

Copertina

Corso di Fisica dell'Atmosfera

Modellistica numerica applicata al sistema atmosferico

Giaiotti Dario & Stel Fulvio

Sommario della lezione

- Considerazioni generali
- Simulazioni su dominio globale
- Simulazioni del tempo meteorologico, fino a 10 giorni: ECMWF, GFS,
- Simulazioni ad area limitata: i LAM e il modello WRF
- Consorzi modellistici in Europa COSMO, ALADIN HIRLAM.
- Strumenti e conoscenze necessarie per svolgere simulazioni atmosferiche

Il sistema completo di equazioni della fisica dell'atmosfera e i codici numerici

Principi Fisici → Equazioni → Codici numerici → Tecniche di esecuzione

Principi di conservazione
 quantità di moto
 energia
 massa
 equazione di stato

$$\frac{du}{dt} - \frac{uv \tan(\phi)}{R} + \frac{uw}{R} = 2\Omega v \sin(\phi) - 2\Omega w \cos(\phi)$$

$$\frac{dv}{dt} + \frac{u^2 \tan(\phi)}{R} + \frac{vw}{R} = -2\Omega u \sin(\phi) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}$$

$$\frac{dw}{dt} - \frac{u^2 + v^2}{R} = 2\Omega u \cos(\phi) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \dots$$

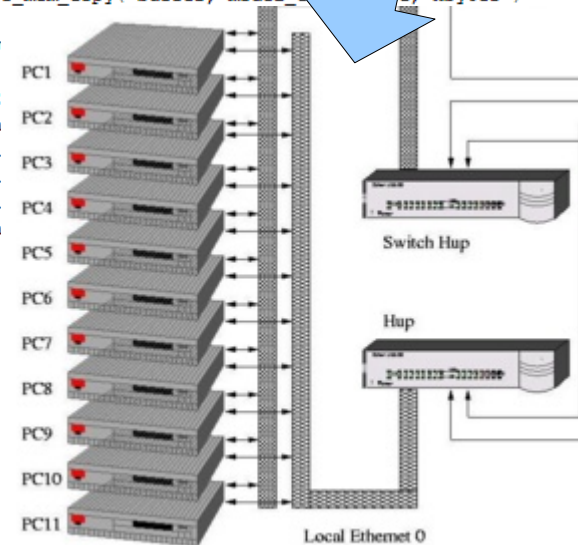
$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

$$\frac{d\eta}{dt} = C_p \frac{dT}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt}$$

$$p = \rho RT$$

```

208     "get_config_rec_as_buffer: buffer size too small for con
209     ENDIF
210     CALL wrf_mem_copy( model_config_rec, buffer, nbytes )
211     ncopied = nbytes
212     RETURN
213     END SUBROUTINE get_config_as_buffer
214
215     SUBROUTINE set_config_as_buffer( buffer, buflen )
216     ! note that model_config_rec_type must be defined as a sequence
217     INTEGER, INTENT(INOUT) :: buffer(*)
218     INTEGER, INTENT(IN)    :: buflen
219     ! TYPE(model_config_rec_type) :: model_config_rec
220     INTEGER :: nbytes
221     CALL wrf_num_bytes_between( model_config_rec%last_item_in_
222                               model_config_rec%first_item_in_
223                               nbytes )
224     ! nbytes = loc(model_config_rec%last_item_in_struct) - &
225     ! loc(model_config_rec%first_item_in_struct)
226     IF ( nbytes .gt. buflen ) THEN
227         CALL wrf_error_fatal( &
228             "set_config_rec_as_buffer: buffer length too small to f:
229     ENDIF
230     CALL wrf_mem_copy( buffer, model_config_rec, nbytes )
231     RETURN
232     END SUBROU
233     #else
234     SUBROUTINE
235     ! note that m
236     INTEGER
237     INTEGER
238     TYPE(m
    
```



Le equazioni della fisica dell'atmosfera sono PDE

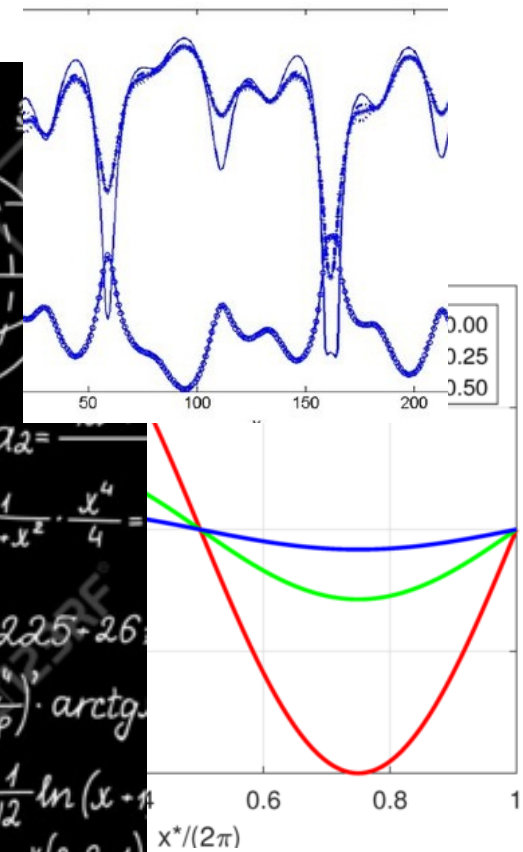
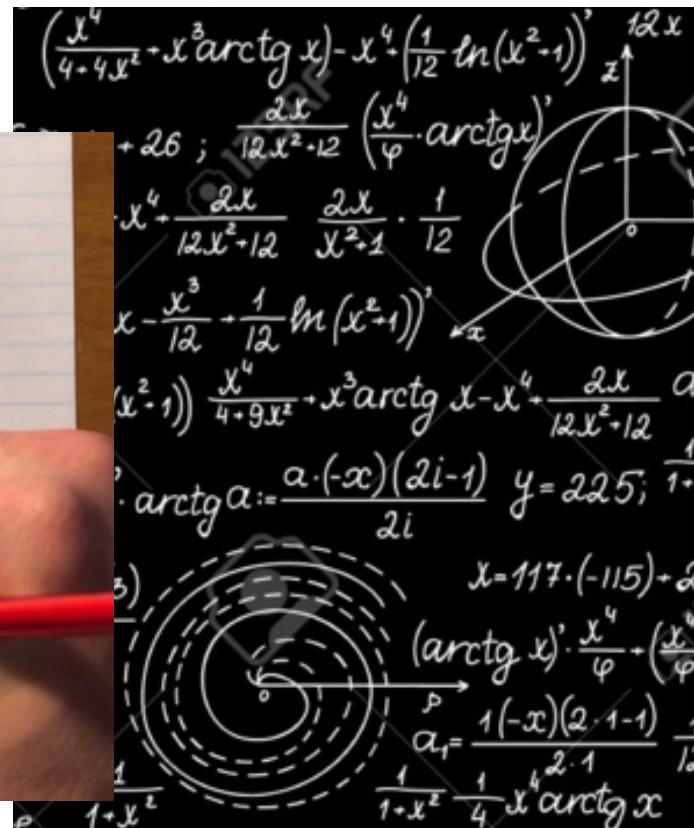
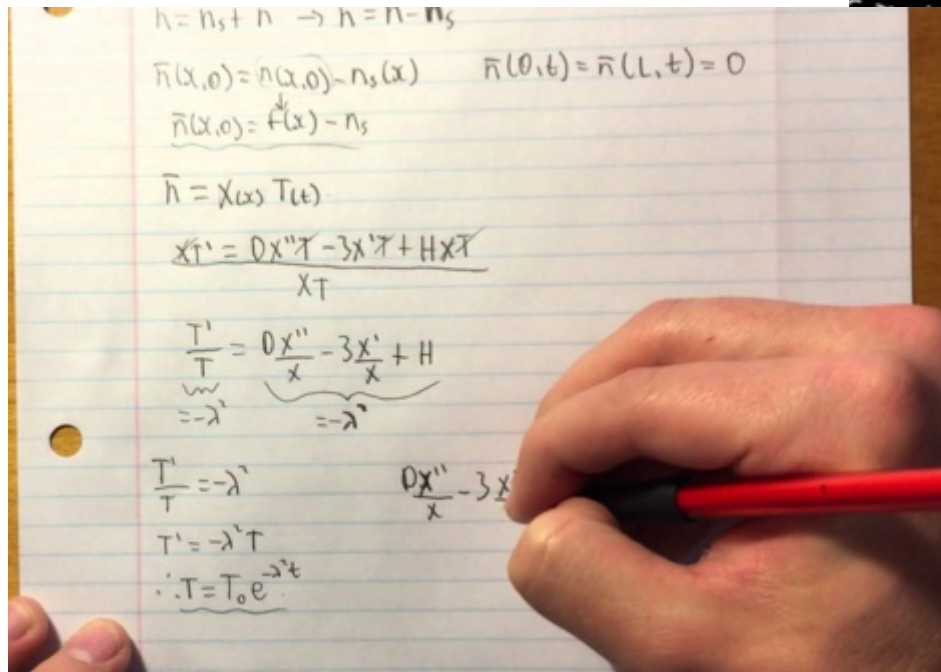
La soluzione è determinata da:

Condizioni iniziali

+

Condizioni al contorno

Metodo risolutivo



Difficoltà della soluzione del set di equazioni fondamentali

$$\frac{du}{dt} - \frac{uv \tan(\phi)}{R} + \frac{uw}{R} = 2\Omega v \sin(\phi) - 2\Omega w \cos(\phi) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + (\nu \Delta \mathbf{v})_x$$

$$\frac{dv}{dt} + \frac{u^2 \tan(\phi)}{R} + \frac{vw}{R} = -2\Omega u \sin(\phi) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + (\nu \Delta \mathbf{v})_y$$

$$\frac{dw}{dt} - \frac{u^2 + v^2}{R} = 2\Omega u \cos(\phi) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + (\nu \Delta \mathbf{v})_z$$

$$p = \rho RT$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

$$\frac{d\eta}{dt} = C_p \frac{dT}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt}$$

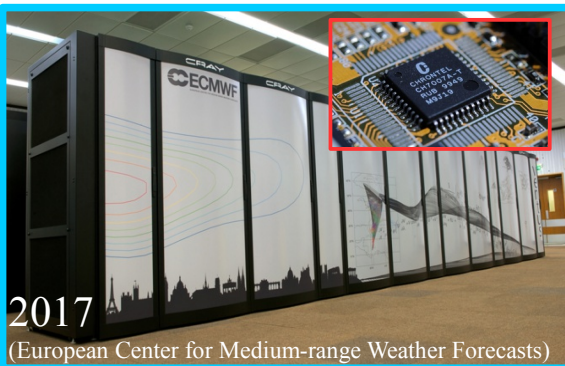
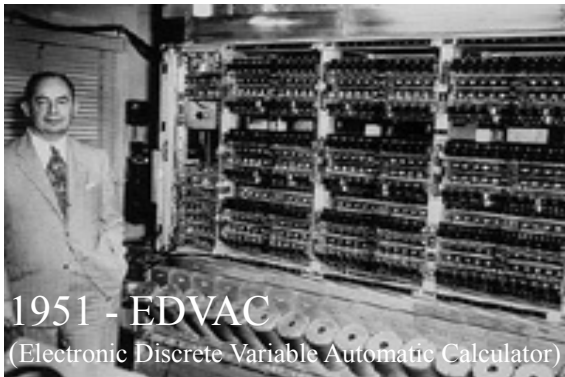
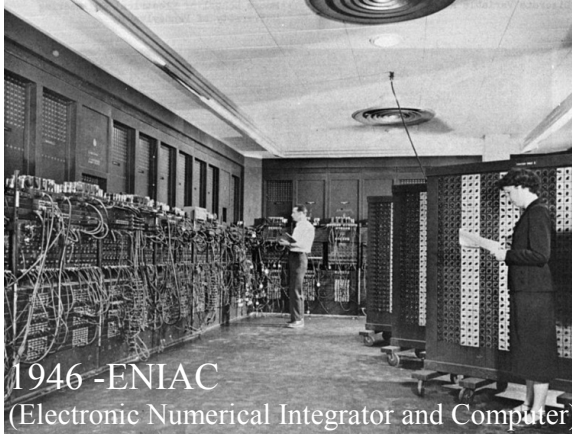
L'insieme completo di equazioni differenziali che descrive l'evoluzione dell'atmosfera terrestre presenta notevoli difficoltà nel calcolo delle soluzioni, sia tramite l'approccio analitico che quello numerico.

Si tratta di equazioni differenziali alle derivate parziali, non lineari.

Le condizioni iniziali e quelle al contorno sono essenziali per la ricerca di soluzioni realistiche

Simulazioni numeriche dei fenomeni atmosferici: storia di uomini e macchine

Calcolatori



Simulazione di una
parte
dell'atmosfera
700km x 700km
per 2 giorni in 24
ore di calcolo



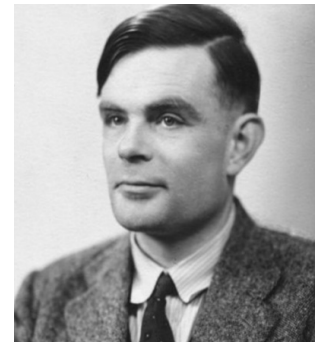
51 Simulazioni su
tutta l'atmosfera
12km x 12km
per 10 giorni in 1
ora di calcolo

Persone

1922 - Richardson L. F.
Weather Prediction by Numerical Process
La teoria della soluzione delle equazioni



1936 - Alan Turing
On computational numbers with applications ...
La teoria del calcolatore digitale

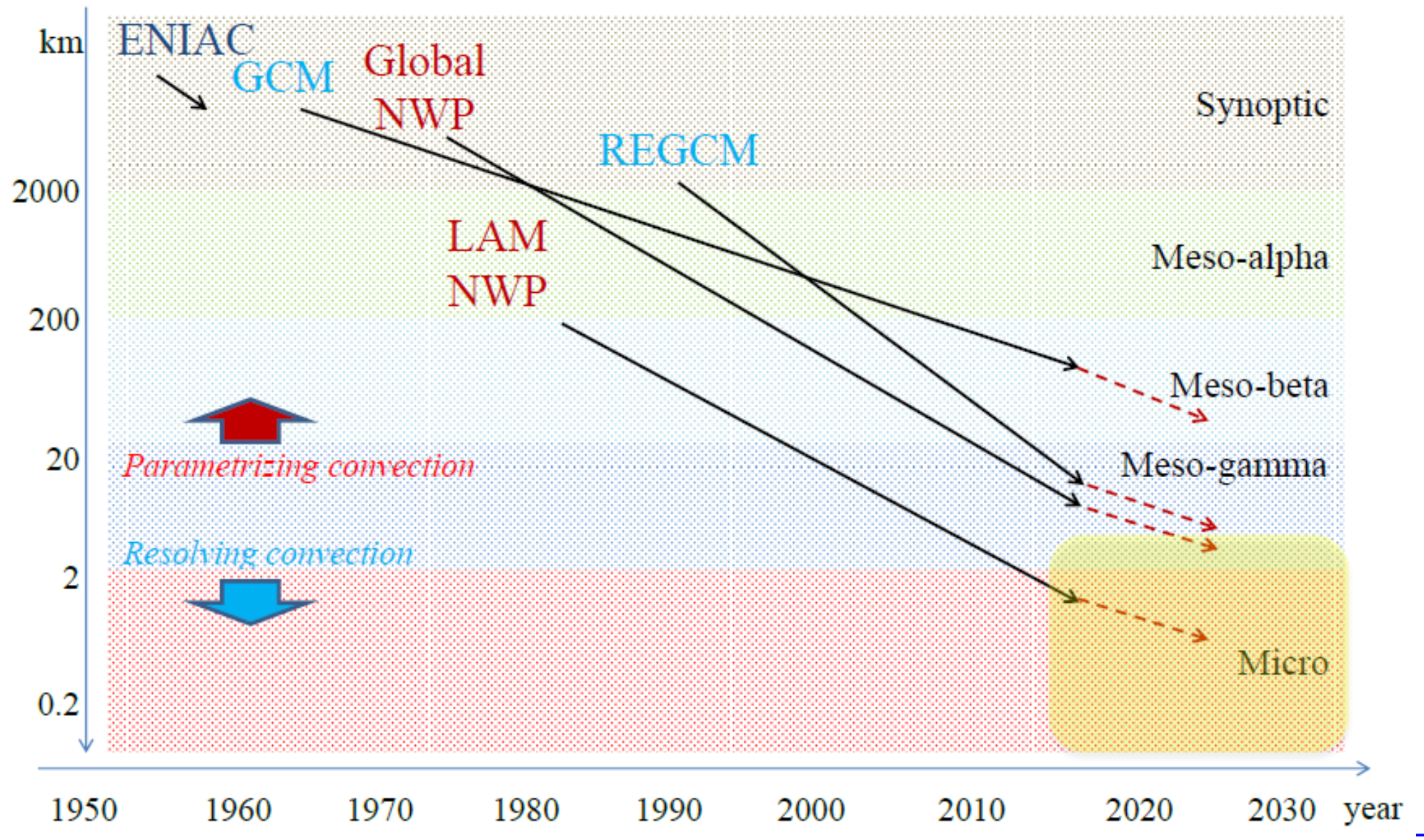


1951 - John von Neumann
Prime previsioni meteorologiche numeriche
Lo sviluppo del calcolatore digitale programmabile



Cosa è cambiato dai tempi di ENIAC nell'approccio computazionale

Dai tempi di ENIAC (1950) abbiamo aumentato la risoluzione spaziale e questa è ancora **la strategia di sviluppo e di miglioramento dei modelli atmosferici**



Cosa implica l'aumento della risoluzione spaziale dei modelli

Aumentare la risoluzione spaziale significa **simulare processi atmosferici su più scale atmosferiche**

Al modello chiediamo di:

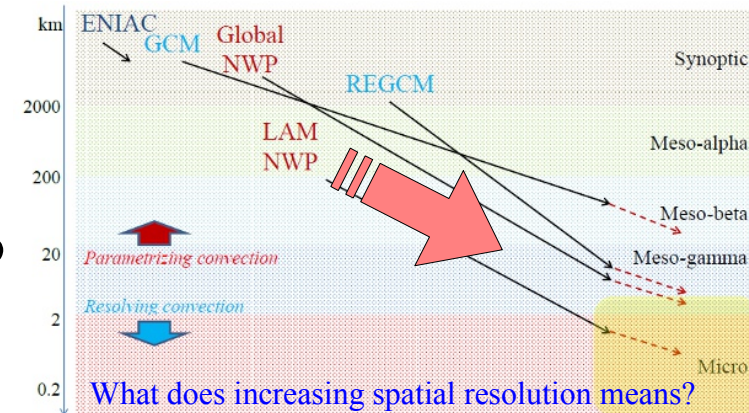
- Trattare più scale atmosferiche
- Simulare le retroazioni tra le scale ed il contorno
- Tenere conto delle condizioni al contorno

Il modello ci chiede:

- Condizioni iniziali più dettagliate e aderenti alla realtà
- Condizioni al contorno più dettagliate
- Più potenza di calcolo

Aumentare la risoluzione, ad oggi ci ha dato:

- Previsioni del tempo più realistiche
- Scenari climatici più dettagliati
- Aumentata capacità di soddisfare gli utenti



Significa

Migliorare i modelli
significa migliorare:

- dinamica
- fisica
- assimilazione dati
- processi al contorno
- calcolo

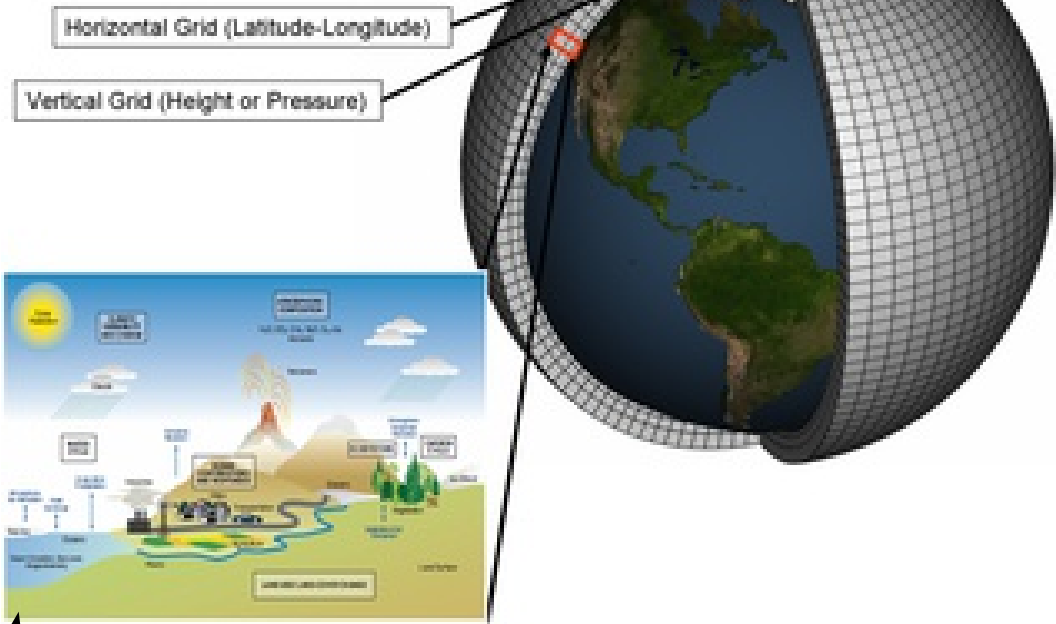
Modelli atmosferici globali

Le equazioni vengono risolte per un dominio tridimensionale che è un guscio sferico che avvolge il pianeta

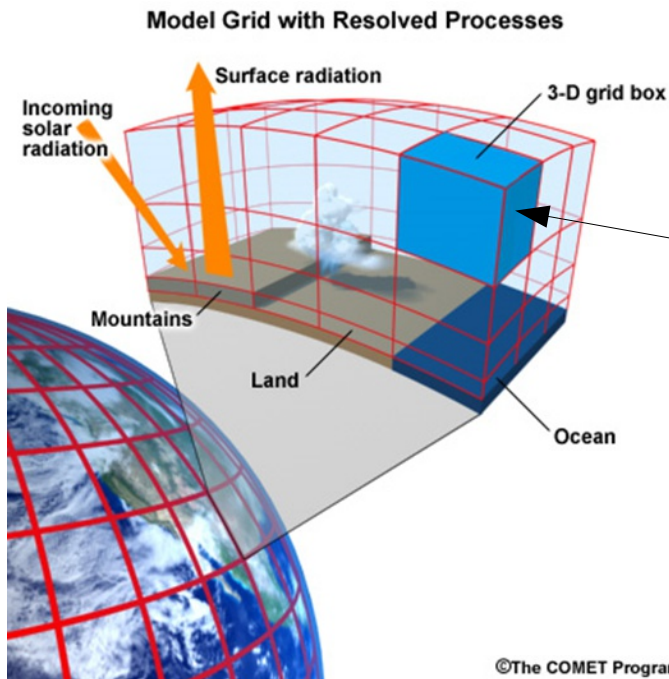
Le condizioni al contorno sono periodiche, perché il dominio di calcolo è composto da superfici sferiche

Sono molto importanti le condizioni iniziali.

Schematic for Global Atmospheric Model



In principio, ogni volume elementare dovrebbe considerare tutti i processi fisici coinvolti nei principi di conservazione

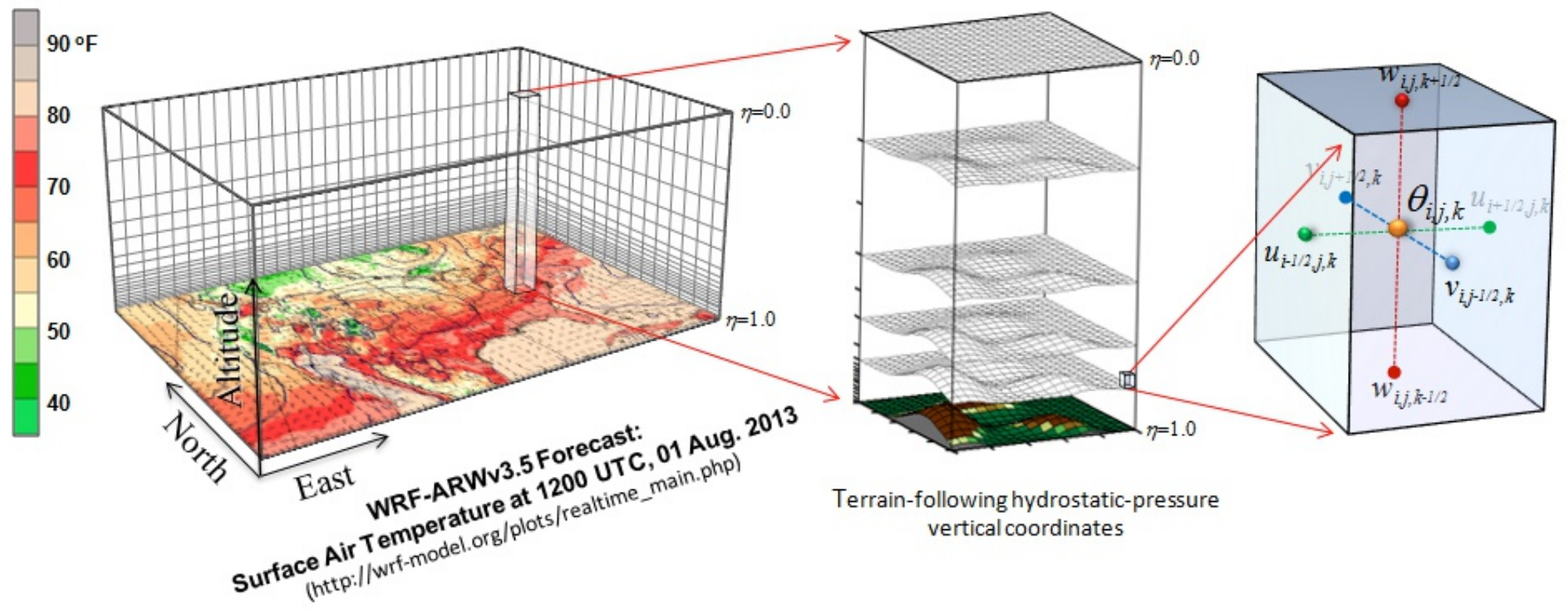


Le soluzioni sono campi tridimensionali funzione del tempo.

Sono discreti: si parla di punto di griglia e di passo temporale

Rappresentazione dei campi atmosferici in un modello numerico

- Sono necessari dei sistemi di coordinate che agevolano l'integrazione numerica
- I campi vengono calcolati su reticolati diversi per rendere più congruenti le posizioni nello spazio a cui si riferiscono i gradienti e i campi stessi



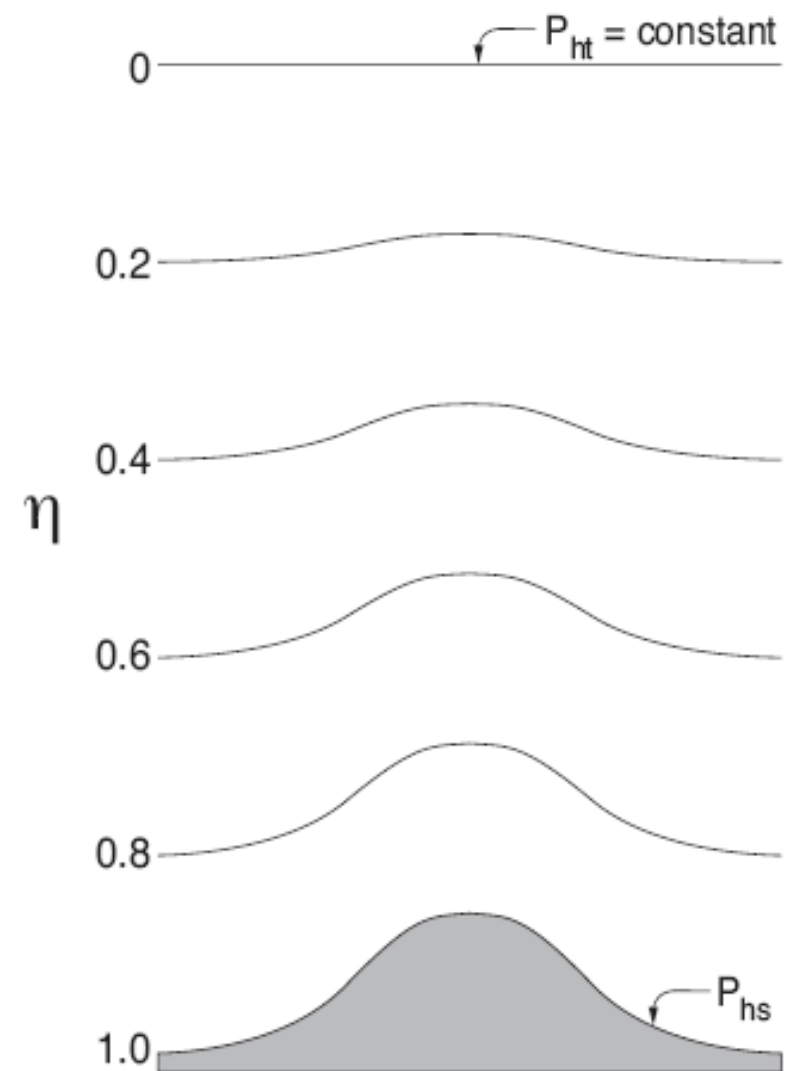
Le coordinate verticali nei modelli numerici

The ARW equations are formulated using a terrain-following hydrostatic-pressure vertical coordinate denoted by η and defined as

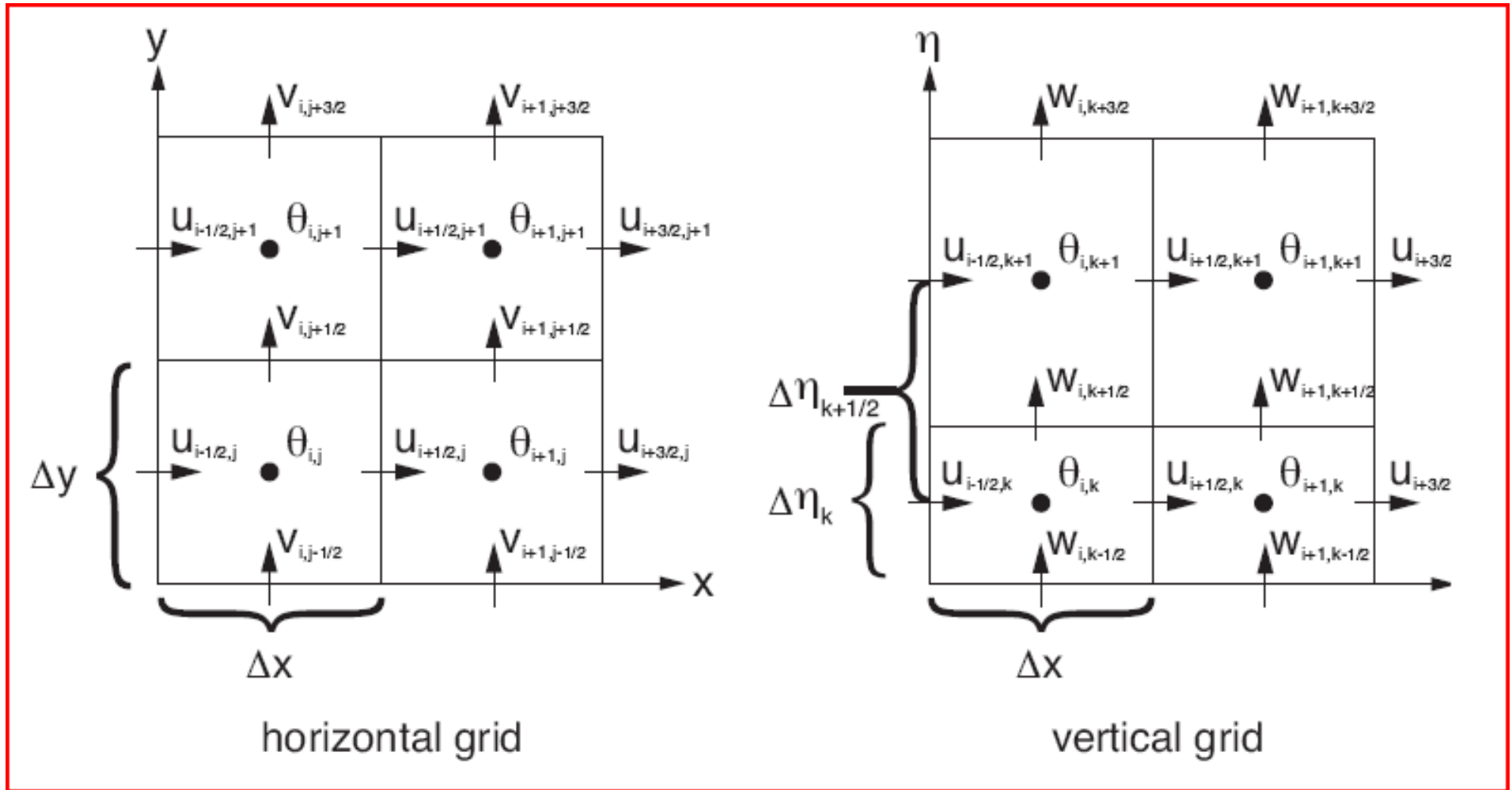
$$\eta = (p_h - p_{ht})/\mu \quad \text{where} \quad \mu = p_{hs} - p_{ht}. \quad (2.1)$$

p_h is the hydrostatic component of the pressure, and p_{hs} and p_{ht} refer to values along the surface and top boundaries, respectively. The coordinate definition (2.1), proposed by Laprise (1992), is the traditional σ coordinate used in many hydrostatic atmospheric models. η varies from a value of 1 at the surface to 0 at the upper boundary of the model domain (Fig. 2.1). This vertical coordinate is also called a mass vertical coordinate.

Since $\mu(x, y)$ represents the mass per unit area within the column in the model domain at (x, y) ,

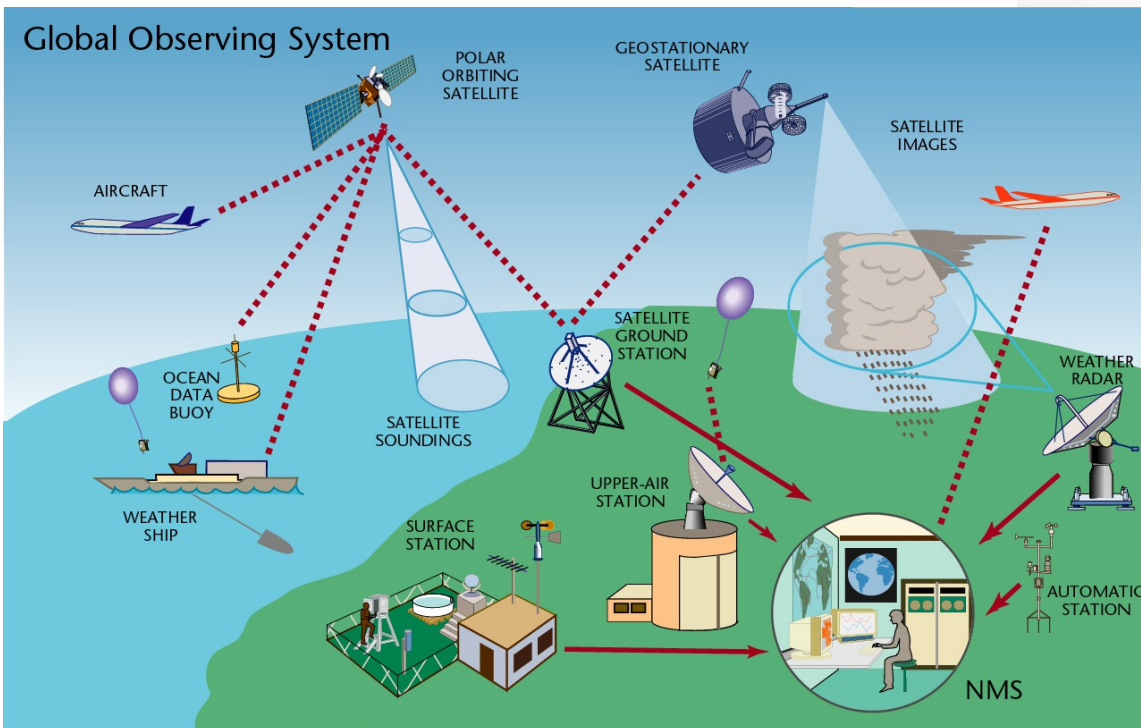
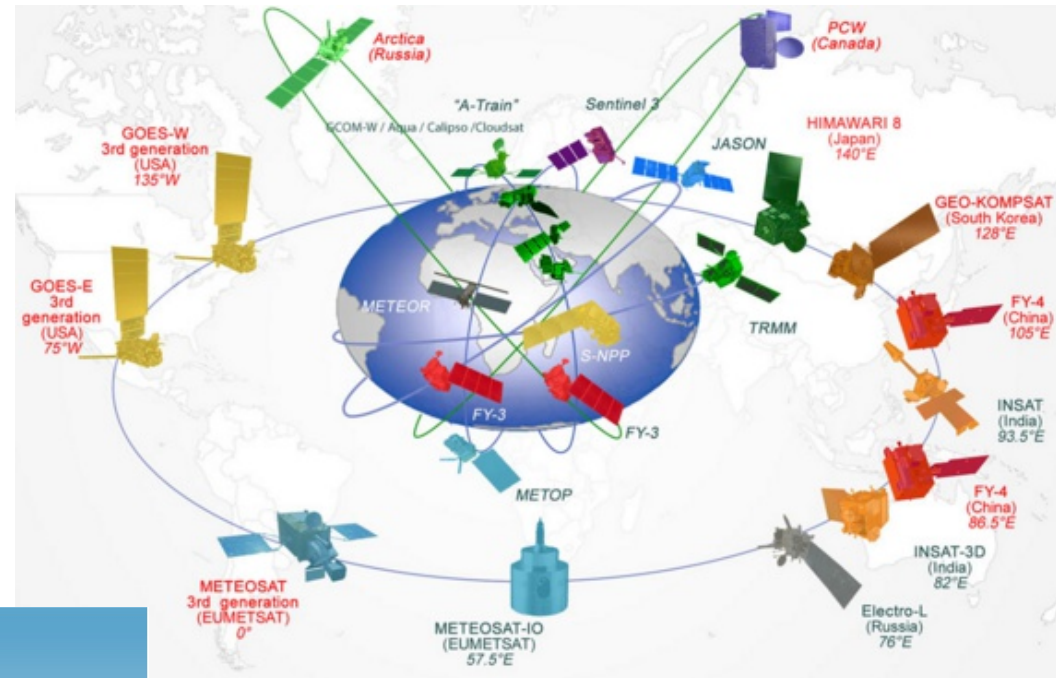


Coordinate sfalsate (staggered) per le diverse variabili



Le condizioni iniziali per i modelli globali

Le condizioni iniziali per la determinazione delle soluzioni sono lo stato dell'atmosfera in un preciso istante temporale.

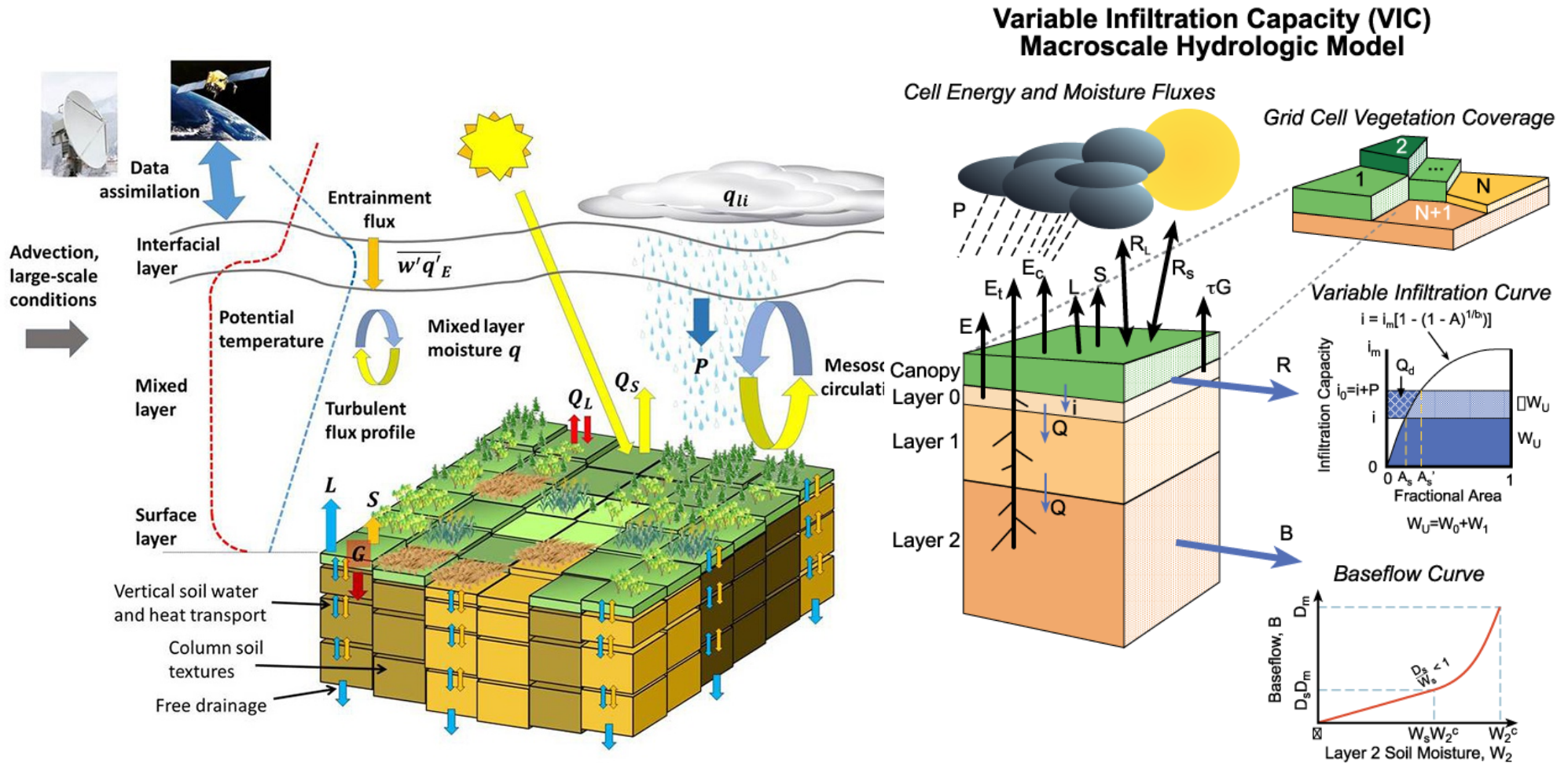


Il monitoraggio globale continuo produce lo stato dell'atmosfera

La qualità delle condizioni iniziali che produciamo quotidianamente deve molto alle conquiste tecnologiche dell'astronautica de XX secolo

La necessità di parametrizzare i processi sotto griglia

In principio, ogni volume elementare dovrebbe considerare tutti i processi fisici coinvolti nei principi di conservazione, ma molti non sono risolvibili esplicitamente a causa della bassa risoluzione spaziale e temporale, quindi **sono parametrizzati**



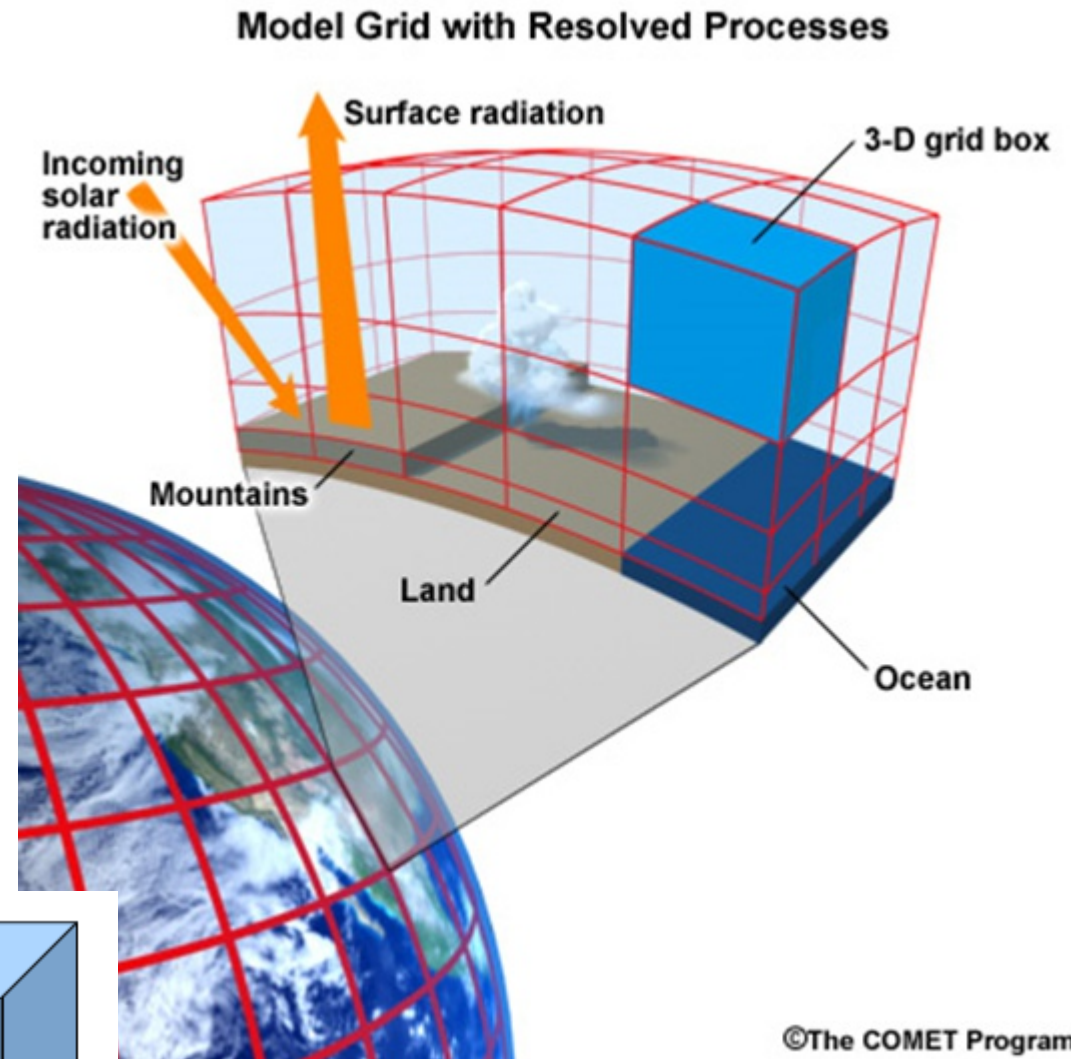
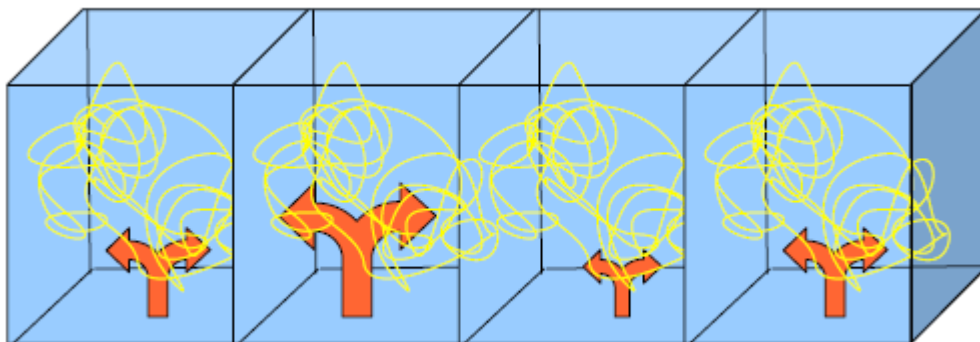
I processi parametrizzati sono uno dei limiti importanti dei modelli numerici

I processi fisici sotto griglia non vengono risolti esplicitamente.

Sono considerati i loro effetti fisici sull'intero volume elementare.

Vengono descritti da funzioni che, a partire dalle variabili risolte esplicitamente per ciascun volume elementare, producono gli effetti dei processi non risolti esplicitamente sui campi atmosferici

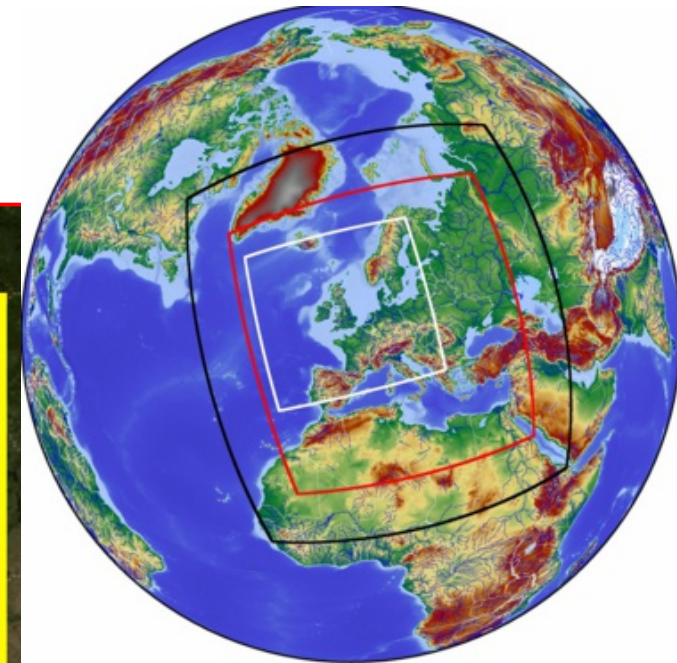
Sono delle approssimazioni, spesso grossolane della realtà



©The COMET Program

Esiste una tecnica largamente usata per aumentare la risoluzione spaziale delle simulazioni

Usare i modelli numerici ad area limitata (Limited Area Models) cioè concentrare l'attenzione su una porzione limitata di atmosfera



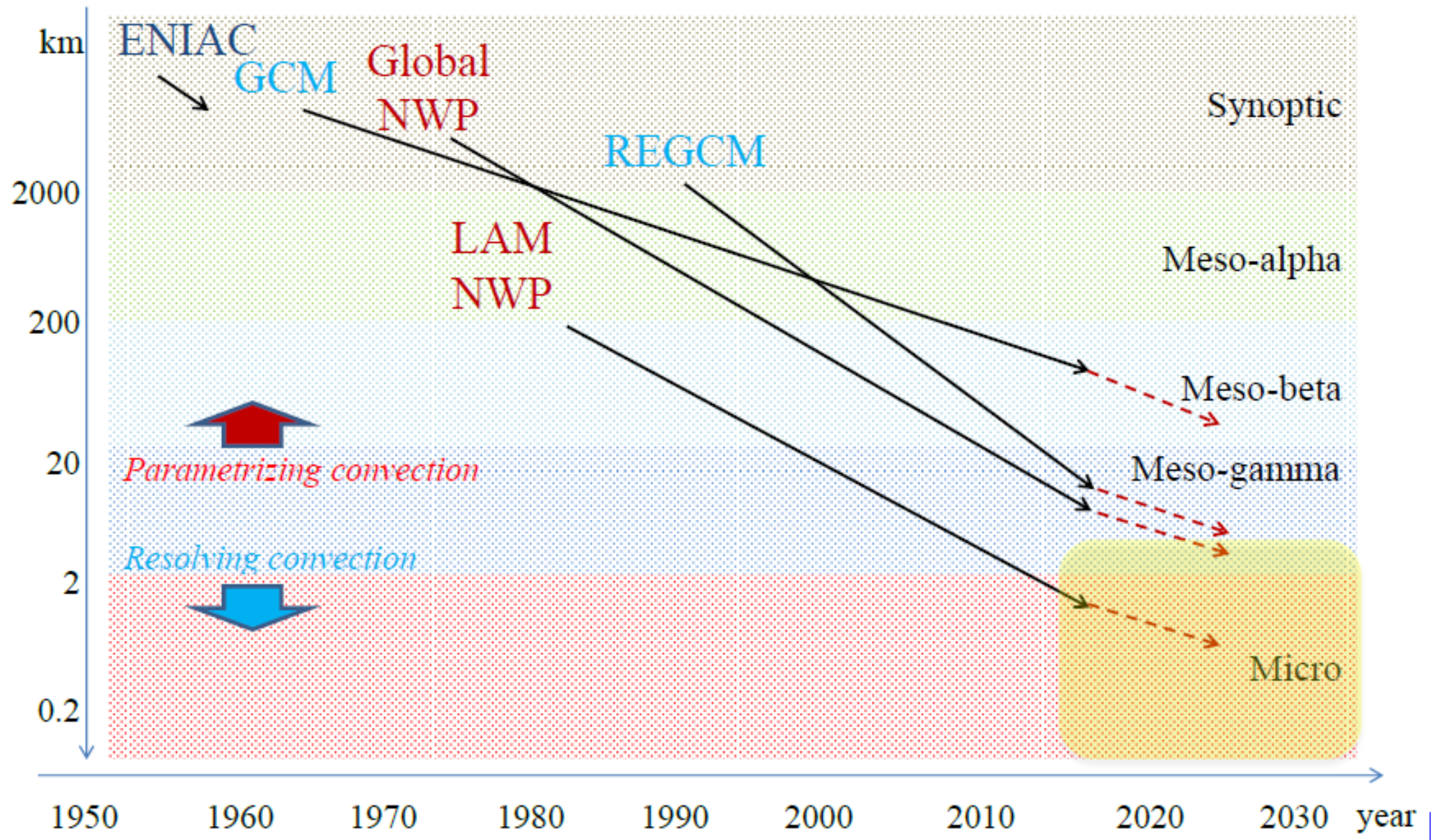
- **Boundary conditions and initial conditions**

	Grid
Domain 1 (continental)	50 km
Domain 2 (national)	10 km
Domain 3 (regional)	2 km



Modello numerico WRF (www.wrf-model.org) Operativo all'ARPA FVG
Modello non idrostatico di ultima generazione
Tecnica di esecuzione parallela distributed memory + shared memory
Esecuzione tramite domini annidati
Condizioni al contorno ed iniziali GFS (corsa delle 00UTC)

Con i modelli ad area limitata riusciamo a simulare i processi convettivi







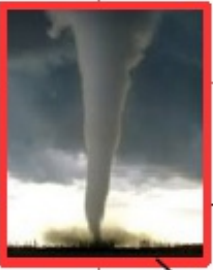


Modelli atmosferici ad area limitata: un approccio vincente all'aumento della risoluzione

Aumentare la risoluzione significa anche risolvere esplicitamente i processi fisici tipici delle scale spaziali e temporali che si intende raggiungere

Inoltre vanno comprese e implementate le retroazioni (feedback) tra le scale

Oltre alle condizioni iniziali sono necessarie le condizioni al contorno al dominio di calcolo

Le forniscono i modelli globali

scale		minuti	ore	giorni	settimane	mesi	anni	km
Macro	α					onde planetarie	riscaldamento globale, EL Nino/La Nina	>10000
	β					cicloni extra-tropicali, onde barocline		2000
Meso	α			frontogenesi	cicloni tropicali, fronti			200
	β		Linee di gruppo, supercelle, temporali					20
	γ		downburst, grandinate					2
Micro	α		convezione profonda, tornadoes,					0,2
	β	dust devils, strato limite						0,02
	γ	turbolenza						< 0,02

Area di rilassamento ai bordi del dominio di calcolo

Real-Data Lateral Boundary Condition: Location of Specified and Relaxation Zones

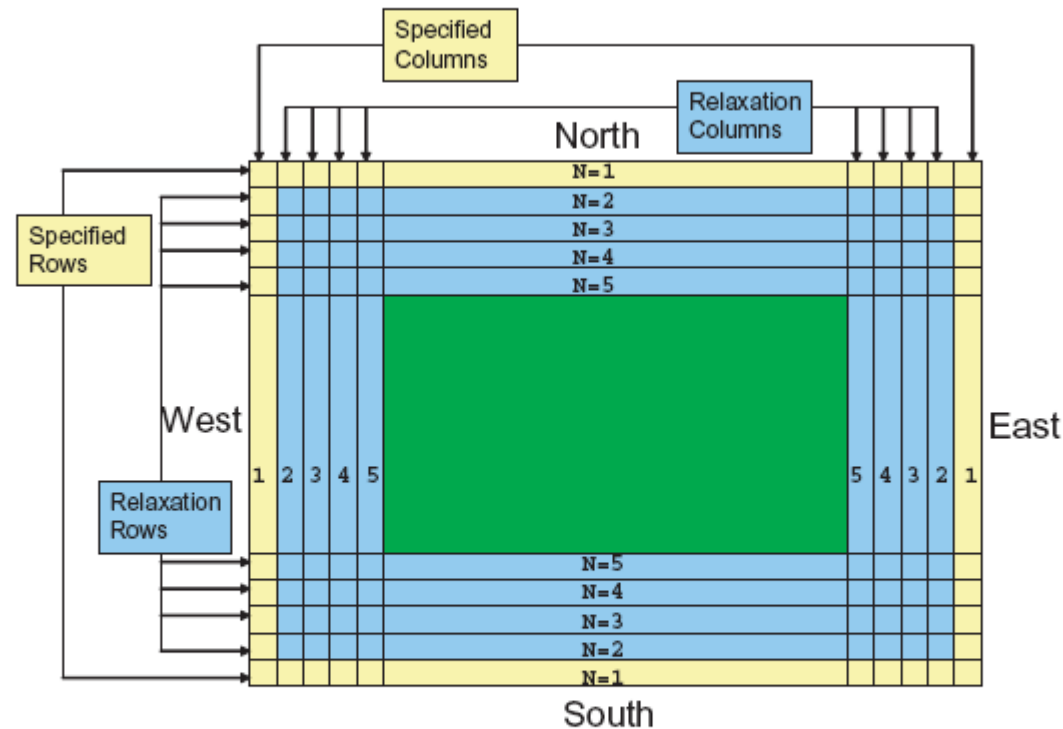
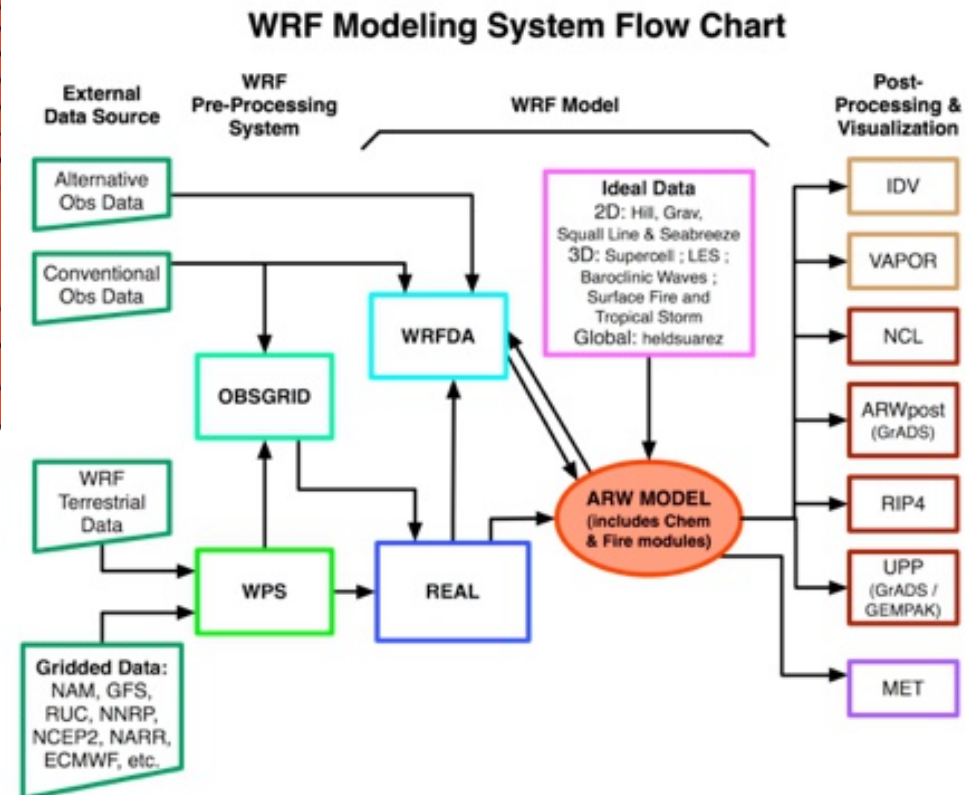
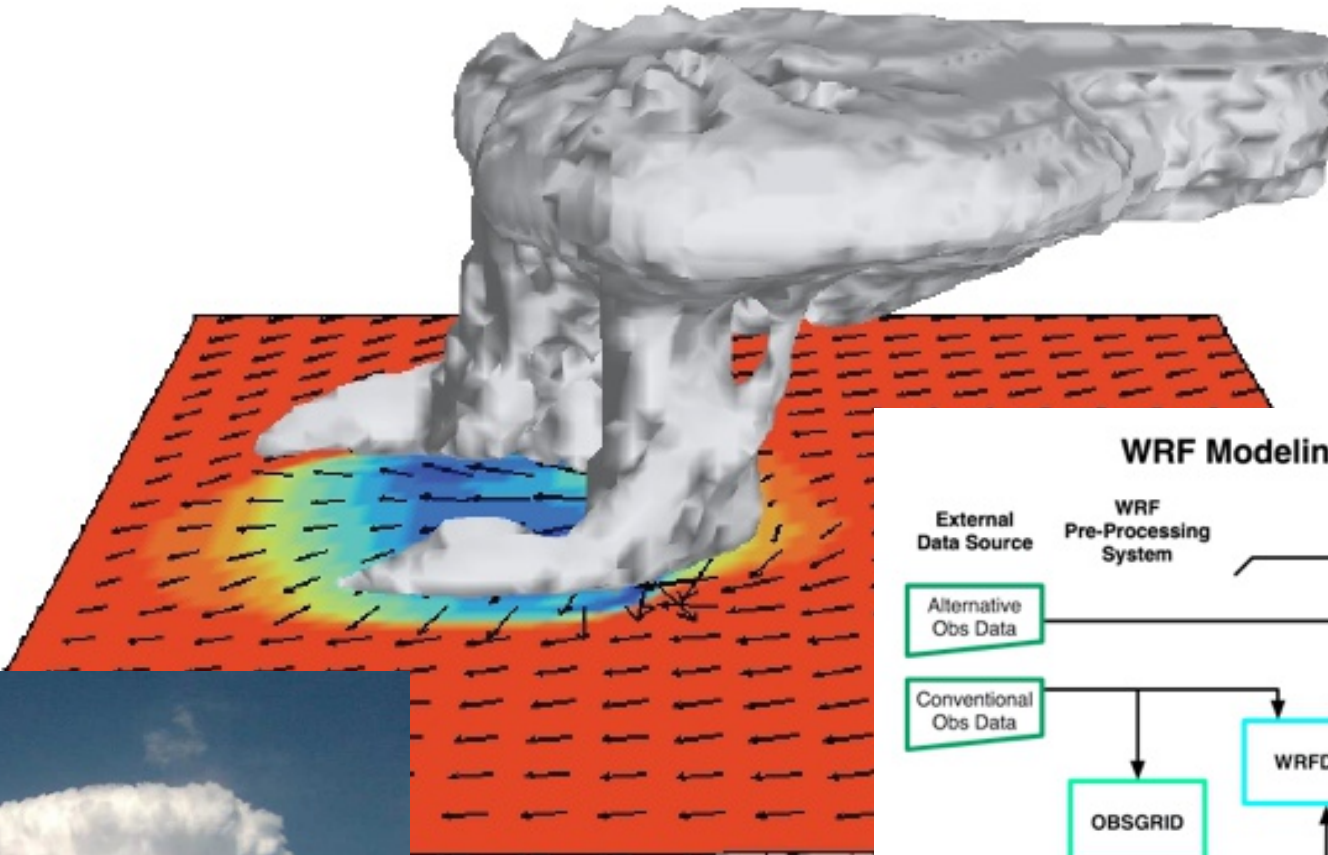


Figure 6.1: Specified and relaxation zones for a grid with a single specified row and column, and four rows and columns for the relaxation zone. These are typical values used for a specified lateral boundary condition for a real-data case.

Con i modelli ad area limitata abbiamo raggiunto i confini tra la meso e la micro scala

Simulazione numerica tramite modello WRF di supercella (Vista 3D RH > 95%)



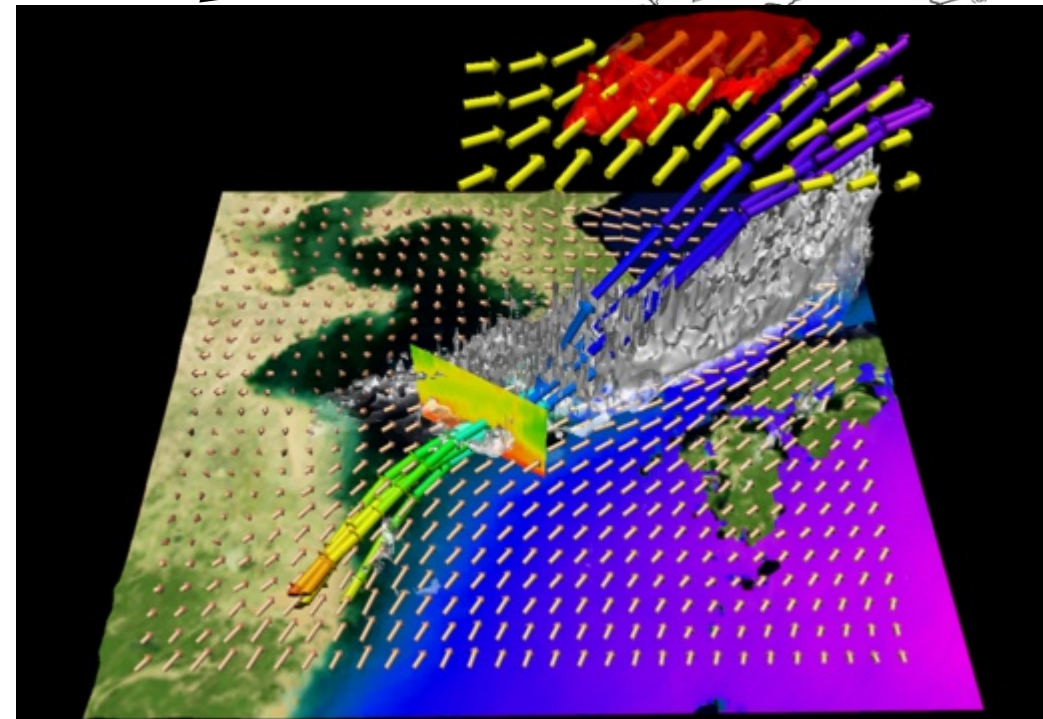
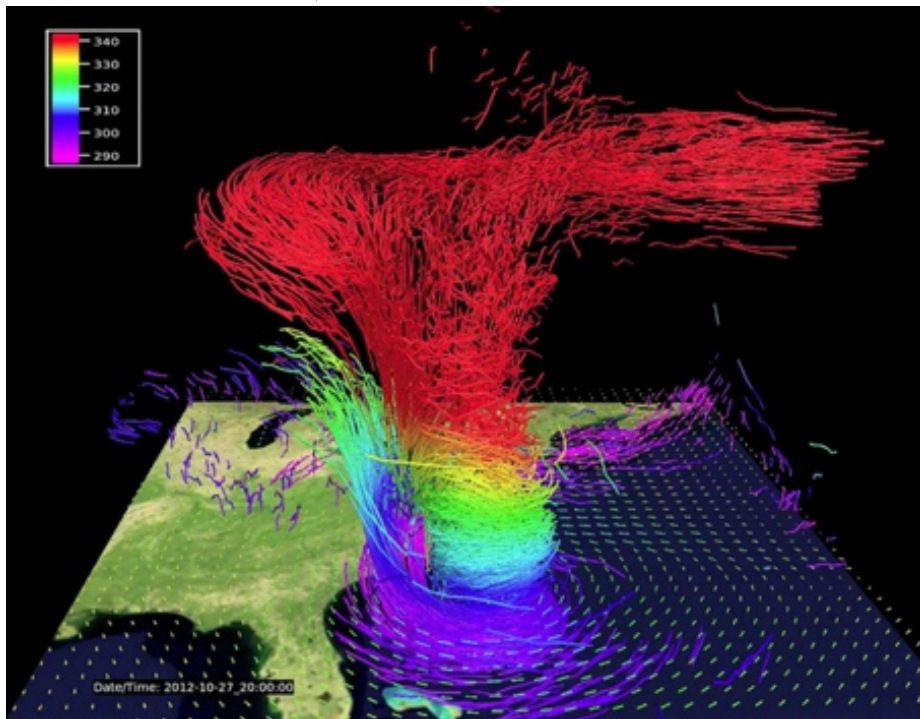
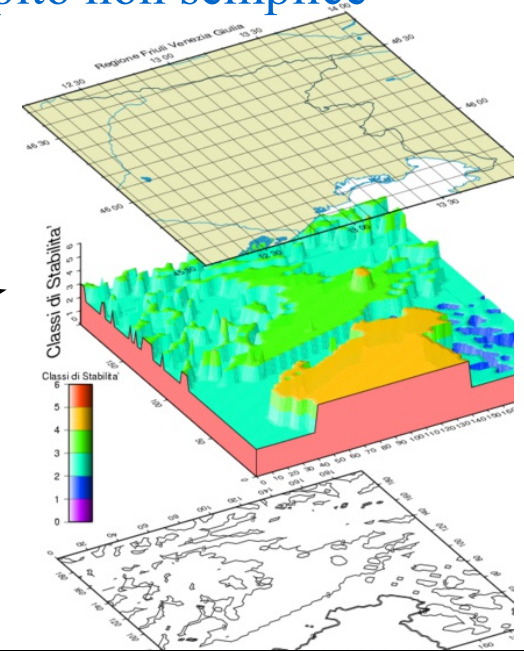
L'estrazione delle informazioni dalle simulazioni numeriche: un compito non semplice

Il volume di dati prodotti dalle simulazioni numeriche per l'atmosfera è molto grande.

Sono necessari strumenti di sintesi e per l'esplorazione dei campi prodotti

Proiezioni su piani o superfici di campi 3D
Visualizzazioni tridimensionali

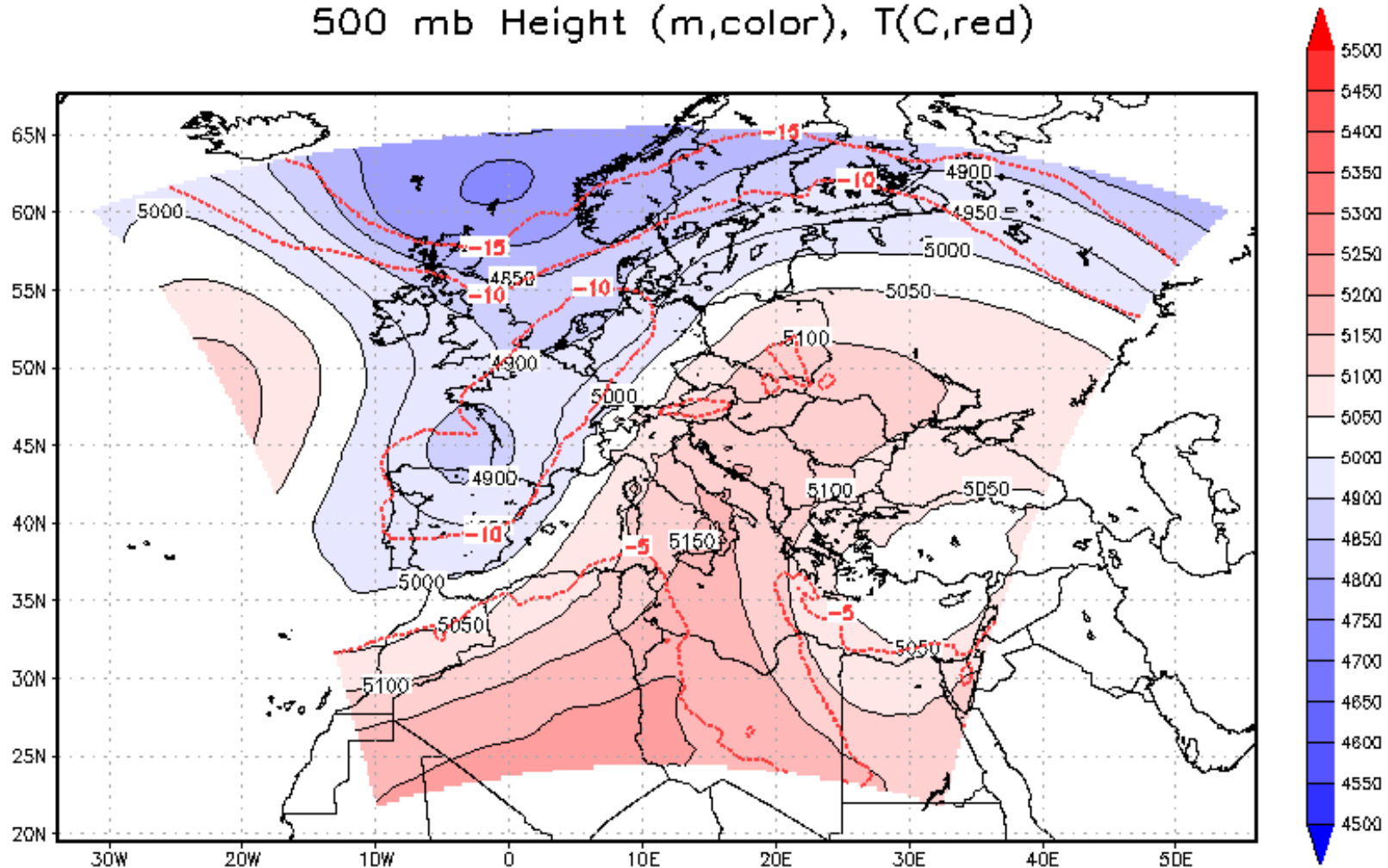
Animazioni



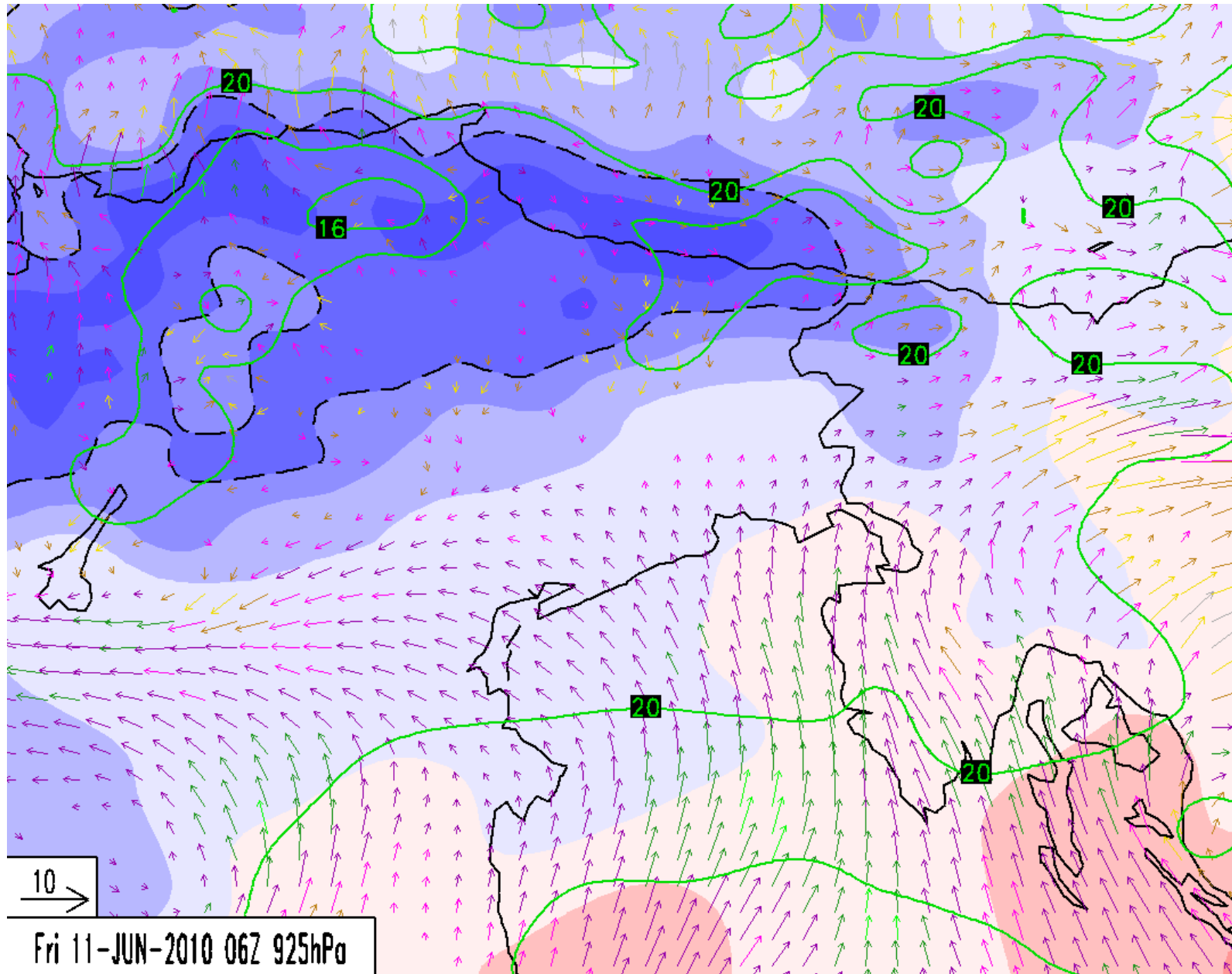
Dominio di calcolo a scala continentale con risoluzione orizzontale di 50 km

Previsioni operative quotidiane CRMA – Modello WRF

500 mb Height (m,color), T(C,red)

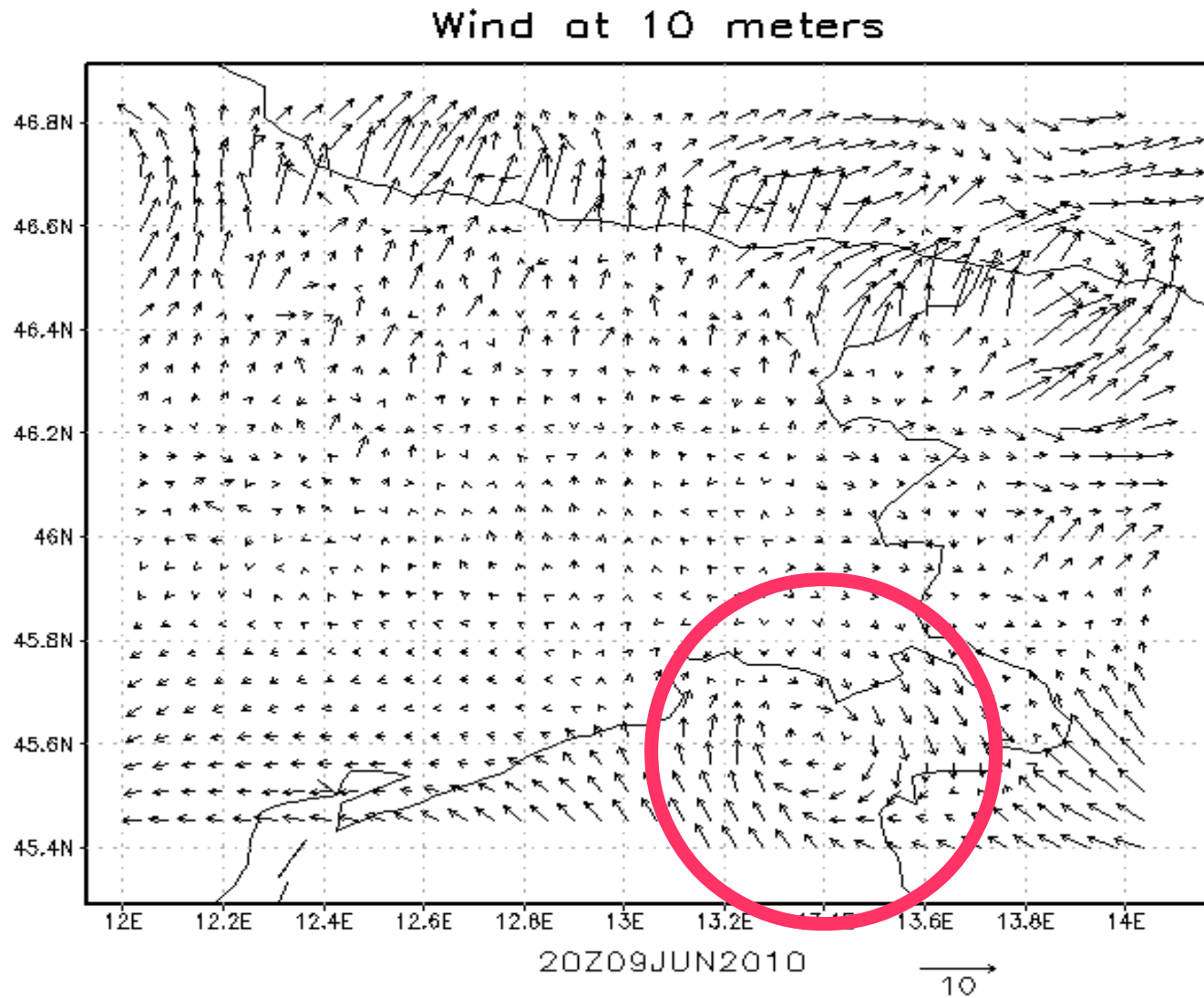


Dominio di calcolo a scala "regionale" con risoluzione orizzontale di 2 km



Previsione dei fenomeni alla mesoscala e alla microscala

Previsioni operative quotidiane CRMA – Modello WRF

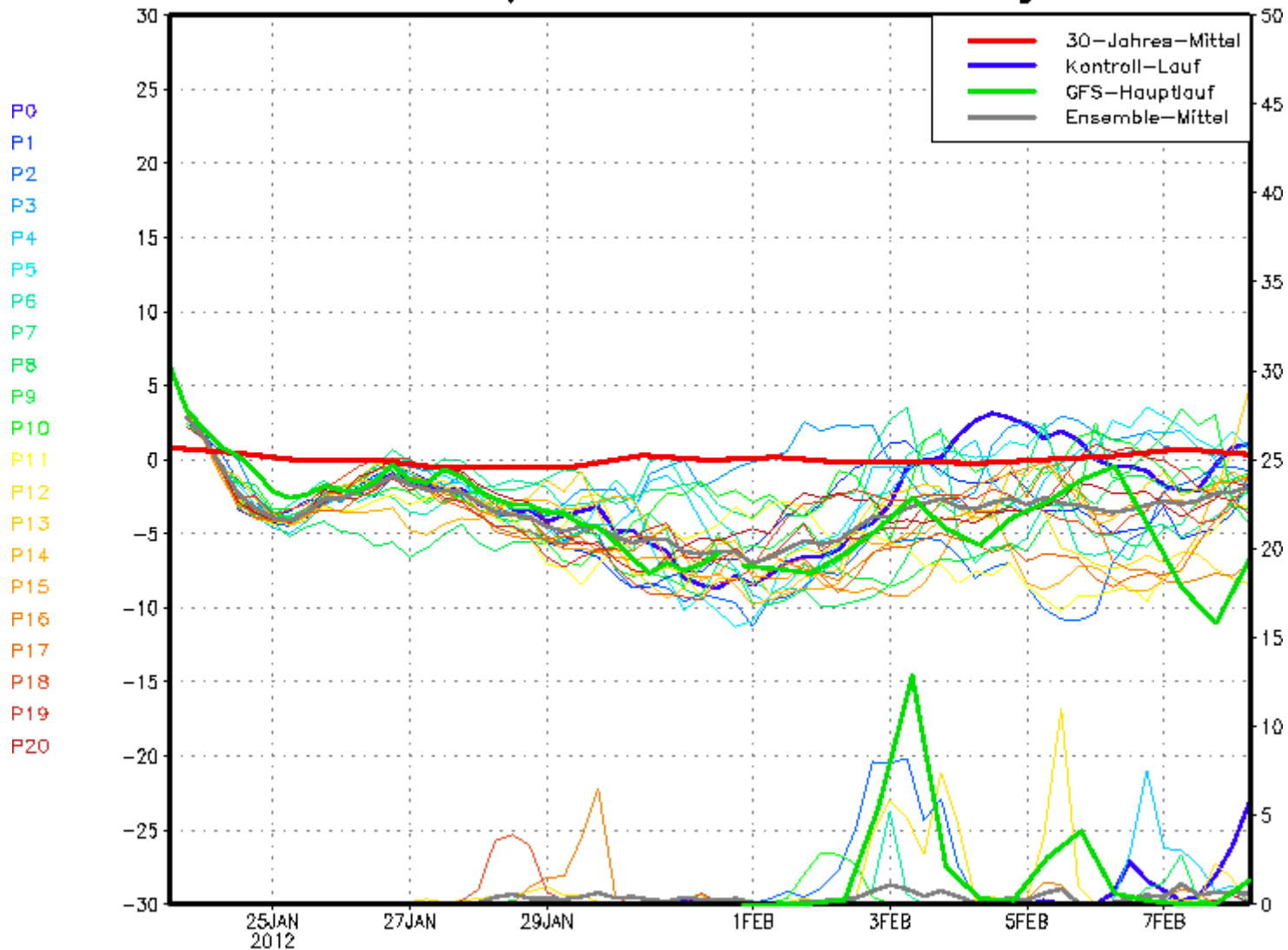


La tecnica Ensemble Forecast

Position Lat: 45 Lon: 9

Mon, 23 JAN 2012 12Z

850 hPa Temp. in °C, 6h-Niederschlag in mm

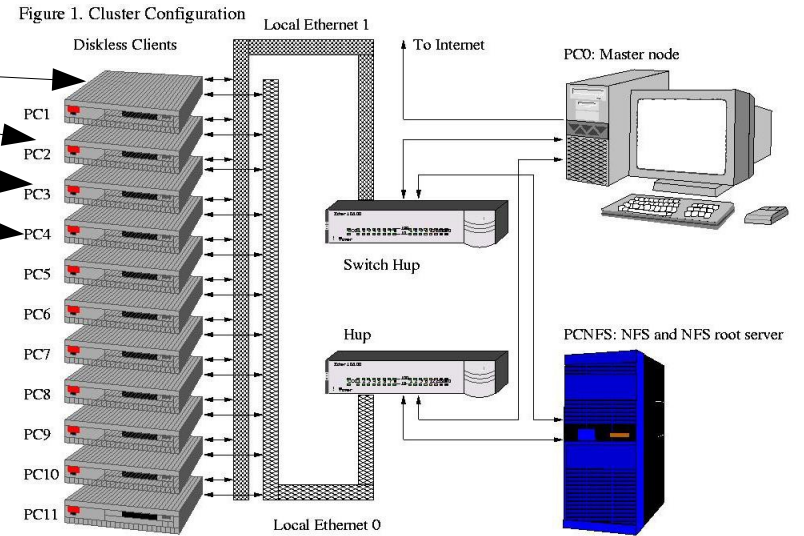
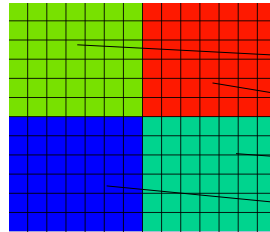


Daten: Ensembles des GFS von NCEP

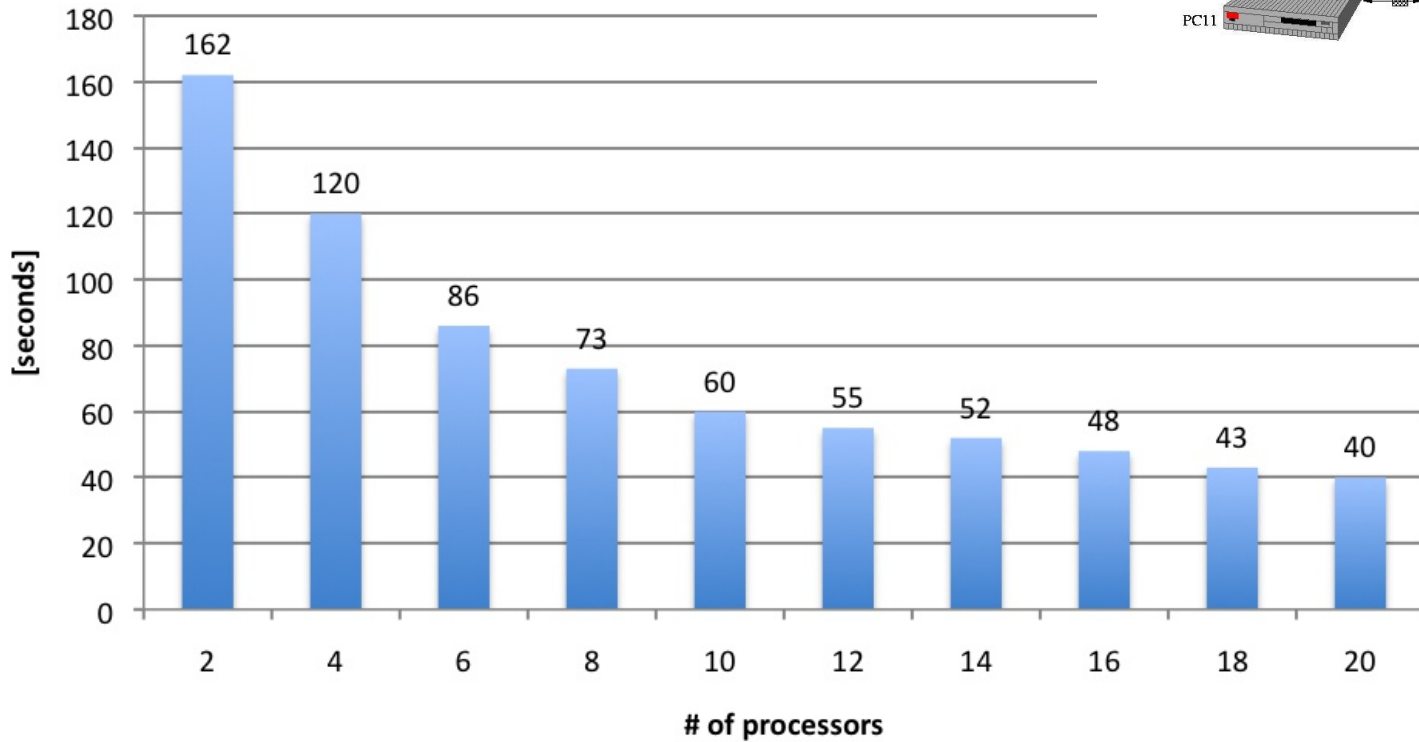
Wetterzentrale

Calcolo parallelo nella simulazione atmosferica

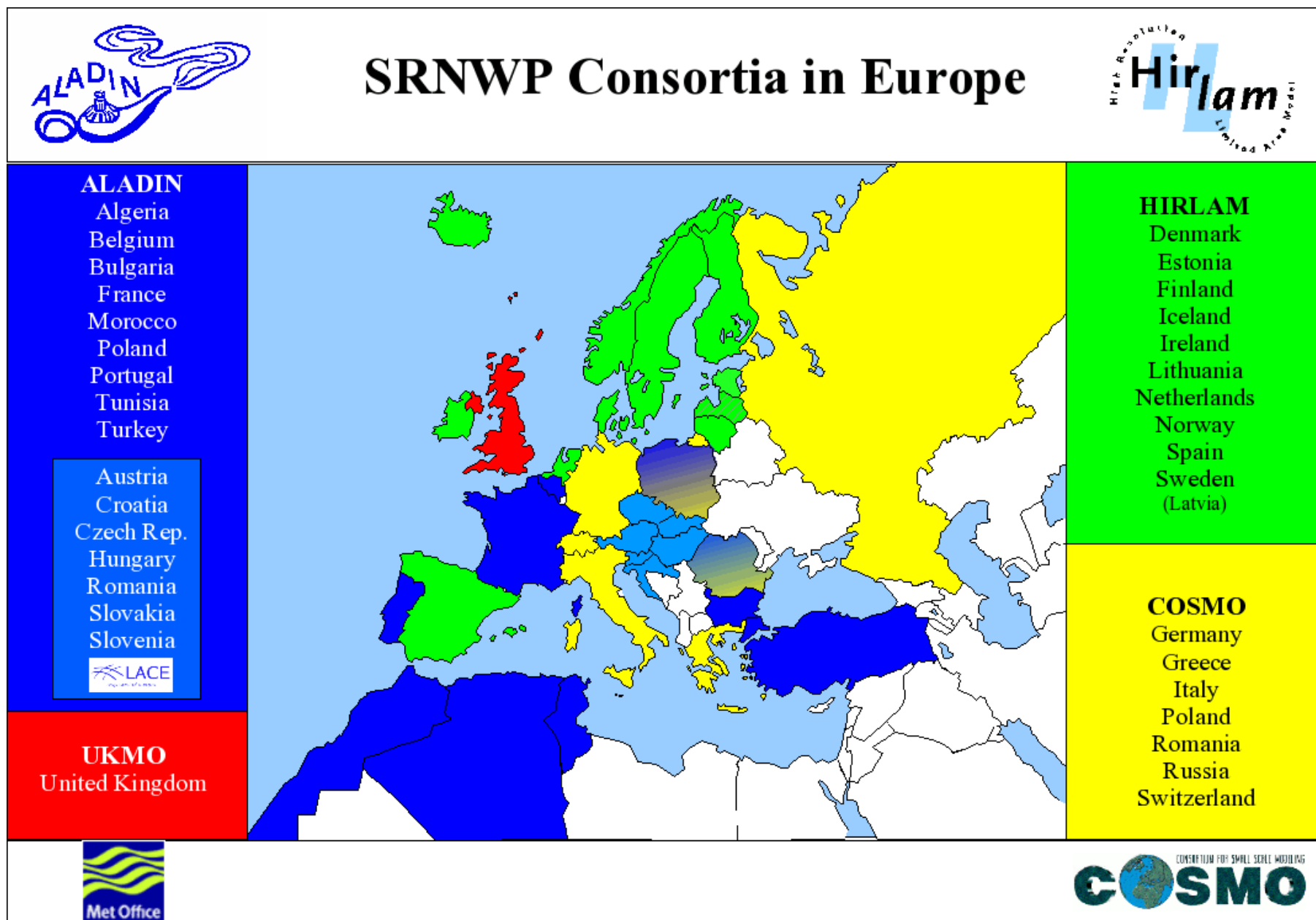
Dominio di calcolo



Execution Times of WRF (3.2.1) @ Hell



I consorzi modellistici europei



Strumenti necessari per svolgere simulazioni numeriche

- Conoscenza della fisica dell'atmosfera
- Conoscenza della climatologia e della meteorologia del sistema che si vuole simulare
- Dimestichezza con l'ambiente informatico Linux o Unix
- Conoscenza della programmazione BASH (Perl o Python- opzionale)
- Conoscenza dei linguaggi di programmazione FORTRAN (C - opzionale)
- Disponibilità di un modello numerico (condizioni al contorno - opzionale)
- Disponibilità di spazio calcolo su una macchina performante (Cluster - opzionale)
- Conoscenza di un sistema di visualizzazione e di analisi di grossi volumi di dati.

Bibliografia

www.ecmwf.int

ECMWF model

<http://www.wrf-model.org/index.php>

WRF model

<http://www.nco.ncep.noaa.gov/>

GFS

