiche più significative per caratterizzare le capacità dispersive dell'atmosfera ha portato alla messa a punto di una metodica direttamente applicabile alle diverse realtà presenti sul territorio regionale. Allo scopo sono stati sviluppati appositi programmi per la realizzazione degli indicatori climatologici sintetici e per la loro integrazione all'interno di un Sistema Informativo Geografico (GIS).



# 1. Inquadramento del problema

## 1.1 Gli indicatori climatologici

L'analisi climatologica del territorio rappresenta un elemento di valutazione essenziale dello stato di qualità dell'aria di un sito: la caratterizzazione del regime dei venti e delle capacità dispersive dell'atmosfera consente infatti di individuare le condizioni meteorologiche più ricorrenti o più critiche per l'accumulo delle sostanze inquinanti. E' nota l'influenza delle condizioni meteorologiche nei fenomeni di inquinamento atmosferico: infatti, a parità di inquinante emesso in atmosfera, le concentrazioni misurate possono essere molto diverse a seconda che si realizzino o meno condizioni favorevoli all'accumulo in aria delle sostanze emesse.

In generale, si possono individuare un insieme di parametri meteorologici che caratterizzano la diffusività dei bassi strati dell'atmosfera, e cioè che corrispondono a condizioni di maggiore o minore turbolenza. Oltre al vento, che caratterizza i fenomeni di trasporto nel piano orizzontale, sono importanti altre grandezze riconducibili a fenomeni di convezione, cioè di rimescolamento delle masse d'aria lungo la direzione verticale: un metodo molto utilizzato per individuare le diverse condizioni di stabilità atmosferica sfrutta misure di radiazione globale, di radiazione netta e di velocità del vento, mentre altri metodi sfruttano la variazione del profilo verticale della temperatura, o ancora lo sbandieramento.

Anche l'altezza dello strato di miscelamento costituisce un elemento molto importante, dato che permette di quantificare le dimensioni della porzione di atmosfera in cui sono importanti i moti convettivi ed è quindi significativo il rimescolamento delle masse d'aria: questa variabile può essere determinata attraverso il profilo termico verticale, con algoritmi che si basano sulle classi di stabilità atmosferica, o ancora utilizzando modelli meteorologici opportunamente configurati.

Per effettuare uno studio climatologico finalizzato a valutare le capacità dispersive dell'atmosfera è quindi necessario individuare alcuni indicatori climatologici sintetici, ottenuti dall'analisi delle principali variabili meteorologiche. Nel presente studio sono stati individuati i seguenti indicatori:

- *Joint Frequency Function* (JFF) e relative rose dei venti per l'analisi anemologica stagionale;
- *Joint Frequency Function* (JFF) e relative rose dei venti per l'analisi anemologica in base alle classi di stabilità atmosferica;



- analisi della persistenza del vento, su base annuale e stagionale;
- analisi dell'andamento dell'altezza di miscelamento nell'arco dell'anno.

Le JFF sono tabelle di ricorrenza, espresse in millesimi, con cui vengono conteggiati gli accadimenti divisi per settori di direzione di provenienza del vento e per classi di velocità del vento; le rose dei venti sono barre telescopiche, orientate secondo i rispettivi settori di provenienza, di lunghezza proporzionale alle ricorrenze percentuali e di colore diverso a seconda della velocità.

L'analisi anemologica prevede tre indicatori, il primo relativo ad una classificazione del vento su base annua e stagionale, il secondo sulla base delle diverse condizioni di stabilità atmosferica, il terzo incentrato sulla persistenza di vento moderato-forte. Il quarto indicatore, infine, riguarda l'analisi dell'andamento dell'altezza di miscelamento su base annua e stagionale.

## **1.2 Utilizzo di modelli meteo prognostici e diagnostici**

La metodologia messa a punto per l'elaborazione degli indicatori prevede l'analisi di una serie di variabili meteorologiche: i valori orari di velocità e di direzione del vento, relativo a 10 m dal suolo, i valori orari di radiazione globale e netta. Per la stima diretta dell'altezza di miscelamento sarebbero necessari profili di temperatura fino a quote di 2500÷3000 m.

In ogni caso, la possibilità di elaborare gli indicatori è subordinata alla disponibilità di dati meteorologici rappresentativi dell'area presa in esame. Molto spesso non è possibile reperire dati adeguati, per l'assenza di stazioni meteo nell'area o per la scarsa qualità dei dati rilevati. Inoltre sono del tutto assenti sul territorio della regione Toscana strumenti che effettuino radiosondaggi per la determinazione di profili verticali di vento e temperatura, se si fa eccezione del sistema integrato RASS-SODAR, localizzato nel Comune di Campi Bisenzio [2]. Questi radiosondaggi sono comunque rappresentativi di un'area limitata, ed inoltre i profili di temperatura raggiungono quote non superiori a 500÷600 m.

Per ovviare a questi problemi è stato utilizzato l'archivio meteorologico RAMS [3], realizzato nell'ambito di una precedente convenzione con la Regione Toscana: si tratta di un archivio di variabili meteorologiche identificate come quelle di maggior interesse sia per studi climatologici che per applicazioni di modellistica diffusionale. Tali variabili vengono estratte quotidianamente dai campi elaborati dal modello RAMS [9] – operativo presso il LaMMA per le previsioni meteorologiche – nella forma di una serie di profili verticali, il che



consente di avere una descrizione tridimensionale delle caratteristiche dei bassi strati dell'atmosfera sull'intero territorio regionale.

Per il presente studio sono stati utilizzati dati di radiazione globale e netta misurati, mentre per i dati di vento si è ricorso alle stime del modello.

Le stime delle variabili fornite dal modello RAMS, oltre ad essere direttamente elaborate, sono utilizzate anche per inizializzare il modello meteo CALMET [7], con cui è possibile riscaldare opportunamente le variabili di interesse. Inoltre questo modello stima l'altezza di miscelamento ora per ora, per tutte le condizioni di stabilità atmosferica, risultato non ottenibile utilizzando gli algoritmi di cui verrà data ampia descrizione nel § 2.6.

### **1.3 Il Sistema Informativo Geografico "WINDROSE-GIS"**

Per elaborare gli indici climatologici sintetici è stato realizzato un apposito *software*, "WINDROSE-GIS" [6], con cui è possibile ottenere le tabelle di ricorrenza (JFF) e le relative rose dei venti, su un arco di tempo desiderato (un anno, una stagione, un mese), o sulla base delle condizioni di stabilità atmosferica. WINDROSE è in grado di stimare la stabilità atmosferica attraverso tre distinti metodi distinti – classificazione di Pasquill, gradiente termico, sbandieramento -, in base al tipo di dati forniti. E' inoltre possibile analizzare la persistenza per alcune ore consecutive di venti moderati-forti attraverso tabelle che riportano, rispetto ai diversi settori, il numero di accadimenti o la percentuale di accadimento, e le relative rose dei venti. I dati in ingresso possono essere relativi alle misure effettuate da stazioni meteo, dal sistema integrato RASS/SODAR, o relativi alle variabili stimate dal modello RAMS, o ancora dal modello CALMET.

Il programma WINDROSE è stato sviluppato in ambiente ArcInfo, e più precisamente nell'applicativo ArcMap: esso consente quindi di sfruttare al meglio tutte le molteplici potenzialità dell'ambiente GIS nel quale è integrato. WINDROSE consente infatti un'immediata visione d'insieme e quindi un'agevole interpretazione degli elaborati grafici prodotti – rose dei venti, classi di stabilità, indici di diffusività, persistenza dei venti, etc. – in quanto questi risultano geograficamente riferiti sul territorio, e quindi direttamente correlabili alla topografia, all'orografia, alla copertura del suolo, all'ubicazione delle sorgenti d'emissione, etc.

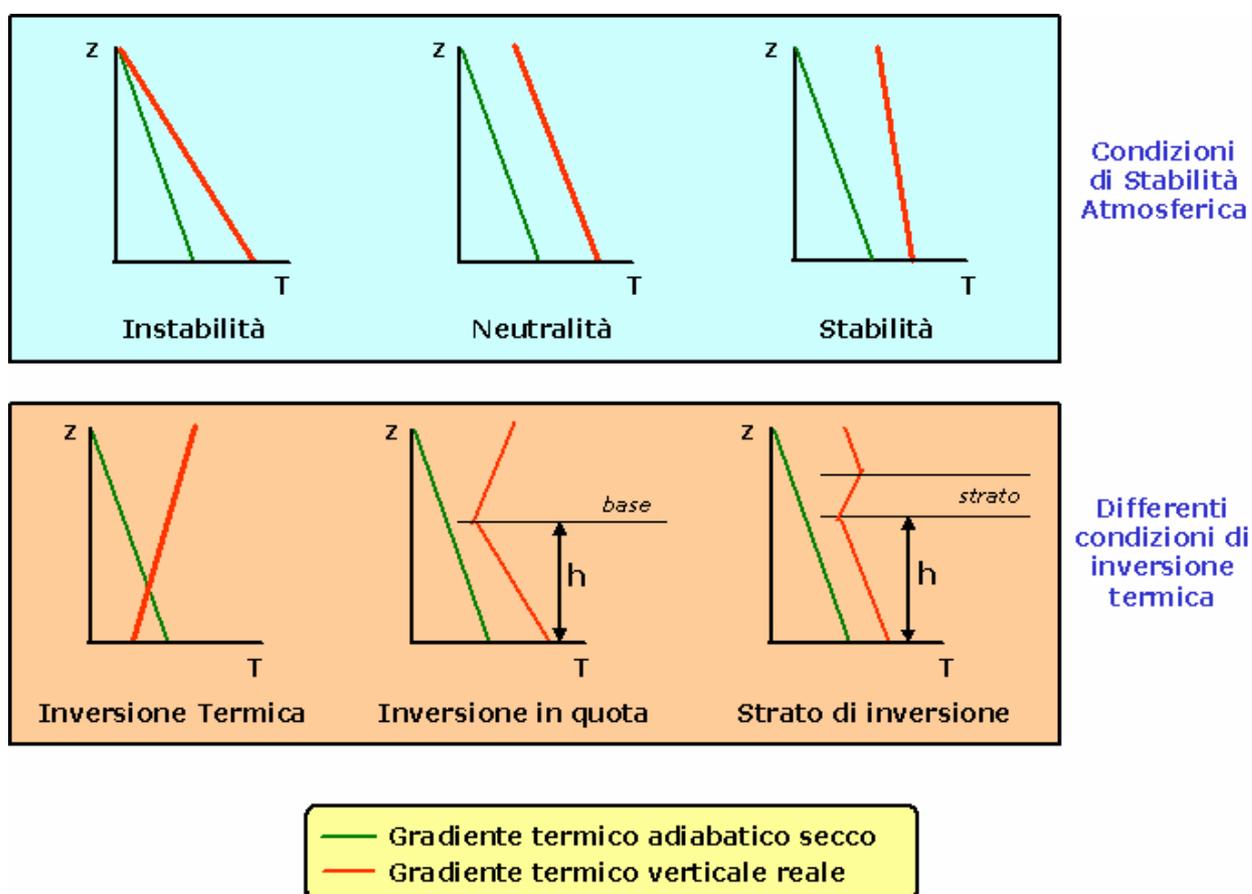
La realizzazione di questo *software-GIS*, congiuntamente all'archivio meteorologico RAMS ed all'integrazione di CALMET, permette una diretta esportazione delle metodiche messe a punto per il presente lavoro all'intero territorio regionale.



## 2. Base metodologica dello studio

La metodologia utilizzata nel presente lavoro per la caratterizzazione meteorologica dell'area in esame si basa sull'analisi dei regimi anemologici e sulla classificazione delle diverse tipologie di condizioni atmosferiche. Infatti l'intensità e la direzione del vento, la turbolenza e la stabilità atmosferica sono le quantità fondamentali nello studio della dispersione degli inquinanti in atmosfera.

Il comportamento di un effluente e le eventuali ricadute al suolo di sostanze inquinanti variano fortemente a seconda che l'atmosfera sia in equilibrio instabile, neutro o stabile. Inoltre la presenza di inversione termica, basata a terra o elevata, può modificare sostanzialmente l'abbattimento al suolo degli inquinanti, a seconda che gli effluenti siano emessi sopra o sotto la quota di inversione [5].



**Fig. 1** – Condizioni di stabilità atmosferica ed inversione termica.

Di seguito vengono descritte le principali caratteristiche che si riscontrano nelle diverse condizioni di stabilità atmosferica; il riferimento al comportamento di un effluente emesso da un camino può facilitare la comprensione di ciò che accade al variare delle condizioni di stabilità [10].

## 2.1 Condizioni di instabilità atmosferica

Quando il gradiente termico verticale è superadiabatico ( $\Delta T/100m < -1^\circ C$ ), l'atmosfera è instabile, la velocità del vento è significativa al suolo e aumenta moderatamente con la quota: in queste condizioni si sviluppano moti turbolenti sia verticali che orizzontali. Un effluente emesso in atmosfera, a causa delle turbolenze, viene abbattuto al suolo in modo irregolare e a distanze piuttosto ravvicinate al punto di emissione: in tal caso le concentrazioni al suolo sono elevate (*looping*). Questa condizione si verifica prevalentemente nel periodo estivo, nelle ore più calde della giornata, con cielo sereno.

## 2.2 Condizioni neutre

Nel caso in cui il gradiente termico verticale è adiabatico ( $\Delta T/100m \cong -1^\circ C$ ), l'atmosfera è in equilibrio neutro, la velocità del vento è molto bassa presso il suolo e aumenta abbastanza rapidamente con la quota. L'effluente emesso si mantiene relativamente compatto e ricade al suolo a una distanza considerevole (*coning*). Questa condizione, molto ricorrente, si verifica con cielo coperto o debole insolazione e velocità del vento moderata o forte.

## 2.3 Condizioni di stabilità atmosferica

Quando il gradiente termico verticale è subadiabatico ( $\Delta T/100m > -1^\circ C$ ), l'atmosfera è in equilibrio stabile, il profilo della velocità del vento parte con valori significativi da una certa quota, la sua componente verticale è trascurabile o nulla. In queste condizioni l'effluente si mantiene compatto per lunghe distanze, anche per diversi Km; il pennacchio assume la forma di "nastro" se la direzione del vento è costante, a "bandiera" se la direzione è variabile (*fanning*).

Questa condizione si verifica prevalentemente in inverno, con cielo coperto o nebbia.

## 2.4 Condizioni di inversione termica

L'inversione termica può avere base a terra, condizione che si presenta nelle ore notturne, quando il suolo si trova ad una temperatura inferiore rispetto all'aria; in questo caso sono inibiti i moti verticali e l'atmosfera si presenta stratificata.

Quando invece il gradiente termico verticale è adiabatico fino ad una certa altezza e poi diventa subadiabatico, è presente una inversione termica in quota. Nel caso in cui la



sorgente si trovi al di sotto di questa quota, l'effluente emesso incontra uno strato di stabilità e, di conseguenza, resta intrappolato e diffonde verso il suolo (*fumigation*). In questo caso la concentrazione di sostanze inquinanti può essere elevata. Questa condizione si verifica prevalentemente nelle prime ore del mattino, quando l'inversione da radiazione esistente viene erosa dal basso e si forma uno strato neutro o instabile interno.

## 2.5 Classi di stabilità di Pasquill

Un criterio di classificazione per le condizioni di stabilità atmosferica è stato introdotto da Pasquill. Le classi di stabilità, denotate con le lettere dalla A alla F, sono determinate in base a parametri meteorologici facilmente acquisibili dalle stazioni a terra, in particolare alla velocità del vento a 10 m dal suolo e alla radiazione solare globale e netta [4].

**Tab. 1** - Corrispondenze tra categorie di Pasquill, intensità della velocità del vento a 10 m e radiazione solare incidente (giorno) o netta (notte).

Radiazione ( $W/m^2$ )	Velocità del vento (m/s)					
	$V < 2$	$2 \leq V < 3$	$3 \leq V < 4$	$4 \leq V < 5$	$5 \leq V < 6$	$V \geq 6$
<b>Giorno</b>						
<b><math>RT \geq 700</math></b>	A	A	B	B	C	C
<b><math>540 \leq RT &lt; 700</math></b>	A	B	B	B	C	C
<b><math>400 \leq RT &lt; 540</math></b>	B	B	B	C	C	D
<b><math>270 \leq RT &lt; 400</math></b>	B	B	C	C	C	D
<b><math>140 \leq RT &lt; 270</math></b>	C	C	C	D	D	D
<b><math>RT &lt; 140</math></b>	D	D	D	D	D	D
<b>Notte</b>						
<b><math>RN \geq -20</math></b>	D	D	D	D	D	D
<b><math>-40 \leq RN &lt; -20</math></b>	F	E	D	D	D	D
<b><math>RN &lt; -40</math></b>	F	F	E	E	D	D

La turbolenza decresce dalla classe A, in cui si ha un equilibrio molto instabile, attraverso la D, in cui si hanno condizioni neutre, fino alla F, in cui si ha una stratificazione molto stabile. Le condizioni di stabilità atmosferica assunte a riferimento sono costituite dai valori ottenuti applicando la ben nota tabella radiazione/velocità del vento (Tab. 1), che consente di determinare la classe di stabilità nota l'intensità della velocità del vento e la radiazione solare incidente (giorno) o netta (notte).

Nel presente studio è stato adottato questo criterio di classificazione, che peraltro è riconosciuto sia a livello nazionale che internazionale – linee guida raccomandate da EPA (*“Environmental Protection Agency”*).

## **2.6 Altezza di miscelamento**

L'altezza dello strato di miscelamento costituisce un altro elemento molto importante ai fini della valutazione della qualità dell'aria, in quanto permette di quantificare le dimensioni della porzione di atmosfera influenzata dalla presenza di composti inquinanti [8].

L'altezza dello strato di miscelamento, definito come la porzione di atmosfera in cui sono importanti i moti convettivi ed è quindi significativo il rimescolamento delle masse d'aria lungo il profilo verticale, può essere determinata attraverso il profilo termico verticale, o sulla base di algoritmi che utilizzano le classi di stabilità atmosferica.

Le variazioni dell'altezza di miscelamento sono caratterizzate da un andamento giornaliero, in relazione alla diversa capacità termica delle masse d'aria e del suolo. Nelle ore notturne e nelle prime ore della mattinata, soprattutto in inverno, sussistono condizioni stabili – inversione termica con base al suolo –, per poi passare, nelle ore centrali della giornata, ad un riscaldamento del terreno che genera uno strato rimescolato: tale strato “erode” lo strato stabile. Dopo il tramonto, quando il terreno si raffredda più velocemente dell'aria, si ricreano le condizioni di inversione termica con base al suolo ed il ciclo ricomincia. Esiste anche un andamento stagionale: nei mesi freddi l'altezza di miscelamento resta in genere non troppo elevata anche nei valori massimi, mentre nei mesi caldi aumenta progressivamente.

Queste considerazioni di massima sono corrette per le aree rurali, mentre nelle aree urbane il gradiente termico verticale subisce delle variazioni rispetto a quanto rilevato nelle aree rurali limitrofe: questo fenomeno, detto “isola di calore”, può in parte modificare le considerazioni fatte in relazione all'altezza di miscelamento. Tuttavia, situazioni critiche rilevate in area rurale – come ad esempio inversione termica con base in quota – sono significative anche per le aree urbane, in cui al più possono venire amplificate, in quanto l'isola di calore, o meglio, il microclima urbano, può costituire un ambiente in cui il rimescolamento delle masse d'aria è inibito e quindi, in ultima analisi, la concentrazione degli inquinanti è più alta.

## 2.7 Metodi per stimare l'altezza di miscelamento

Il metodo più diretto per valutare l'altezza di miscelamento è quello di determinare l'altezza della base della prima inversione termica utilizzando i profili termici ottenuti con radiosondaggi. Questi vengono effettuati al massimo due volte al giorno e quindi non sarebbe possibile ricostruire l'andamento orario della variabile di interesse: in ogni caso, questo tipo di misure non viene effettuato sul territorio regionale.

Una possibile alternativa consiste nell'utilizzo di profili termici ottenuti con il RASS (*SOund Detection And Raging*). Si tratta di un sistema integrato costituito da una antenna acustica (utilizzata sia come trasmettitore che come ricevitore) e da due antenne radio (trasmettitore e ricevitore). Il principio di funzionamento del RASS si basa sull'invio in atmosfera di un pacchetto monocromatico di onde acustiche, la cui velocità dipende dalla temperatura locale dell'aria. La velocità del pacchetto acustico e, conseguentemente, la temperatura locale, viene rilevata tramite un segnale elettromagnetico a radiofrequenza, che viene parzialmente riflesso a causa della variazione dell'indice di rifrazione elettromagnetico dell'aria, dovuto alla variazione di pressione dell'onda acustica. L'analisi dell'impulso di ritorno in funzione del tempo permette di ricavare la temperatura a varie quote [2].

Con questo strumento è possibile disporre di misure orarie ed è quindi possibile ricostruire l'andamento giornaliero: i limiti di questo approccio derivano dal fatto che i profili raggiungono quote non superiori a 500÷600 m, anche in condizioni di misura ottimali. Analizzando le misure effettuate con il RASS localizzato presso il LaMMA nell'arco di quattro anni, si sono evidenziati limiti ancora più stringenti. Come limite superiore è stata definita la quota di 300 m in base al fatto che la percentuale di dati validi al di sopra di questa quota decresce drammaticamente, con percentuali dell'ordine del 20÷30% di dati validi sopra i 400 m. Il motivo di questa limitazione è dovuto al fatto che, in presenza di vento sostenuto, il sistema RASS ha delle prestazioni scadenti, cioè i profili restano generalmente inferiori ai 300÷400 m a causa della perdita di cofocalità delle onde acustiche e elettromagnetiche: i profili dell'ordine di 500÷600 m si hanno in genere in presenza di condizioni favorevoli, con venti deboli o moderati. Inoltre, in basso, al di sotto dei 100 m i dati disponibili, pur essendo validi, sono affetti da una incertezza maggiore, in quanto le prime quote misurate dallo strumento (53 m, 63 m, 73 m) sono maggiormente influenzate dalla temperatura rilevata dal sensore posto a 13 m dal suolo: per avere delle misure più accurate nei primi 100 m – e quindi direttamente confrontabili con le misure delle quote superiori – sarebbe necessaria una diversa messa



a punto dello strumento, con accorgimenti tecnici che sono ancora oggetto di studio da parte della ditta costruttrice.

In questo senso, l'analisi dei profili per la stima della prima quota di inversione si presta esclusivamente ad una trattazione di tipo statistico, e non alla ricostruzione di andamenti dell'altezza di miscelamento su base annuale o stagionale ( si rimanda al rapporto relativo all'analisi meteorologica nel Comune di Prato, in cui è stato applicato questo metodo).

Le misure del RASS sono comunque rappresentative per un'area di alcuni Km al massimo – nel nostro caso le misure effettuate presso la sede del LaMMA si possono considerare rappresentative per Prato e Firenze.

Quando però non sono presenti strumenti che effettuano misure di profili di temperatura, si può ricorrere all'uso di algoritmi che dipendono dalla classe di stabilità: questo approccio però è utilizzabile solo in condizioni neutre e stabili, in quanto in presenza di condizioni instabili sarebbe necessaria la conoscenza di alcune variabili – quali ad esempio il gradiente termico all'alba ed al tramonto – generalmente non disponibili [10].

In presenza di condizioni neutre o stabili, per tale stima è stata utilizzata la formulazione empirica proposta da Zilitinkevich (1989), che fornisce h in modo continuo nel passare dalla stabilità alla neutralità:

$$h = \frac{u_*}{|f|} \left[ \frac{1}{c} + \left( \frac{u_*}{|f|k} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{0.85} \left( \frac{1}{L} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{-1}, \quad (1)$$

dove:

$u_*$  : velocità di attrito.

L : lunghezza di Monin-Obukhov.

k : costante di von Karman (0.33÷0.43, ma di norma assunta pari a 0.35).

c : costante, in genere compresa tra 0.1 e k, ma tipicamente assunta pari a 0.30.

f : parametro di Coriolis, dato da:

$$f = 2\Omega \sin\varphi \quad (2)$$

dove:

$\Omega$  : velocità angolare della Terra ( $7.29 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ).

$\varphi$  : latitudine del sito di riferimento.



La lunghezza di Monin-Obukhov  $L$  è un parametro che caratterizza la stabilità dello strato superficiale. In particolare, si ha che  $1/L$  è negativo per condizioni instabili, nullo per condizioni neutre e positivo per quelle stabili.

Tale lunghezza caratterizza la stabilità dello strato superficiale e può essere stimata empiricamente utilizzando l'approccio di Liu (1976) ed Irwin (1979), che hanno approssimato analiticamente le curve empiriche di  $1/L$  in funzione delle classi di Turner e della lunghezza di rugosità  $z_0$ , che rappresenta lo spessore della regione al di sopra del suolo in cui la turbolenza appare non pienamente sviluppata, in cui prevalgono quindi condizioni di moto di tipo meccanico.

Tale approssimazione è rappresentata dall'equazione:

$$\frac{1}{L} = az_0^b, \quad (3)$$

dove per le costanti  $a$  e  $b$  si riportano in Tab. 2 i corrispondenti valori.

**Tab. 2** - Costanti  $a$  e  $b$  della (1) per determinare  $1/L$ , nota la classe di stabilità

Classi di stabilità	a	b
A	-0.0875	-0.1029
B	-0.03849	-0.1714
C	-0.00807	-0.3049
D	0	0
E	0.00807	-0.3049
F	0.03849	-0.1714

La velocità di attrito  $u_*$  (o "friction velocity") è quella velocità in grado di quantificare lo sforzo di taglio del vento dovuto all'attrito con la superficie terrestre. Essa aumenta all'aumentare della velocità del vento e della rugosità del suolo, variando peraltro in funzione della stabilità atmosferica.

In condizioni neutre si ha:

$$u_* = \frac{ku}{\ln(z/z_0)}, \quad (4)$$

dove:

$u_*$  : velocità di attrito all'altezza  $z$  dal suolo;

$u$  : velocità del vento all'altezza  $z$  dal suolo;

$z$  : altezza di riferimento di  $u$  e  $u_*$ ;

$z_0$  : lunghezza di rugosità;



k : costante di von Karman.

In condizioni stabili si ha:

$$u_* = \frac{ku}{\ln(z/z_0) - \Psi_m(z/L) + \Psi_m(z_0/L)}, \quad (5)$$

dove:

$$\Psi_m(z/L) = -5 \frac{z}{L}; \quad (6)$$

In conclusione, in base a queste formule è possibile stimare l'altezza di miscelamento in condizioni neutre e stabili, escludendo il caso in cui si presentino condizioni instabili, condizioni non trascurabili soprattutto nelle ore centrali del giorno, ed in particolare nel periodo estivo. Anche questo tipo di approccio si presta ad effettuare analisi di tipo statistico e non alla ricostruzione di andamenti dell'altezza di miscelamento su base annuale o stagionale.

Per stimare l'andamento temporale dell'altezza di miscelamento è possibile ricorrere ad un modello meteorologico, opportunamente configurato sul territorio in esame. Questo approccio permette di stimare a livello orario la variabile di interesse anche per periodi dell'ordine di un anno, indipendentemente dalle condizioni di stabilità atmosferica: è così possibile ricostruire l'andamento del "giorno medio"<sup>1</sup>, a livello annuale e stagionale.

Il modello CALMET è stato configurato sul territorio pisano ed utilizzato in questo caso-studio per la stima dell'altezza di miscelamento. Per il calcolo di questa variabile CALMET utilizza due approcci differenti: durante le ore diurne viene definito come altezza di miscelamento il valore massimo ottenuto applicando due algoritmi, di cui uno tiene conto della componente convettiva della turbolenza, mentre l'altro quantifica la componente di origine meccanica. Nel primo caso l'altezza di miscelamento risulta funzione del flusso di calore sensibile e del gradiente termico verticale, mentre nel secondo caso è legata all'intensità del vento attraverso la velocità d'attrito. Di notte, invece, il valore dell'altezza di miscelamento viene calcolato solo sulla base del contributo di tipo meccanico.

---

<sup>1</sup> Viene calcolato il valore medio della variabile di interesse per ciascuna ora del giorno.



### 3. L'approccio modellistico: RAMS e CALMET

L'esigenza di sviluppare una metodologia generalizzabile alle diverse realtà regionali per effettuare studi climatologici ha portato ad adottare un approccio di tipo modellistico. Infatti, dato che la possibilità di elaborare indicatori sintetici è subordinata alla disponibilità di dati meteorologici rappresentativi dell'area in esame, molto spesso, non essendo reperibili dati adeguati, è necessario ricorrere alle variabili stimate dal modello meteorologico RAMS, opportunamente archiviate.

Le stime delle variabili fornite dal modello RAMS, oltre ad essere direttamente elaborate, sono utilizzate anche per inizializzare il modello meteo CALMET, con cui è possibile spazializzare le variabili di interesse; inoltre con questo modello è possibile calcolare l'andamento temporale dell'altezza di miscelamento, indicatore difficilmente stimabile con altri approcci.

Nei seguenti paragrafi vengono brevemente illustrate le principali caratteristiche del modello RAMS, dell'archivio di variabili estratte dal modello, nonché del modello CALMET.

#### 3.1 Il modello 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 [9].

Si tratta di un modello non idrostatico, con una risoluzione che può variare da meno di un metro a centinaia di chilometri.

RAMS utilizza uno schema di *nesting* a griglia multipla; le maglie a risoluzione più fine sono utilizzate per modellizzare i sistemi atmosferici a piccola scala, come i flussi su terreni complessi e su superfici che inducono circolazioni termiche, mentre le maglie più grosse sono utilizzate per fornire le condizioni al contorno al dominio a risoluzione più fine.

L'approccio non idrostatico e lo schema a griglie multiple innestate sono utilizzati per rappresentare i fenomeni atmosferici nella configurazione a due griglie: le due griglie sono innestate in modalità interattiva (*two-way*), in modo da avere un continuo bilancio nei due sensi.

L'interazione tra il suolo e l'atmosfera è descritta utilizzando uno specifico schema, LEAF-2, che considera la presenza del tipo di vegetazione che copre il suolo; in particolare, lo schema utilizza una classificazione di 18 tipi caratterizzati da specifici

valori di albedo, rugosità superficiale, conduttività termica, etc. Per creare i campi del land-use è stato usato il *database* U.S.G.S.

Il bilancio radiativo è calcolato attraverso lo schema numerico di Cotton-Chen, sia per lo spettro a onda lunga che per lo spettro a onda corta.

Presso il LaMMA, la configurazione iniziale utilizzata per le previsioni sul territorio regionale – da cui ha preso le mosse la prima versione dell'archivio – prevedeva una risoluzione spaziale di 10 km, mentre successivamente tale risoluzione è stata portata a 4 Km; la struttura verticale dell'atmosfera è descritta da 24 livelli che raggiungono il top a 16 Km, con spessori variabili, da 75 metri vicino al suolo fino a 1 Km sopra i 5 Km.

Il modello RAMS, come ogni modello atmosferico prognostico, necessita di dati di condizioni iniziali e condizioni al contorno, sia in atmosfera che al suolo: tali dati sono forniti dal modello globale ECMWF (*European Center For Medium range Weather Forecasts*). Le temperature della superficie del mare con una risoluzione di 1° di latitudine e longitudine sono acquisite dal satellite NOAA.

### **3.2 L'archivio meteorologico RAMS**

Le variabili meteorologiche di interesse vengono estratte quotidianamente dai campi elaborati dal modello RAMS – operativo presso il LaMMA per le previsioni meteorologiche – nella forma di una serie di profili verticali; questo permette di avere una descrizione tridimensionale delle caratteristiche dei bassi strati dell'atmosfera. L'intervallo temporale con cui tali profili vengono forniti è di un'ora. Il numero e il tipo di variabili meteorologiche archiviate sono stati pensati con l'obiettivo di agevolare l'utilizzo di quei modelli diffusionali che richiedono in ingresso un'accurata descrizione dei campi meteorologici.

La realizzazione dell'archivio meteorologico RAMS ha richiesto la definizione di una serie di procedure automatiche da porre in sequenza alla catena operativa RAMS. Parallelamente, sono state messe a punto delle procedure routinarie di *back-up* mensile dei dati archiviati, procedure che costituiscono la base della manutenzione ordinaria dell'archivio. La prima versione dell'archivio RAMS è stata messa a punto alla fine dell'anno 2000 e ha avuto un'operatività di poco superiore ad un anno, coprendo più precisamente il periodo compreso tra il 15 dicembre 2000 e il 31 dicembre 2001. L'attività di *upgrade* dell'archivio RAMS ha portato successivamente alla realizzazione della sua seconda versione, in cui è stata aumentata la risoluzione spaziale, che è stata portata a 4x4 Km<sup>2</sup>, ed il numero dei livelli verticali, da 9 a 12 livelli. L'*upgrade* ha inoltre riguardato anche il numero delle grandezze meteorologiche archiviate e l'accuratezza



con cui esse vengono calcolate. L'operatività della versione 2 dell'archivio è decorsa a partire dal 1° gennaio 2002.

Le variabili atmosferiche acquisite sono di seguito riportate:

- VV : velocità prevalente del vento orizzontale (m/s)
- DV : direzione prevalente del vento orizzontale (°N)
- w : componente verticale del vento (m/s)
- T : temperatura dell'aria (°C)
- Pres : pressione atmosferica (mb)
- UmR : umidità relativa (%).
- Prec : piovosità (mm)
- U\* : velocità di frizione (m/s)
- Rsw : radiazione solare ad onda corta (W/m<sup>2</sup>)
- Rlw : radiazione solare ad onda lunga (W/m<sup>2</sup>)
- Rswu : radiazione solare ad onda lunga uscente (W/m<sup>2</sup>)
- Ccov : indice di ricoprimento nuvoloso (decimi)

Da notare che la prima quota si trova a 38 m sul livello del suolo: questo può rappresentare un problema per i parametri relativi al vento, dato che gli standard si riferiscono a misure effettuate a 10 m dal suolo.

Per ovviare a questo problema, limitatamente al modulo della velocità del vento VV, si può ricorrere al seguente algoritmo, che, a rigore, vale per condizioni atmosferiche neutre [4]

$$V_{10m} = V_{38m} \frac{\ln(10/z_0)}{\ln(38/z_0)} \quad (10)$$

dove:

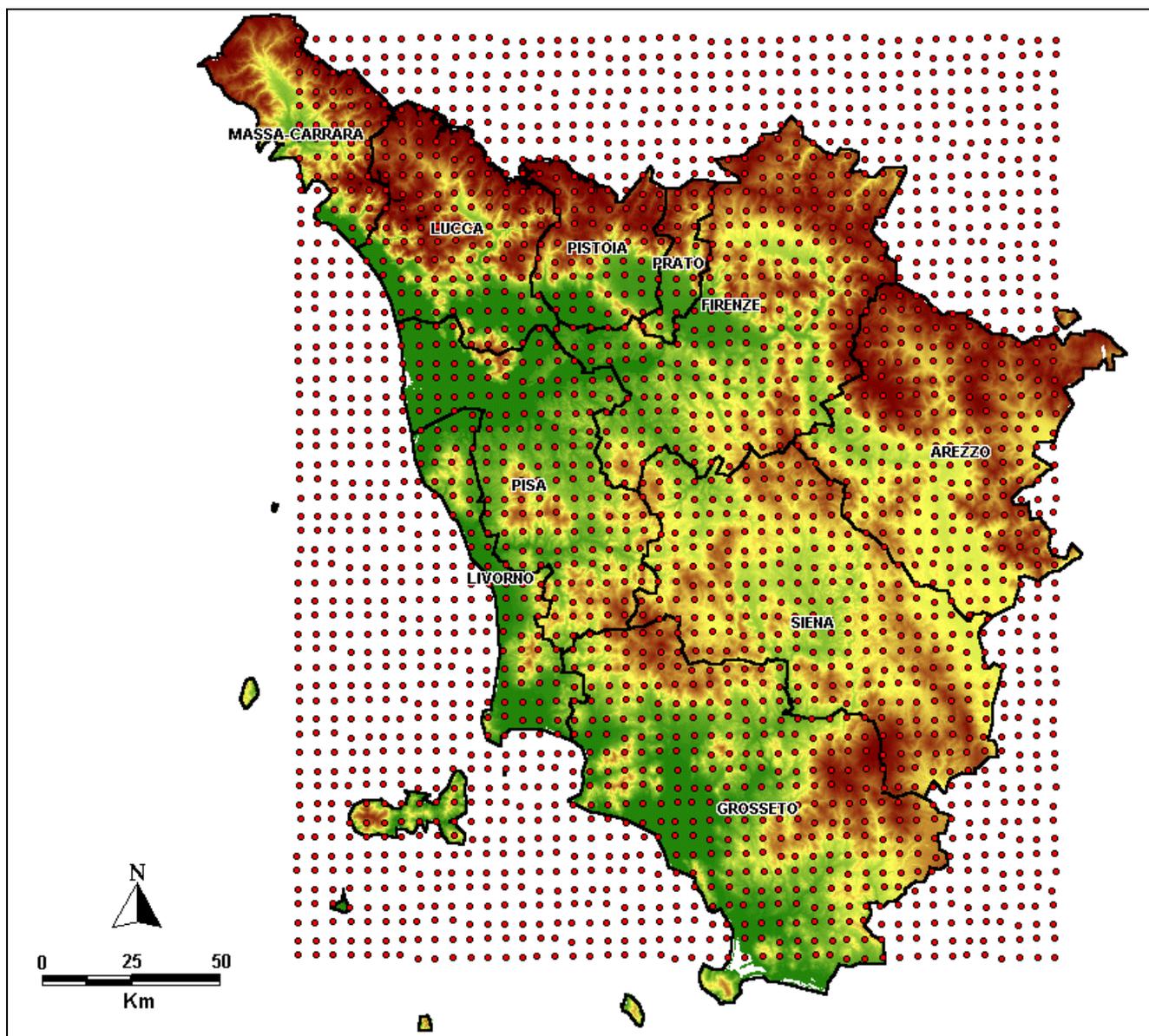
$V_{10m}$  : velocità del vento a 10 m dal suolo;

$V_{38m}$  : velocità del vento a 38 m dal suolo;

$z_0$  : rugosità del terreno.

Per quanto riguarda la direzione del vento, viceversa, non è possibile stimare le differenze tra i valori rilevati a 38 e a 10 m, e quindi nelle applicazioni si dovrà tener conto di questa difformità.





**Fig. 2** – Localizzazione geografica dei punti-griglia della versione 2 dell'archivio RAMS, caratterizzata da un passo di 4x4 Km<sup>2</sup>.

### 3.3 Il modello CALMET

CALMET [7] è un preprocessore meteorologico di tipo diagnostico, o *mass-consistent*, in grado di riprodurre campi tridimensionali di vento e temperatura e campi bidimensionali di parametri descrittivi della turbolenza. E' stato sviluppato per conto del CARB da alcuni ricercatori della Sigma Research (ora *Earth Tech*) come preprocessore del modello a *puff* CALPUFF, oltre che del modello fotochimico CALGRID.

CALMET può operare su qualsiasi tipo di dominio, in quanto è in grado di gestire le problematiche inerenti alla presenza di orografia complessa o di interfaccia terra-mare; inoltre questo modello opera anche in presenza di calma di vento. CALMET può essere

applicato su domini di dimensioni dell'ordine di alcuni Km fino a centinaia di chilometri, con passi variabili da poche centinaia di metri fino a 10÷20 km.

Il modello risulta particolarmente versatile in quanto può operare sia per applicazioni di tipo *short-term* che *long-term*; per applicazioni *short-term* vengono definiti dei casi di studio relativi ad alcuni giorni, mentre per applicazioni *long-term* possono essere individuati periodi di un anno o superiori. Il passo temporale è fisso ed è pari ad un'ora.

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.

In realtà, 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 modello diagnostico, il modello meteo RAMS è un modello a fisica completa, che 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.



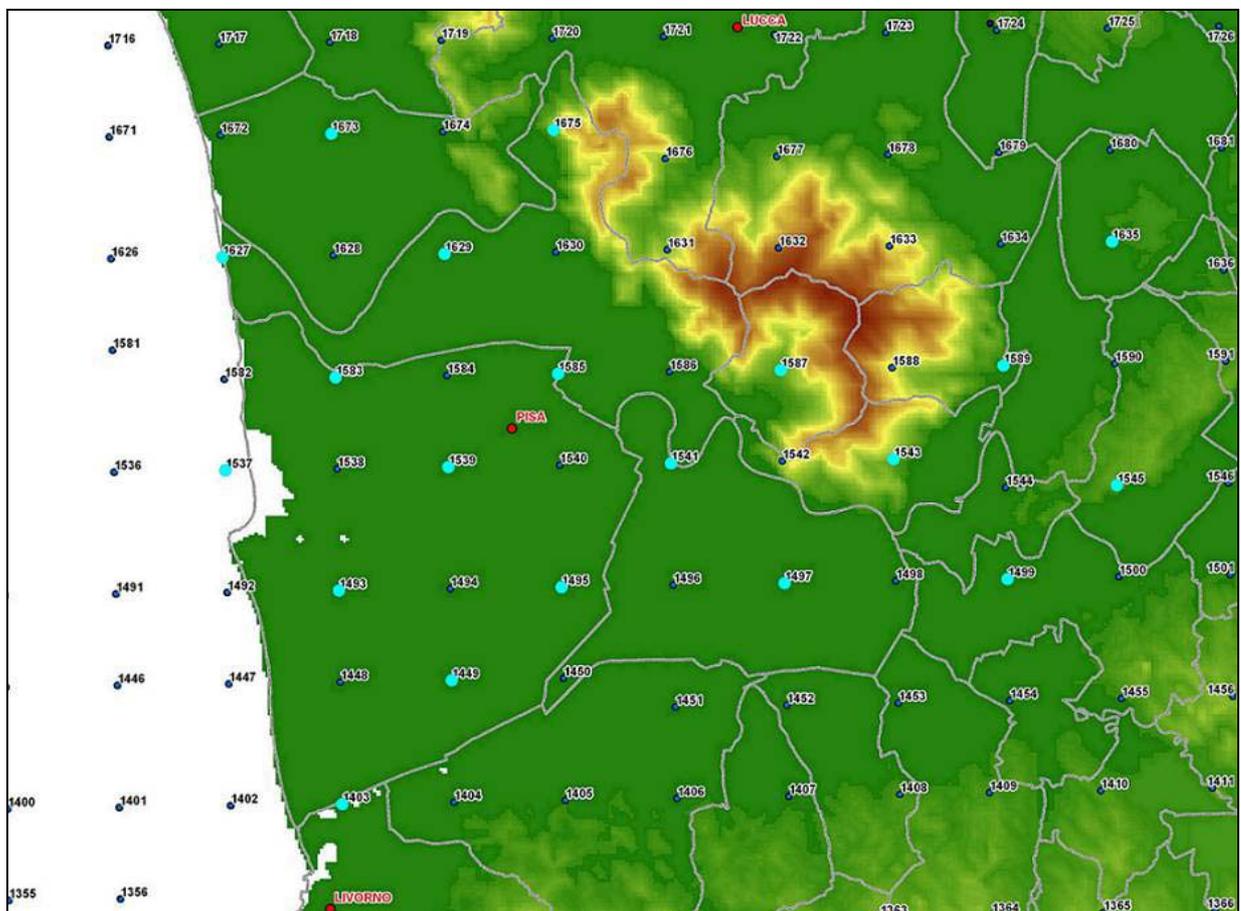
## 4. Applicazione all'area di Pisa

### 4.1 Dominio di studio e base dati

Il dominio di studio è rappresentato da un'area che comprende la parte nord della provincia di Pisa, ed in particolare i comuni di Pisa, Vecchiano, S. Giuliano Terme, Cascina, Calci, Calcinaia, Pontedera, S. Marta, Buti, Bientina e Castelfranco.

Questo dominio comprende una vasta area costiera ed il relativo entroterra, prevalentemente pianeggiante; il territorio è delimitato a sud da zone collinari, mentre al centro-nord si trova il Monte Pisano, unico rilievo presente nel dominio.

Nella seguente figura è riportata l'area di studio con l'indicazione della posizione delle "stazioni virtuali" dell'archivio meteorologico RAMS.



**Fig. 3** – Mappa dell'area di studio nella provincia di Pisa e localizzazione dei punti-RAMS.

La caratterizzazione dei campi di vento e delle condizioni di stabilità è stata effettuata utilizzando le stime del modello RAMS per i valori di velocità e direzione del vento. In particolare, le stazioni prese in considerazione sono quelle selezionate tramite *mouse*, ossia contrassegnate con il colore azzurro.

In questo contesto, le stime effettuate dal modello meteorologico RAMS rivestono un ruolo centrale in quanto le misure di velocità e direzione del vento – ad esempio delle stazioni gestite da ARPAT - non sono state ritenute idonee per la loro collocazione, non rappresentativa per la caratterizzazione dell'area.

Per quanto riguarda la caratterizzazione relativa alle classi di stabilità atmosferica, il criterio scelto si basa sull'elaborazione di dati di vento e di radiazione globale e netta. Nell'area in esame sono presenti strumenti che misurano la radiazione globale, ma non la radiazione netta; per queste variabili sono state utilizzate le misure della stazione di Porcari<sup>2</sup>, distante circa 20 Km da Pisa, trattandosi dell'unica stazione, presente in prossimità dell'area di studio, dotata dei radiometri globale e netto. I dati di radiazione globale sono stati confrontati con quelli misurati nelle stazioni presenti sull'area di studio – Cascina, Navacchio, Passi, Serao – ed è stato ricavato il coefficiente di correlazione: si può notare come questo valore sia decisamente alto per ciascuno dei quattro casi, avvalorando la tesi che le misure di radiazione globale siano rappresentative anche per aree più ampie rispetto a quanto accade per altre variabili, come ad esempio per il vento.

**Tab. 3** – Coefficienti di correlazione dei dati di radiazione globale tra la stazione meteo di Porcari e le 4 stazioni presenti nell'area di studio.

	<b>Porcari-Cascina</b>	<b>Porcari-Navacchio</b>	<b>Porcari-Passi</b>	<b>Porcari-Serao</b>
<b>N. dati utili</b>	4136	5363	8502	5282
<b>% dati utili</b>	47	61	97	60
<b>Correlazione</b>	0.90	0.95	0.96	0.96

## 4.2 Applicazione del modello CALMET

All'interno dell'area di studio è stato individuato un dominio spaziale più piccolo, incentrato sul Comune di Pisa, su cui è stata effettuata una applicazione di CALMET in modalità *long-term*, per un periodo temporale di un anno.

Il dominio di calcolo ha una estensione di 28x24 km<sup>2</sup> ed è costituito da un grigliato - di passo 0.5 km - di 56x48 celle; all'interno di questo ricadono 42 stazioni virtuali dell'archivio RAMS.

In particolare, utilizzando le stime del modello RAMS, sono stati costruiti i seguenti *file* di *input* meteorologici per CALMET:

- il *file* delle variabili meteo generalmente rilevate da stazioni a terra (SURF.dat);

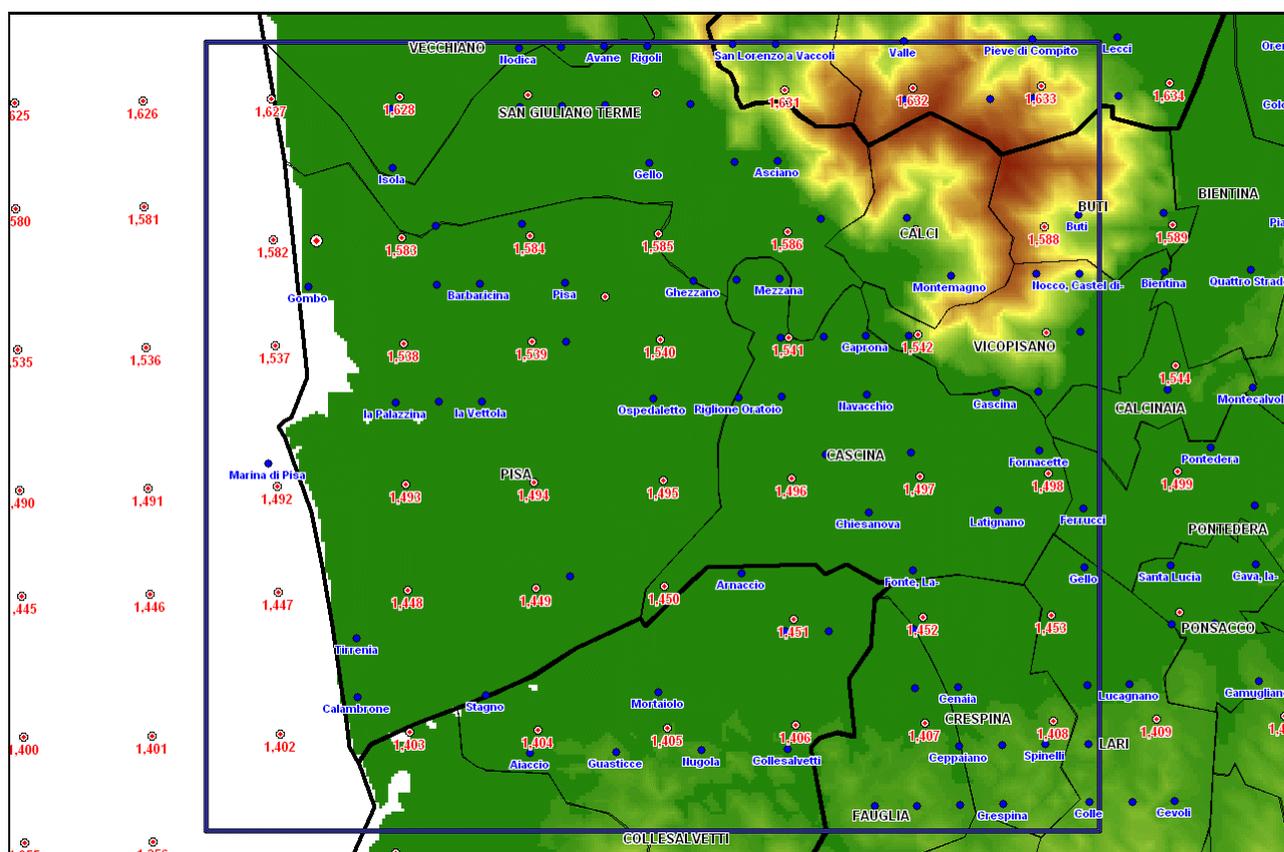
<sup>2</sup> La stazione di Porcari appartiene alla Rete Provinciale di Lucca, ed è gestita da ARPAT.



- i *file* delle stazioni profilometriche (UPn.dat);
- il *file* del campo tridimensionale di vento e temperatura (MM4.dat), che deve essere fornito da un modello prognostico a scala regionale.

Scopo di questa applicazione è stato quello di stimare con maggiore accuratezza i campi di vento, in quanto l'utilizzo di una griglia di calcolo con passo 0.5 Km implica un affinamento delle informazioni territoriali, sia per quanto riguarda l'orografia, sia per quanto concerne l'uso del suolo.

Inoltre, il modello CALMET permette di stimare su base oraria l'altezza di miscelamento, oltre a fornire una stima delle classi di stabilità atmosferica, con un approccio alternativo a quello utilizzato per l'intero dominio: in questo caso tutte le variabili sono fornite dal modello RAMS e non è necessario ricorrere a dati misurati di radiazione globale e netta.



**Fig. 4** – Estensione spaziale del dominio di studio relativo all'applicazione del modello CALMET nella provincia di Pisa.

### 4.3 Analisi dei risultati

Di seguito vengono presentati i risultati delle elaborazioni effettuate per determinare il regime anemologico e le condizioni di stabilità dell'area in esame, sia per quanto riguarda il dominio esteso, che il dominio più piccolo su cui è stato configurato CALMET.

L'altezza di miscelamento è stata stimata da CALMET sull'area di applicazione, su base oraria, per l'intero anno 2002; le stime ottenute sono state elaborate, in modo da ottenere una visualizzazione tridimensionale sul dominio di applicazione dell'andamento dell'altezza di miscelamento nelle ore sinottiche, per due giorni, uno invernale ed uno estivo. Inoltre per quattro punti – Pisa, S. Rossore, Calci, Cascina – le stime orarie sono state elaborate per ottenere l'andamento nel giorno tipo, sia su base annuale che stagionale. Infine, per questi stessi punti, è stata effettuata una analisi statistica, dividendo i valori assunti dall'altezza di miscelamento in classi, per permettere il confronto con le altre metodologie di stima di altezza di miscelamento.

### 4.4 Regime anemologico e classi di stabilità

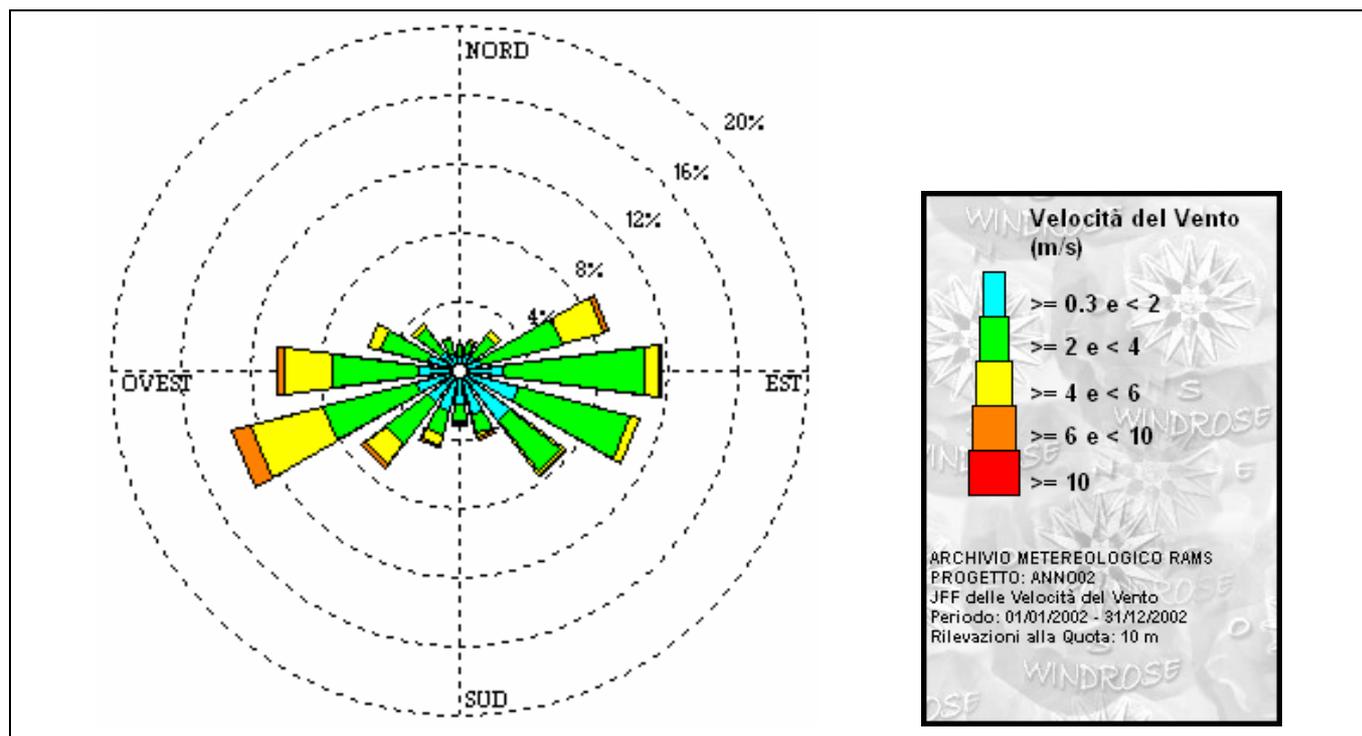
Per ottenere una visualizzazione sintetica dell'andamento della velocità e della direzione prevalente del vento sono state elaborate le "rose dei venti": i dati di vento sono raggruppati attraverso barre telescopiche, orientate secondo i rispettivi settori di provenienza, di lunghezza proporzionale alle ricorrenze percentuali e di colore diverso a seconda della velocità.

Le elaborazioni statistiche e grafiche che sono illustrate in questo paragrafo sono state realizzate utilizzando il *software* GIS WINDROSE, le cui caratteristiche sono state brevemente illustrate nel § 1.3.

Le rose dei venti sono affiancate dalle relative tabelle, o JFF (*Joint Frequency Function*); si tratta di tabelle di ricorrenza, espresse in millesimi, con cui vengono conteggiati gli accadimenti divisi per settori di direzione di provenienza del vento – nel nostro caso 16 settori – e per classi di velocità del vento – nel nostro caso 6 classi, compresa quella relativa alle calme. Accanto alla rappresentazione grafica, sono riportate alcune informazioni, come il codice della stazione, il numero totale di eventi, oltre che la percentuale di eventi utili.

A titolo di esempio, è riportata la rosa dei venti e la relativa tabella della stazione virtuale 1583, per l'anno 2002.





**Fig.5** – Rosa dei venti Staz.RAMS n.1583 (anno 2002).

**Tab.4** – Ricorrenze millesimali dei venti Staz.RAMS n.1583 (anno 2002).

SETTORE	< 0.3	>= 0.3 e < 2	>= 2 e < 4	>= 4 e < 6	>= 6 e < 10	>= 10	TOTALE
N		8.95	5.92	0.13	0.13	0	15.38
NNE		9.83	7.44	1.39	0.13	0	18.91
NE		11.22	14.12	4.41	0.5	0	30.51
ENE		13.11	47.9	24.96	2.9	0	89.25
E		25.46	81.56	8.7	0.88	0	116.85
ESE		35.42	66.05	5.17	0.13	0	107.02
SE		37.31	36.43	2.02	0.5	0	76.89
SSE		26.35	11.22	2.27	1.89	0	42.1
S		19.92	8.95	2.14	0.5	0	31.77
SSW		23.57	14.75	6.81	0.76	0	46.77
SW		22.06	31.14	15	3.15	0	71.85
WSW		25.46	55.46	43.36	11.35	0	135.89
W		24.33	49.29	27.61	4.41	0.13	106.27
WNW		19.16	27.73	7.31	0.63	0	54.96
NW		13.99	16.77	3.4	0	0	34.41
NNW		9.96	9.33	1.13	0	0	21.18
TOTALE	6.05	326.11	484.05	155.8	27.86	0.13	1000

Sono state elaborate le rose dei venti annuali e stagionali, le rose dei venti relative alla frequenza di accadimento delle classi di Pasquill, le rose dei venti per ciascuna classe di stabilità, partendo dalla A (fortemente instabile), passando per la D (neutra), fino alla F+G (stabile). Inoltre sono state realizzate rose dei venti che individuano i settori in cui si

hanno venti moderati o forti - con velocità maggiore di 3 m/s - con una persistenza superiore a tre ore consecutive.

Infine, le rose dei venti relative alle stazioni virtuali sono state georeferenziate e riportate sulla mappa dell'area di studio, in modo da ottenere una visione d'insieme che permette di interpretare più facilmente i risultati ottenuti.

Per motivi di sintesi, non sono stati riportati tutti gli elaborati grafici presenti nel rapporto finale relativo all'area di Pisa.

#### **4.4.1 Dominio esteso**

Per la caratterizzazione del regime anemologico dell'area in esame sono stati analizzati i valori di velocità e direzione prevalente del vento stimati dal modello RAMS nell'anno 2002; in particolare, sono state utilizzate le 20 "stazioni virtuali" corrispondenti ai codici 1403, 1449, 1493, 1495, 1497, 1499, 1537, 1539, 1541, 1543, 1545, 1583, 1585, 1587, 1589, 1627, 1629, 1635, 1673, 1675 (Fig. 3), in modo da ottenere una copertura completa dell'area nord della provincia di Pisa.

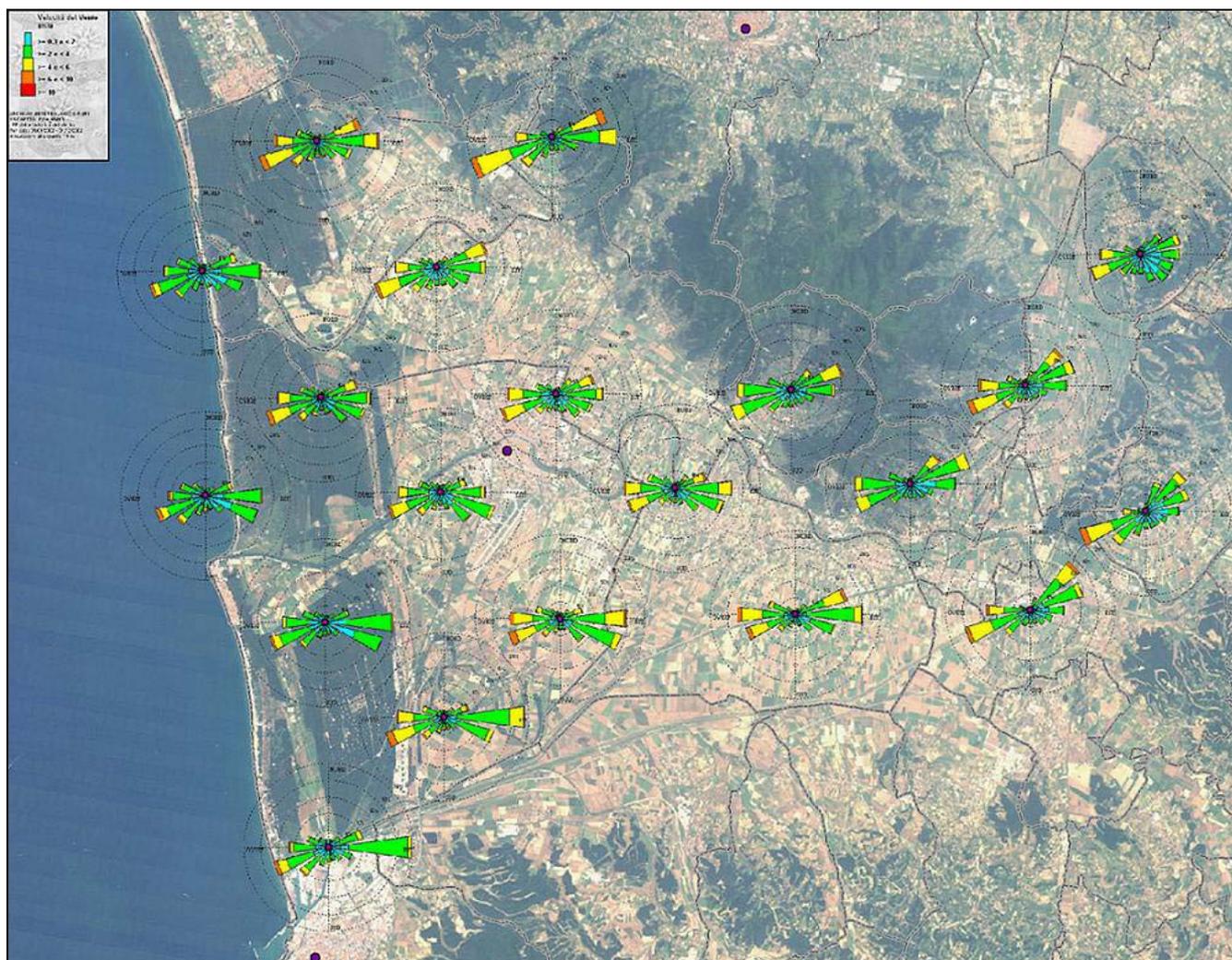
Su base annuale (Fig. 6), l'analisi dei valori numerici associata alle rose dei venti evidenzia una certa uniformità sul territorio in esame: si nota comunque l'aggiramento del rilievo principale, rappresentato dal Monte Pisano. Le direzioni di provenienza prevalenti corrispondano ai settori WSW, W e SW - che ricorrono complessivamente intorno al 25% dei casi -, con velocità anche sostenute, ed ai settori E ed ESE - che fanno registrare una percentuale complessiva pari a circa il 20-25% dei casi.

In termini di classi di velocità dei venti, le calme di vento non ricorrono molto spesso, circa nello 0.5-1% dei casi; le classi prevalenti sono quelle con venti d'intensità compresa tra 0.3 e 2 m/s (pari a circa il 30-40% dei casi) e quelle con venti moderati (tra 2 e 4 m/s) che ricorrono nel 40-45% dei casi, mentre quelle con velocità più elevata (maggiore di 4 m/s) si verificano nel 15-20% dei casi.

A livello stagionale (Figg. 7-10) si notano le principali differenze tra il periodo primaverile-estivo, in cui la direzione di provenienza prevalente è W e WSW, con velocità del vento mediamente più alte ed il periodo autunnale, in cui i venti prevalenti provengono dai settori Est; il periodo invernale invece è caratterizzato da venti che non differiscono molto, in termini di direzione di provenienza, dal caso annuale.

L'analisi della persistenza su base annua evidenzia che i venti moderati o forti, con persistenza superiore a 3 ore consecutive, provengono quasi esclusivamente dai settori W-WSW ed E; nel periodo primaverile-estivo prevale il vento da W e WSW, in autunno dal settore E.

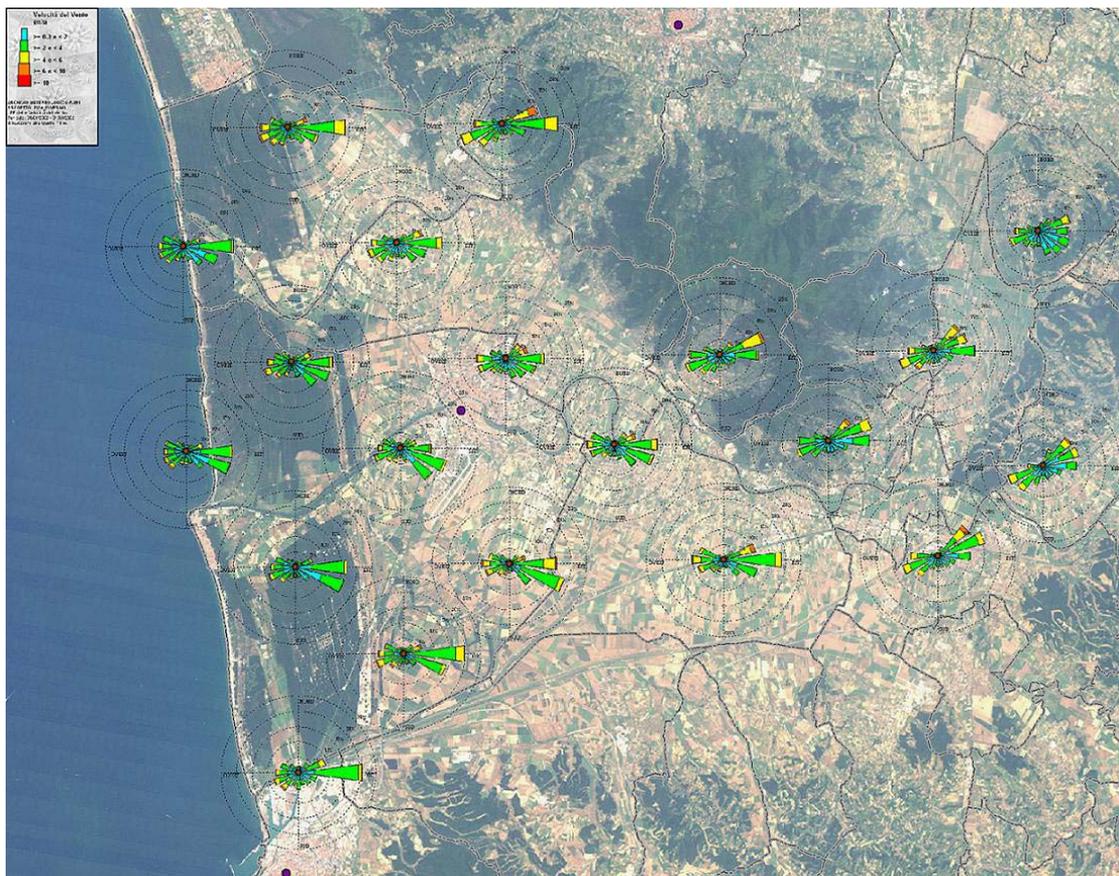




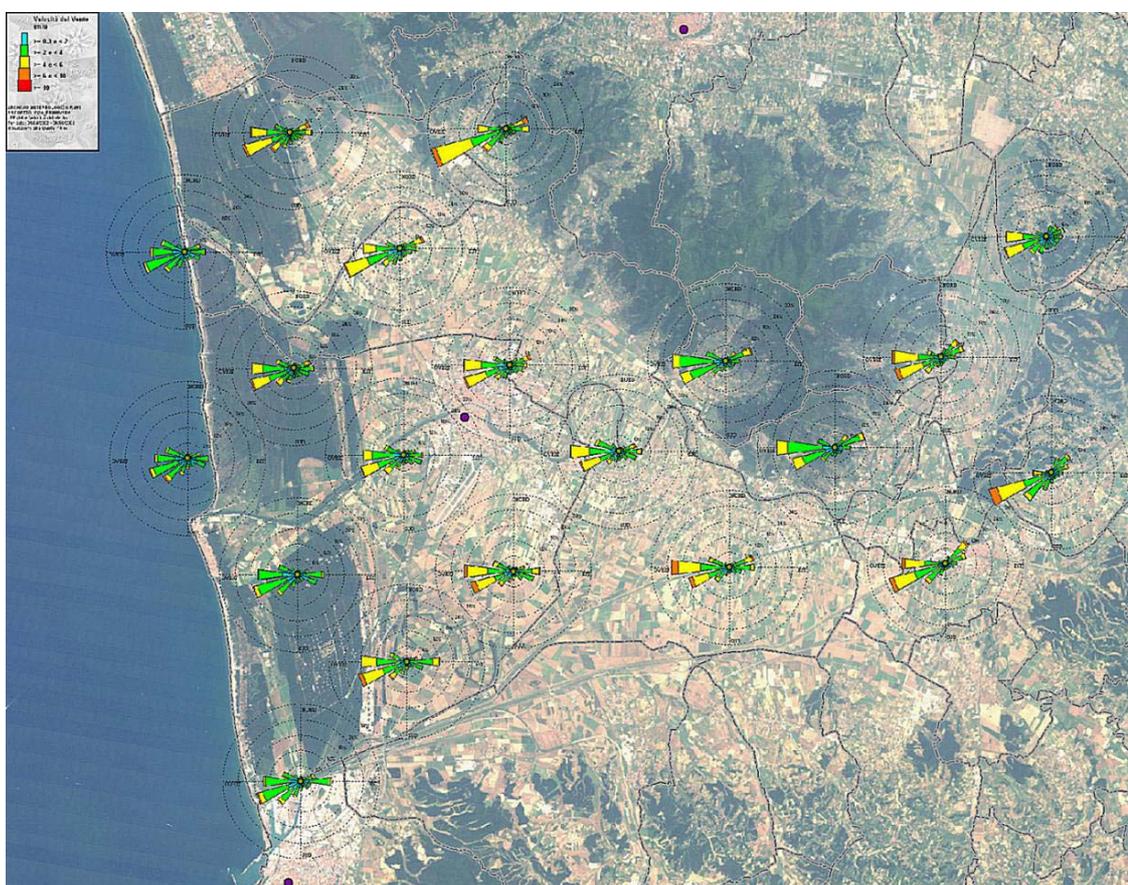
**Fig. 6** – Mappa territoriale d'insieme delle rose dei venti nella provincia di Pisa: stazioni RAMS a 10 m, tutto anno 2002.

La classe di stabilità più ricorrente è senz'altro la D (Fig. 14), relativa a condizioni neutre, con un'incidenza di circa il 50% dei casi; la classe A (Fig. 11) si verifica circa il 2-3%, la classe B (Fig. 12) intorno al 10-15%, la C (Fig. 13) circa 10%, per un totale dell'ordine del 20-25% per le classi relative a condizioni instabili; la classe E (Fig. 15) ha una frequenza di circa il 10% dei casi, mentre la F÷G (Fig. 16) ha un'incidenza dell'ordine del 15-20%, per un totale di circa il 25-30% per l'insieme delle classi che corrispondono a condizioni stabili.

Le condizioni più critiche per la diffusione degli inquinanti si verificano in condizioni di calma di vento o di venti deboli, sia in condizioni stabili e quindi in corrispondenza della classe F÷G, sia in condizioni instabili, e quindi soprattutto della classe A.

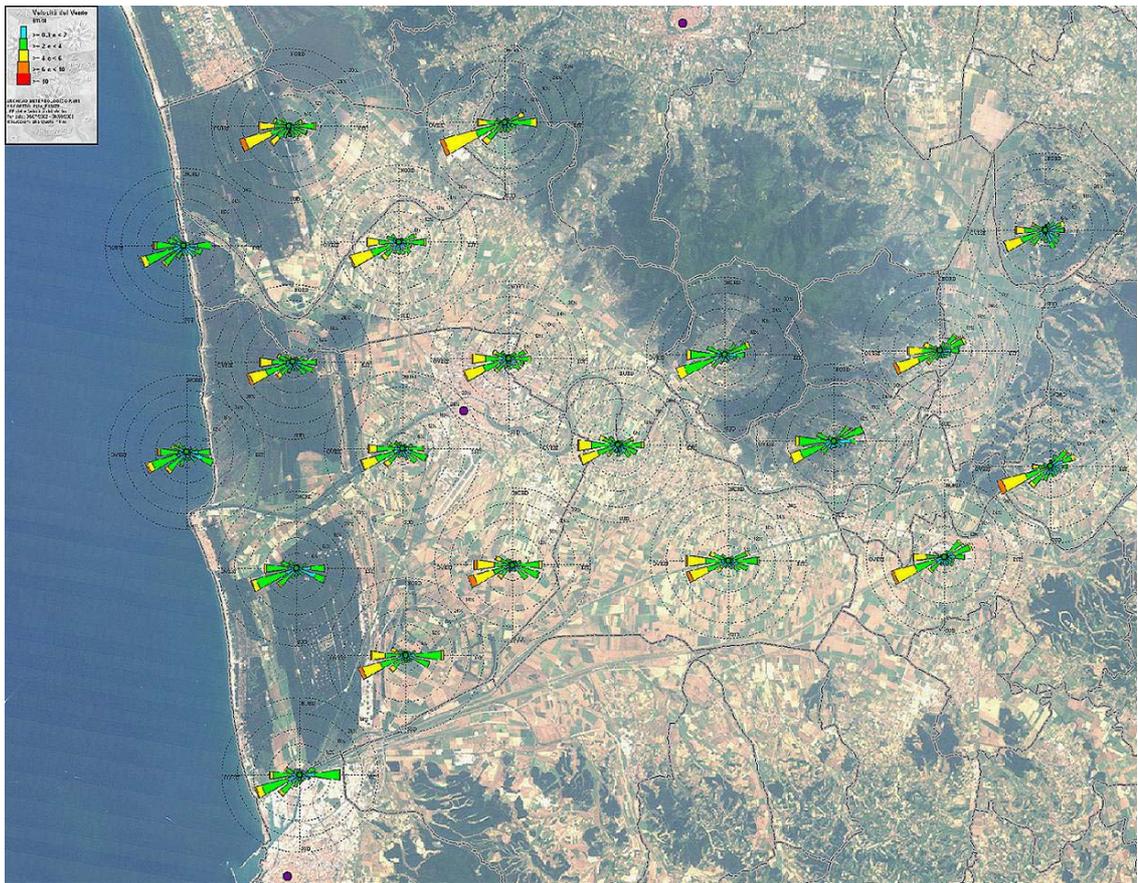


**Fig. 7** – Mappa delle rose dei venti nella provincia di Pisa: stazioni RAMS a 10 m, inverno 2002.

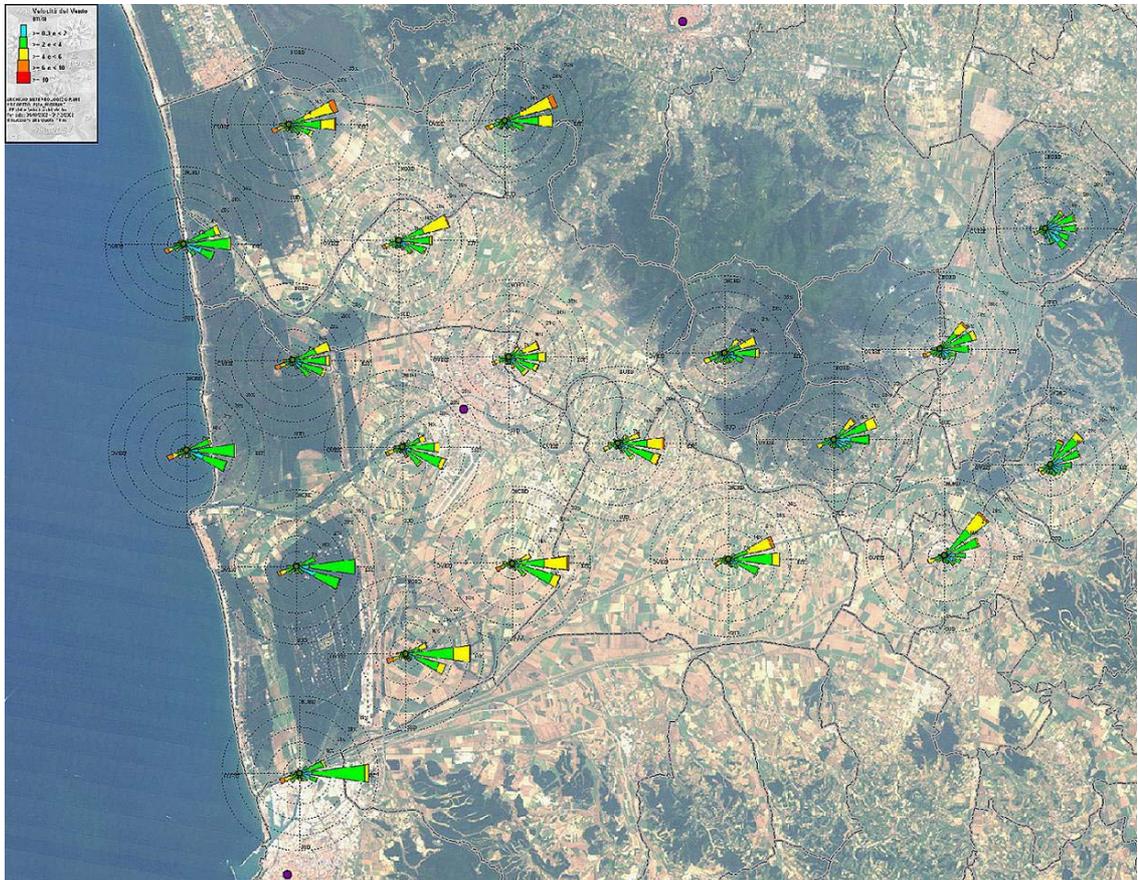


**Fig. 8** – Mappa delle rose dei venti nella provincia di Pisa: stazioni RAMS a 10 m, primavera 2002.



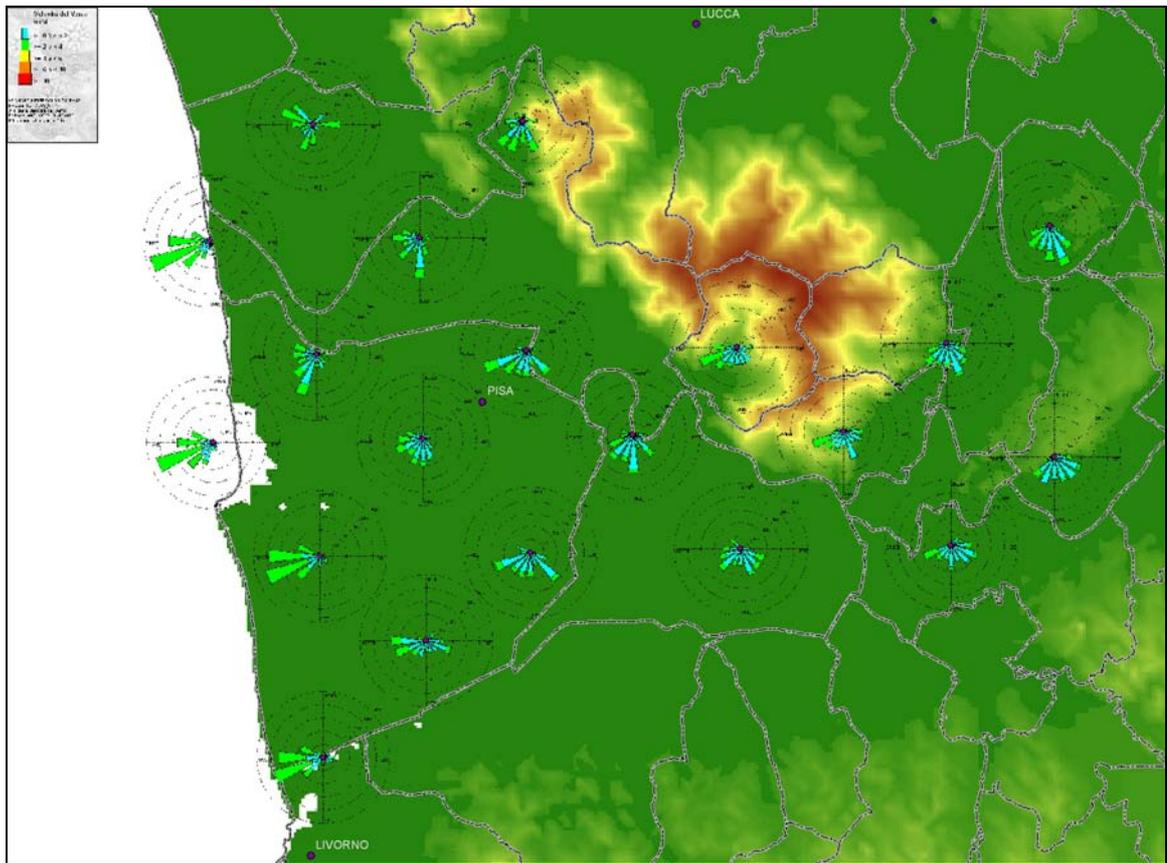


**Fig. 9** – Mappa delle rose dei venti nella provincia di Pisa: stazioni RAMS a 10 m, estate 2002.

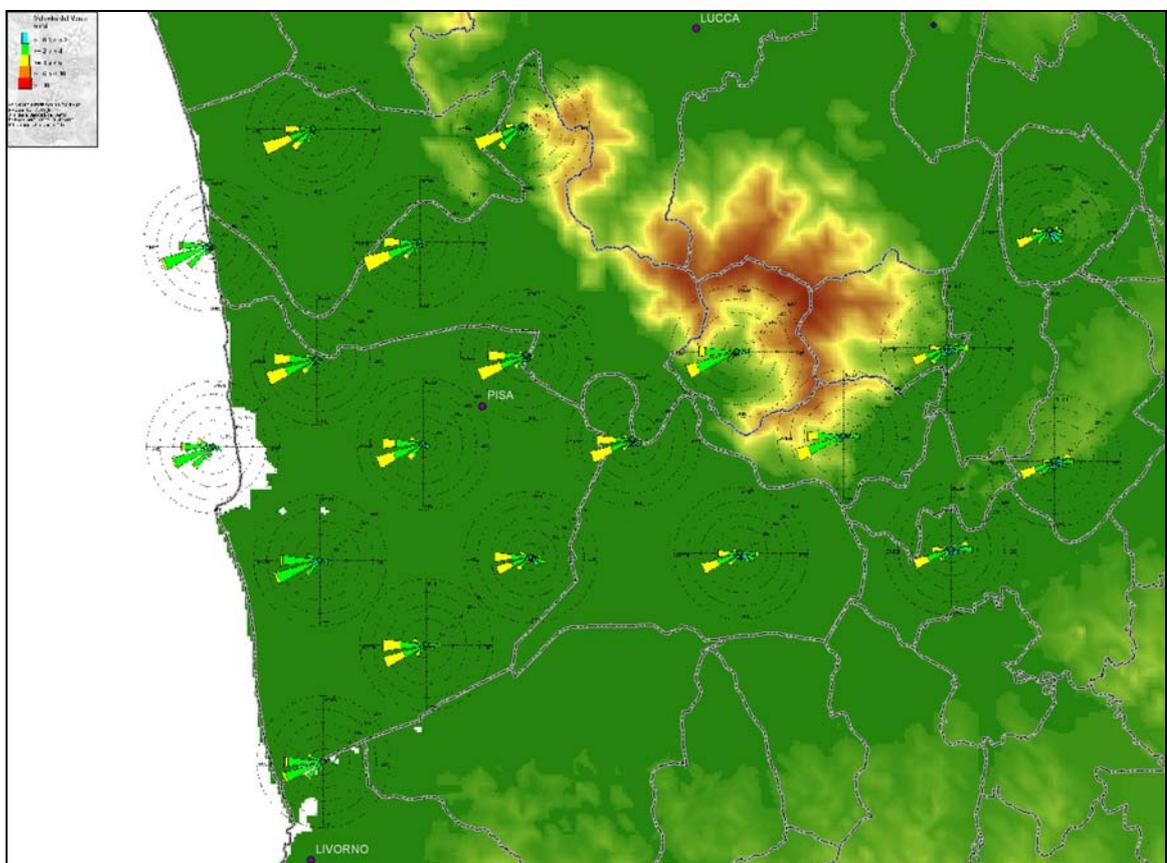


**Fig. 10** – Mappa delle rose dei venti nella provincia di Pisa: stazioni RAMS a 10 m, autunno 2002.

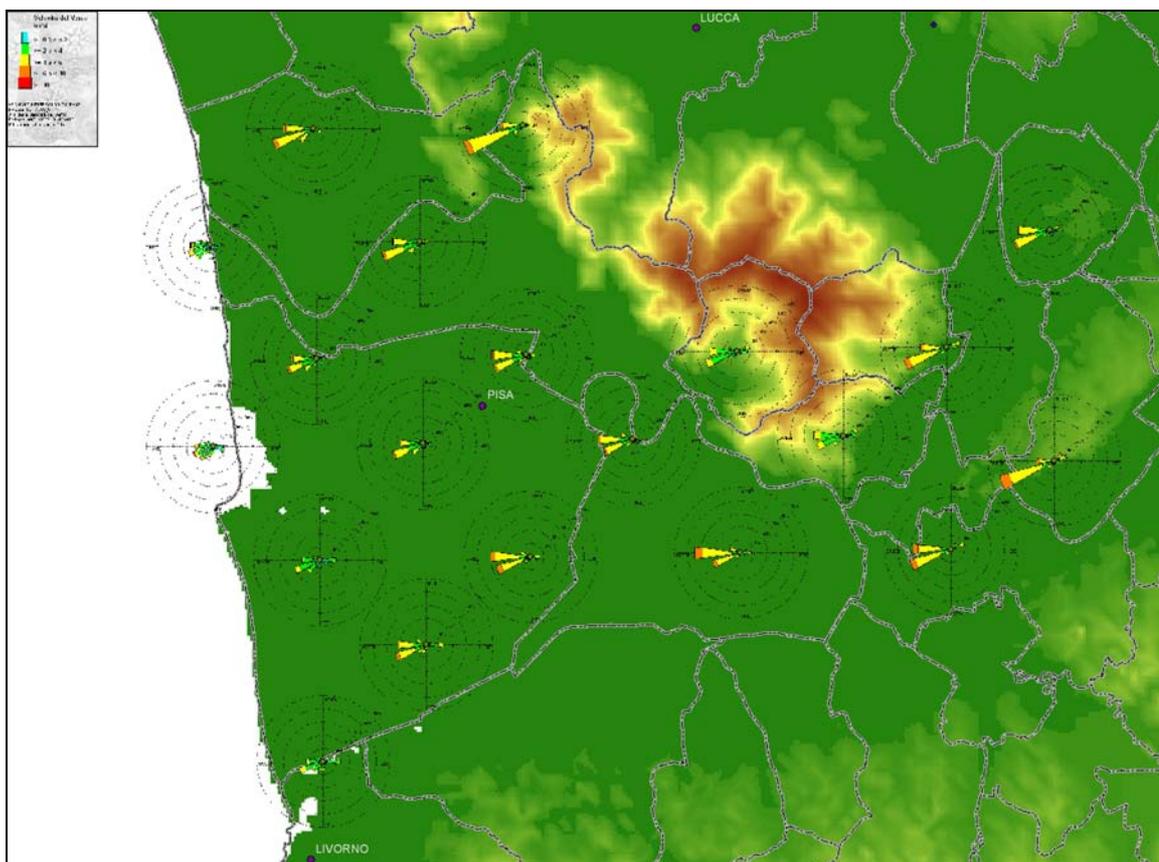




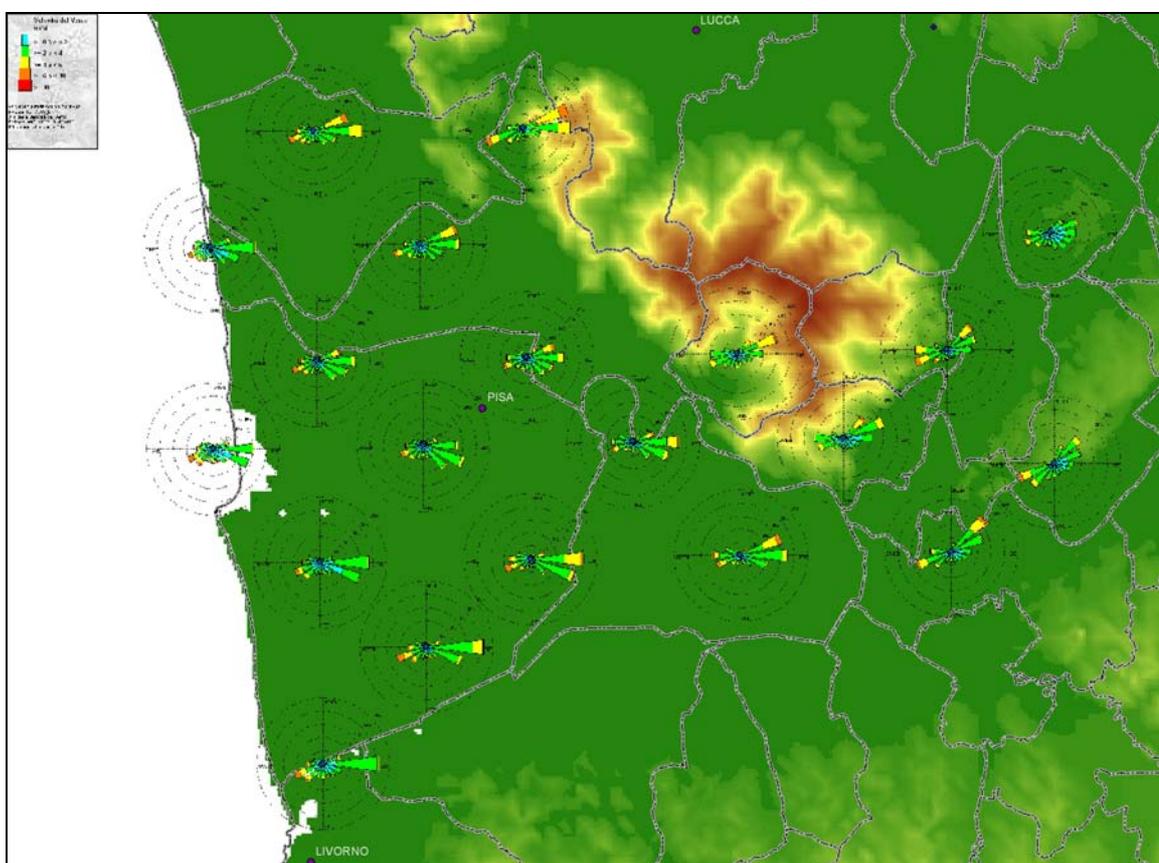
**Fig. 11** – Mappa delle rose dei venti nella provincia di Pisa: stazioni RAMS a 10 m, classe A, tutto anno 2002.



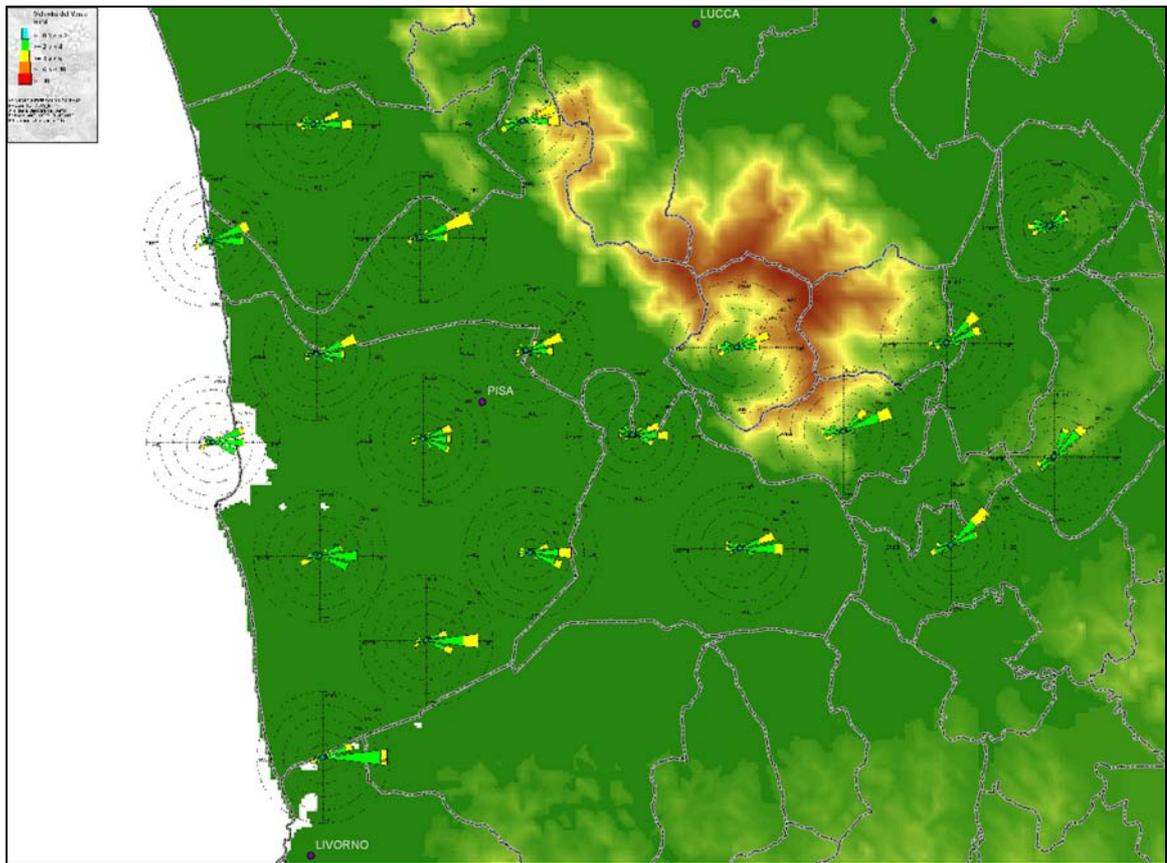
**Fig. 12** – Mappa delle rose dei venti nella provincia di Pisa: stazioni RAMS a 10 m, classe B, tutto anno 2002.



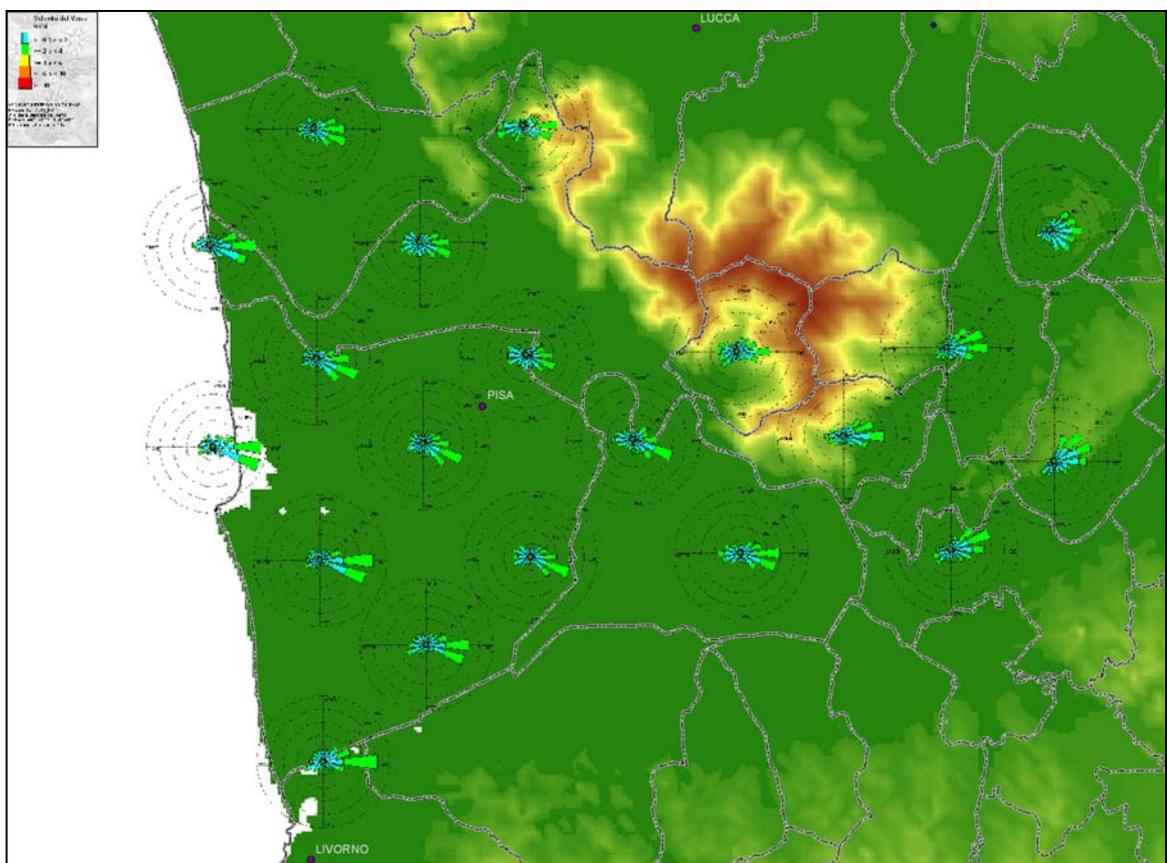
**Fig. 13** – Mappa delle rose dei venti nella provincia di Pisa: stazioni RAMS a 10 m, classe C, tutto anno 2002.



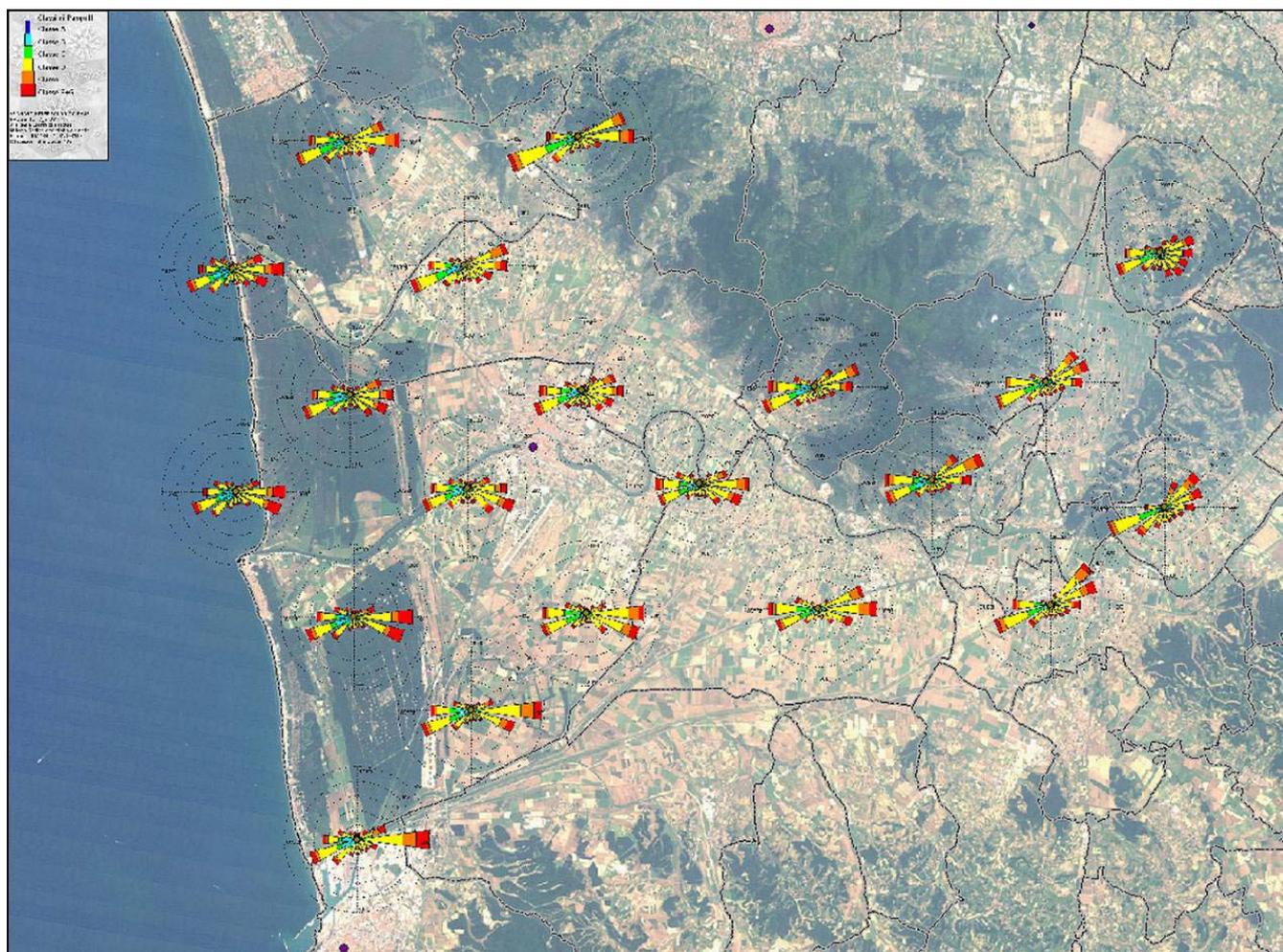
**Fig. 14** – Mappa delle rose dei venti nella provincia di Pisa: stazioni RAMS a 10 m, classe D, tutto anno 2002.



**Fig. 15** – Mappa delle rose dei venti nella provincia di Pisa: stazioni RAMS a 10 m, classe E, tutto anno 2002.



**Fig. 16** – Mappa delle rose dei venti nella provincia di Pisa: stazioni RAMS a 10 m, classe F+G, tutto anno 2002.



**Fig. 17** – Mappa territoriale d’insieme delle classi di stabilità di Pasquill nella provincia di Pisa: stazioni RAMS a 10 m, tutto anno 2002.

#### **4.4.2 Dominio CALMET**

Lo studio anemologico è stato approfondito attraverso l’applicazione del modello CALMET su di un dominio centrato sul Comune di Pisa, di estensione pari a 28x24 Km<sup>2</sup>, con una risoluzione di 0.5 Km (Fig. 4).

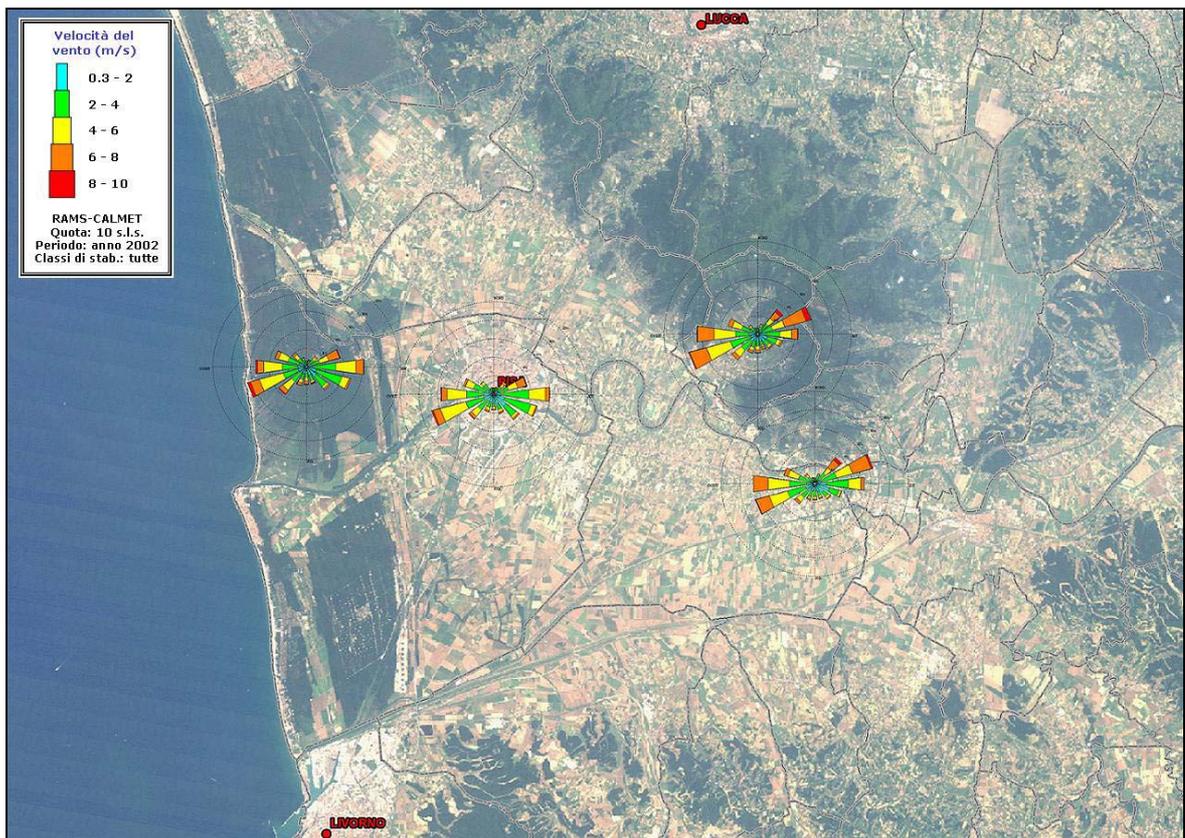
Il periodo temporale corrisponde all’intero anno 2002: sono stati determinati i valori orari delle principali variabili atmosferiche su base oraria e per un numero di celle pari a 56x48=2688. Come illustrato nelle Figg. 18-23, i campi di vento ottenuti su base oraria sono stati elaborati in forma grafica solo per alcuni giorni, mentre elaborazioni *long-term* sull’intero periodo sono state realizzate per quattro punti rappresentativi di tipologie differenti, in corrispondenza di Pisa (area urbana), S. Rossore (costa), Cascina (entroterra), Calci (presenza di orografia).

In linea di principio, una maggiore risoluzione può aggiungere importanti informazioni, in quanto *input* territoriali più dettagliati – ad es. orografia e uso del suolo – influiscono sulle stime dei campi di vento. Nella presente applicazione, essendo il dominio di studio prevalentemente pianeggiante, le principali differenze rispetto alle

stime di vento relative all'archivio RAMS, derivano dalla migliore risoluzione dell'uso del suolo, che può assumere valori anche molto diversi rispetto a quelli adottati per il modello RAMS, caratterizzato da una risoluzione di 4 Km.

Confrontando le tavole relative alle rose dei venti annuali e stagionali ottenute elaborando le stime RAMS e quelle che si ottengono elaborando le stime CALMET (Figg. 18-23), si può notare che, nel secondo caso, la velocità del vento è più sostenuta; questo fenomeno è maggiormente accentuato per la stazione in prossimità di Calci, in cui si evidenzia maggiormente l'effetto delle brezze monte-valle. Nei quattro casi, le direzioni di provenienza prevalenti sono quelle individuate dalle stime RAMS, anche se in questo caso si osserva una maggiore distribuzione spaziale rispetto alle altre direzioni; questo fenomeno si può facilmente spiegare considerando che CALMET stima il vento (direzione e velocità) a 10 m dal suolo, mentre RAMS stima il vento a 38 m e solo la componente orizzontale della velocità del vento viene riscalata a 10 m in base alla nota equazione logaritmica (§ 3.2).

In generale, si può concludere che l'applicazione del CALMET non ha apportato sostanziali modifiche rispetto al quadro ottenuto dalle stime del modello RAMS, anche se un maggior dettaglio dell'uso del suolo e dell'orografia - segnatamente per l'area attigua al Monte Pisano - oltre al valore aggiunto di una stima della direzione del vento a 10 m, ha contribuito a completare l'analisi anemologica del sito. L'applicazione modellistica è stata di fondamentale importanza, come vedremo nel prossimo paragrafo, per ottenere la stima dell'altezza di miscelamento nell'arco dell'anno. Infine, la stima del regime anemologico sulla base delle classi di stabilità è sostanzialmente congruente con i risultati ottenuti con il metodo che utilizza le stime RAMS per il vento e i dati misurati per la radiazione; si ha quindi una conferma della validità dell'approccio esclusivamente modellistico per la valutazione dell'indicatore basato sulla stima delle classi di stabilità.

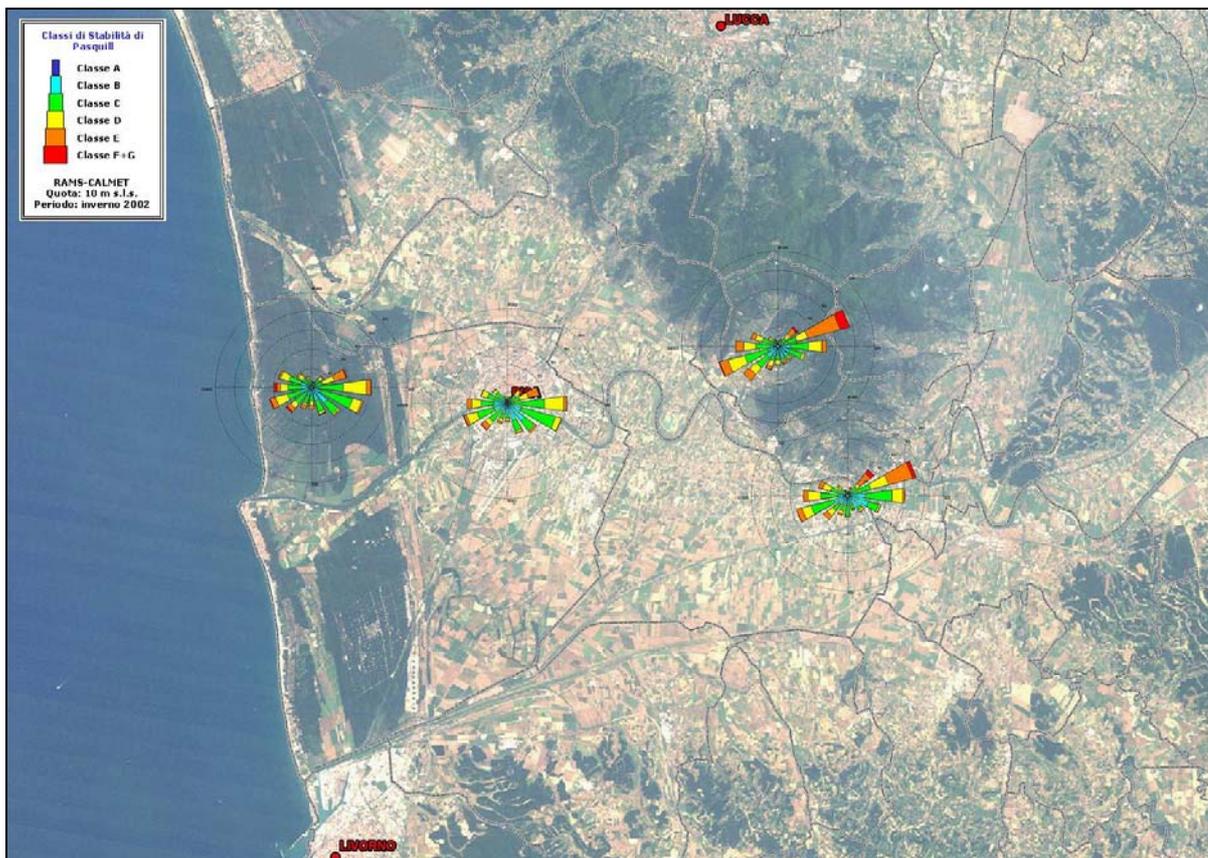


**Fig. 18** – Applicazione RAMS-CALMET nella provincia di Pisa per tutto l’anno 2002: mappa delle rose dei venti a 10 m nei punti del grigliato più prossimi alle stazioni di S. Rossore, Pisa, Cascina e Calci.

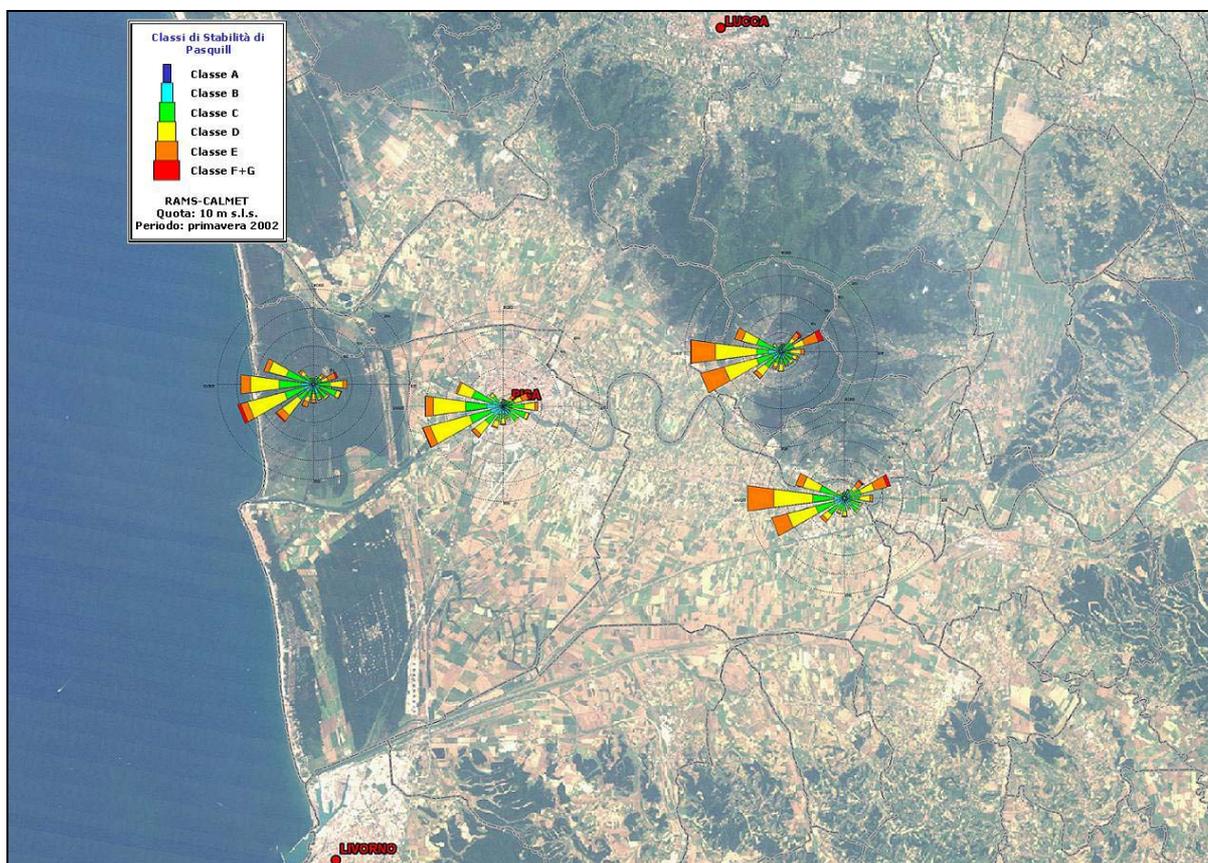


**Fig. 19** – Applicazione RAMS-CALMET nella provincia di Pisa per tutto l’anno 2002: mappa delle classi di stab.a 10 m nei punti del grigliato più prossimi alle stazioni di S. Rossore, Pisa, Cascina e Calci.



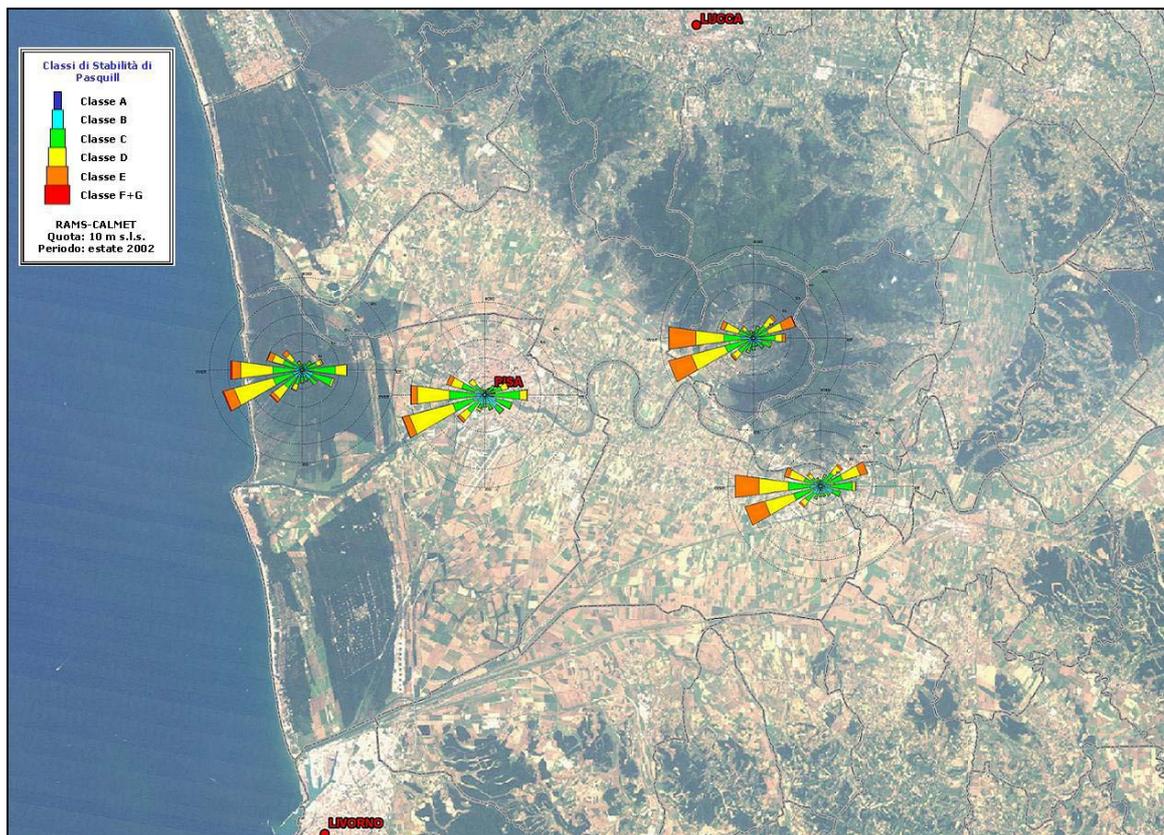


**Fig. 20** – Applicazione RAMS-CALMET nella provincia di Pisa per l’inverno 2002: mappa delle rose dei venti a 10 m nei punti del grigliato più prossimi alle stazioni di S. Rossore, Pisa, Cascina e Calci.

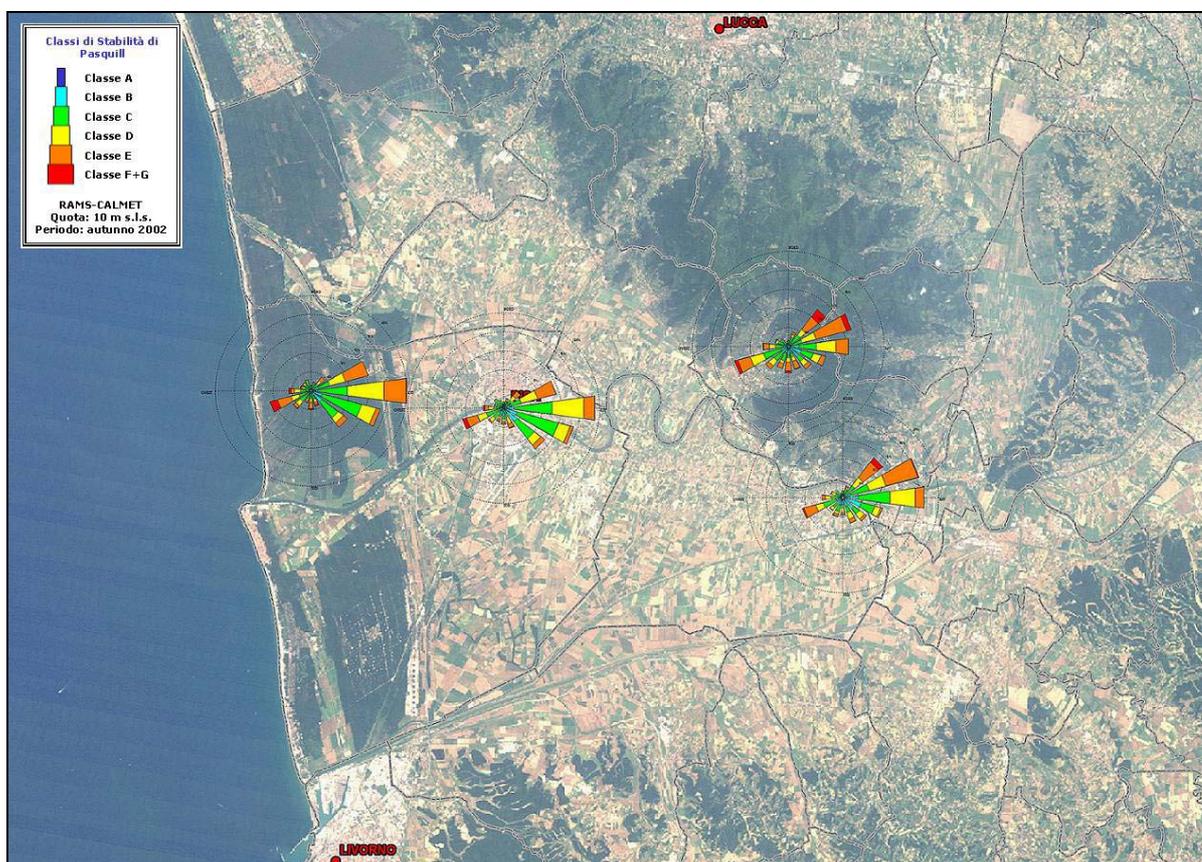


**Fig. 21** – Applicazione RAMS-CALMET nella provincia di Pisa per la primavera 2002: mappa delle rose dei venti a 10 m nei punti del grigliato più prossimi alle stazioni di S. Rossore, Pisa, Cascina e Calci.





**Fig. 22** – Applicazione RAMS-CALMET nella provincia di Pisa per l'estate 2002: mappa delle rose dei venti a 10 m nei punti del grigliato più prossimi alle stazioni di S. Rossore, Pisa, Cascina e Calci.



**Fig. 23** – Applicazione RAMS-CALMET nella provincia di Pisa per l'autunno 2002: mappa delle rose dei venti a 10 m nei punti del grigliato più prossimi alle stazioni di S. Rossore, Pisa, Cascina e Calci.



## 4.5 Altezza di miscelamento

L'altezza di miscelamento è stata stimata con il modello CALMET sul dominio di 28x24 Km<sup>2</sup>, su base oraria, per l'intero anno 2002.

Anche in questo caso, come per la variabile vento, le stime ottenute sono state elaborate graficamente sull'intero dominio per due giorni-campione, uno invernale ed uno estivo. Nelle figure 28-31 è riportata una visualizzazione tridimensionale, sul dominio di applicazione, dell'andamento dell'altezza di miscelamento e dei campi di vento a 10 m dal suolo nelle ore sinottiche, per i giorni 15/07/2002 e 22/12/2002.

In questo modo si evidenzia l'andamento giornaliero dell'altezza di miscelamento, con valori che aumentano nel corso della mattina, fino ad un massimo nelle ore centrali del giorno ed una successiva diminuzione dopo il tramonto; si evidenzia inoltre il diverso comportamento sul dominio spaziale, ed in particolare sul mare, nell'area costiera, nell'entroterra pianeggiante e in presenza di orografia. Nella giornata invernale l'andamento giornaliero dell'altezza di miscelamento è sempre significativa, anche se nelle ore centrali del giorno i valori restano più bassi rispetto al caso estivo; inoltre è più marcata la disomogeneità di comportamento sul dominio spaziale.

Le stime orarie sono state elaborate per l'intero periodo per quattro punti – Pisa, S. Rossore, Calci, Cascina – in modo da ottenere l'andamento nel giorno-medio; per ciascuna ora del giorno è stato determinato il valore medio, per riprodurre un andamento giornaliero tipico, sia su base annuale che stagionale.

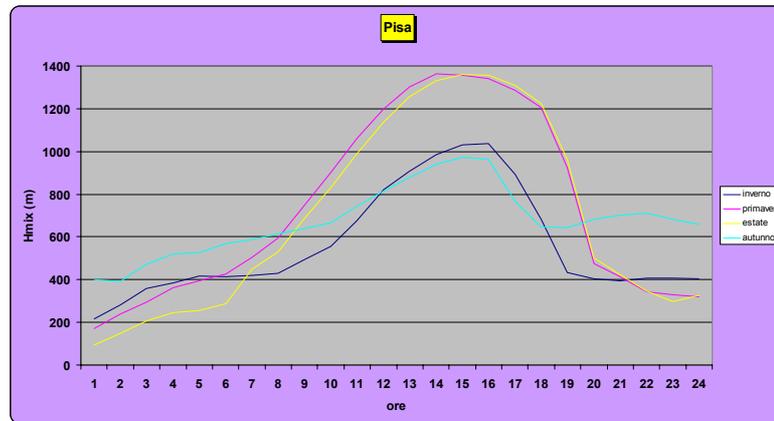
Su base annuale si può notare un marcato andamento di variazione giornaliera (Fig. 26): questo effetto è più evidente per Pisa e Cascina, nell'entroterra pianeggiante, rispetto a S. Rossore, sulla costa e a Calci, che risente dell'orografia. A livello stagionale (Fig. 27), l'andamento di variazione giornaliera è più marcato in primavera ed in estate: l'altezza di miscelamento, a causa del riscaldamento del suolo, raggiunge valori più alti proprio nel semestre estivo, nelle ore centrali del giorno. I mesi autunnali, caratterizzati da venti più sostenuti, hanno invece una escursione giornaliera meno pronunciata per Pisa e Cascina, e praticamente inesistente per S. Rossore e Calci, per cui si evidenziano tre picchi poco marcati, nelle prime ore del mattino, nelle ore centrali e in tarda serata.

In termini numerici, per Pisa (Fig. 24) (e analogamente per Cascina, che ha un comportamento del tutto simile) i valori massimi vengono raggiunti nel semestre caldo, con valori di circa 1400 m nelle ore centrali e valori minimi dell'ordine di 100 m durante la notte e all'alba; in inverno l'escursione giorno-notte è meno accentuata, con valori minimi di 200 m e massimi di circa 1000 m.

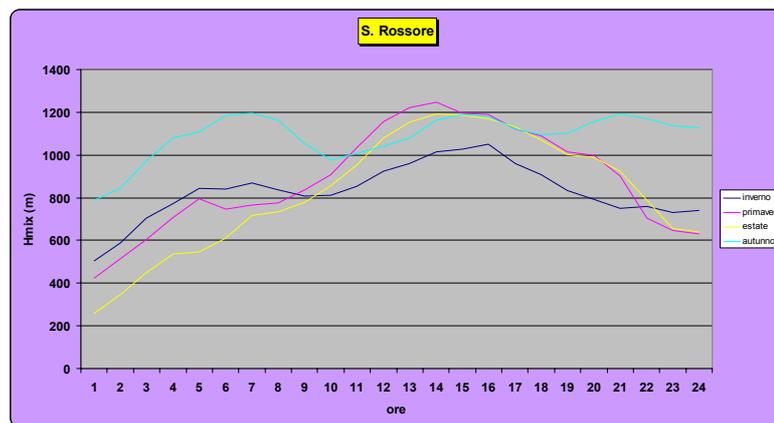
L'altezza di miscelamento a S. Rossore (Fig. 25) è caratterizzata da escursioni giornalieri meno marcate, con valori massimi di circa 1200m e valori minimi intorno a



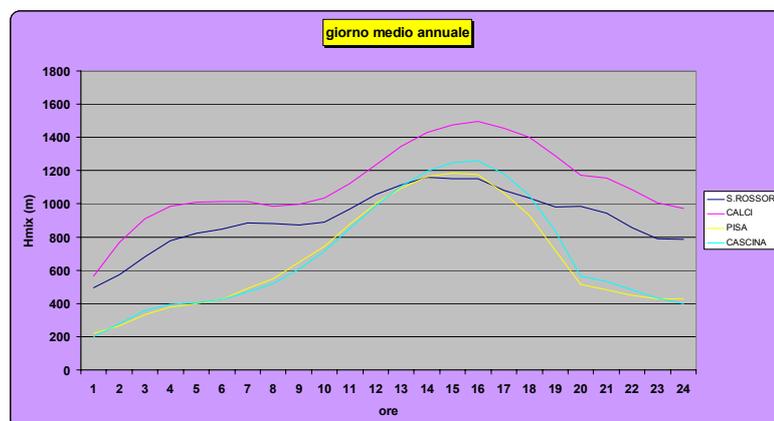
250 m; questa variabile nell'area di Calci ha un andamento del tutto simile, ma con valori più alti, sia a livello annuo che stagionale, con valori massimi dell'ordine di 1700 m e minimi dell'ordine di 400 m.



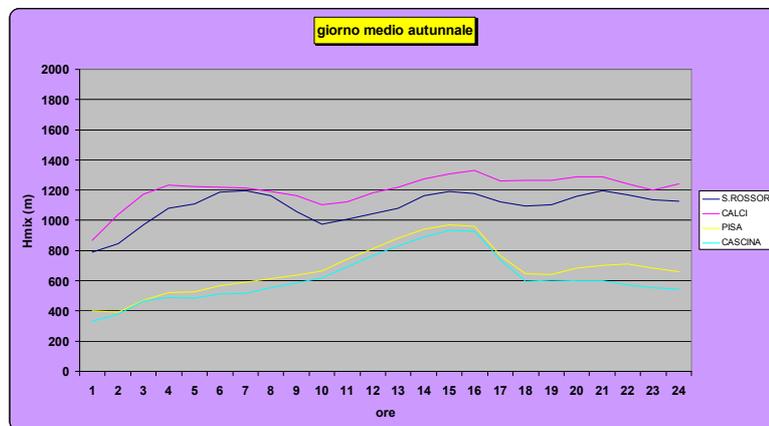
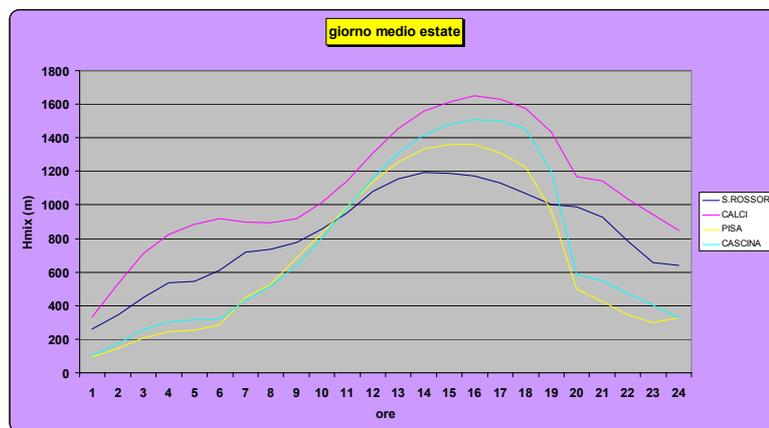
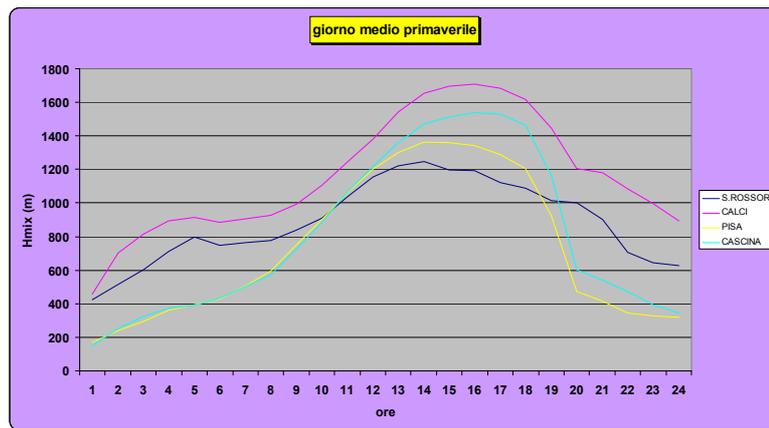
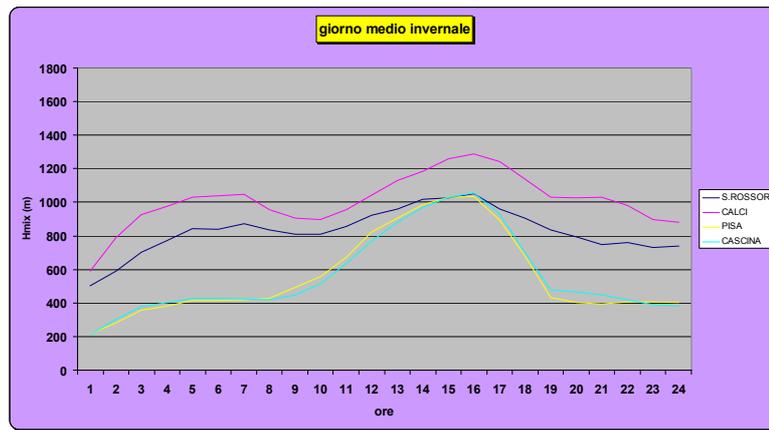
**Fig. 24** – Andamento giornaliero dell'altezza di miscelamento al variare della stagione, presso Pisa.



**Fig. 25** – Andamento giornaliero dell'altezza di miscelamento al variare della stagione, presso S. Rossore.

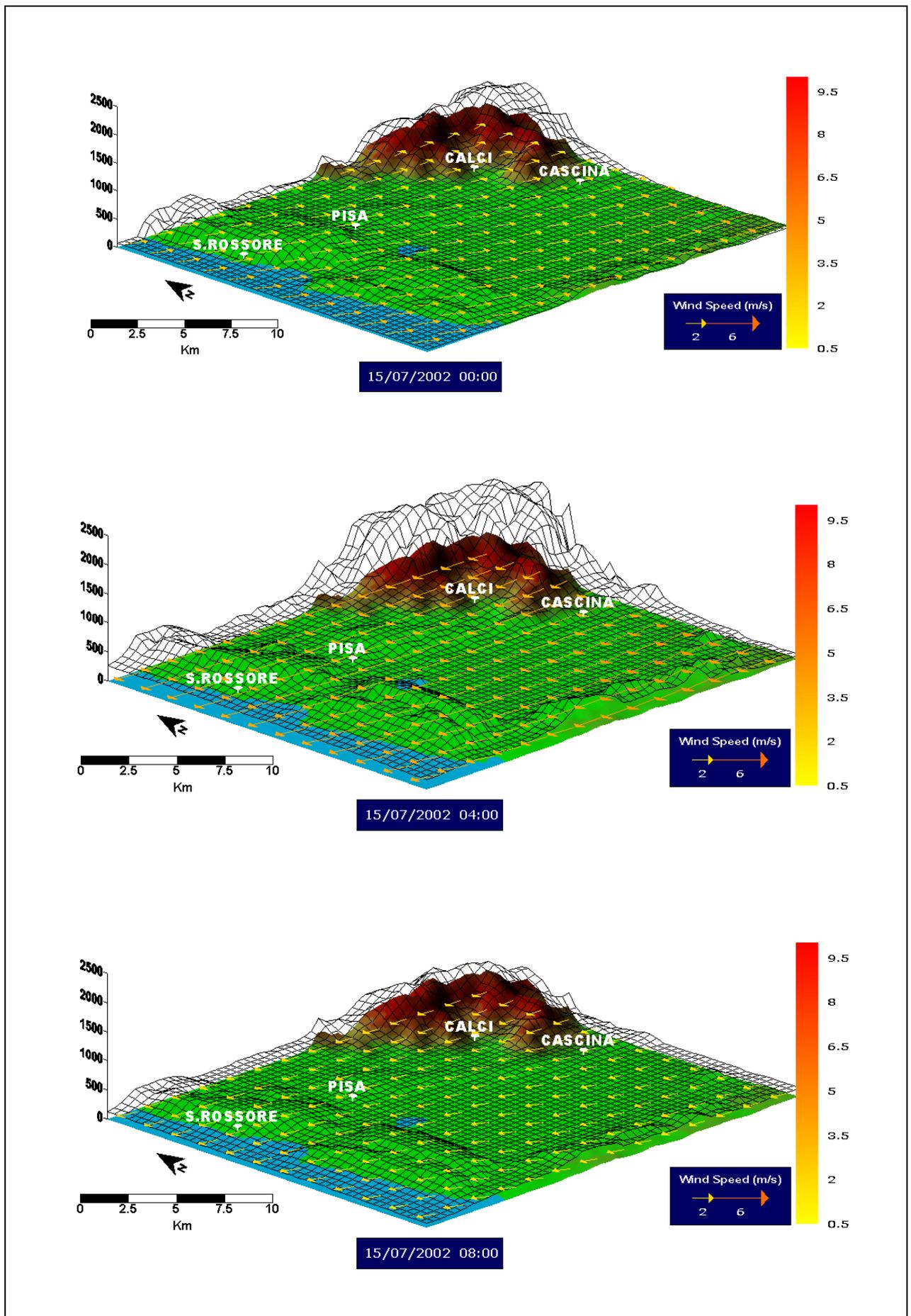


**Fig. 26** – Andamento giornaliero dell'altezza di miscelamento per il giorno medio annuale nei punti del grigliato più prossimi a S. Rossore, Pisa, Cascina e Calci.



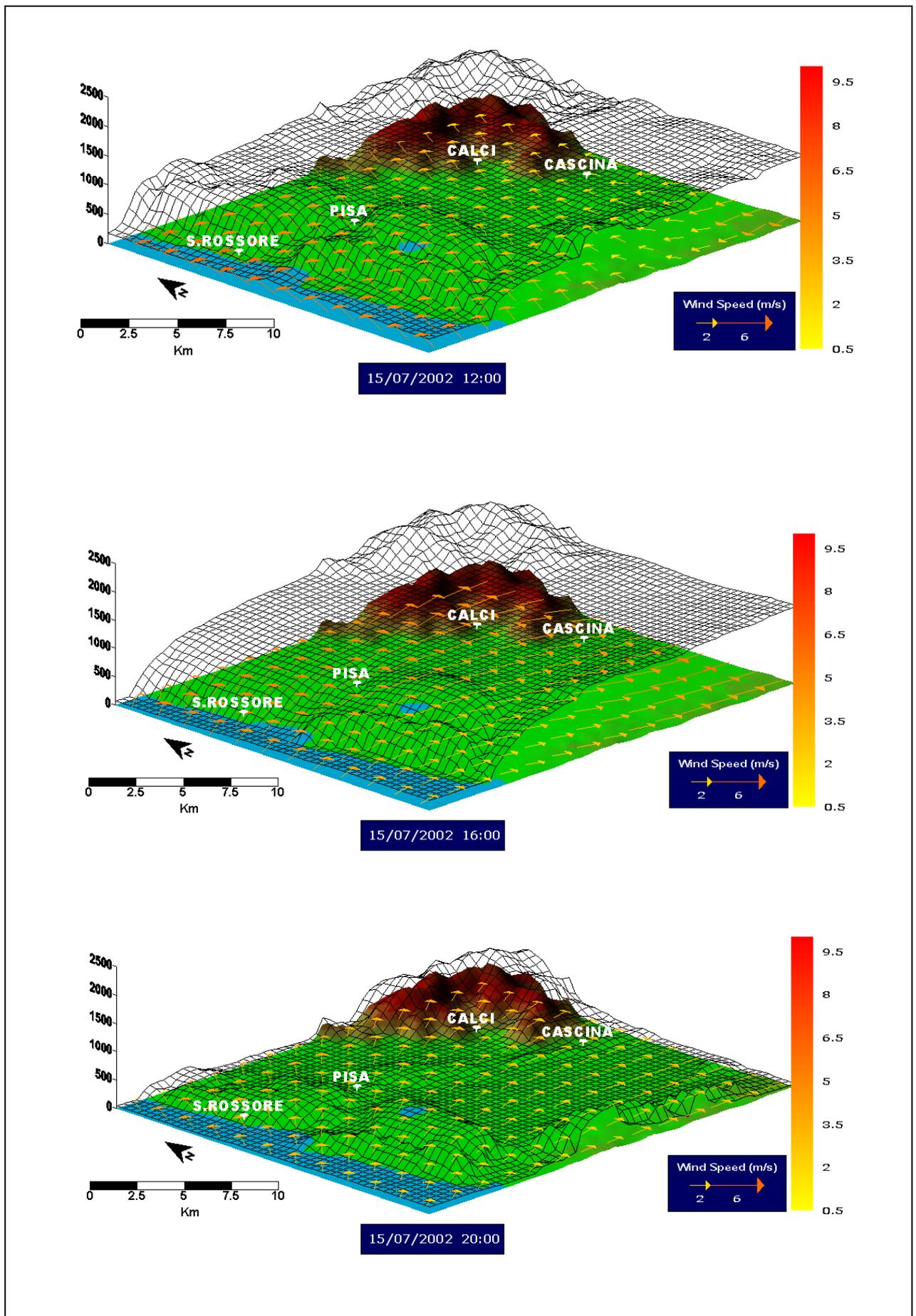
**Fig. 27** –Andamento giornaliero dell’altezza di miscelamento per il giorno medio invernale, primaverile, estivo, autunnale, nei punti del grigliato più prossimi a S. Rossore, Pisa, Cascina e Calci.





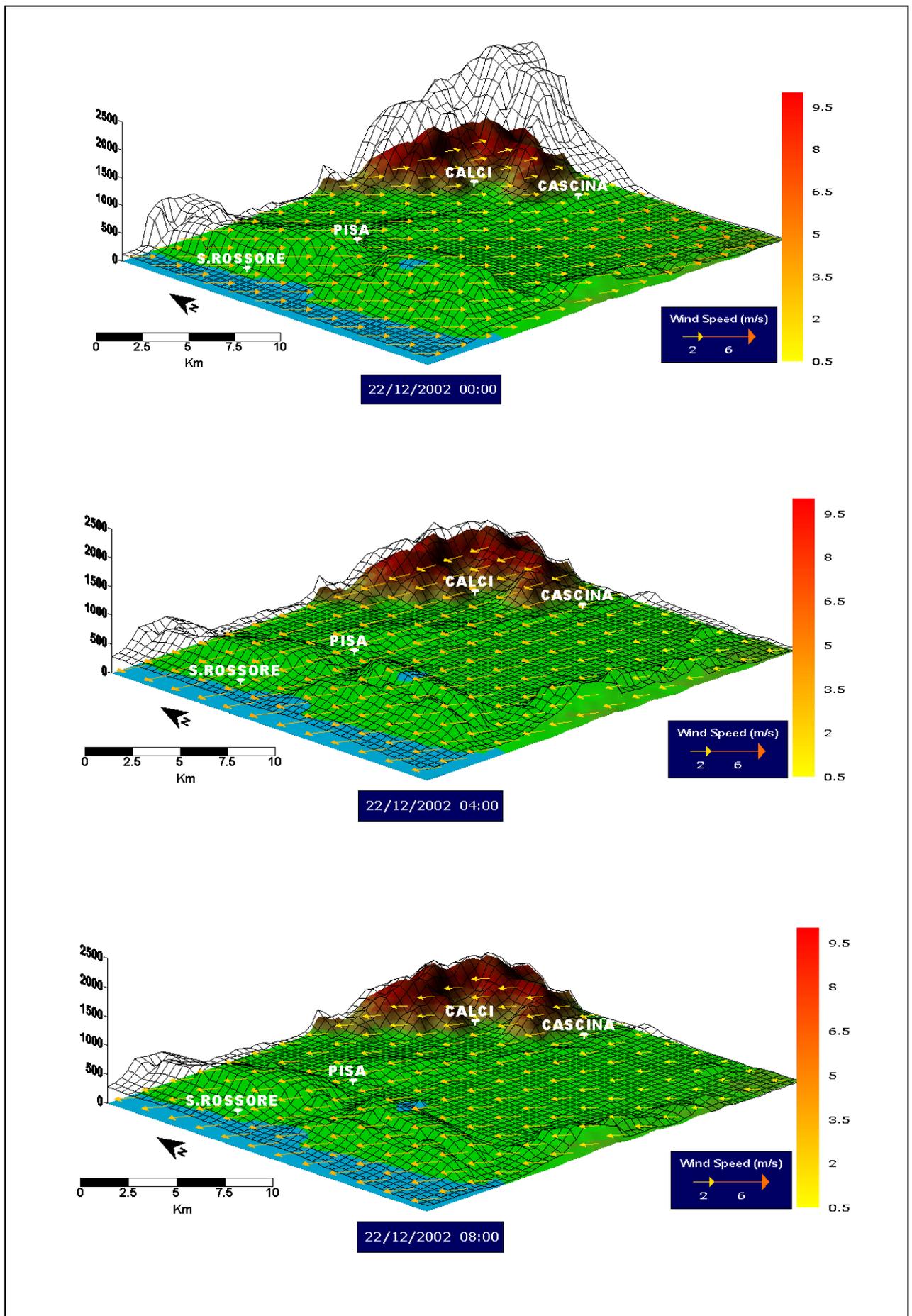
**Fig. 28** – Applicazione RAMS-CALMET nella provincia di Pisa: ricostruzione dell'andamento spaziale dell'altezza di miscelamento per il giorno 15/07/2002 (hh. 00, 04, 08).





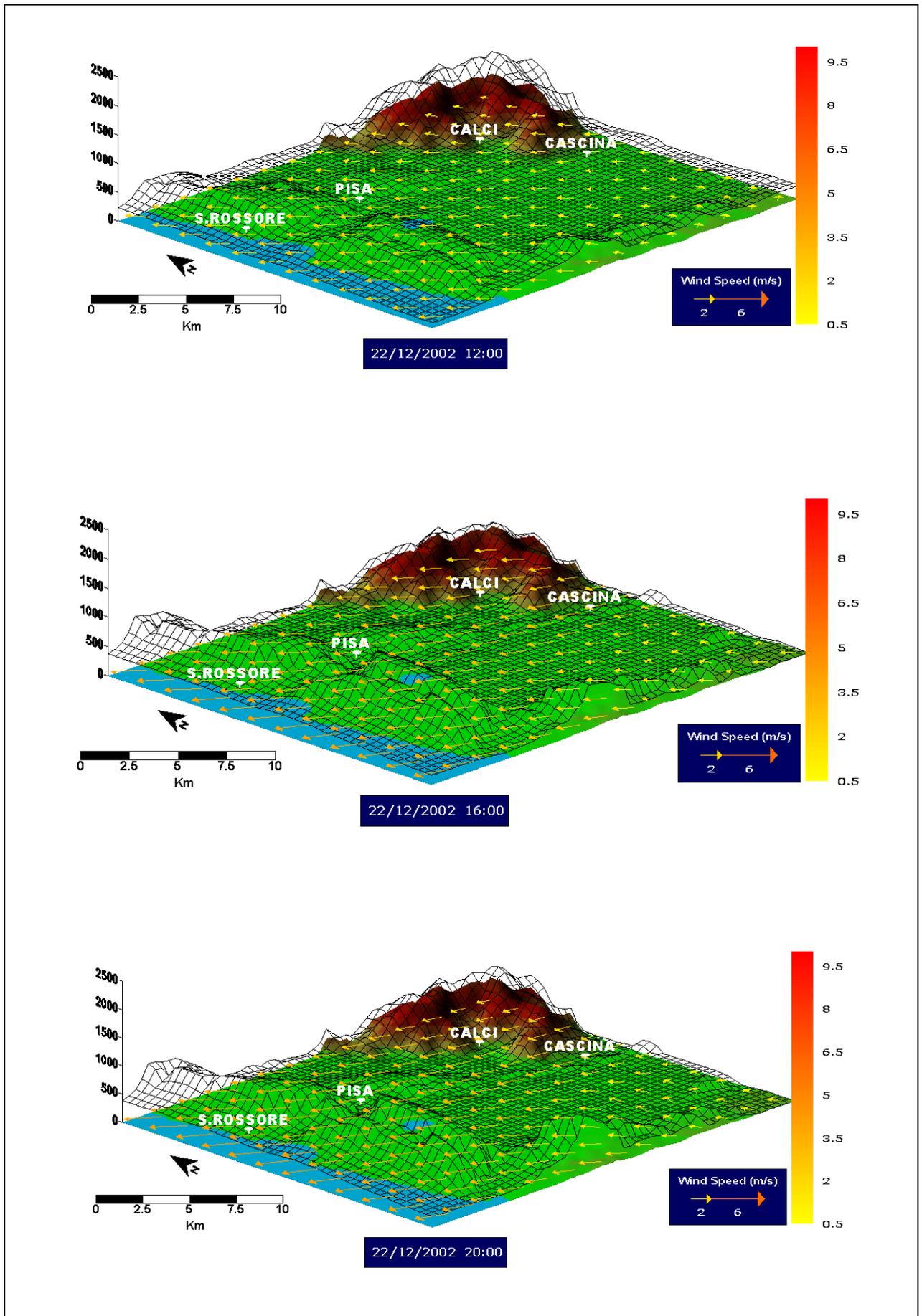
**Fig. 29** – Applicazione RAMS-CALMET nella provincia di Pisa: ricostruzione dell'andamento spaziale dell'altezza di miscelamento per il giorno 15/07/2002 (hh. 12, 16, 20).





**Fig. 30** – Applicazione RAMS-CALMET nella provincia di Pisa: ricostruzione dell'andamento spaziale dell'altezza di miscelamento per il giorno 22/12/2002 (hh. 00, 04, 08).





**Fig. 31** – Applicazione RAMS-CALMET nella provincia di Pisa: ricostruzione dell'andamento spaziale dell'altezza di miscelamento per il giorno 22/12/2002 (hh. 12, 16, 20).



Per completare l'analisi relativa all'altezza di miscelamento, ed in particolare per permettere il confronto con le altre metodologie di stima di altezza di miscelamento, è stata effettuata una analisi statistica, dividendo i valori assunti dall'altezza di miscelamento in classi; anche in questo caso, le elaborazioni sono state condotte per Pisa e S. Rossore Calci e Cascina.

Le stime orarie della variabile di interesse sono state elaborate in modo da ottenere le frequenze di accadimento in base alla seguente classificazione: condizioni in cui la base dell'inversione si trova al di sotto dei 100 m; condizioni in cui la base dell'inversione si trova tra 100 m e 150 m; condizioni in cui la base dell'inversione si trova tra 150 m e 250 m; condizioni in cui la base dell'inversione si trova tra 250 m e 300 m; condizioni in cui la base dell'inversione è superiore a 300 m. Le elaborazioni per ottenere le frequenze di accadimento sono state effettuate su base annua. Di seguito è riportata la tabella che sintetizza i risultati per i quattro punti.

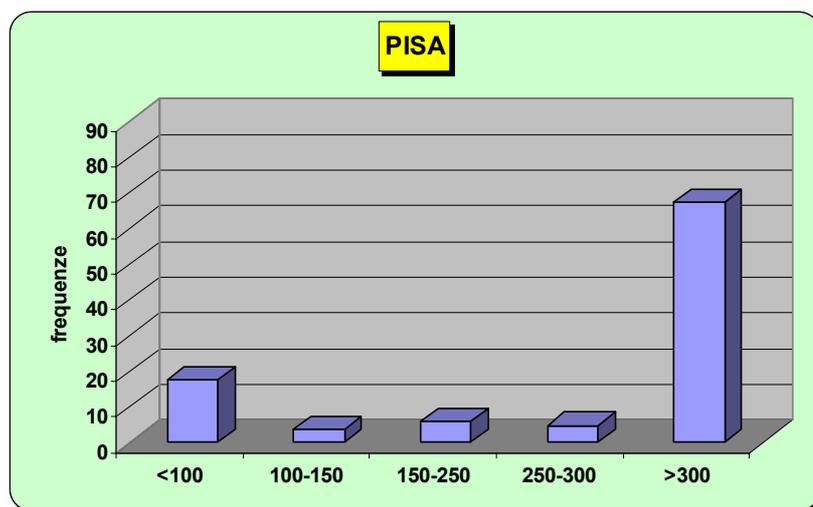
**Tab.5** - Frequenze percentuali (%) delle classi caratterizzanti l'altezza di miscelamento, calcolate su base annua (anno 2002).

<b>Classi di Hmix (m)</b>	<b>Pisa</b>	<b>S.Rossore</b>	<b>Calci</b>	<b>Cascina</b>
<b>&lt;100</b>	17.7	9.0	8.7	18.0
<b>100-150</b>	3.6	2.0	2.0	3.9
<b>150-250</b>	6.2	4.0	3.6	5.7
<b>250-300</b>	4.9	3.2	2.6	4.9
<b>&gt;300</b>	67.6	81.8	83.0	67.5

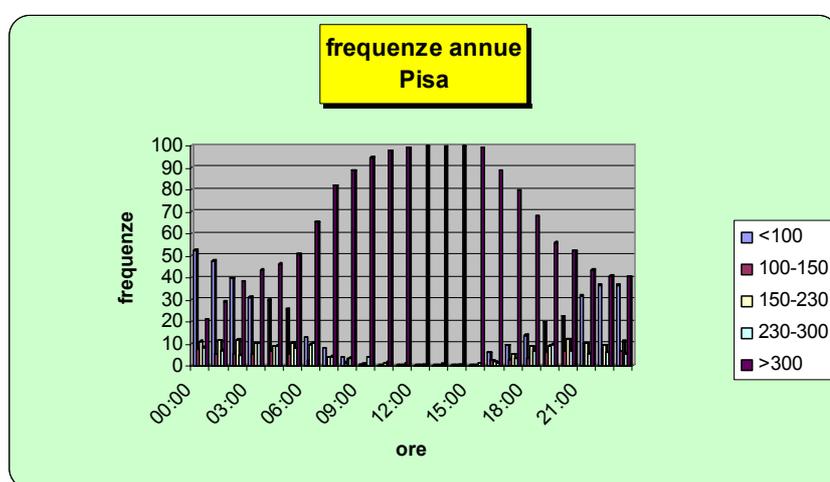
Dalla tabella si può notare che per Pisa e Cascina si hanno dei risultati del tutto simili, così come per S. Rossore e Calci.

La classe che ha una incidenza maggiore, per tutti i punti analizzati, è quella relativa ad Hmix superiore a 300 m, con valori di circa 67% per Pisa e Cascina e valori superiori all'80% negli altri due casi. La classe 1, relativa alle condizioni con Hmix minore di 100 m, ha una incidenza di circa il 18% per Pisa e Cascina, mentre diminuisce, con il 9% per S. Rossore e Calci; le altre classi hanno una incidenza decisamente inferiore.

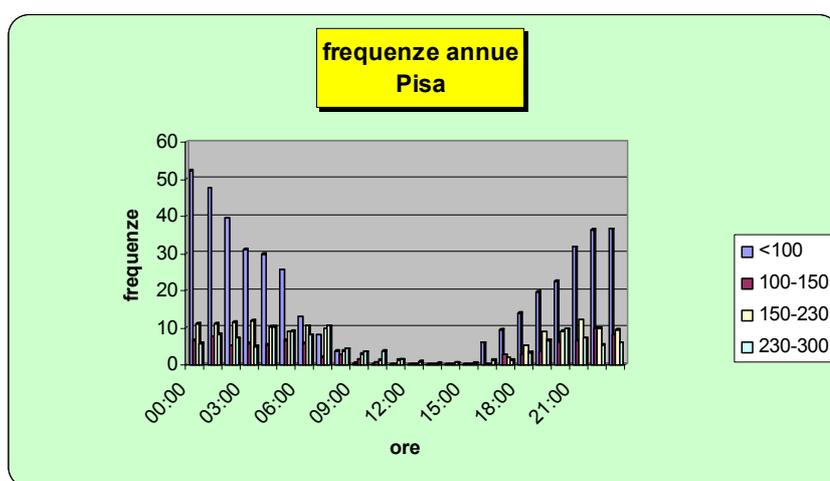
Nei grafici seguenti – Figg.32-38 - sono riportate le percentuali di accadimento per le cinque classi, al variare dell'ora del giorno, in modo da ottenere una sorta di giorno-medio, su base annua.



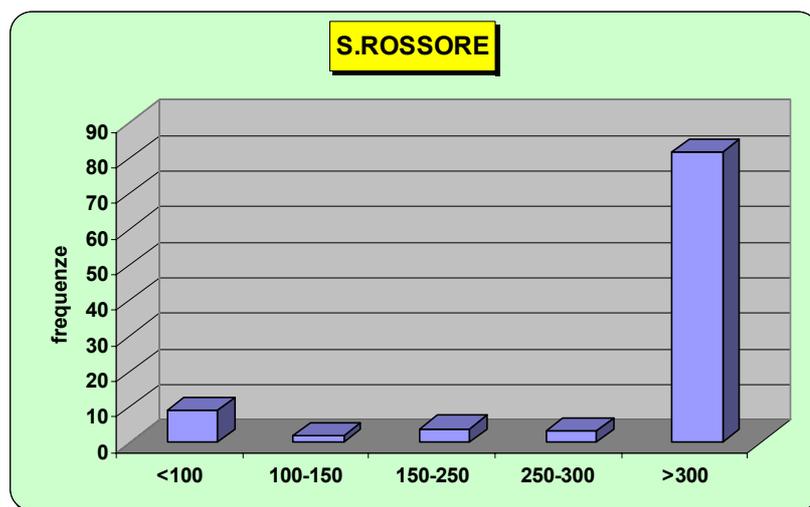
**Fig. 32** –Istogrammi di frequenza dell’altezza di miscelamento relativa al punto del grigliato più prossimo a Pisa.



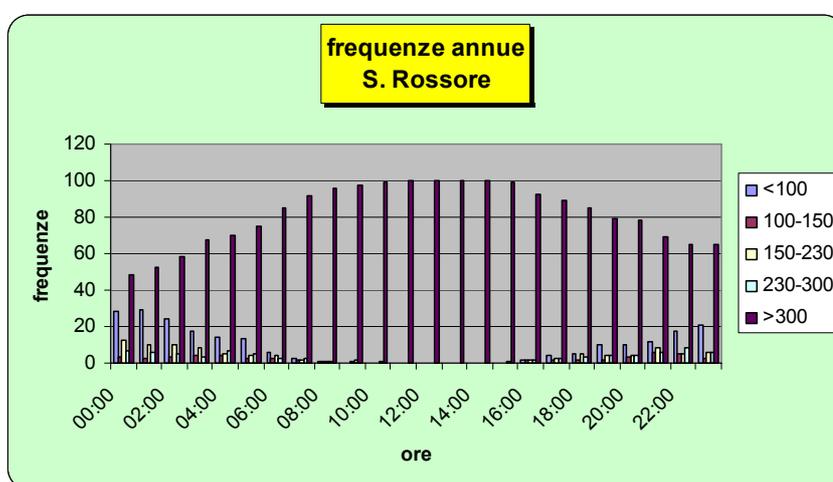
**Fig. 33** –Istogrammi di frequenza dell’altezza di miscelamento relativa al punto del grigliato più prossimo a Pisa, al variare delle ore del giorno.



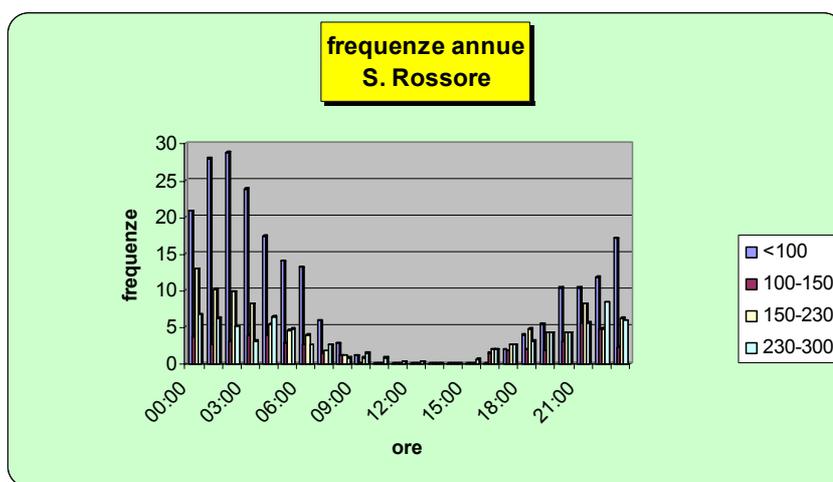
**Fig. 34** – Istogrammi di frequenza dell’altezza di miscelamento relativa al punto del grigliato più prossimo a Pisa, al variare delle ore del giorno, per le prime 4 classi.



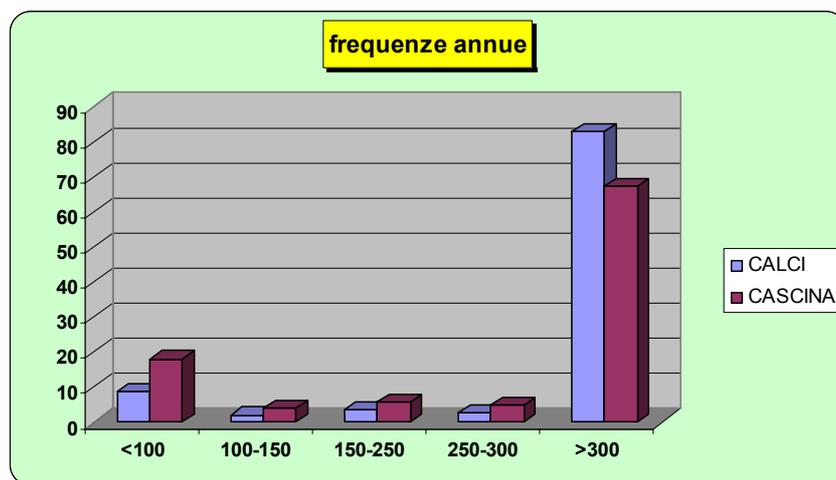
**Fig. 35** – Istogrammi di frequenza dell'altezza di miscelamento relativa al punto del grigliato più prossimo a S. Rossore.



**Fig. 36** – Istogrammi di frequenza dell'altezza di miscelamento relativa al punto del grigliato più prossimo a S. Rossore, al variare delle ore del giorno.



**Fig. 37** Istogrammi di frequenza dell'altezza di miscelamento relativa al punto del grigliato più prossimo a S. Rossore, al variare delle ore del giorno, per le prime 4 classi.



**Fig. 38** – Istogrammi di frequenza dell’altezza di miscelamento relativa ai punti del grigliato più prossimi a Calci e a Cascina.

Nelle ore notturne e, decrescendo, nelle prime ore della mattina, si ha un importante contributo della condizione 1 (anche il 50% a Pisa, il 30% a S.Rossore), una netta riduzione fino alla scomparsa degli accadimenti relativi alle classi 1-4 nelle ore centrali del giorno ed una ripresa dopo il tramonto del sole, dalle 17 in poi.

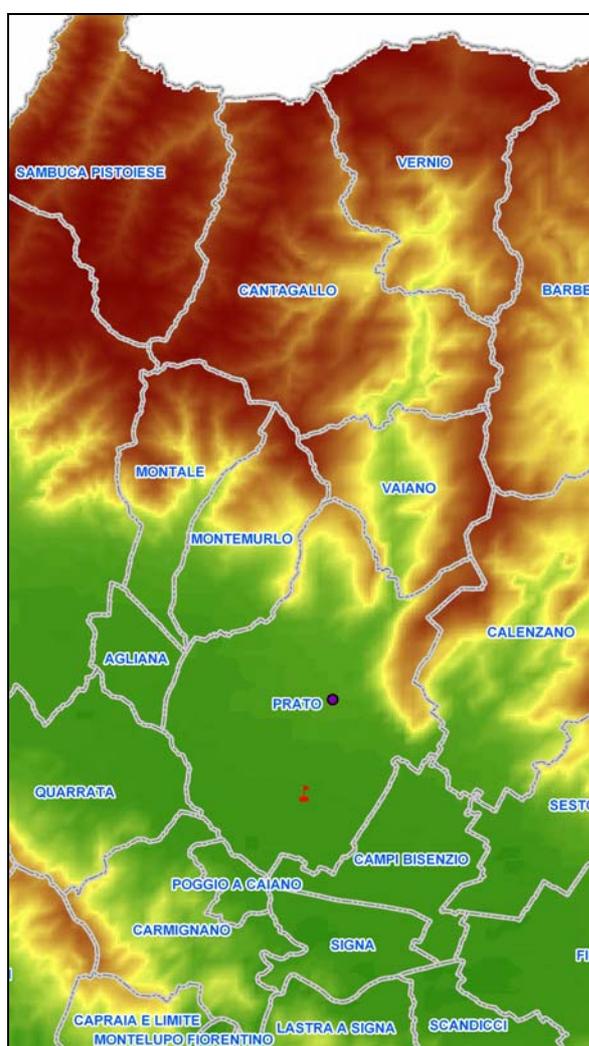
Anche attraverso questo tipo di elaborazione si evidenzia la differenza di comportamento del sito nell’entroterra e quello sulla costa: la variazione delle frequenze di accadimento della classe 5 – relativa a valori maggiori di 300 m – è più marcata per Pisa, in cui si hanno, nelle ore della notte, della prima mattinata e della tarda serata, valori importanti per le frequenze delle classi 1-2, e cioè relative a valori di Hmix bassi.

In generale, le condizioni più critiche dal punto di vista delle concentrazioni degli inquinanti si hanno quando l’altezza di miscelamento resta bassa anche in tarda mattinata, o, ancor peggio, quando restano condizioni di inversione con base a terra anche nel corso della giornata; in questo senso, condizioni più critiche – anche se limitatamente – si riscontrano nell’entroterra (Pisa, Cascina), mentre sulla costa e in presenza di orografia si hanno in generale condizioni migliori.

## 5. Applicazione all'area di Prato

### 5.1 Dominio di studio e base dati

Il dominio di studio è costituito dal territorio della Provincia di Prato: come si può vedere dalla mappa in fig. 39, il territorio è sostanzialmente diviso in due parti, caratterizzato a nord dai rilievi montuosi dell'Appennino Tosco-Emiliano e a sud dalla vasta area pianeggiante in cui si trovano le città di Firenze, Prato e Pistoia, delimitata a nord dagli Appennini e a sud dal Monte Albano.



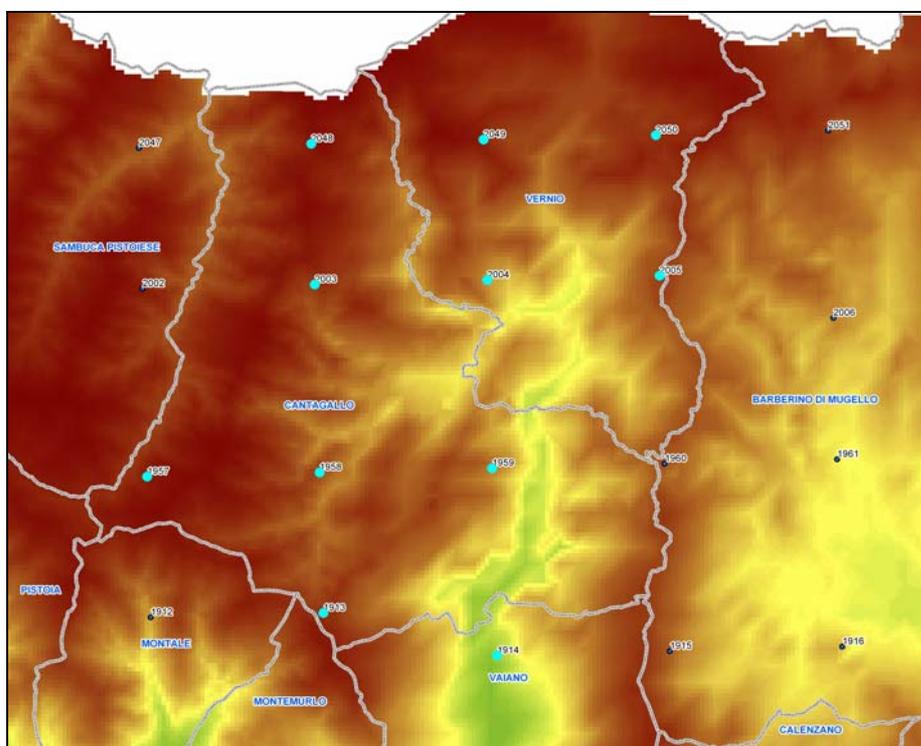
**Fig. 39** – Mappa del territorio della provincia di Prato. Oltre alla città di Prato, è indicata la posizione della stazione di Baciacavallo.

Oltre alla città di Prato, è indicata la posizione della stazione di Baciacavallo: è evidente la necessità di introdurre le stime di vento del modello RAMS, per la copertura dell'intero territorio provinciale.

Le "stazioni virtuali" dell'archivio RAMS presenti sul territorio provinciale pratese sono ventuno e corrispondono alle seguenti codifiche: 1687, 1732, 1733, 1777, 1778, 1779, 1823, 1824, 1868, 1869, 1913, 1914, 1957, 1958, 1959, 2003, 2004, 2005, 2048, 2049, 2050.

Per motivi legati all'elaborazione dei dati, il dominio di studio è stato separato in due aree, come riportato nelle seguenti figure, dove sono indicate le "stazioni virtuali" RAMS: in questo caso i dati relativi alla singola stazione non devono essere intese come dati puntuali, ma come dati riferiti ad un'area di 4X4 Km<sup>2</sup>; per semplicità, ad ogni stazione virtuale è attribuita la latitudine e la longitudine del punto centrale dell'area di pertinenza.

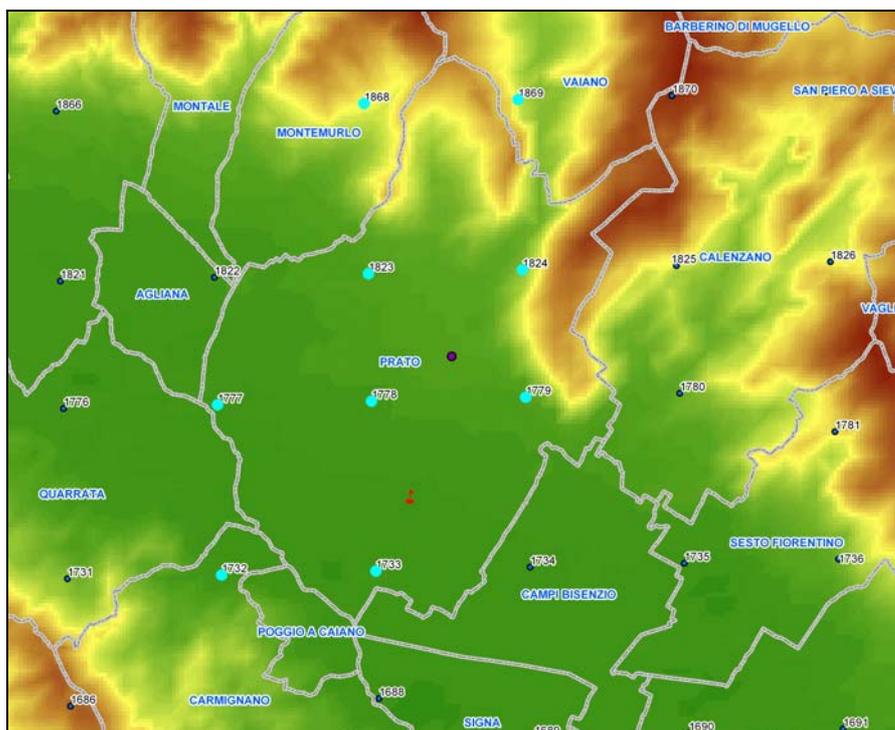
Le stazioni utilizzate per il presente studio sono evidenziate con il colore azzurro.



**Fig. 40** – Mappa del dominio nord della provincia di Prato.

Il dominio nord (Fig. 40) comprende i comuni di Cantagallo, Vernio e parte dei comuni di Montemurlo e Vaiano; il dominio sud (Fig. 41) comprende parte dei comuni di Montemurlo e Vaiano, i comuni di Prato, Poggio a Caiano, Carmignano.

Il sistema integrato RASS/SODAR è collocato nella parte nord del comune di Campi Bisenzio (non è indicato in figura): come è stato già segnalato, i dati relativi ai profili verticali di temperatura sono stati utilizzati per la stima dell'altezza di miscelamento, dato che si possono considerare rappresentativi per l'area Firenze-Prato.



**Fig. 41** – Mappa del dominio sud della provincia di Prato.

## 5.2 Regime anemologico e classi di stabilità

Per la caratterizzazione del regime anemologico e della stabilità atmosferica dell'area in esame sono stati analizzati i dati relativi alle misure orarie di velocità e direzione prevalente del vento, nonché di radiazione globale e netta, misurati dalla stazione di Baciacavallo dell'anno 2002, e le stime delle 21 "stazioni virtuali" RAMS, corrispondenti alle seguenti codifiche: 1687, 1732, 1733, 1777, 1778, 1779, 1823, 1824, 1868, 1869, 1913, 1914, 1957, 1958, 1959, 2003, 2004, 2005, 2048, 2049, 2050.

Per motivi di sintesi, non sono stati riportati tutti gli elaborati grafici presenti nel rapporto finale relativo all'area di Prato.

### 5.2.1 Stazione di Baciacavallo

Su base annuale, l'analisi dei valori numerici associata alle rose dei venti mette in luce come le direzioni di provenienza prevalenti dai settori NE e NNE ricorrano rispettivamente per il 7.4% e l'11.5% dei casi; in questo caso la velocità dei venti è abbastanza sostenuta, con valori superiori a 4 m/s. La seconda direzione di provenienza prevalente – quadranti S e SSE – fa registrare una percentuale complessiva pari a circa 16.8%, con velocità medie decisamente basse, dell'ordine dei 2 m/s. I quadranti occidentali, in particolare le direzioni W e WNW, registrano complessivamente una frequenza pari al 16.9 %, caratterizzati da una velocità del vento debole o moderata.



In termini di classi di velocità dei venti, la sintesi di ricorrenza cumulata annualmente fa registrare valori sostanzialmente bassi: le calme di vento ricorrono solo nel 2.6% dei casi, ma la classe prevalente è quella con venti d'intensità compresa tra 0.3 e 2 m/s (pari al 70.5 % dei casi); i venti moderati (tra 2 e 4 m/s) ricorrono nel 18.4 % dei casi, mentre quelli con velocità più elevata (maggiore di 4 m/s) si verificano solo per l'8.4 % dei casi e provengono quasi esclusivamente dai settori NE-NNE.

A livello stagionale si notano le principali differenze tra il periodo invernale, in cui aumenta la frequenza dei venti forti da NNE-NE, ed il periodo estivo, in cui assumono maggiore importanza i venti moderati dai settori occidentali ed i venti deboli da S-SSE.

L'analisi della persistenza evidenzia ancor meglio che i venti moderati o forti, con persistenza superiore a 3 ore consecutive, provengono quasi esclusivamente dai settori NNE-NE, salvo nel periodo estivo, in cui assume importanza anche il vento proveniente da Ovest.

La classe di stabilità più ricorrente è senz'altro la D, relativa a condizioni neutre, con un'incidenza del 53.3% dei casi; la classe A si verifica circa il 6%, la classe B il 10.7%, la C l'8.6%, per un totale dell'ordine del 25% per le classi relative a condizioni instabili; la classe E ha una frequenza molto modesta, l'1.5% dei casi, mentre la F÷G ha un'incidenza del 20%, per un totale di circa il 21% per l'insieme delle classi che corrispondono a condizioni stabili.

Le condizioni più critiche per la diffusione degli inquinanti si verificano in di condizioni di calma di vento o di venti deboli, sia in condizioni stabili e quindi in corrispondenza della classe F÷G, sia in condizioni instabili, e quindi soprattutto della classe A.

### **5.2.2 Stazioni virtuali RAMS**

Per consentire una più facile elaborazione dei dati, l'area di studio è stata divisa in due domini, corrispondenti all'area nord, caratterizzata da orografia complessa, e la parte sud, prevalentemente pianeggiante.

L'andamento dei campi di vento naturalmente riflette questa differenza: in particolare, su base annua, a nord le direzioni di provenienza prevalenti corrispondano ai settori Nord e Sud e si spostano, seguendo l'orografia verso i settori NNE e SSO-SO; in pianura le direzioni prevalenti sono ulteriormente ruotate, privilegiando i settori NE e SO, anche se le direzioni prevalenti sono decisamente meno marcate (Fig. 42); inoltre anche la velocità del vento è inferiore rispetto all'area montana. In termini percentuali, nelle stazioni situate in montagna (es. 1958, 2003, 2049) le calme di vento ricorrono meno dell'1% dei casi, la classe con venti d'intensità compresa tra 0.3 e 2 m/s ricorre circa nel



30-40% dei casi; i venti moderati (tra 2 e 4 m/s) ricorrono nel 45-50% dei casi, mentre quelli con velocità più elevata (maggiore di 4 m/s) si verificano circa per il 20% dei casi. Nelle stazioni in pianura, e soprattutto nelle aree antropizzate, dove la rugosità del terreno è più alta, la situazione è diversa, con calme di vento che ricorrono circa nel 2% dei casi, la classe prevalente è quella con venti d'intensità compresa tra 0.3 e 2 m/s ricorre circa nel 50-60% dei casi; i venti moderati (tra 2 e 4 m/s) ricorrono nel 30% dei casi, mentre quelli con velocità più elevata (maggiore di 4 m/s) si verificano circa per il 20% dei casi.

A livello stagionale si notano le principali differenze tra il periodo primaverile-estivo, in cui la direzione di provenienza prevalente è SSW-SW, ed il periodo autunnale-invernale, in cui i venti prevalenti provengono dai settori N-NNE.

L'analisi della persistenza su base annua evidenzia che i venti moderati o forti, con persistenza superiore a 3 ore consecutive, provengono dai settori WSW- SW e N-NNW nell'area montana (Fig. 43), mentre in pianura prevalgono le direzioni di provenienza SW e NE.

La classe di stabilità più ricorrente è senz'altro la D, relativa a condizioni neutre, con un'incidenza di circa il 50% dei casi; la classe A si verifica circa il 2-3%, la classe B intorno al 10%, la C circa 8-10%, per un totale di poco più del 20% per le classi relative a condizioni instabili; la classe E ha una incidenza, tra il 9% ed il 5% dei casi, mentre la F+G ha un'incidenza dell'ordine del 15-20%, per un totale di circa il 25% per l'insieme delle classi che corrispondono a condizioni stabili.

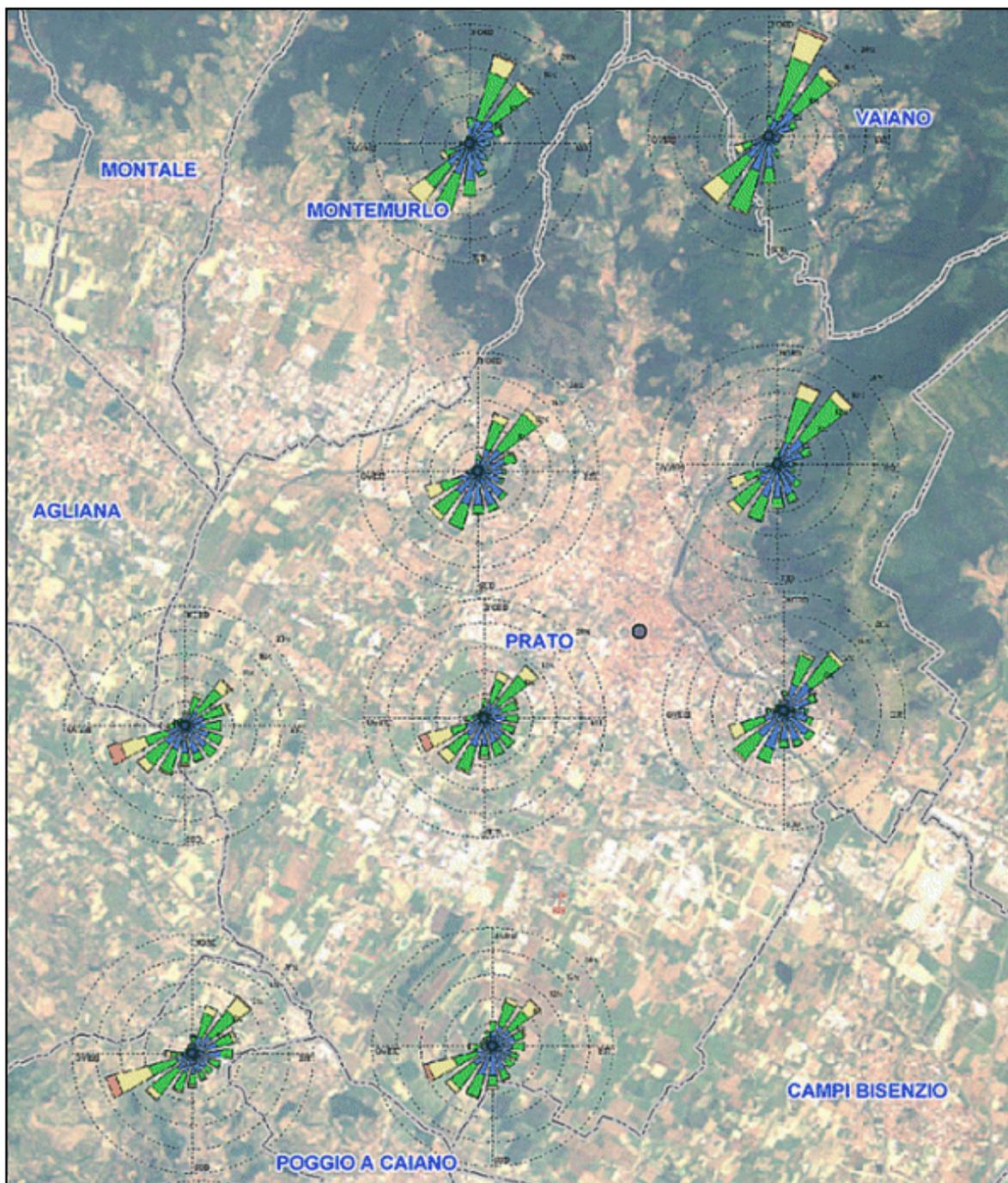
Confrontando i risultati ottenuti elaborando i dati della stazione di Baciacavallo e i risultati relativi alle stime RAMS nelle stazioni più vicine (1733, 1778) si nota subito una differenza nelle direzioni prevalenti e nella velocità del vento che è più bassa nella stazione di Baciacavallo. Per quanto riguarda la direzione, si deve sottolineare che le stime RAMS corrispondono alla quota di 38 m sopra il livello del suolo, mentre l'anemometro di Baciacavallo è posto a 10 m: questo può spiegare le differenze, in quanto anche in pochi metri la direzione del vento può subire dei cambiamenti, soprattutto perché in basso il vento risente maggiormente degli ostacoli presenti nell'area<sup>3</sup>. Per quanto riguarda la velocità del vento, che è invece stimata a 10 m dal suolo, utilizzando un algoritmo semplificato (vedi § 3.2), si riscontra in generale una leggera sovrastima di questo parametro nelle aree pianeggianti ed una leggera sottostima nelle aree montane: le cause principali sono legate alla stima del parametro

---

<sup>3</sup> Confronti fatti tra stime RAMS e misure di vento rilevato a 30 m dal suolo (es. Ximeniano, Passo della Comunella, etc.) hanno evidenziato un buon accordo.

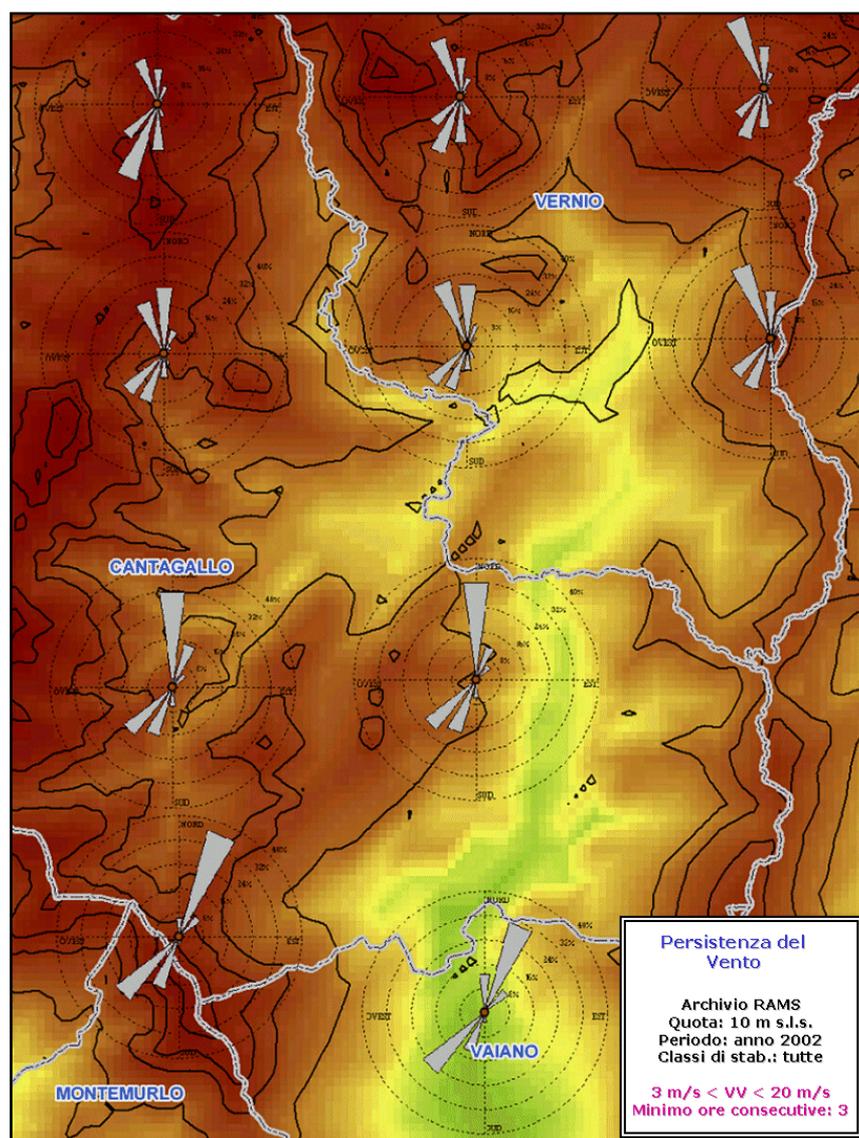


uso del suolo, mediato sull'area di 16 Km<sup>2</sup> di pertinenza della singola stazione, ed il DTM (modello digitale del territorio), anch'esso mediato sulla stessa area.



**Fig. 42** – Mappa territoriale d'insieme delle rose dei venti nell'area sud della provincia di Prato: stazioni RAMS a 10 m, tutto anno 2002.

Pur considerando queste differenze, le stime RAMS consentono comunque di avere una valida rappresentazione dei campi di vento, omogenea sul territorio, cosa non facilmente ottenibile tramite misure puntuali, sia per la non completa copertura territoriale, sia per differenze nella collocazione degli anemometri che spesso rendono i dati non direttamente confrontabili.



**Fig. 43** Mappa della persistenza dei venti superiore a 3 m/s per almeno 3 ore consecutive nell'area nord della provincia di Prato: stazioni RAMS a 10 m, tutto anno 2002.

### 5.3 Altezza di miscelamento

Per valutare l'altezza di miscelamento è stata determinata l'altezza della base della prima inversione termica, analizzando i profili verticali di temperatura che si ottengono dal RASS.

La base dati analizzata è quella relativa al periodo invernale (dicembre, gennaio, febbraio, marzo) degli anni 1999-2000, 2000-2001 ed al periodo estivo (giugno, luglio, agosto, settembre) degli anni 2000 e 2001.

La scelta del periodo è legata al fatto che in inverno si verificano le condizioni più critiche dal punto di vista dello strato di miscelamento, condizioni che possono portare a raggiungere elevate concentrazioni di inquinanti; l'analisi dei dati del periodo estivo

invece è stata effettuata per controllo, cioè per verificare se effettivamente si riscontrassero delle differenze sostanziali nei due periodi dell'anno.

I profili di temperatura orari sono stati analizzati in modo da ottenere la seguente classificazione: condizioni che presentano inversione termica al suolo o con base in quota inferiore a 100 m (identificate dalla codifica 1); condizioni in cui la base dell'inversione si trova tra 100 m e 150 m; tra 150 m e 230 m; tra 230 m e 300 m; superiore a 300 m.

Questa classificazione è stata ritenuta ragionevole, tenendo conto dei dati a disposizione. Il limite superiore a 300 m è stato scelto in base al fatto che la percentuale di dati validi al di sopra di questa quota decresce drammaticamente, con percentuali dell'ordine del 20%-30% di dati validi sopra i 400 m. Il motivo di questa limitazione è dovuto al fatto che, in presenza di vento sostenuto, il sistema RASS ha delle prestazioni inferiori, cioè i profili restano generalmente inferiori ai 300-400 m a causa della perdita di co focalità delle onde acustiche e elettromagnetiche: i profili dell'ordine di 500-600 m si hanno in genere in presenza di condizioni favorevoli, con venti deboli o moderati. Viceversa, in basso, al di sotto dei 100 m i dati disponibili, pur essendo validi, sono affetti da una incertezza maggiore, in quanto le prime quote misurate dallo strumento (53 m, 63 m, 73 m) sono maggiormente influenzate dalla temperatura rilevata dal sensore posto a 13 m dal suolo: per avere delle misure più accurate nei primi 100 m – e quindi direttamente confrontabili con le misure delle quote superiori – sarebbe necessaria una diversa messa a punto dello strumento, con accorgimenti tecnici che sono ancora oggetto di studio da parte della ditta costruttrice.

In questo senso, l'analisi dei profili per la stima della prima quota di inversione rappresenta un primo tentativo, finalizzato a valutare la possibilità di applicazione di questo metodo e soprattutto a evidenziarne i limiti.

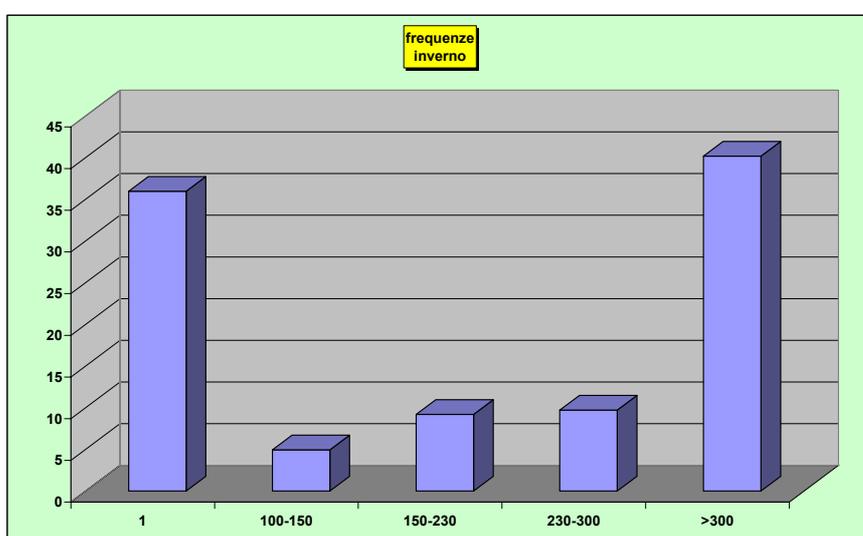
I risultati ottenuti per il periodo invernale ed estivo vengono di seguito esaminati e confrontati.

**Tab.6** – Frequenze delle classi caratterizzanti l'altezza della prima inversione termica.

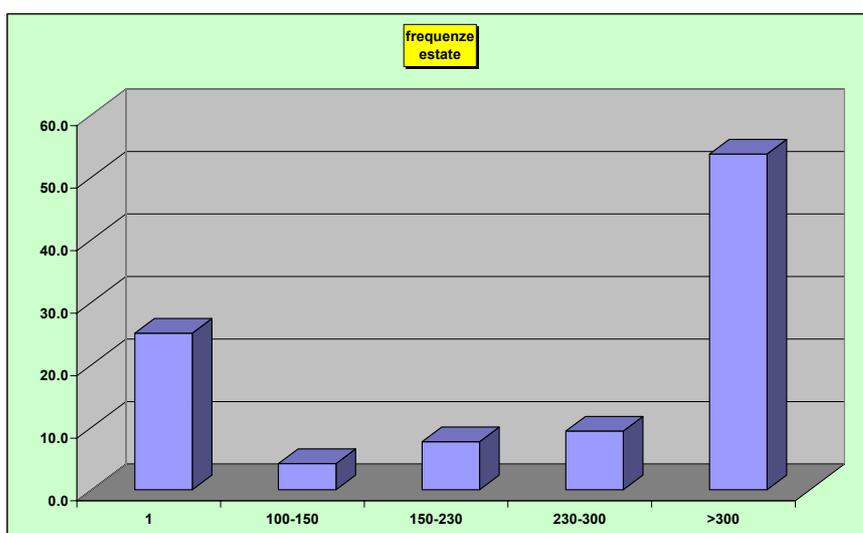
<b>classi</b>	<b>frequenza % inverno</b>	<b>frequenza % estate</b>
<b>1</b>	36.0	25.0
<b>100-150</b>	4.9	4.2
<b>150-230</b>	9.2	7.7
<b>230-300</b>	9.7	9.4
<b>&gt;300</b>	40.2	53.7

La classe 1 ha una incidenza del 36.0% in inverno e del 25.0% in estate (figg. 44 e 45): in effetti in area rurale, come quella in cui è collocato lo strumento, nelle ore

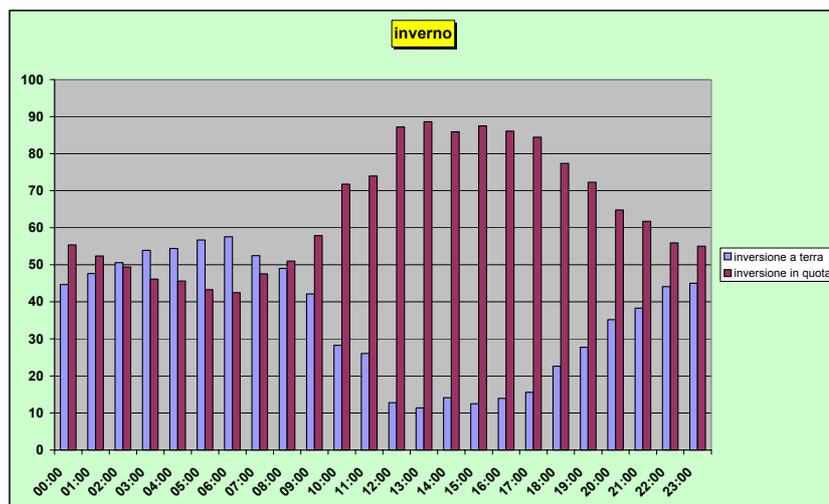
notturne il suolo si raffredda prima dell'aria, per cui si ha inversione. Questa tendenza è confermata dal grafico riportato nelle figg. 46 e 49, in cui è mostrato l'andamento della classe 1 (inversione con base al suolo o con base inferiore a 100 m) al variare delle ore del giorno, contrapposto a condizioni in cui esiste uno strato rimescolato con base superiore a 100 m. In inverno, nelle ore notturne e nelle prime ore della mattina, fino alle 8 si ha una prevalenza della condizione 1, una netta riduzione di tale prevalenza nelle ore centrali del giorno ed una ripresa dopo il tramonto del sole, dalle 18 in poi. In estate il fenomeno rappresentato dalla classe 1 è decisamente ridimensionato; si ha una frequenza maggiore di questa classe nelle ore notturne, soprattutto tra le 3 e le 6, ed una modesta ripresa dopo il tramonto.



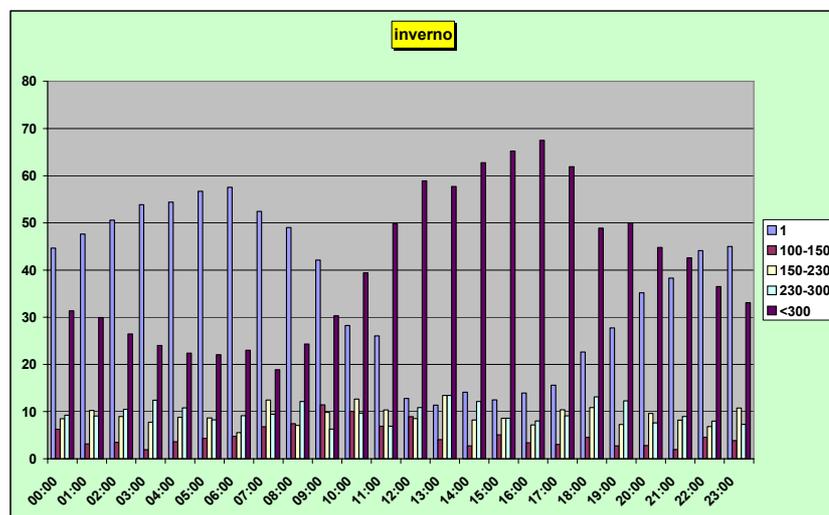
**Fig.44** – Frequenze delle classi caratterizzanti l'altezza della prima inversione termica - Inverno.



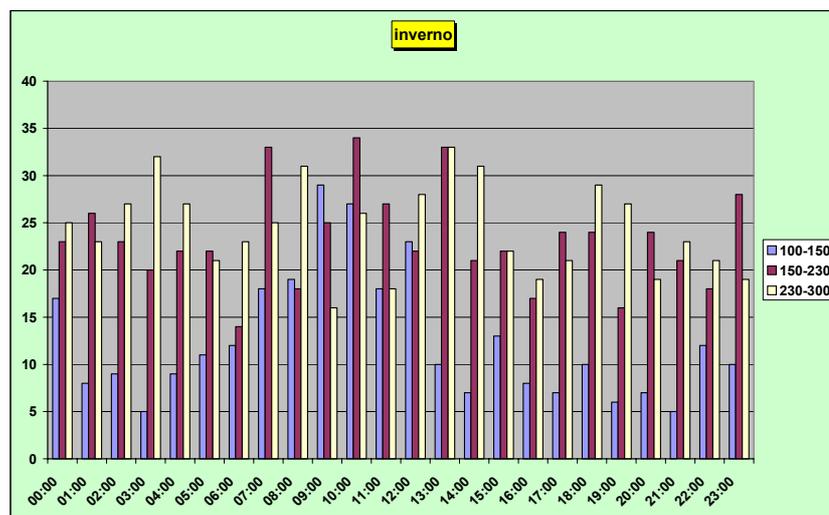
**Fig.45** – Frequenze delle classi caratterizzanti l'altezza della prima inversione termica - Estate.



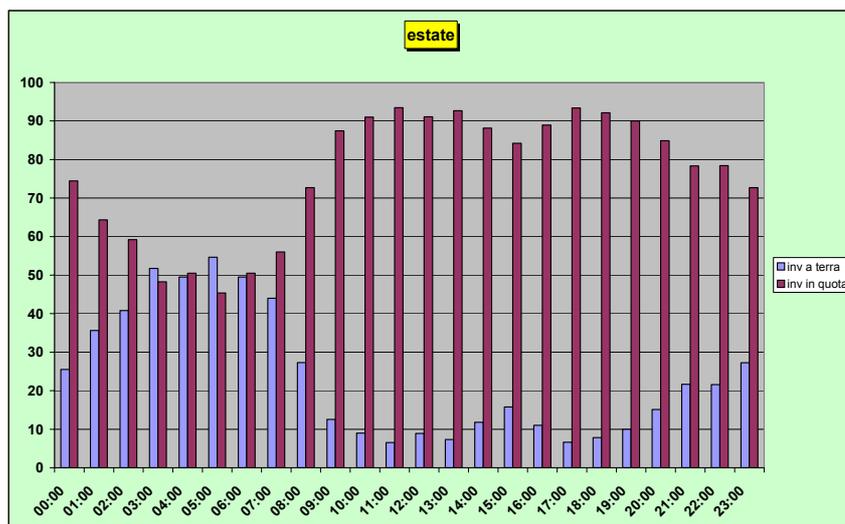
**Fig.46** – Frequenze delle ore con inversione con base al suolo (viola) contrapposto a condizioni che presentano base in quota (rosso) - Inverno.



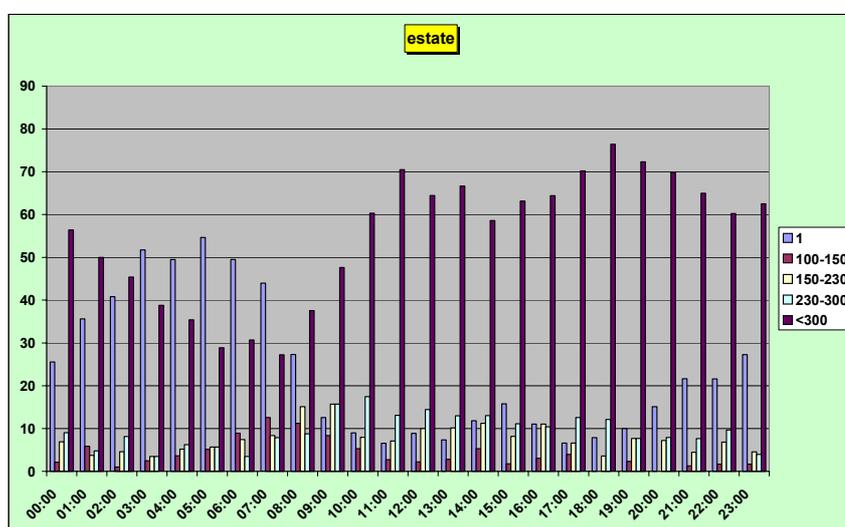
**Fig.47** – Frequenze orarie delle classi caratterizzanti l'altezza della prima inversione termica - Inverno.



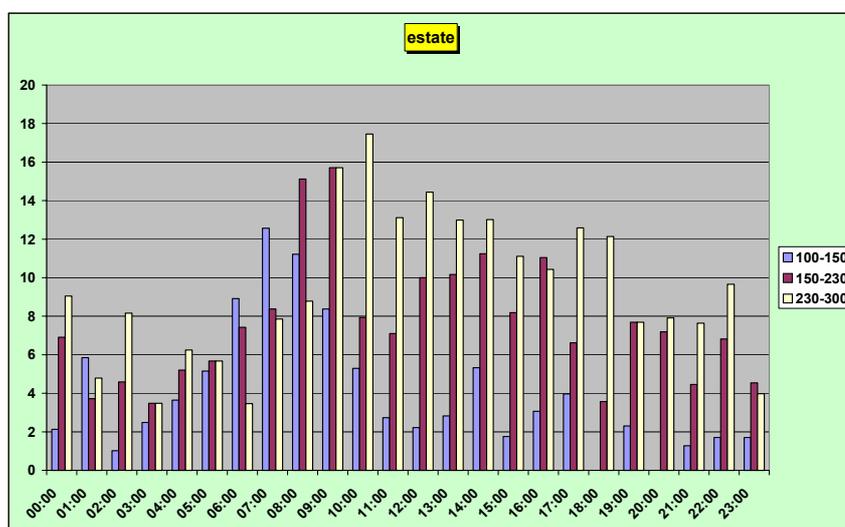
**Fig.48** – Frequenze orarie delle classi caratterizzanti l'altezza della prima inversione termica, tra 150 e 300 - Inverno.



**Fig.49** – Frequenze delle ore con inversione con base al suolo (viola) contrapposto a condizioni che presentano base in quota (rosso) - Estate.



**Fig.50** – Frequenze orarie delle classi caratterizzanti l'altezza della prima inversione termica - Estate.



**Fig.51** – Frequenze orarie delle classi caratterizzanti l'altezza della prima inversione termica, tra 150 e 300 - Estate.



La classe che individua le condizioni in cui l'altezza dell'inversione è superiore a 300 m ha, in entrambe le stagioni, la frequenza più alta (40.2% in inverno e 53.7% in estate), mentre le altre classi hanno una frequenza decisamente inferiore. Le figg. 47, 48, 50, 51 evidenziano l'andamento delle varie classi al variare delle ore del giorno: è interessante notare come la condizione di inversione con base bassa, tra 100 m e 150 m, ricorra prevalentemente nelle prime ore della mattinata, tra le 9 e le 11 in inverno e tra le 6 e le 8 in estate.

In generale, le condizioni più critiche dal punto di vista delle concentrazioni degli inquinanti si hanno proprio quando l'altezza dell'inversione resta bassa anche in tarda mattinata, o, ancor peggio, quando restano condizioni di inversione con base a terra anche nel corso della giornata; come si può notare dai grafici queste condizioni, nel periodo invernale, hanno una ricorrenza non del tutto trascurabile.

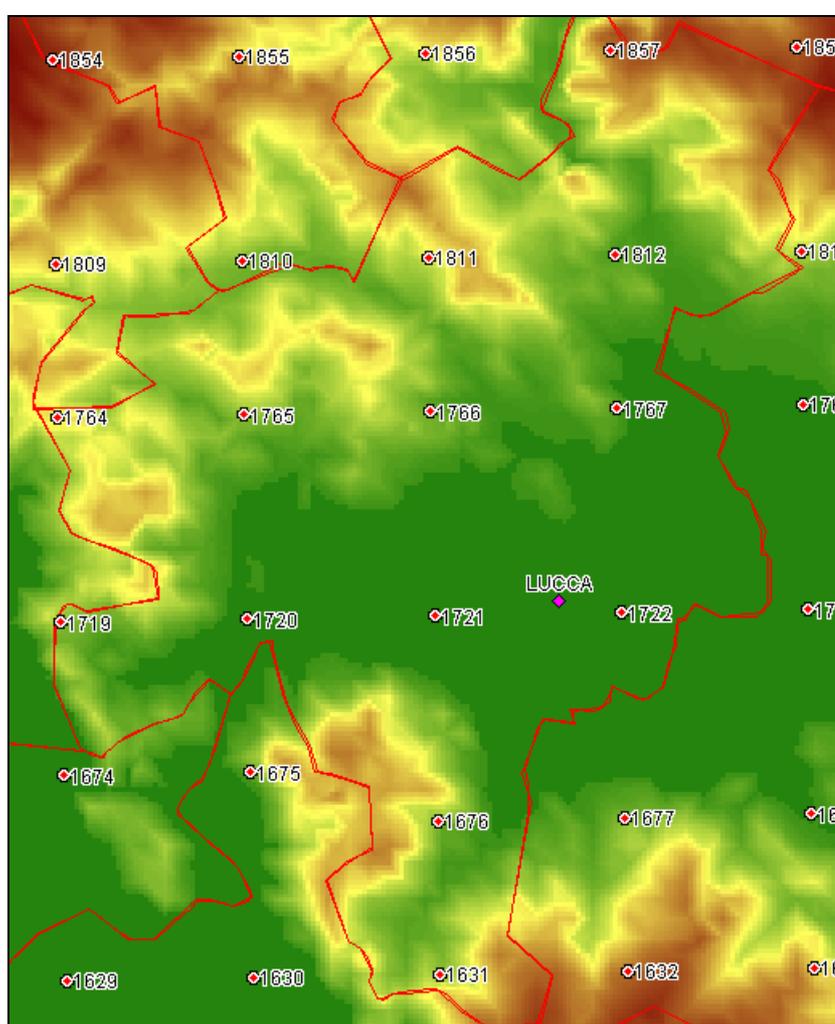
Resta comunque sospetto che si verifichino condizioni di inversione al di sotto dei 100 m anche nelle ore centrali del giorno, nel periodo estivo (anche se con frequenze di accadimento decisamente basse: è probabile che, nonostante gli accorgimenti adottati nella stima della prima quota di inversione, si incorra in un errore sistematico, che porti a sovrastimare gli eventi attinenti alla classe 1.

## 6. Applicazione all'area di Lucca

### 6.1 Dominio di studio e base dati

Il dominio di studio è rappresentato dal territorio del Comune di Lucca. Si tratta di una vasta zona pianeggiante, racchiusa su tre lati da fasce collinari ed a est dall'alveo dell'ex lago di Vientina.

Nella seguente figura è riportata l'area di studio con l'indicazione della posizione delle "stazioni virtuali" dell'archivio meteorologico RAMS.



**Fig.52** – Mappa dell'area di studio.

La caratterizzazione dei campi di vento e delle condizioni di stabilità è stata effettuata utilizzando le stime del modello RAMS per i valori di velocità e direzione del vento e le misure della stazione di Porcari<sup>4</sup>, per le misure di radiazione globale e netta,

<sup>4</sup> La stazione di Porcari appartiene alla Rete Provinciale di Lucca, ed è gestita da ARPAT.

trattandosi dell'unica stazione, presente in prossimità dell'area di studio, dotata dei radiometri globale e netto.

In questo contesto, le stime effettuate dal modello meteorologico RAMS rivestono un ruolo centrale in quanto le misure di velocità e direzione del vento – ad esempio della stazione di Porcari – non potevano essere utilizzate, data la distanza, per la caratterizzazione dell'area, mentre i dati della stazione presente a Lucca non erano disponibili.

## **6.2 Regime anemologico e classi di stabilità**

Per la caratterizzazione del regime anemologico dell'area in esame sono stati analizzati i valori di velocità e direzione prevalente del vento stimati dal modello RAMS nell'anno 2002; in particolare sono state utilizzate le nove "stazioni virtuali" corrispondenti ai codici 1676, 1720, 1721, 1722, 1765, 1766, 1767, 1811, 1812 (fig.52), in modo da ottenere una copertura completa del territorio del Comune di Lucca.

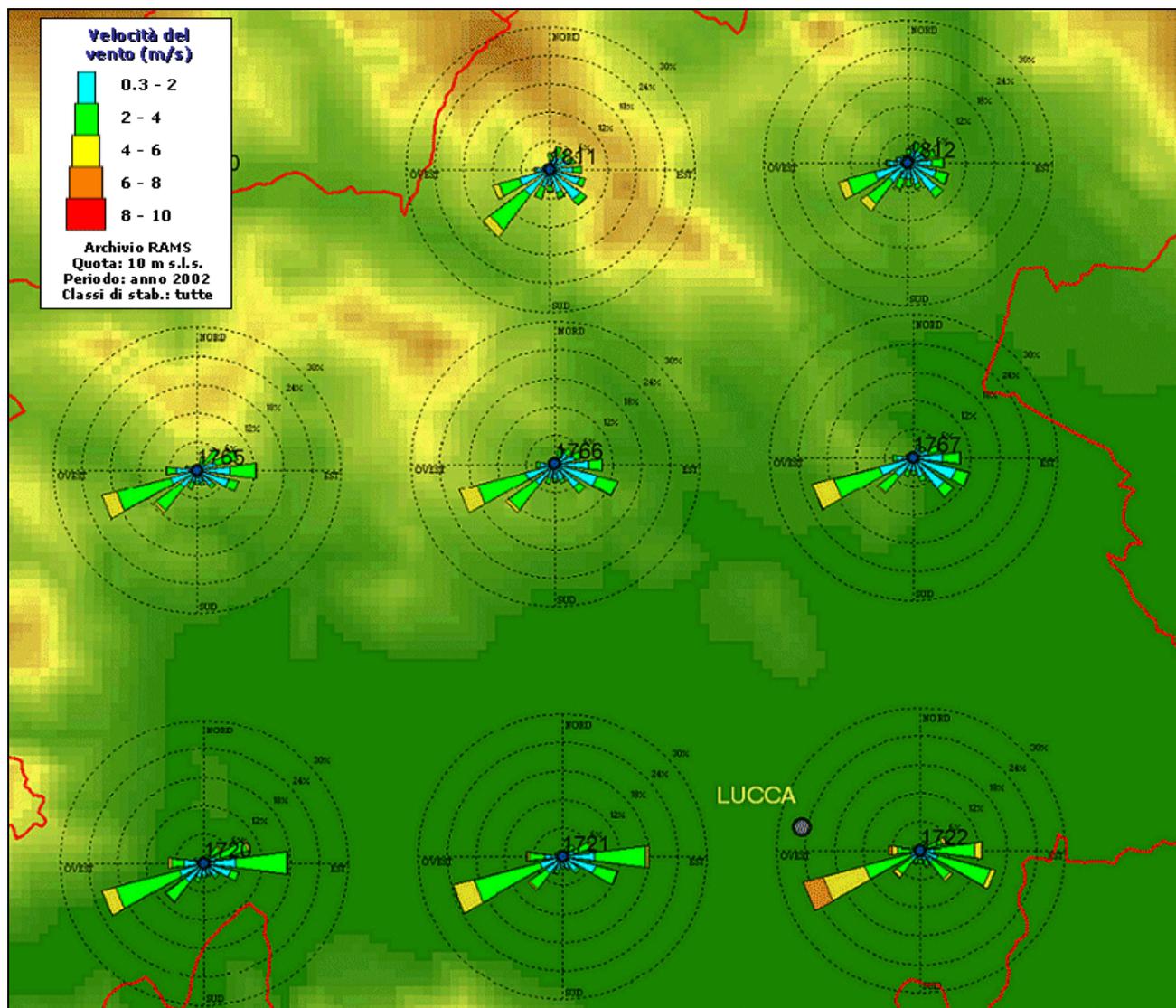
Per motivi di sintesi, non sono stati riportati tutti gli elaborati grafici presenti nel rapporto finale relativo all'area di Lucca.

Su base annuale, l'analisi dei valori numerici associata alle rose dei venti mette in luce che le direzioni di provenienza prevalenti corrispondano ai settori WSW e SW, che ricorrono rispettivamente intorno al 20% e al 7-10% dei casi; in direzione WSW la velocità dei venti si può presentare anche abbastanza sostenuta, con valori superiori a 4 - 5 m/s. La seconda direzione di provenienza prevalente – quadranti E ed ESE – fa registrare una percentuale complessiva pari a circa 25-27%, in particolare nell'area sud del Comune (stazioni 1676, 1720, 1721, 1722), mentre per le altre stazioni queste direzioni di provenienza sono meno frequenti, anche in rapporto all'orografia (es. stazione 1811), con velocità medie più basse.

In termini di classi di velocità dei venti, mediamente nell'area nord i valori sono più bassi rispetto alla zona sud: nelle stazioni 1766,1765, 1811, 1812 le calme di vento ricorrono circa nel 10-15% dei casi, la classe prevalente è quella con venti d'intensità compresa tra 0.3 e 2 m/s (pari a circa il 60 % dei casi); i venti moderati (tra 2 e 4 m/s) ricorrono nel 30-35% dei casi, mentre quelli con velocità più elevata (maggiore di 4 m/s) si verificano solo per 4-5% dei casi. Nel caso delle stazioni 1721 e 1722 le calme di vento ricorrono circa nel 5-8% dei casi, la classe con venti d'intensità compresa tra 0.3 e 2 m/s ricorre circa nel 40 % dei casi, come la classe dei venti moderati (tra 2 e 4 m/s), mentre quelli con velocità più elevata (maggiore di 4 m/s) si verificano solo per 5-6% dei casi. Le stazioni 1676 e 1722 sono caratterizzate da velocità del vento superiori,



fenomeno principalmente legato ad un diverso uso del suolo rispetto alle altre stazioni ( $z_0 = 0.5$  m rispetto a  $z_0 = 2$  m).



**Fig.53** - Mappa territoriale d'insieme delle rose dei venti nell'area sud della provincia di Lucca: stazioni RAMS a 10 m, tutto anno 2002.

A livello stagionale si notano le principali differenze tra il periodo primaverile-estivo, in cui la direzione di provenienza prevalente è WSW, con velocità del vento mediamente più alte ed il periodo autunnale, in cui i venti prevalenti provengono dai settori Est; il periodo invernale invece è caratterizzato da venti che non differiscono molto, in termini di direzione di provenienza, dal caso annuale.

L'analisi della persistenza su base annua evidenzia che i venti moderati o forti, con persistenza superiore a 3 ore consecutive, provengono quasi esclusivamente dai settori WSW ed E; nel periodo primaverile-estivo prevale il vento da WSW, in autunno dal settore E.



La classe di stabilità più ricorrente è senz'altro la D, relativa a condizioni neutre, con un'incidenza di circa il 50% dei casi; la classe A si verifica circa il 2-3%, la classe B intorno al 16-19%, la C circa 7-9%, per un totale dell'ordine del 28-30% per le classi relative a condizioni instabili; la classe E ha una frequenza modesta, tra il 3% ed il 2% dei casi, mentre la F-G ha un'incidenza dell'ordine del 15-17%, per un totale di circa il 18-20% per l'insieme delle classi che corrispondono a condizioni stabili.

Le condizioni più critiche per la diffusione degli inquinanti si verificano in di condizioni di calma di vento o di venti deboli, sia in condizioni stabili e quindi in corrispondenza della classe F-G, sia in condizioni instabili, e quindi soprattutto della classe A.

### **6.3 Altezza di miscelamento**

Per valutare l'altezza di miscelamento sono stati utilizzati gli algoritmi riportati nel paragrafo 2.6, dal momento che non erano disponibili misure di profili termici nell'area di studio.

I dati utilizzati sono stati le misure di radiazione globale e netta rilevate nella stazione di Porcari, mentre per quanto riguarda il vento, sono state utilizzate le stime relative alla "stazione virtuale" 1721 dell'archivio RAMS.

La base dati analizzata è quella relativa all'intero anno 2002, anche se si deve segnalare che è stato escluso il periodo che va dal 19 novembre al 31 dicembre per la mancanza di misure di radiazione netta, il che rende impossibile il calcolo delle classi di stabilità secondo il metodo di Pasquill, ed in ultima analisi la stima dell'altezza di miscelamento.

Come è stato già evidenziato nel capitolo 2, infatti, la stima dell'altezza di miscelamento è possibile solo in condizioni di stabilità atmosferica neutre e stabili, che comunque rappresentano circa il 70% dei casi, nell'arco dell'anno. Tuttavia, visto che le condizioni instabili in cui non viene stimata l'altezza di miscelamento non sono distribuite uniformemente nell'arco dell'anno, ma hanno una frequenza di accadimento maggiore nelle ore centrali della giornata e nella stagione calda, non è possibile ricostruire in modo corretto l'andamento dell'altezza di miscelamento nel corso della giornata o su base stagionale.

Per questo motivo le stime orarie della variabile di interesse sono state elaborate in modo da ottenere le frequenze di accadimento in base alla seguente classificazione: condizioni instabili in cui non viene stimata l'altezza di miscelamento (identificate dalla codifica 1); condizioni in cui la base dell'inversione si trova al di sotto dei 100 m; condizioni in cui la base dell'inversione si trova tra 100 m e 150 m; condizioni in cui la

base dell'inversione si trova tra 150 m e 250 m; condizioni in cui la base dell'inversione si trova tra 250 m e 300 m; condizioni in cui la base dell'inversione è superiore a 300 m.

Le elaborazioni per ottenere le frequenze di accadimento sono state effettuate su base annua e su periodi di tre mesi relativi all'inverno (gennaio, febbraio, marzo) ed all'estate (giugno, luglio, agosto).

La scelta dei periodi è legata al fatto che in inverno si verificano le condizioni più critiche dal punto di vista dello strato di miscelamento, che possono portare a raggiungere elevate concentrazioni di inquinanti; l'analisi dei dati del periodo estivo invece è stata effettuata per controllo, cioè per verificare se effettivamente si riscontrassero delle differenze sostanziali nei due periodi dell'anno.

**Tab.7** – Frequenze delle classi caratterizzanti l'altezza della prima inversione termica, calcolate su base annua e stagionale (inverno ed estate).

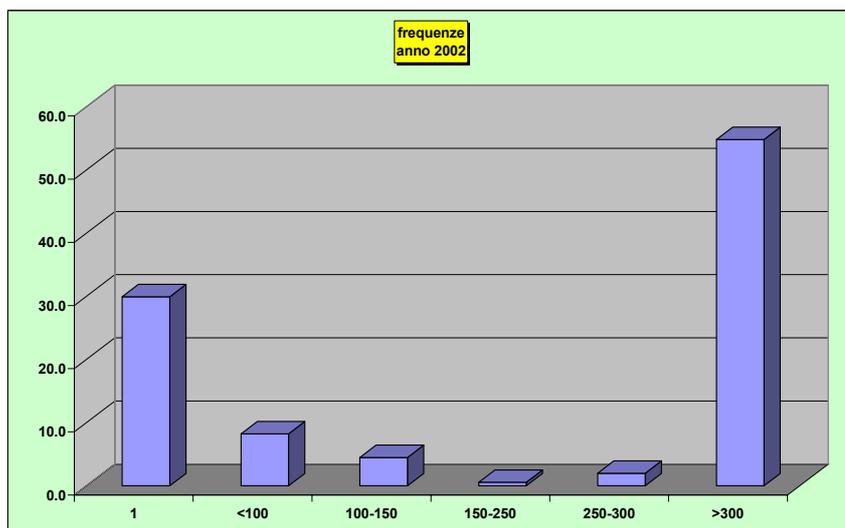
<b>classi</b>	<b>Anno 2002</b>	<b>inverno</b>	<b>estate</b>
<b>1</b>	29.9	25.0	40.0
<b>&lt;100</b>	8.2	8.5	7.3
<b>100-150</b>	4.5	4.0	3.4
<b>150-250</b>	0.6	0.7	0.7
<b>250-300</b>	2.0	2.6	1.9
<b>&gt;300</b>	54.8	59.2	46.7

La classe 1, relativa alle condizioni instabili – in cui non è possibile stimare l'altezza di miscelamento -, ha una incidenza del 30.0% su base annua, mentre diminuisce in inverno, con il 25% ed aumenta in estate, con il 40% (figg. 55, 56, 57).

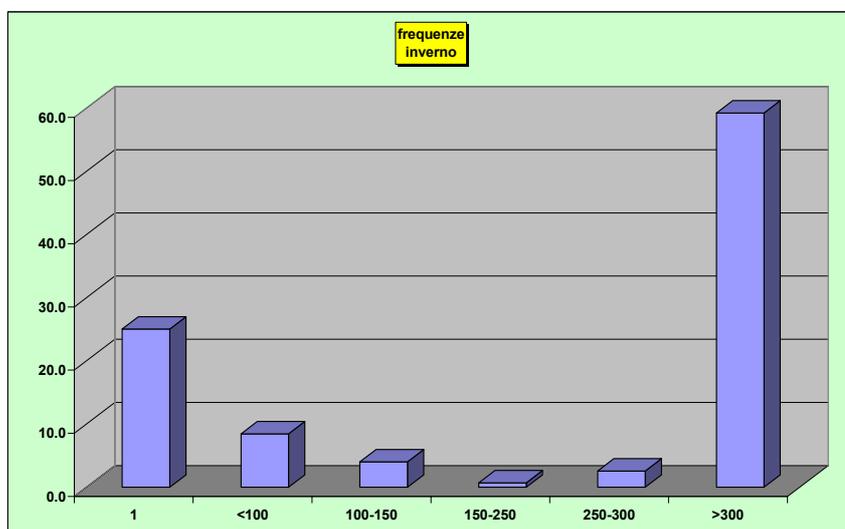
Questa tendenza è confermata dal grafico riportato nelle figg. 58, 61, 64, in cui è mostrato l'andamento della classe 1, relativa alle condizioni instabili, al variare delle ore del giorno, contrapposto all'andamento della classe 2, relativa all'insieme delle classi in cui si riscontrano condizioni neutre e stabili.

In inverno, nelle ore notturne e nelle prime ore della mattina, fino alle 8 si ha una prevalenza della condizione 2 (anche il 100% dei casi), una netta riduzione di tale prevalenza nelle ore centrali del giorno ed una ripresa dopo il tramonto del sole, dalle 18 in poi (figg. 62, 63); la classe 1 nelle ore centrali del giorno ha frequenze di accadimento elevate, anche superiori all'80% dei casi. In estate il fenomeno è simile, anche se la classe 1 ha valori più alti, superiori all'80% dalle 8 fino alle 18 (figg. 65, 66). Questi istogrammi, mostrando la distribuzione nell'arco della giornata delle due classi di condizioni di stabilità, evidenziano l'impossibilità di stimare correttamente l'altezza di miscelamento nelle ore centrali del giorno, in cui sono molto frequenti condizioni instabili.

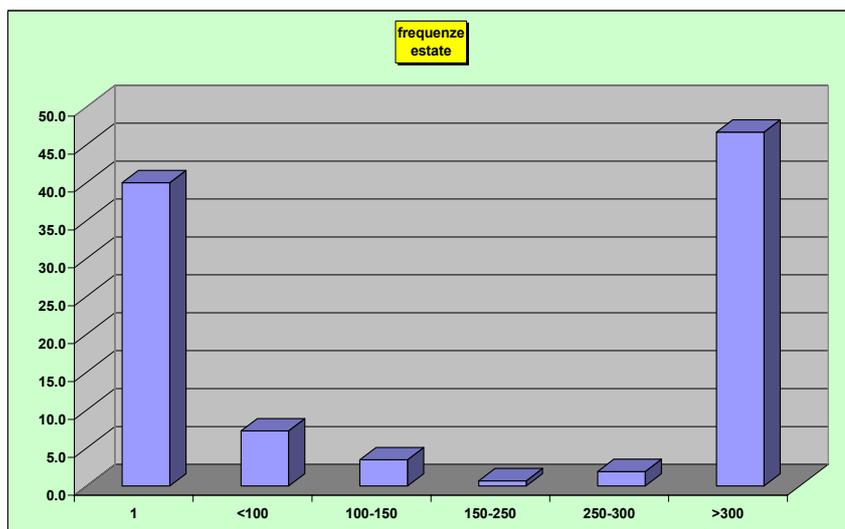
La classe che individua le condizioni in cui l'altezza dell'inversione è superiore a 300 m ha, nell'arco dell'anno ed in entrambe le stagioni, la frequenza più alta ( 54,8% su base annua, 59.2% in inverno e 46.7% in estate); la riduzione della frequenza di accadimento di questa classe in estate si spiega in base al fatto che la classe 1, che individua le condizioni instabili (probabilmente caratterizzate da una elevata altezza di miscelamento in questa stagione) è decisamente aumentata.



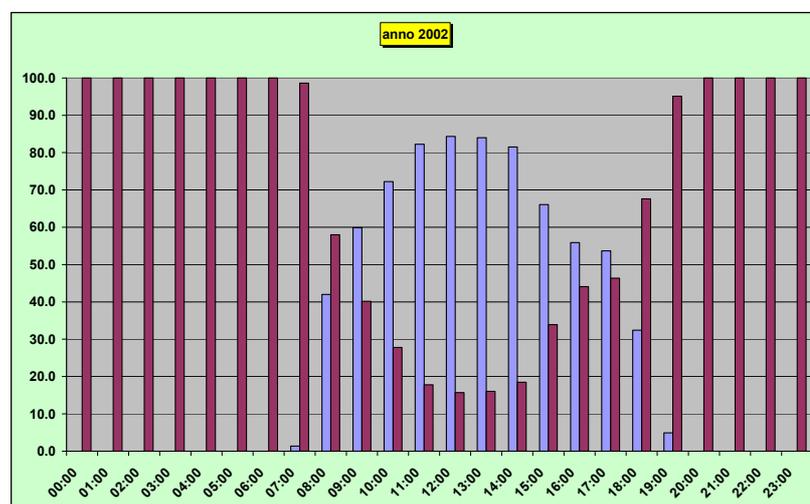
**Fig.54** – Frequenze delle classi caratterizzanti l'altezza di miscelamento, anno 2002.



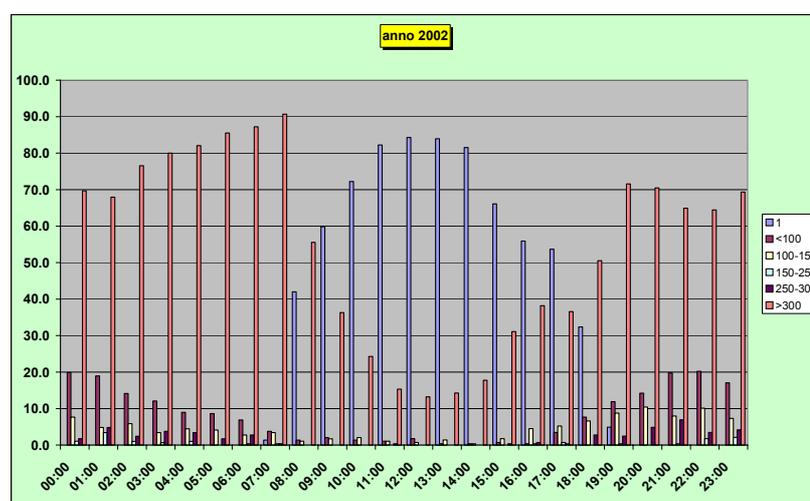
**Fig.55** – Frequenze delle classi caratterizzanti l'altezza di miscelamento, inverno 2002.



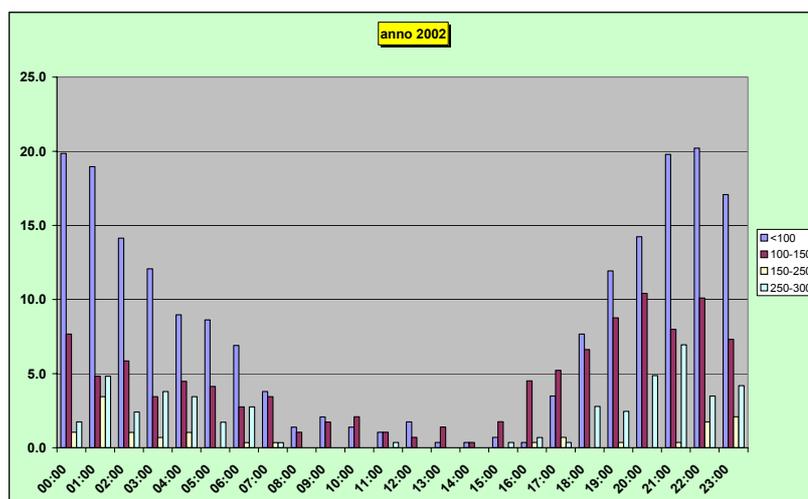
**Fig. 56** – Frequenze delle classi caratterizzanti l'altezza di miscelamento, estate 2002.



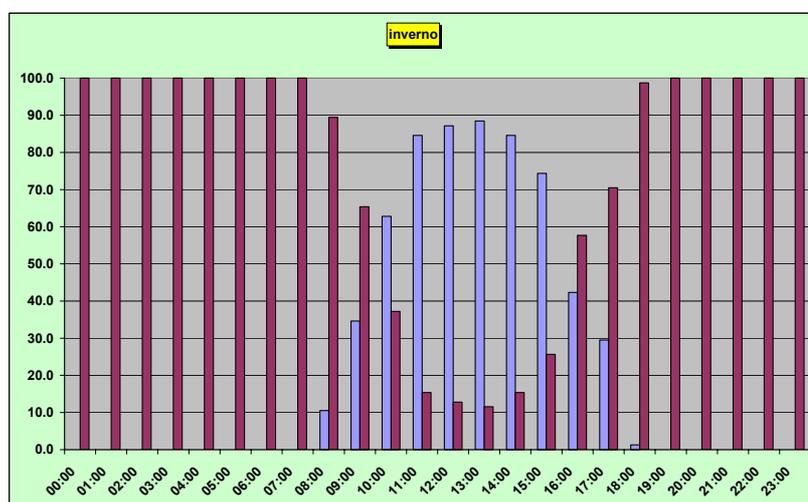
**Fig.57** – Frequenze delle ore caratterizzate da condizioni instabili (viola) contrapposto a condizioni che presentano condizioni neutre o stabili (rosso), anno 2002.



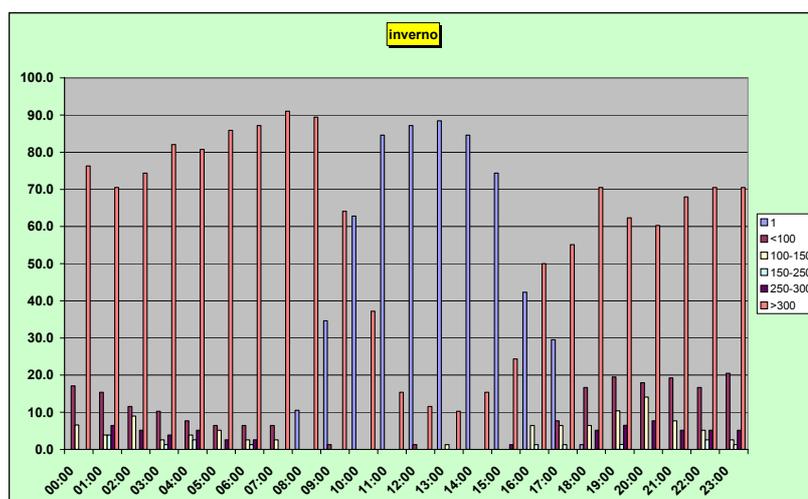
**Fig. 58** – Frequenze orarie delle classi caratterizzanti l'altezza di miscelamento, oltre alla frequenza della classe 1, legata a condizioni instabili; anno 2002.



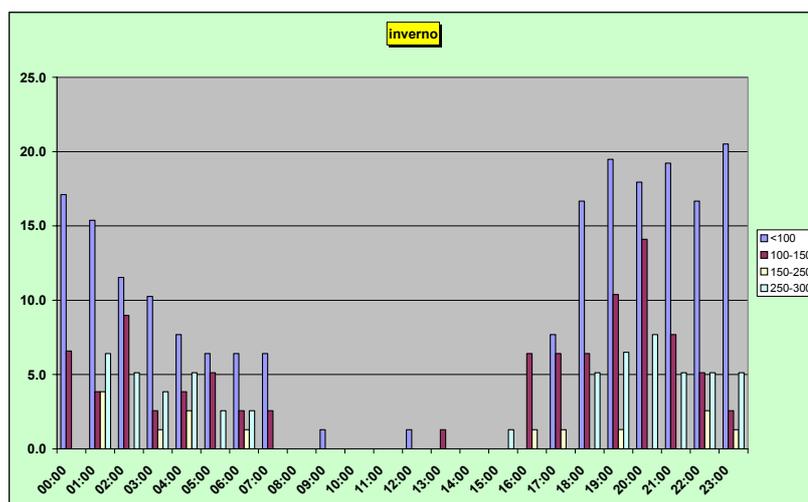
**Fig. 59** – Frequenze orarie delle classi caratterizzanti l'altezza di miscelamento nei primi 300 m; anno 2002.



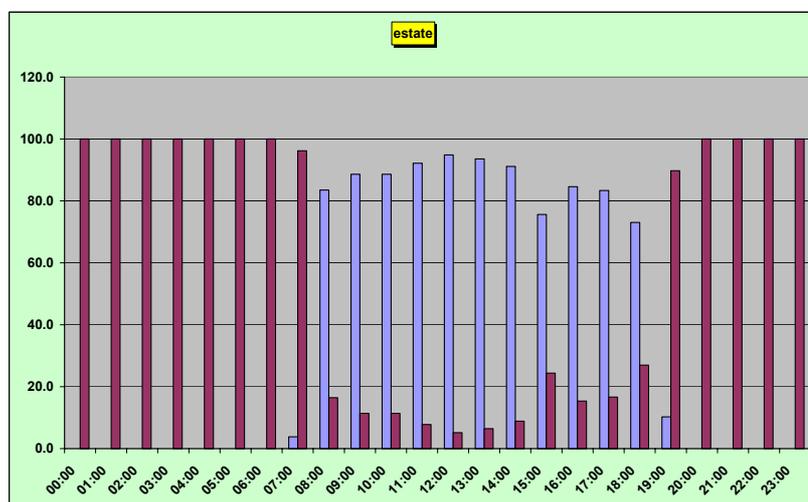
**Fig.60** – Frequenze delle ore caratterizzate da condizioni instabili (viola) contrapposto a condizioni che presentano condizioni neutre o stabili (rosso), inverno 2002.



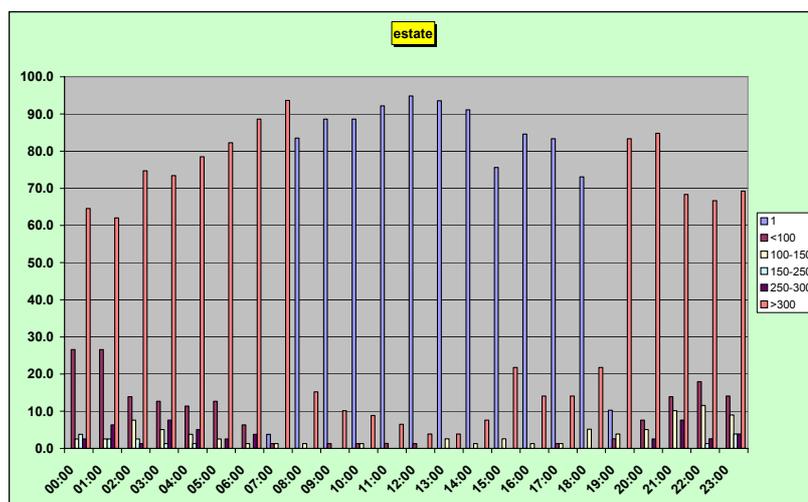
**Fig. 61** – Frequenze orarie delle classi caratterizzanti l'altezza di miscelamento, oltre alla frequenza della classe 1, legata a condizioni instabili; inverno 2002.



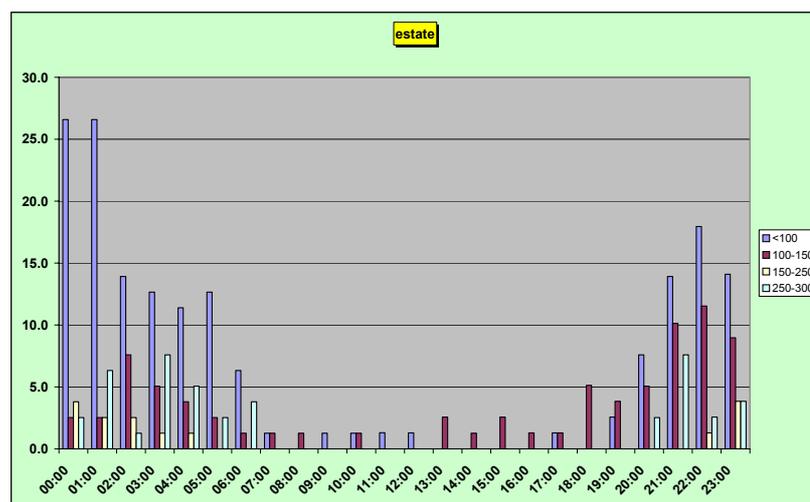
**Fig. 62** – Frequenze orarie delle classi caratterizzanti l'altezza di miscelamento nei primi 300 m; inverno 2002.



**Fig.63** – Frequenze delle ore caratterizzate da condizioni instabili (viola) contrapposto a condizioni che presentano condizioni neutre o stabili (rosso), estate 2002.



**Fig. 64** – Frequenze orarie delle classi caratterizzanti l'altezza di miscelamento, oltre alla frequenza della classe 1, legata a condizioni instabili; estate 2002.



**Fig. 65** – Frequenze orarie delle classi caratterizzanti l'altezza di miscelamento nei primi 300 m; estate 2002.

In generale, le condizioni più critiche dal punto di vista delle concentrazioni degli inquinanti si hanno quando l'altezza di miscelamento resta bassa anche in tarda mattinata, o, ancor peggio, quando restano condizioni di inversione con base a terra anche nel corso della giornata. L'approccio adottato per questo studio, pur evidenziando interessanti caratteristiche dell'andamento giornaliero e stagionale dell'altezza di miscelamento, non risulta completo, proprio per l'impossibilità di stimare l'altezza di miscelamento in presenza di condizioni instabili: in linea di principio infatti, soprattutto in inverno, non si può escludere che anche in queste circostanze si presentino condizioni di inversione termica con base in quota, caratterizzate da una altezza della base dell'ordine dei 100 m – 150 m e quindi critiche dal punto di vista della dispersione degli inquinanti.

In questo senso, la bassa frequenza di accadimento delle classi relative ad una altezza di miscelamento inferiore a 100 m in tarda mattinata, evidenziano una carenza del metodo di stima della variabile. Risultati più realistici si potrebbero ottenere applicando un modello matematico in grado di stimare l'altezza di miscelamento in modo completo, anche se si tratta di un approccio decisamente più gravoso. Una applicazione del processore meteorologico CALMET è stata svolta, nell'ambito del lavoro di una tesi di laurea [1] , su un dominio spaziale relativo alla provincia di Lucca, ed in questo caso, insieme ad altri parametri è stata stimata anche l'altezza di miscelamento nell'arco di alcuni mesi. L'analisi dei risultati così ottenuti ha evidenziato una buona coerenza con gli andamenti disponibili in letteratura.

## Conclusioni

Scopo di questo lavoro è stata la determinazione di una metodologia per la caratterizzazione meteoclimatica di un sito di particolare interesse, con caratteristiche di esportabilità all'intero territorio regionale. Tale caratterizzazione rappresenta infatti una base per la valutazione delle condizioni meteorologiche più ricorrenti o più critiche per all'accumulo in atmosfera di sostanze inquinanti.

Il progetto ha previsto uno studio finalizzato all'individuazione di indicatori climatologici sintetici, ottenuti dall'analisi delle principali variabili meteorologiche, la messa a punto di un metodo per effettuare le elaborazioni sulla base dei dati disponibili sul territorio regionale, ed infine la realizzazione di uno specifico programma, sviluppato in ambiente GIS.

I principali problemi incontrati hanno riguardato la reperibilità di un data-set di variabili misurate utili per elaborare gli indicatori climatologici, oltre alle difficoltà legate alla stima di alcune variabili, quali l'altezza di miscelamento e le classi di stabilità atmosferica.

Queste difficoltà sono state superate integrando i dati misurati con le stime ottenute dal modello RAMS, operativo presso il LaMMA per le previsioni meteorologiche; le stime del modello RAMS, inoltre, sono state utilizzate per inizializzare il modello meteo CALMET, con cui è possibile ottenere una riscalatura dei dati meteorologici, oltre che la stima dell'altezza di miscelamento, e delle variabili micrometeorologiche legate alle condizioni di stabilità atmosferica.

Infine, la realizzazione di appositi programmi per l'elaborazione degli indicatori sintetici e per la loro integrazione all'interno di un Sistema Informativo Geografico (GIS), congiuntamente all'archivio meteorologico RAMS ed all'integrazione di CALMET, ha permesso una diretta esportazione all'intero territorio regionale delle metodiche messe a punto.

## Bibliografia

1. **Busillo C.** (2002): *Studio del sistema integrato meteodiffusionale CALMET/CALPUFF per la valutazione della qualità dell'aria. Applicazione all'area della provincia di Lucca* – Tesi di Laurea in Ingegneria Nucleare, Università degli Studi di Pisa, Facoltà di Ingegneria, Dip. di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione, A.A. 2001-2002.
2. **Calastrini F.** (2000): *Il sistema integrato RASS-SODAR* – Firenze, 15 Settembre 2000.
3. **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, 20 Novembre 2002.
4. **Pasquill F.** (1974): *Atmospheric diffusion* – Wiley, New York, NY, USA.
5. **Santomauro L.** (1977): *Dinamica dell'inquinamento atmosferico da impianti industriali.*
6. **Secci S.** (2004): *WINDROSE-GIS – Analisi, elaborazione e presentazione dati meteo-anemologici multiplatforma in ambiente GIS* – EuroForm S.c.r.l. – S. Giovanni V. (FI), Gennaio 2004
7. **Scire J.S., Robe F.R., Fermat 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.
8. **Stull R.** (1990): *An introduction to boundary layer meteorology.*
9. **Walko R. L., Tremback C. J.** (2001): *RAMS – Regional Atmospheric Modeling System Version 4.3/4.4* – Guida per l'utente
10. **Zannetti P.** (1990): *Air pollution modelling.* Computational Mechanics Publications. Southampton, UK.

