

# La metodologia di calcolo sviluppata

## 1. Generalità

La caratterizzazione anemologica di un'area finalizzata alla valutazione della producibilità eolica può essere svolta correttamente se sono noti dati di vento rappresentativi del dominio di studio. In linea di principio sarebbe necessario effettuare costose campagne di misure anemologiche, per un periodo di almeno un anno, alla quota a cui è prevista l'installazione delle pale eoliche, tipicamente 60-80 metri. In alternativa, vengono utilizzati i dati misurati da stazione a terra o le stime ottenute da modello meteorologico a scala locale. Entrambi gli approcci presentano vantaggi e limiti. L'approccio modellistico si basa su stime e non su dati misurati, ma presenta il vantaggio di fornire i risultati alla quota desiderata; l'utilizzo di dati misurati da stazioni a terra, apparentemente più attendibili, prevede comunque un processo di elaborazione per stimare la velocità del vento alla quota di lavoro; inoltre non è possibile determinare la direzione del vento ad una quota superiore a quella di misura attraverso un semplice algoritmo. Se il dominio di studio è, come in questo caso, molto esteso, è praticamente impossibile utilizzare i soli dati da stazione a terra, che non possono essere rappresentativi dell'intero territorio regionale.

Sulla base di queste considerazioni, nel presente lavoro si propone l'utilizzo delle stime ottenute da modelli meteorologici; il modello prognostico WRF, alla risoluzione di 10 Km, fornisce l'input al modello diagnostico CALMET, che riscalda le stime ad una risoluzione finale di 2 Km.

I dati misurati presso stazioni a terra verranno utilizzati unicamente come confronto con gli analoghi stimati dai modelli, come verrà illustrato nel § 2.5.

Di seguito viene descritta l'area di studio e la base-dati utilizzata; dal momento che quest'ultima è costituita dalle stime di vento ottenute dai modelli WRF e CALMET, verranno descritte alcune delle loro principali caratteristiche. Tali stime sono poi state confrontate con i dati misurati presso le stazioni a terra ritenute idonee.

## 2. Archivio meteorologico

In collaborazione con la Regione Toscana, il settore "Qualità dell'Aria" del LaMMA ha realizzato un archivio di variabili meteorologiche, estratte quotidianamente su tutta la regione Toscana a partire dalle previsioni del servizio meteo regionale. Fino al mese

di agosto 2006 tale servizio operativo è stato svolto utilizzando il modello RAMS, mentre successivamente è stato adottato il modello WRF.

Per il presente studio, tuttavia, è stato ritenuto opportuno operare con stime ottenute unicamente dal modello WRF, alla risoluzione di 10 Km; allo scopo, la stessa configurazione del modello adottata per il servizio meteo operativo è stata applicata per stimare le variabili meteo, nel periodo che va dal primo gennaio 2004 al primo settembre 2006. Successivamente è stato applicato, per l'intero quadriennio 2004-2007, il modello CALMET, allo scopo di riscalare le stime ad una risoluzione di 2 Km.

## **2.1 Il modello WRF**

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

Il sistema è costituito da:

1. Risolutore delle equazioni fluido-dinamiche. Caratteristiche del solutore sono:
  - Equazioni di Navier-Stokes non idrostatiche (con opzione per ipotesi idrostatica) per fluido compressibile.
  - Sistema di coordinate verticali ibrido: "*terrain-following*" e "*sigma-pressure*".
  - Griglia *staggerata* Arakawa E-grid.
  - Stesso passo temporale per tutti i termini.
  - La dinamica conserva un elevato numero di termini del primo e del secondo ordine, tra cui energia ed entropia.
  - Non è ancora implementata la possibilità di *nesting* delle griglie.
  - Propagazione orizzontale con schema "*forward-backward*".
  - Propagazione verticale delle onde sonore con "*Implicit Scheme*".
  - Avvezione orizzontale e verticale conservative (fino ai termini del secondo ordine).
  - Diffusione laterale e verticale. La diffusione verticale nel *Boundary Layer* e nell'atmosfera libera si esplicita attraverso lo schema del terreno e lo schema "*Mellor-Yamada-Janjic*". Quella laterale è formulata attraverso l'approccio non lineare di Smagorinsky (con parametro di controllo pari al quadrato della costante di Smagorinsky).
2. Modelli fisici interagenti con il risolutore NMM attraverso una interfaccia *standard*.

- Microfisica.
  - Schema radiativo ad onda lunga.
  - Schema radiativo ad onda corta.
  - Parametrizzazione fenomeni convettivi.
  - Modello di interazione con la superficie.
3. Inizializzazione *standard* delle condizioni iniziali ed al contorno da dati provenienti da modelli globali o regionali.
  4. Assimilazione dati con schema variazionale "3DVar".

## **2.2 Il modello CALMET**

Per inizializzare CALMET possono essere utilizzati sia i dati delle variabili atmosferiche acquisite da stazioni a terra e dei radiosondaggi, sia le stime di profili verticali delle variabili ottenute da modelli meteorologici ad area limitata.

Molto spesso non è possibile reperire dati meteorologici adeguati, per la mancanza di stazioni a terra rappresentative dell'area di interesse e per l'assenza di stazioni che misurano profili verticali di vento e temperatura nell'area di studio: l'archivio delle variabili meteo ottenute da un modello prognostico - WRF nel presente studio - consente di ovviare a questo problema.

In realtà, l'utilizzo di stime da modello prognostico rispetto a misure da stazione non compensa semplicemente la mancanza di dati misurati (in particolar modo dati relativi a radiosondaggi), ma porta ad una migliore descrizione dei campi di vento e delle variabili legate alla turbolenza. Infatti, mentre il preprocessore meteo CALMET è un semplice interpolatore, i modelli prognostici (RAMS/WRF) stimano 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. Questa caratteristica del sistema RAMS/WRF-CALMET risulta particolarmente utile nel caso in cui il dominio di studio sia esteso.

## **3. Dominio spaziale e base-dati**

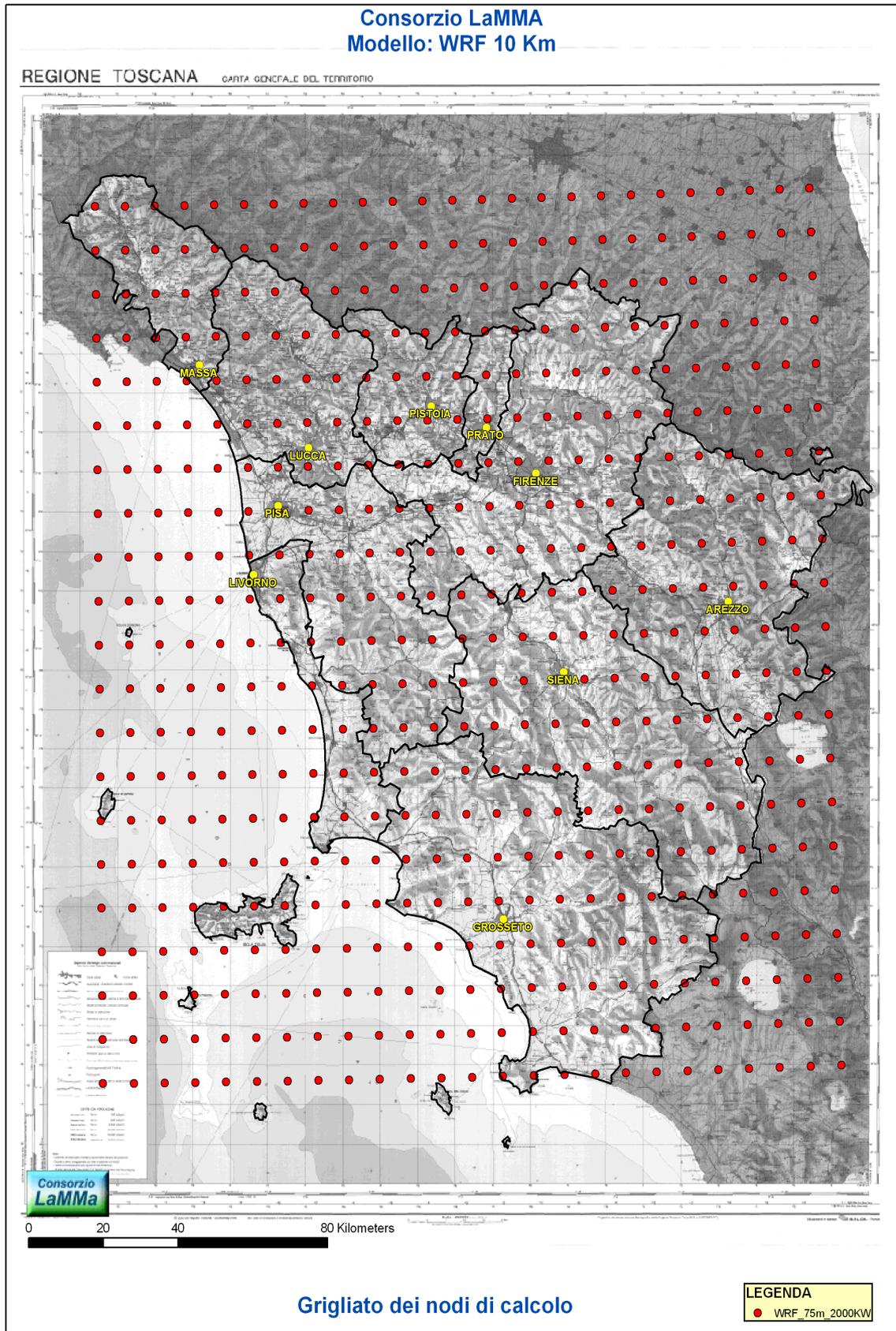
Il dominio spaziale preso in esame nel presente lavoro comprende l'intero territorio della regione Toscana, come illustrato in Fig. 1.



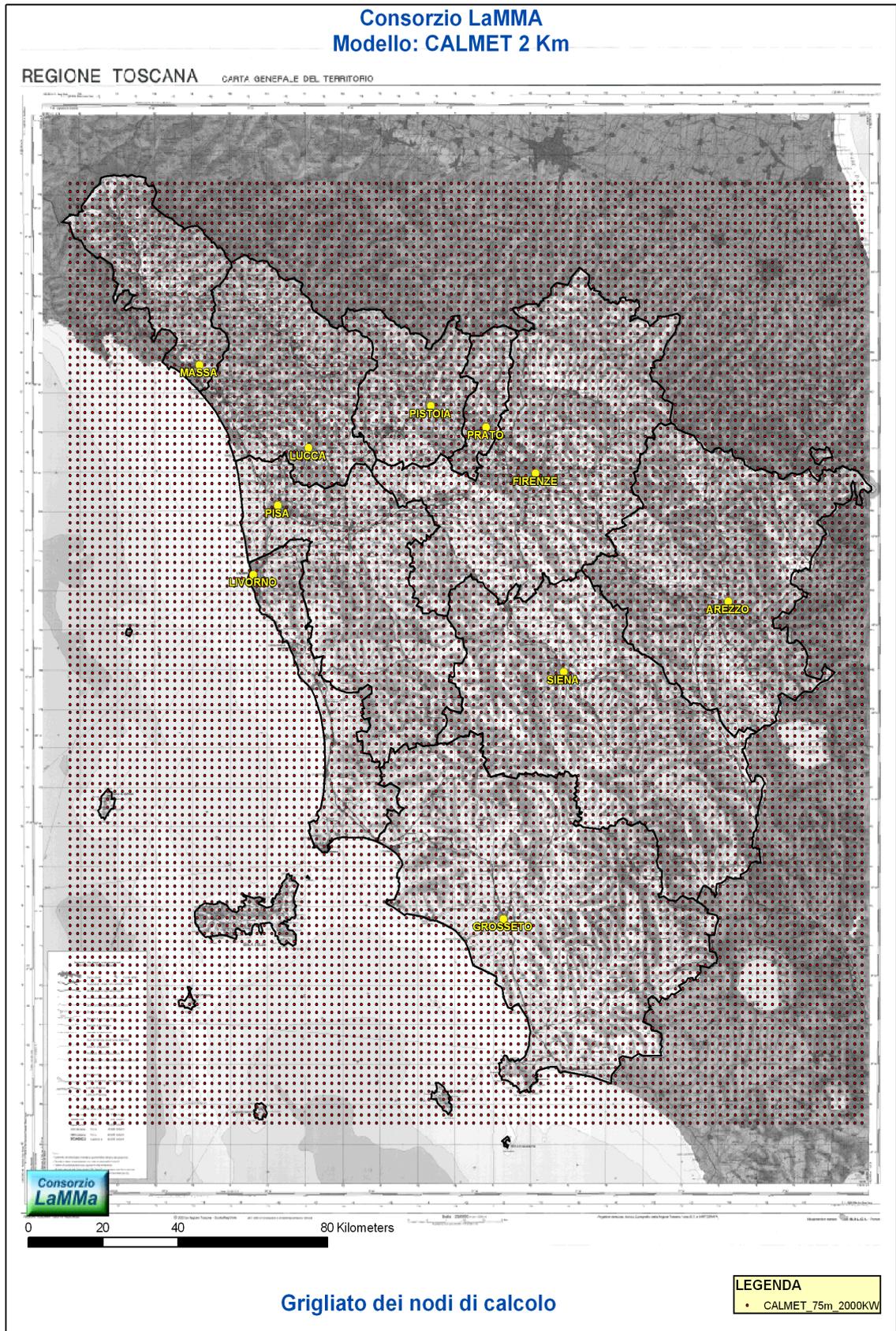
**Fig. 1** – Dominio spaziale del sistema WIND-GIS.

La base-dati anemologica dello studio è costituita dalle stime del campo di vento elaborate su tutta la regione Toscana dal modello prognostico WRF alla risoluzione di 10 Km. In Fig. 2 è illustrata la mappa del grigliato dei nodi di calcolo del modello WRF, costituito nel complesso da 525 punti. La validità della scelta modellistica nella base-dati dello studio in esame è suffragata da analoghi lavori condotti di recente.

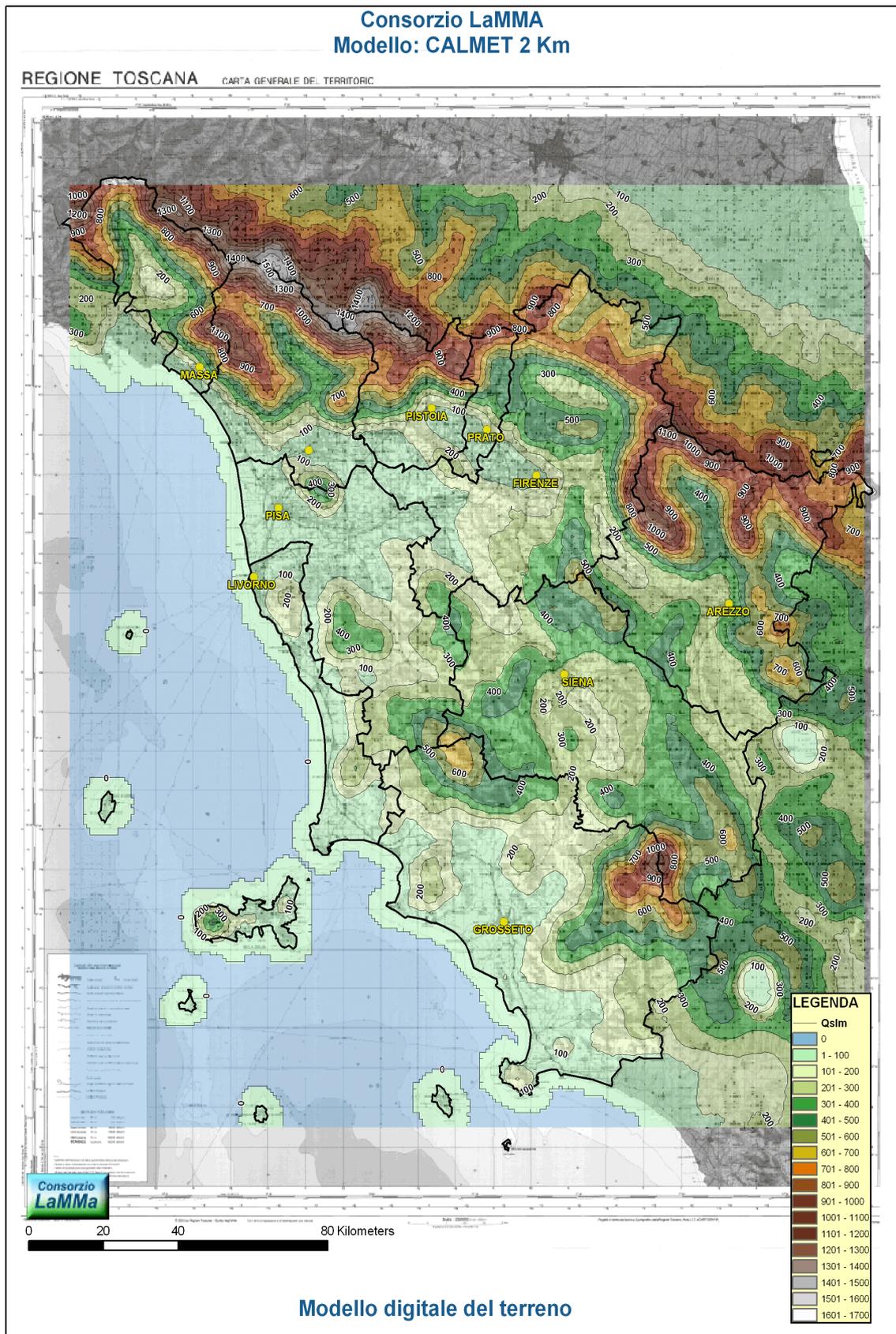
Le stime del modello WRF sono state successivamente riscalate alla risoluzione finale di 2 Km attraverso l'utilizzo del modello diagnostico CALMET. In Fig. 3 è illustrato il grigliato dei nodi di calcolo del modello CALMET, costituito in totale da 12840 punti, mentre in Fig. 4 è mostrato il corrispondente modello digitale del terreno utilizzato. Per ognuno dei 12840 punti del grigliato spaziale, i dati di vento della base-dati utilizzata si presentano nella forma di altrettanti profili verticali. La risoluzione temporale dei profili è pari ad un'ora ed il periodo temporale coperto va dal primo gennaio 2004 al 31 dicembre 2007.



**Fig. 2** – Grigliato di calcolo del modello WRF sulla regione Toscana (risoluzione di 10 Km).



**Fig. 3** – Grigliato di calcolo del modello CALMET sulla regione Toscana (risoluzione di 2 Km).



**Fig. 4** – Mappa del modello digitale del terreno del modello CALMET sulla regione Toscana (risoluzione di 2 Km).

## 4. Specifiche di applicazione

La base-dati costituita dalle stime di vento ottenute dai modelli WRF-CALMET è stata elaborata attraverso uno specifico software di gestione e calcolo, appositamente sviluppato e implementato per il presente studio.

Nella tabella 1 sono riportate nel dettaglio le specifiche di applicazione, come il periodo temporale preso in esame (anni 2004-2007), la quota altimetrica di riferimento (75 m dal suolo), i modelli utilizzati, la loro risoluzione spaziale, etc.

**Tab. 1** – Specifiche di applicazione del sistema WIND-GIS sulla regione Toscana.

VOCE	PARAMETRO	VALORE
Stime di vento	Periodo processato	01/01/2004-31/12/2007
	Risoluzione temporale	1 ora
	Dati processati	35064
	Percentuale dati validi	99.50 %
	Altezza dal suolo	75 m
Modello prognostico	Nome	WRF
	Risoluzione spaziale	10 Km
	Totale punti processati	525
Modello diagnostico	Nome	CALMET
	Risoluzione spaziale	2 Km
	Totale punti processati	12840

In accordo con quanto previsto nel Piano di Indirizzo Energetico Regionale (PIER), uno degli obiettivi del lavoro è quello di verificare la possibilità di realizzazione di parchi eolici di elevata potenza (tra i 15 e i 25 MW); si è quindi focalizzata l'attenzione su applicazioni eoliche di grande taglia. Le elaborazioni, pertanto, sono state effettuate in riferimento ai parametri costruttivi e funzionali di turbine di potenza 2 MW; tali parametri sono riportati in Tab. 2.

È necessario sottolineare che tra le ipotesi di lavoro del presente studio non sono state prese in esame le eventuali perdite di producibilità tipicamente connesse ad un impianto eolico, quali ad esempio quelle per indisponibilità e manutenzione, quelle connesse alla riduzione della densità dell'aria, le perdite elettriche, etc.

**Tab. 2** – Parametri costruttivi e funzionali della turbina eolica di riferimento (2000 KW).

VOCE	PARAMETRO	VALORE
Turbina utilizzata	Nome	Tipo 2000 KW
	Numero di pale	3
	Velocità del vento in accensione	4 m/s
	Velocità del vento di fermo	25 m/s
	Velocità del vento nominale	15 m/s
	Altezza del mozzo	78 m
	Diametro del rotore	80 m
	Area spazzata	5027 m <sup>2</sup>
	Potenza nominale	2000 KW

## 5. Elaborazioni grafiche e numeriche

È stata elaborata una serie di mappe di sintesi sull'intero territorio regionale. In particolare, in Tab. 3 è riportato l'elenco delle grandezze anemologiche calcolate da WIND-GIS, mentre in Tab. 4 è riportato quello delle grandezze di producibilità eolica elaborate sulla base della turbina di riferimento prescelta (Tab. 2).

**Tab. 3** – Grandezze anemologiche elaborate da WIND-GIS.

GRANDEZZA	SIMBOLO	DESCRIZIONE	UNITÀ DI MISURA
Velocità media del vento	-	Valore medio della velocità del vento	m/s
Velocità mediana del vento	-	Valore mediano della velocità del vento; corrisponde al 50° percentile, ossia al valore per cui la probabilità cumulata è pari a 0.5	m/s
Fattore di forma	k	Fattore adimensionale della curva di Weibull: valori prossimi ad 1 rappresentano curve molto asimmetriche, valori superiori a 2÷3 rappresentano distribuzioni molto simmetriche simili alle gaussiane	-
Fattore di scala	A	Parametro di scala della curva di distribuzione di Weibull: è proporzionale alla velocità media	m/s
Energia annua specifica di Betz	-	Prodotto della potenza media specifica di Betz (densità di potenza funzione della ventosità del sito) per il numero di ore annue	KWh/m <sup>2</sup>

Per una più immediata fruizione del servizio, all'interno di WIND-GIS è stata inclusa una serie di layer informativi, quali gli ambiti amministrativi (comuni e province), nonché informazioni ausiliarie di interesse come i diversi vincoli esistenti (parchi, aree vincolate, vincoli archeologici), le infrastrutture presenti, il grafo delle

linee elettriche, etc. L'elenco delle aree protette e vincolate rappresentate nel sistema è riportato in Tab. 5.

**Tab. 4** – Grandezze di producibilità eolica elaborate da WIND-GIS.

GRANDEZZA	SIMBOLO	DESCRIZIONE	UNITÀ DI MISURA
Fattore di disponibilità	$A_f$	Percentuale di ore annue di funzionamento effettivo: è dato dall'integrale della curva di Weibull calcolato tra le velocità di avvio e di spegnimento	-
Fattore di capacità	$C_f$	Percentuale di ore annue di funzionamento a potenza nominale	-
Ore equivalenti annue a potenza nominale	$H_{eq}$	Numero di ore annue di funzionamento alla potenza nominale: è dato dal prodotto tra il fattore di capacità e il numero di ore annue	ore/anno
Producibilità energetica annua	AEP	Stima dell'energia producibile in un anno dalla turbina, nota la sua curva di potenza e la curva di probabilità delle velocità del vento, cioè la probabilità cumulata di Weibull	MWh/anno

**Tab. 5** – Dettaglio delle aree protette/vincolate prese in esame nel sistema.

LIVELLO 1	LIVELLO 2	LIVELLO 3
Parchi, riserve e aree protette	Aree protette nazionali	Parchi nazionali
		Riserve naturali dello stato
	Aree protette regionali	Parchi regionali
		Parchi provinciali
		Riserve naturali provinciali
	Siti di importanza regionale	Aree naturali protette di interesse locale (ANPIL)
	Zone umide	SIR
Siti di interesse Comunitario	Zone RAMSAR	
Vincoli paesaggistici	Vincoli paesaggistici	SIC e ZPS
Vincoli archeologici	Vincoli archeologici	Aree sottoposte a vincolo ai sensi di: L.1497/39 e D.Lgs. 490/99
		Siti sottoposti a vincolo ai sensi di: L.364/1909, L. 1089/39, D.Lgs. 490/99

Infine, con il software di gestione e calcolo appositamente sviluppato, per ognuno dei punti dell'archivio selezionati, in corrispondenza della quota di riferimento dal suolo (75 m), sono state effettuate le seguenti elaborazioni numeriche e grafiche:

- grafico della rosa dei venti e corrispondente tabella delle JFF (*Joint Frequency Functions*);
- grafico della distribuzione di Weibull della velocità del vento, con indicazione della velocità media e dei parametri  $A$  (fattore di scala) e  $k$  (fattore di forma);
- grafico della distribuzione di producibilità energetica per classi di velocità del vento (istogramma di frequenza) relativa alla turbina scelta e corrispondente tabella.