



I modelli numerici di previsione del tempo atmosferico

TCol. Lucio TORRISI

lucio.torrisci@aeronautica.difesa.it

Centro Operativo per la Meteorologia - COMET



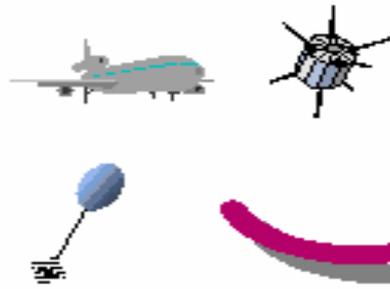
Aeronautica Militare

Torrisci L. - I Modelli Numerici di Previsione - Convegno Pristem, Trento, 7-9 Aprile 2017

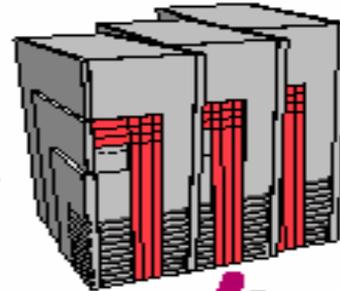


Numerical Weather Prediction (NWP)

OBSERVATIONS



NUMERICAL MODEL



CUSTOMERS



HUMAN FORECASTER

La previsione numerica del tempo (NWP) è l'elemento fondamentale sul quale si basano le previsioni meteorologiche.

Si ottiene tramite l'integrazione dei modelli numerici a partire da una stima dello stato iniziale dell'atmosfera .

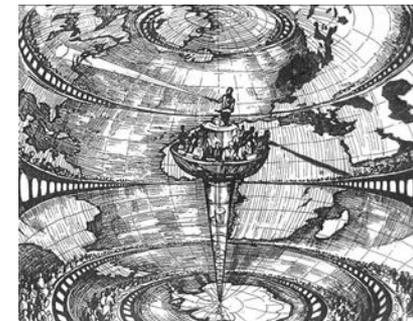


Un po' di storia

1904 - V. Bjerkness, primo a ipotizzare che la previsione numerica era possibile



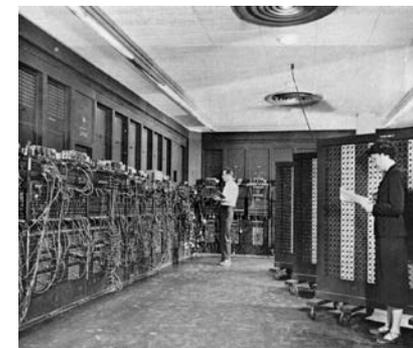
1922 - Primo tentativo di previsione numerica del tempo effettuato manualmente senza successo da L.F. Richardson



1950 - Prima previsione numerica (J. Charney, J. von Neumann) su computer (ENIAC).

1954 - Previsioni numeriche operative in USA.

1963 - E. Lorenz, mostra che l'atmosfera è un sistema caotico

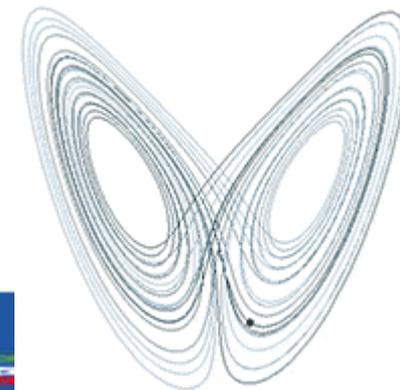


1966 - Primo modello globale negli USA.

1975 - Fondazione del Centro Europeo ECMWF.

.....

La previsione numerica ha avuto un impatto decisivo sulla qualità delle previsioni a scadenze maggiori di 24 ore.



Cos'è un modello?

- **modello**: tool per la simulazione (previsione) del comportamento di un sistema dinamico
 - euristico: basato sull'esperienza
 - empirico: previsione basata sul “comportamento passato”
 - concettuale: framework per la comprensione di processi fisici basato su un “physical reasoning”
 - analitico: soluzione esatta di eq. “semplificate” che descrivono il sistema
 - numerico: soluzione numerica delle equazioni che descrivono l'evoluzione dei principali processi dell'atmosfera



Modello Numerico di Previsione

Un modello simula i processi dinamico-fisici che determinano i moti atmosferici (avvezione, gradiente di pressione, riscaldamento e raffreddamento adiabatico, divergenza e convergenza di massa, gravità, ...).

- La formulazione del modello è basata su un sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali (equazioni primitive) che rappresentano la conservazione della quantità di moto, dell'energia e della massa.
- Le equazioni sono prognostiche (la variazione nel tempo, detta tendenza, di una variabile è incognita) e diagnostiche.
- La soluzione di questo sistema di equazioni richiede la conoscenza delle condizioni iniziali (caratteristica dei fenomeni fisici) e di condizioni al contorno.



Equazioni Primitive

Eq.ni del moto (3) – conservazione quantità di moto (descrivono le variazioni temporali delle componenti del vento u , v e w di una particella d'aria dovute alle forze agenti su di essa)

Eq. della termodinamica – conservazione energia (descrive le variazioni temporali della temperatura T)

Eq. di continuità – conservazione massa dell'aria (descrive le variazioni temporali della densità ρ o della pressione p)

Eq.ni delle fasi dell'acqua (3) – conservazione vapore (q_v), contenuto liquido (q_w) e solido (q_i) delle nubi (descrivono le variazioni temporali di q_v , q_w , q_i)

Legge dei gas perfetti (relazione diagn. tra p , ρ e T).



ES. EQUAZIONE DEL MOTO

Movimento zonale da Ovest verso Est

$$F = m a \rightarrow \frac{F}{m} = a \rightarrow F_m = \frac{du}{dt}$$

Valida per un “volume di controllo” in moto con il fluido e contenente sempre lo stesso numero di particelle. Approccio **Lagrangiano** (x_0, y_0, z_0, t)

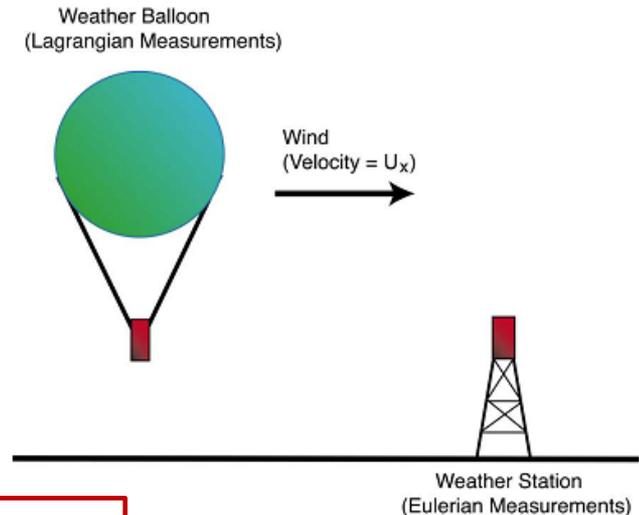
$$F_m = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \rightarrow$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = F_m - u \frac{\partial u}{\partial x}$$

variazione
locale

avvezione
(trasporto)

Valida per un “volume di controllo” fisso rispetto agli assi x (Ovest->Est), y (Sud->Nord) e z (verticale da superficie verso l'alto). Approccio **Euleriano** (x, y, z, t)



Equazioni del Modello

- Velocità orizzontale del vento**

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial E_h}{\partial \lambda} - v V_a \right\} - \zeta \frac{\partial u}{\partial \zeta} - \frac{1}{\rho a \cos \varphi} \left(\frac{\partial p'}{\partial \lambda} - \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \frac{\partial p_0}{\partial \lambda} \frac{\partial p'}{\partial \zeta} \right) + M_u$$

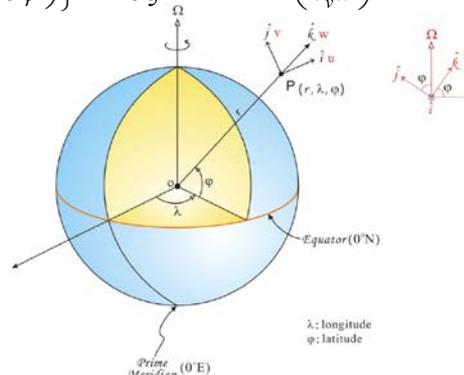
$$\frac{\partial v}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a} \frac{\partial E_h}{\partial \varphi} - V_a \right\} - \zeta \frac{\partial v}{\partial \zeta} - \frac{1}{\rho a} \left(\frac{\partial p'}{\partial \varphi} - \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \frac{\partial p_0}{\partial \varphi} \frac{\partial p'}{\partial \zeta} \right) + M_v$$

- Velocità verticale**

$$\frac{\partial w}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a \cos \varphi} \left(u \frac{\partial w}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial w}{\partial \varphi} \right) \right\} - \zeta \frac{\partial w}{\partial \zeta} + \frac{g}{\sqrt{\gamma}} \frac{\rho_0}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial \zeta} + \frac{g}{\sqrt{\gamma}} \frac{\rho_0}{\rho} \left\{ \frac{(T - T_0)}{T} - \frac{T_0 p'}{T p_0} + \left(\frac{R_v}{R_d} - 1 \right) q^v - q^l - q^f \right\}$$

- Perturbazione della pressione**

$$\frac{\partial p'}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a \cos \varphi} \left(u \frac{\partial p'}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial p'}{\partial \varphi} \right) \right\} - \zeta \frac{\partial p'}{\partial \zeta} + g \rho_0 w - \left(\frac{c_{pd}}{c_v d} \right) p \nabla \cdot \vec{v}$$



- Temperatura**

$$\frac{\partial T}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a \cos \varphi} \left(u \frac{\partial T}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) \right\} - \zeta \frac{\partial T}{\partial \zeta} - \frac{1}{\rho c_{vd}} p \nabla \cdot \vec{v} + Q_T$$

- Vapore acqueo**

$$\frac{\partial q^v}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a \cos \varphi} \left(u \frac{\partial q^v}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial q^v}{\partial \varphi} \right) \right\} - \zeta \frac{\partial q^v}{\partial \zeta} - (S^l + S^f) + M_{q^v}$$

- Acqua allo stato solido e liquido**

$$\frac{\partial q^{l,f}}{\partial t} = - \left\{ \frac{1}{a \cos \varphi} \left(u \frac{\partial q^{l,f}}{\partial \lambda} + v \cos \varphi \frac{\partial q^{l,f}}{\partial \varphi} \right) \right\} - \zeta \frac{\partial q^{l,f}}{\partial \zeta} - \frac{g}{\sqrt{\lambda}} \frac{\rho_0}{\rho} \frac{\partial P_{l,f}}{\partial \zeta} + S^{l,f} + M_{q^{l,f}}$$

- Densità totale dell'aria**

$$\rho = p \left\{ R_d \left(1 + \left(\frac{R_v}{R_d} - 1 \right) q^v - q^l - q^f \right) T^{-1} \right\}$$

ove $\sqrt{\gamma} \equiv \frac{\partial p_0}{\partial \zeta}$, $E_h = \frac{1}{2} (u^2 + v^2)$ e $V_a = \frac{1}{a \cos \varphi} \left\{ \frac{\partial v}{\partial \lambda} - \frac{\partial}{\partial \varphi} (u \cos \varphi) \right\} + f$.



Un Problema ai Valori Iniziali

In forma semplificata il problema della previsione numerica si può rappresentare con:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = F(A) \quad A(x, y, z, t)$$

dove A è una variabile meteorologica definita in un certo dominio, F rappresenta gli effetti dei processi che causano cambiamenti di A e $\partial A/\partial t$ è la variazione temporale di A ad un certo tempo t . Date le condizioni iniziali di A (e quelle al contorno):

$$A_{previsto\ dopo\ \partial t} = A_{iniziale} + F(A) \partial t$$



Soluzione numerica

La complessità delle equazioni non consente la determinazione di soluzioni analitiche complete. Date le condizioni iniziali e quelle al contorno, il sistema di equazioni è risolto con metodi numerici.

$$A_{previsto\ dopo\ \Delta t} = A_{iniziale} + F(A_{iniziale}) \Delta t$$

Caso $A=T$: data la condizione iniziale ottenuta dalle osservazioni (es. $T_{iniziale}=20^{\circ}\text{C}$) si determina il termine forzante (es. $F(20)=2^{\circ}\text{C/h}$). Per calcolare il valore di $T_{\Delta t}$ previsto dopo un certo tempo Δt (es. $\Delta t = 0.25\text{ h}$), si calcola la variazione $\Delta T = F(T_{iniziale}) \Delta t$ (es. $\Delta T = 2 * 0.25 = 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) e si somma al valore $T_{iniziale}$ (es. $T_{0.25} = 20 + 0.5 = 20.5\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Il valore $T_{\Delta t}$ si utilizzerà poi come valore iniziale per calcolare $F(T_{\Delta t})$ e determinare il nuovo valore $T_{2\Delta t}$ e così facendo fino al tempo massimo definito $T_{n\Delta t}$ effettuando almeno $3n$ operazioni (es. $n\Delta t = 240\text{h} \rightarrow 3n = 2880$).

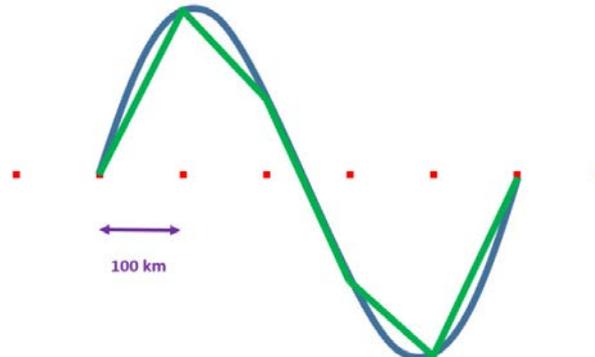
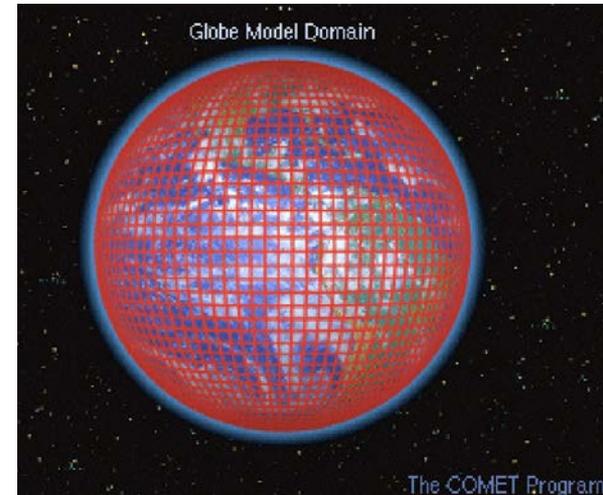


Discretizzazione

I metodi numerici trasformano le equazioni valide in un dominio continuo in equazioni algebriche con derivate spaziali e temporali approssimate.

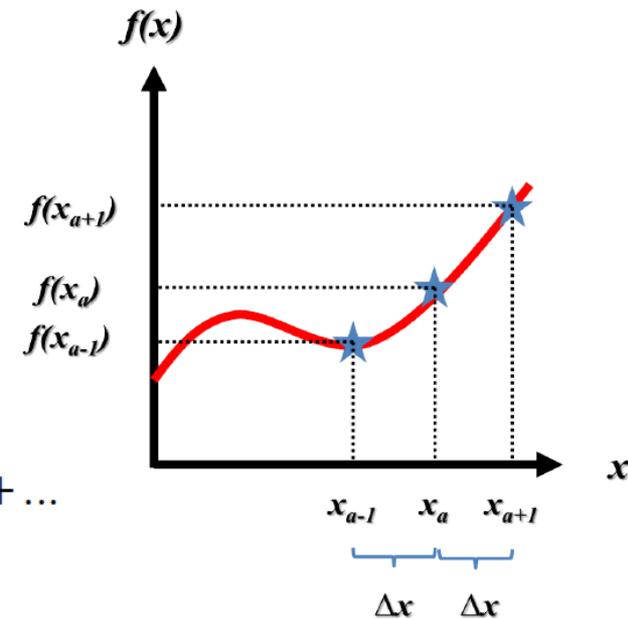
Metodo di espansione in serie – spettrale: le variabili e le derivate sono rappresentate da una somma di un numero finito di funzioni globali.

Metodo delle differenze finite: le variabili e le derivate sono specificate usando i valori su punti di una griglia predefinita (es. un dominio globale con passo di griglia di 50 km ha 10 milioni di punti).



Es. Metodo Differenze Finite

Utilizzando lo sviluppo in serie di Taylor si possono trovare diverse approssimazioni della derivata di una funzione f .



$$f(x_{a+1}) = f(x_a) + f'(x_a)\Delta x + \frac{f''(x_a)}{2!}(\Delta x)^2 + \frac{f'''(x_a)}{3!}(\Delta x)^3 + \dots$$

$$f(x_{a-1}) = f(x_a) - f'(x_a)\Delta x + \frac{f''(x_a)}{2!}(\Delta x)^2 - \frac{f'''(x_a)}{3!}(\Delta x)^3 + \dots$$

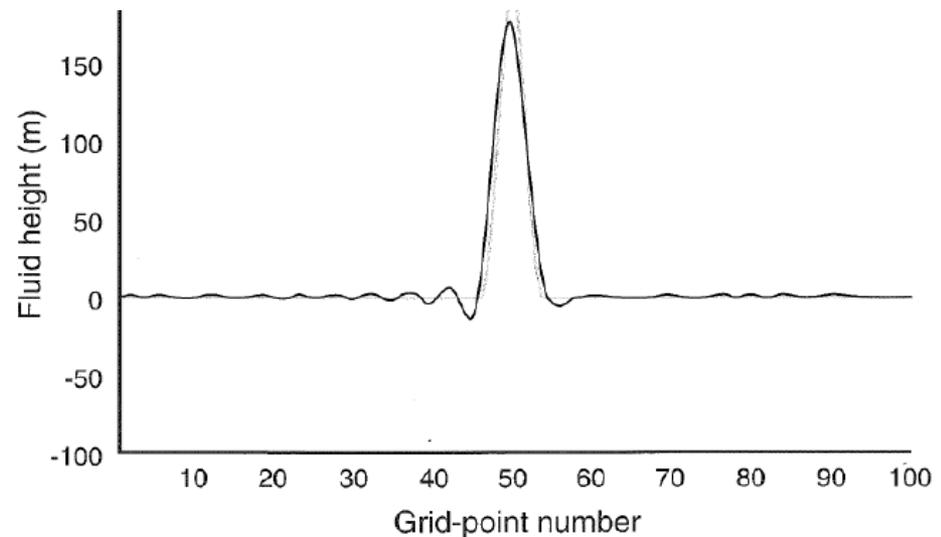
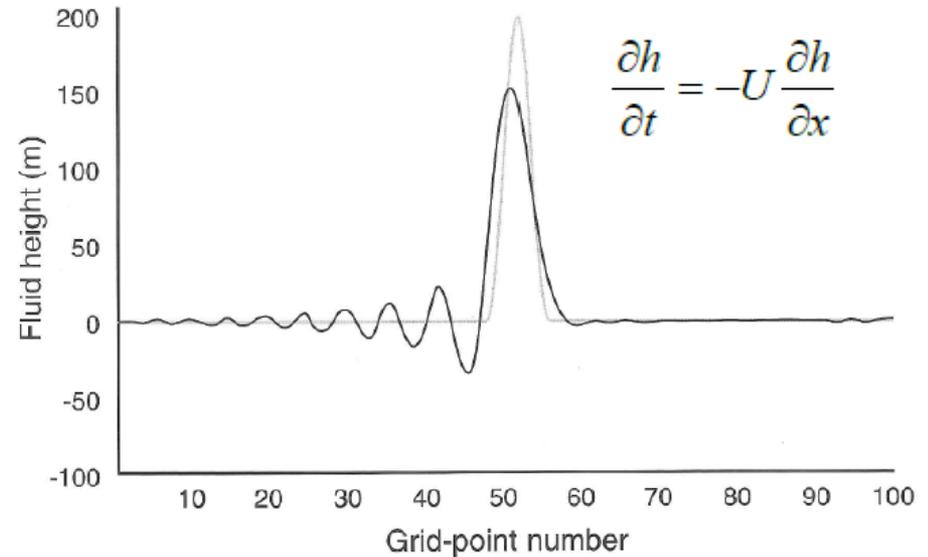
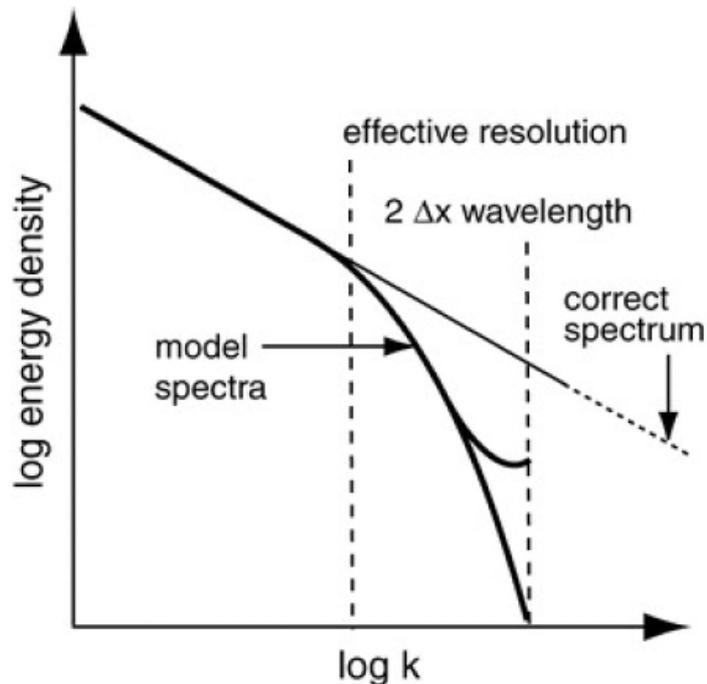
Es.
$$f'(x_a) = \frac{f(x_{a+1}) - f(x_{a-1})}{2\Delta x} - \frac{f'''(x_a)}{3!}(\Delta x)^2 + \dots$$

Errore di troncamento

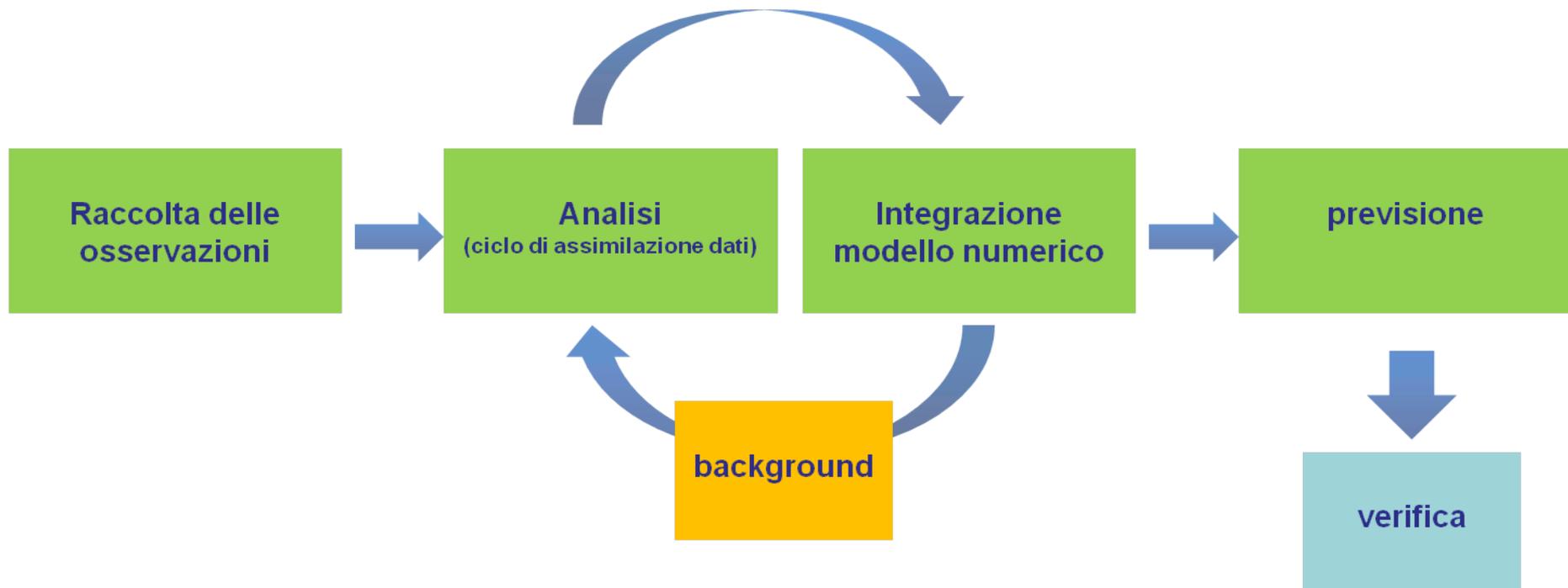


Risoluzione Effettiva

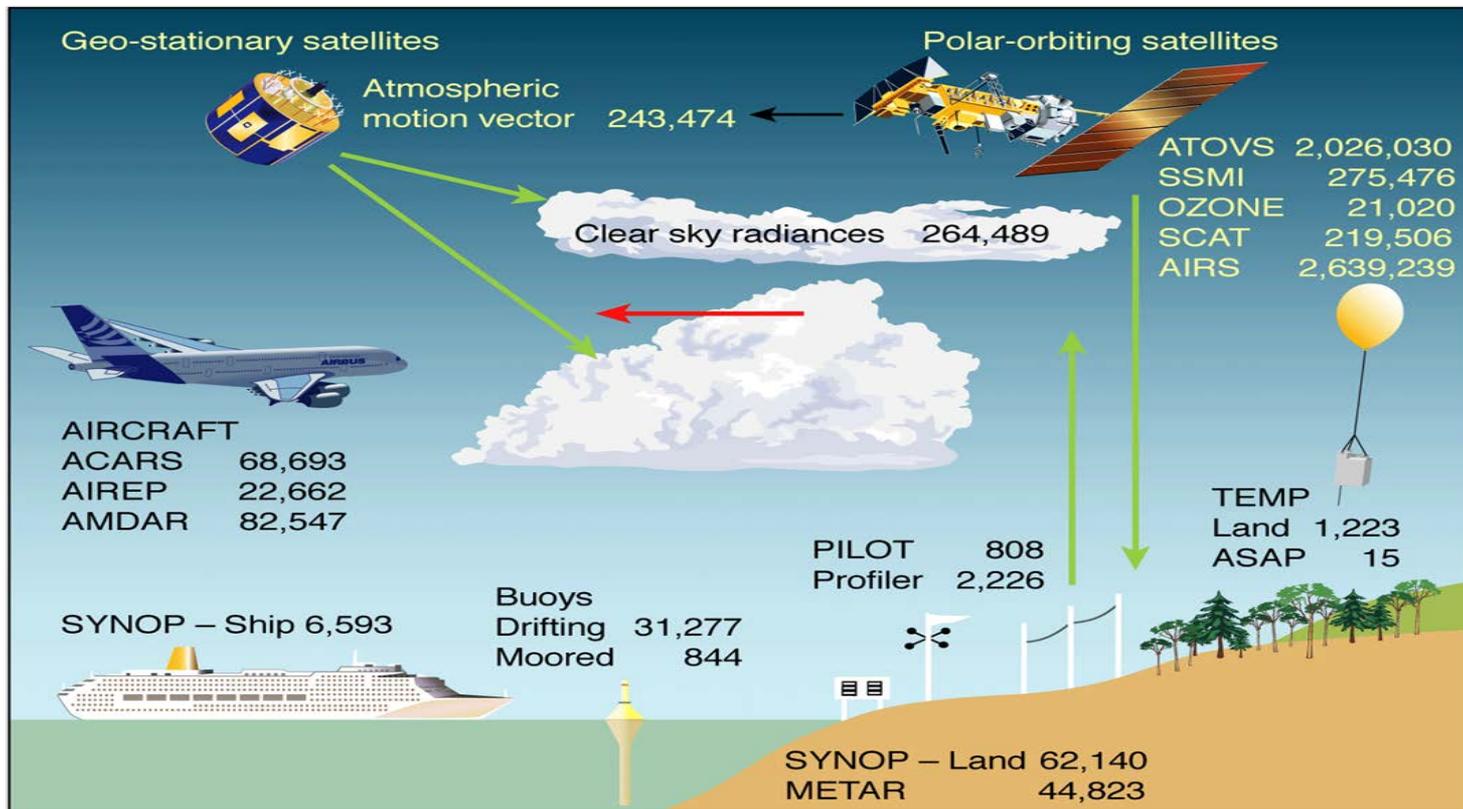
L'accuratezza della approssimazione usata influenza la qualità della simulazione numerica.



Le fasi della previsione

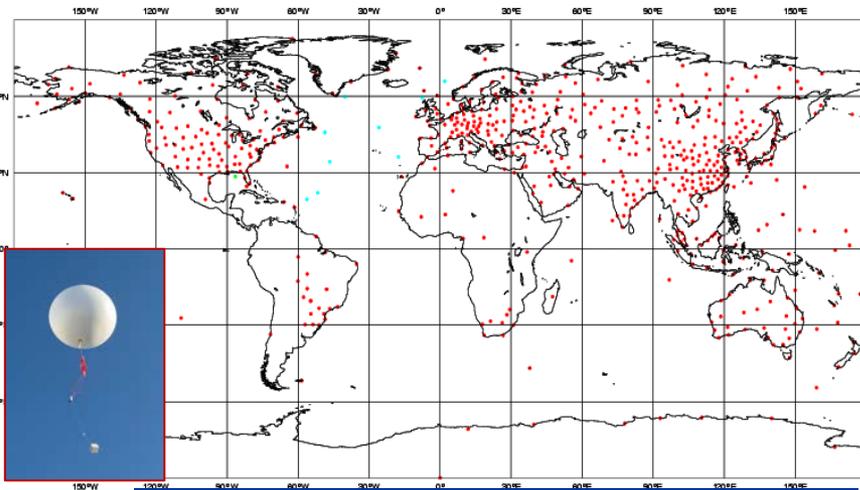


LA RACCOLTA DELLE OSSERVAZIONI

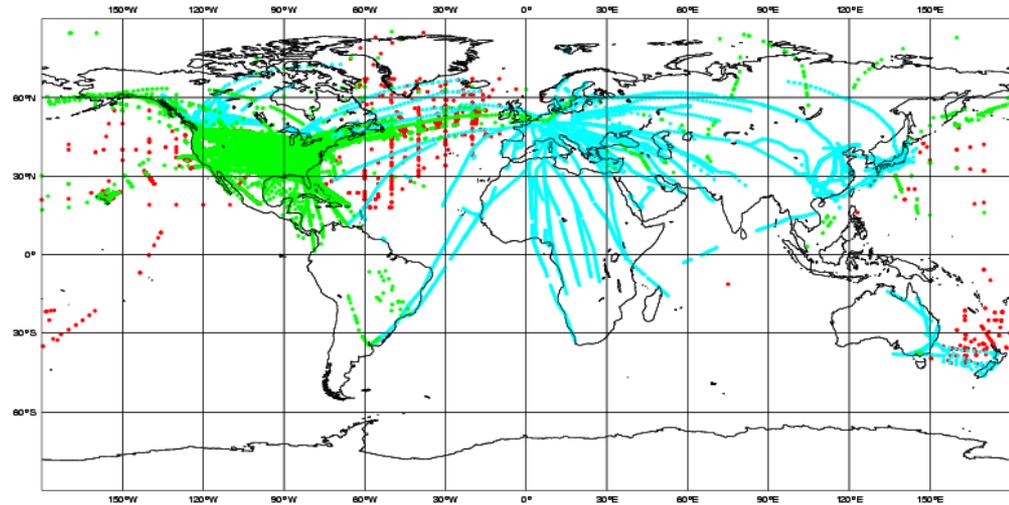


ES. OSSERVAZIONI

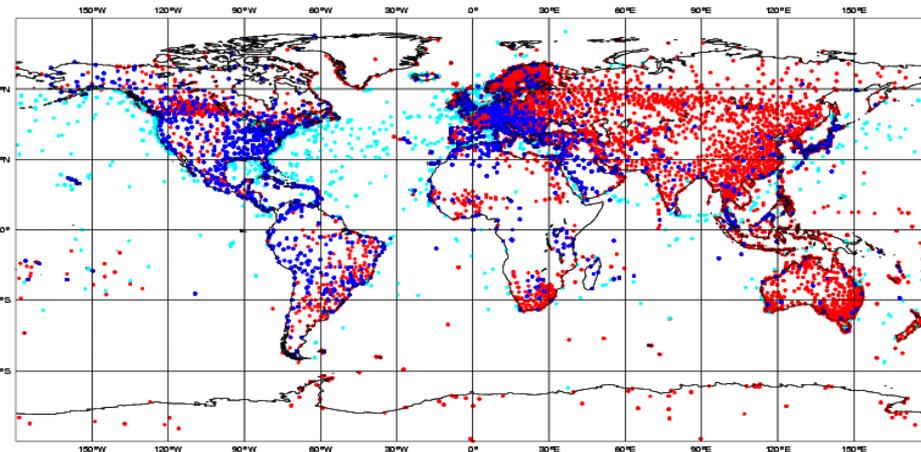
RADIOSONDAGGI (00 UTC)



AEREI (00 UTC)



OSSERVAZIONI AL SUOLO (00 UTC)

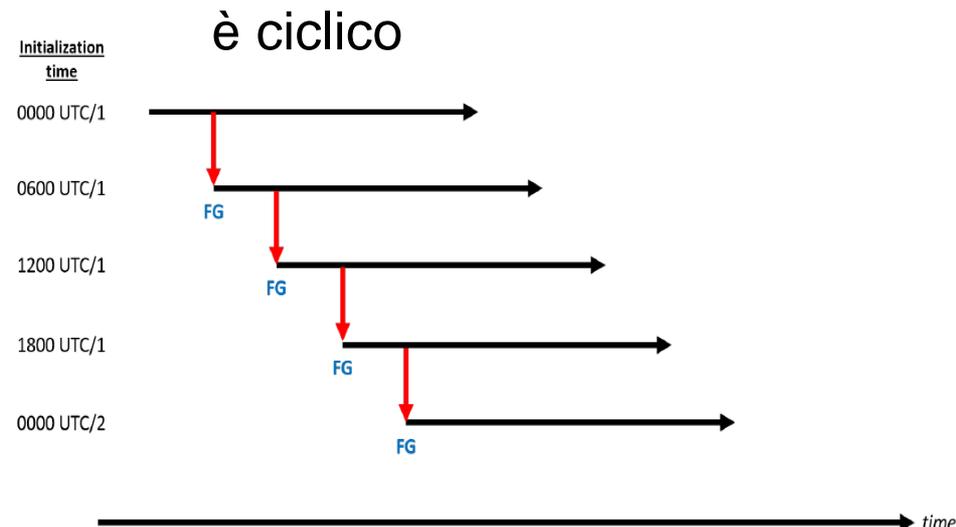
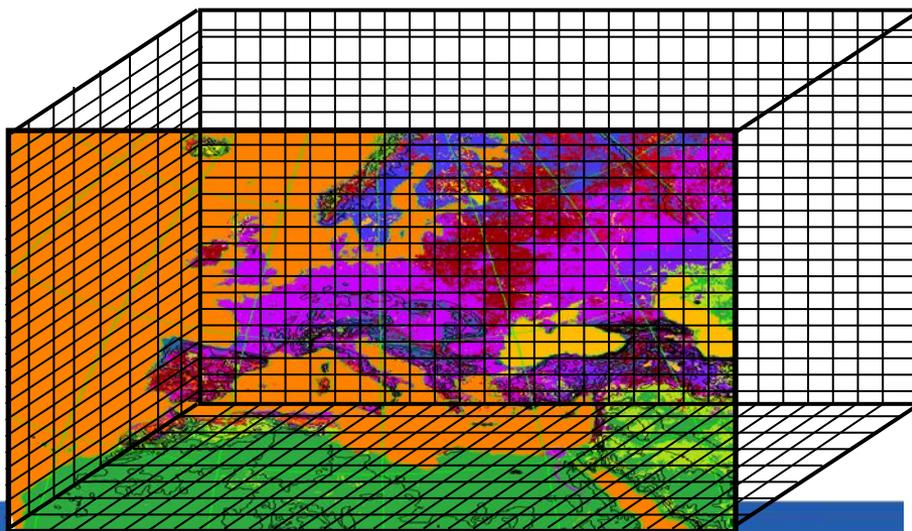


C'e' una grande varietà di osservazioni, con differenti caratteristiche, irregolarmente distribuite nello spazio e nel tempo.

LA DIAGNOSI: Assimilazione Dati

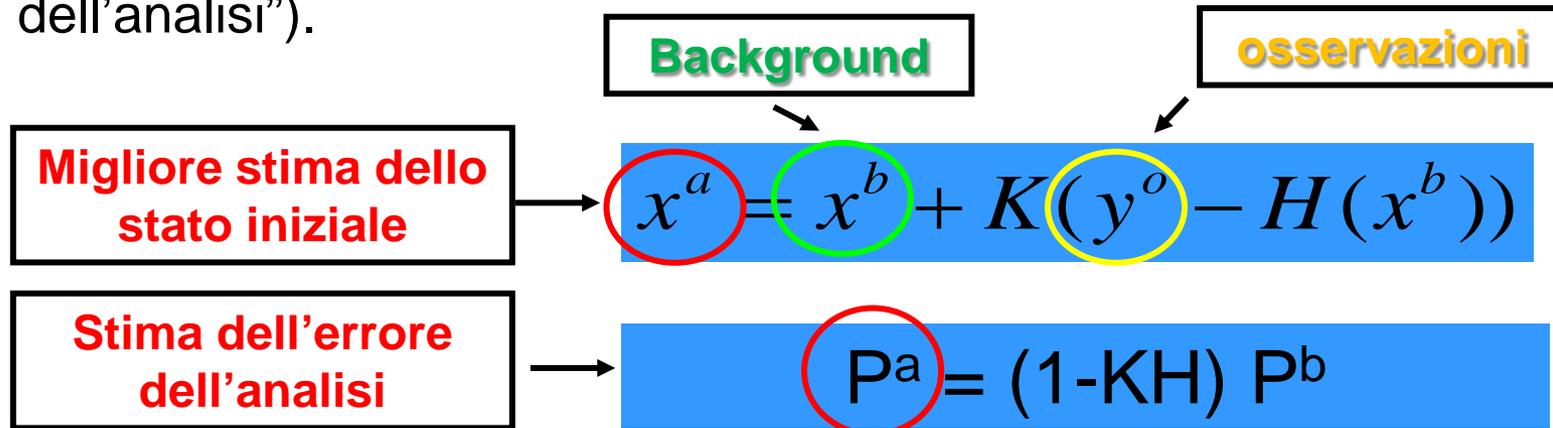
L'assimilazione dati e' il processo attraverso il quale l'informazione proveniente dalle **osservazioni** è "incorporata" in un modello numerico per fornire la migliore stima dello stato iniziale dell'atmosfera (**ANALISI**).

Il modello è poi usato per propagare l'informazione delle osservazioni dopo un certo tempo t (es. 6h) e poter effettuare (previsione FG usata come background) l'analisi con nuove osservazioni. Il processo (analisi/previsione) è ciclico



La Teoria della Stima

Per ottenere la migliore rappresentazione possibile dello stato iniziale dell'atmosfera, i metodi di assimilazione dati combinano l'informazione di **background (previsione numerica o climatologia)** e delle **osservazioni** tenendo conto dei relativi errori (minimizzando il funzionale di costo "errore dell'analisi").



KALMAN GAIN

Soluzione che minimizza P^a

$$K = P^b H^T (H P^b H^T + R)^{-1}$$

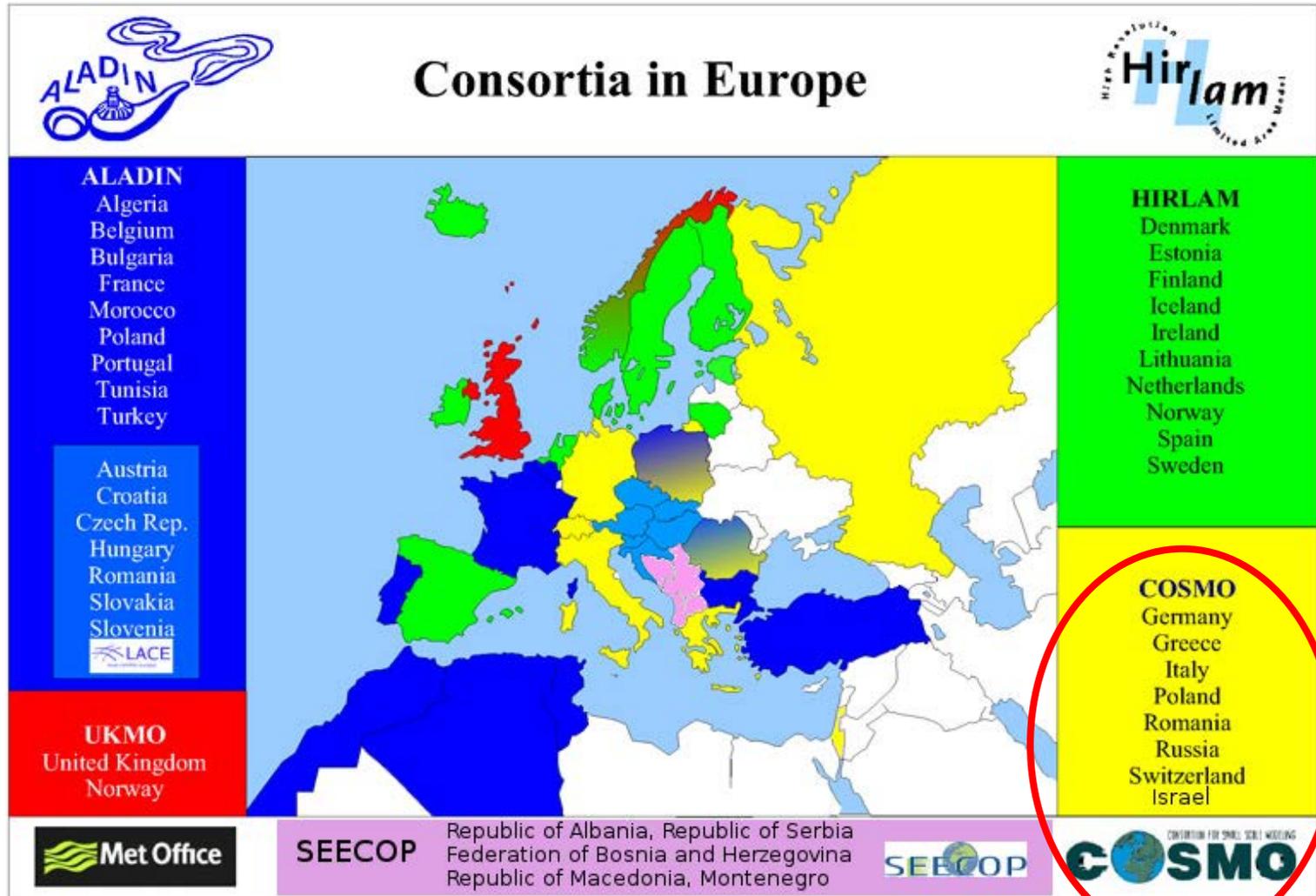
Errore Background

Errore osservazioni



LA PROGNOSI

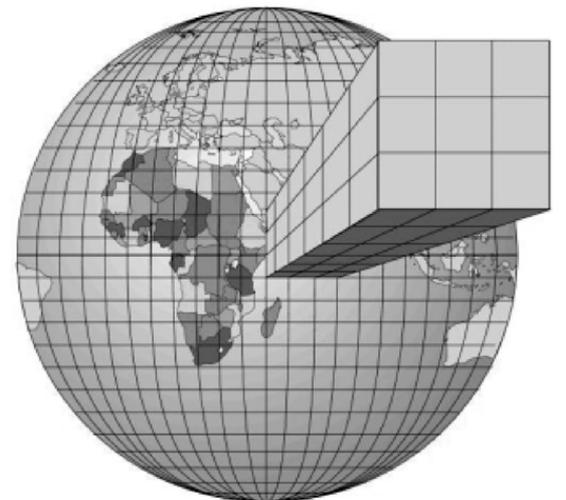
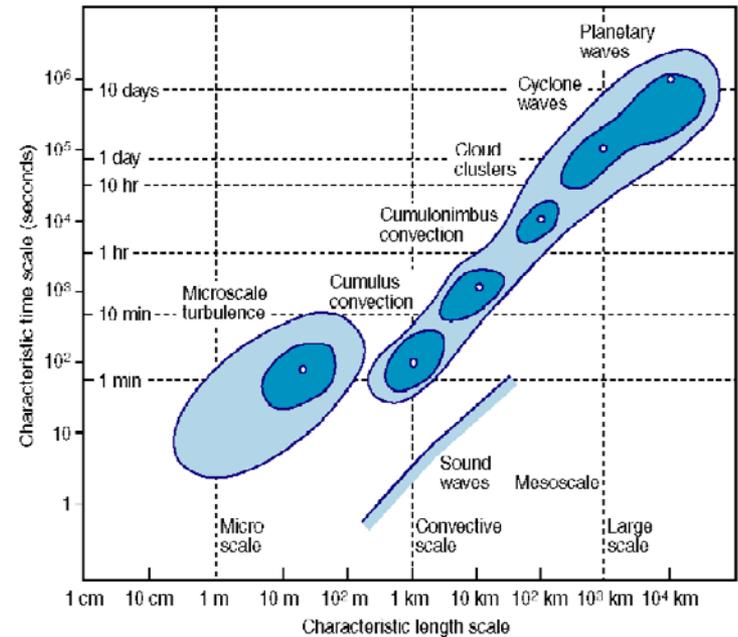
L'AM partecipa al consorzio per lo sviluppo del modello COSMO



Ae

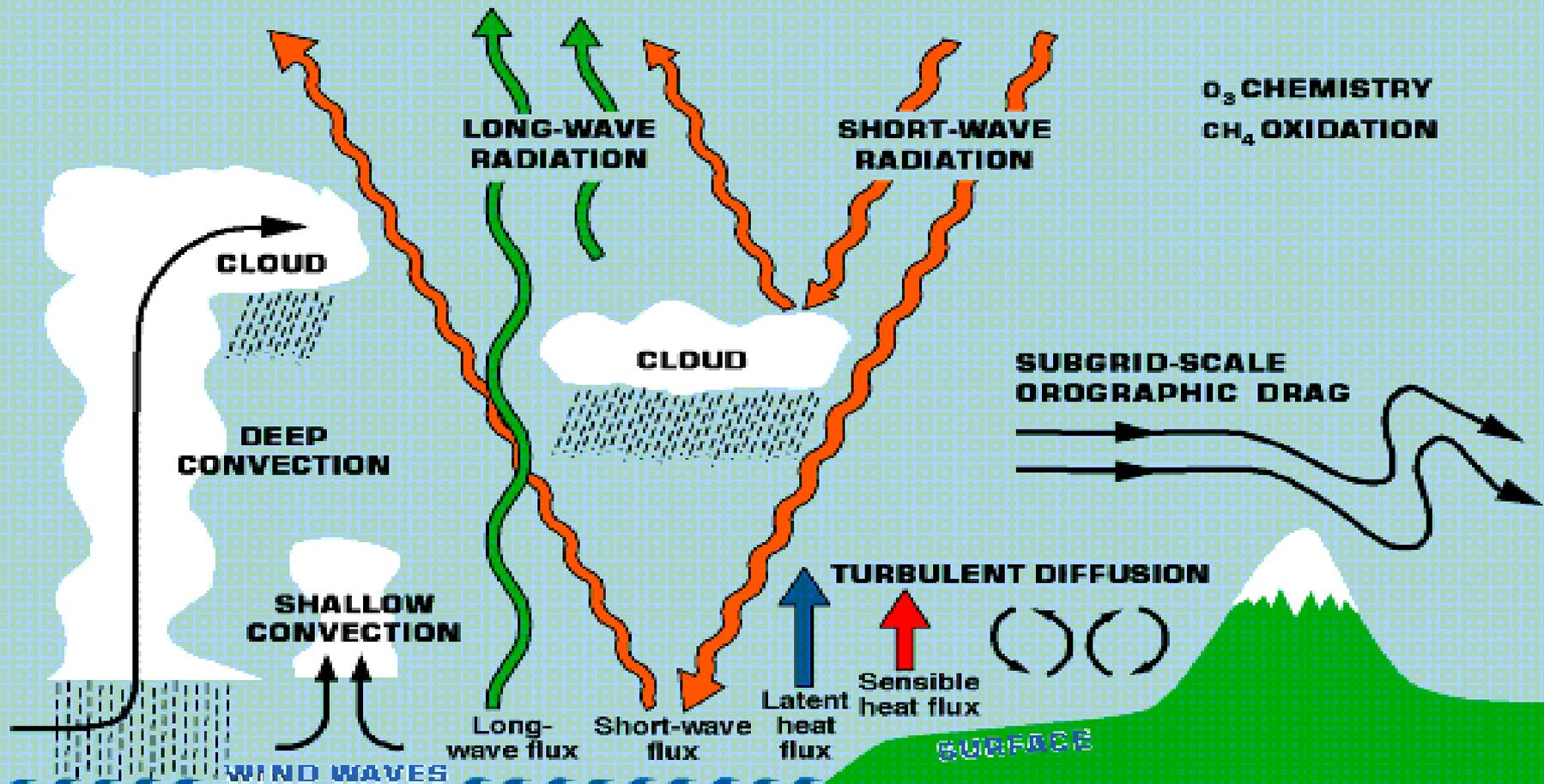
Processi non Risolti

- La discretizzazione dell'atmosfera introduce un limite minimo alla scala di fenomeni fisici risolti dal modello numerico (passo di griglia).
- Infatti le equazioni discretizzate contengono dei termini che rappresentano gli effetti dei processi non risolti (subgrid scale motions).
- Tali termini, che tengono conto anche di processi complessi da rappresentare esplicitamente e di fenomeni non ben compresi, devono essere opportunamente parametrizzati.

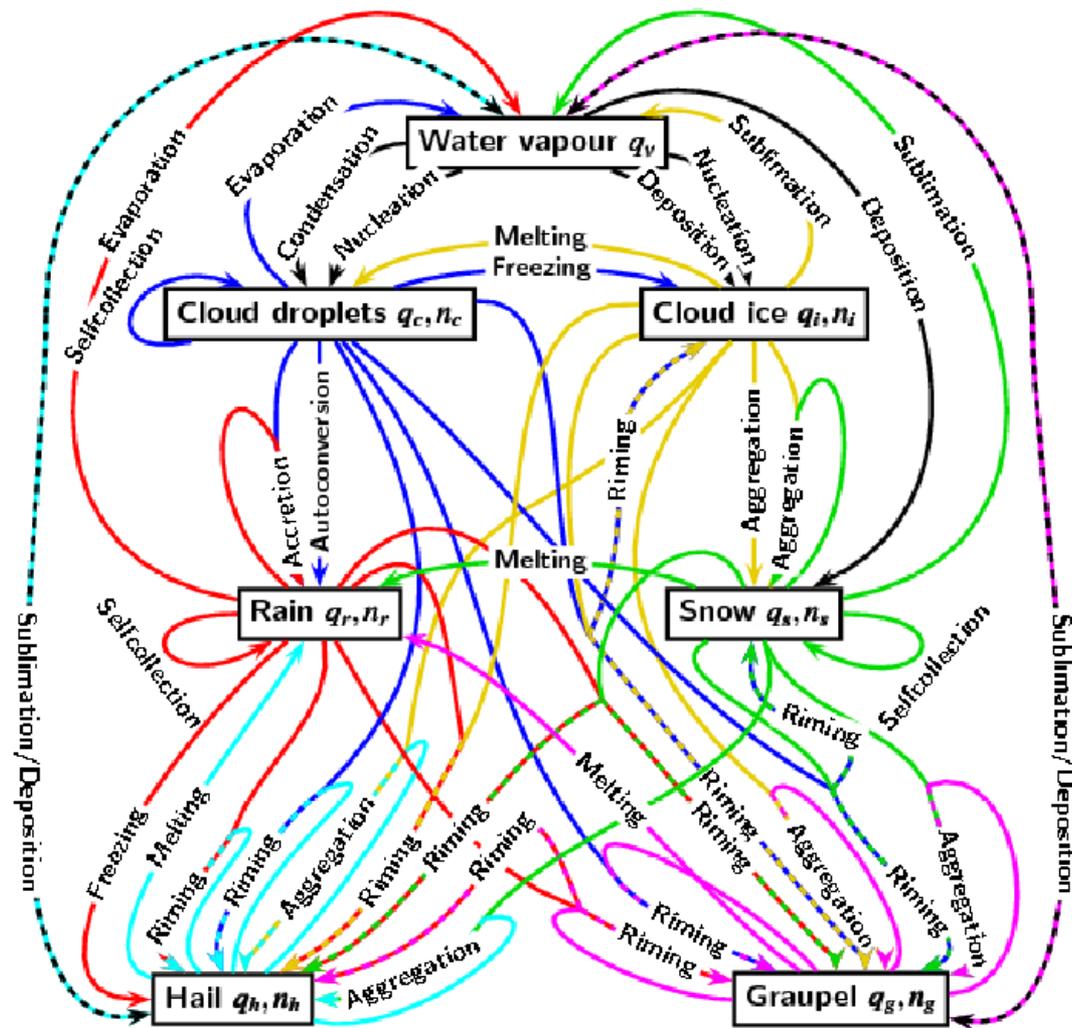


Parametrizzazioni Fisiche

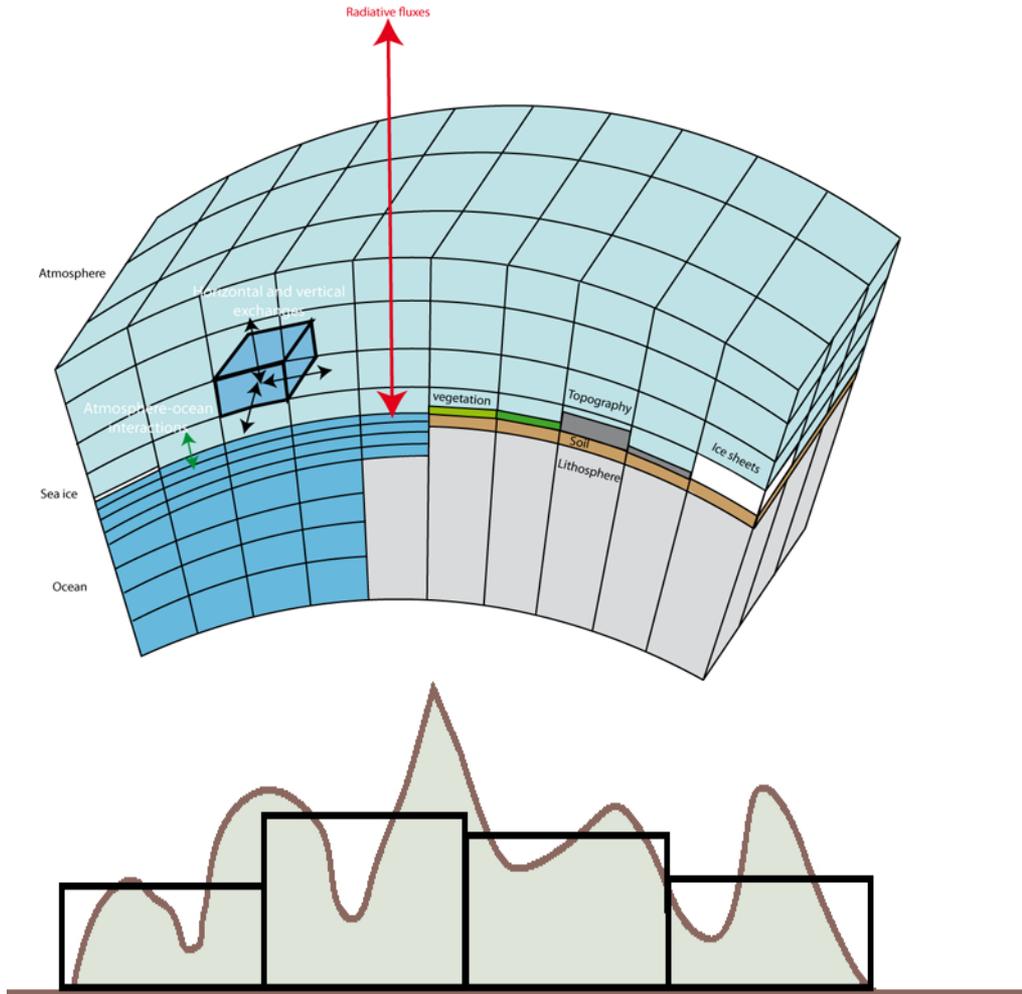
Le parametrizzazioni sono rappresentazioni semplificate dei processi non risolti da un modello numerico.



ES. MICROFISICA DELLE NUBI



Es. Rappresentazione della Superficie



L'orografia è appiattita rispetto a quella reale. Impatto sulla previsione di vento, nubi e precipitazione.



VERIFICA DEL MODELLO NUMERICO

Le previsioni di un modello numerico valide a un certo istante sono confrontate con le corrispondenti osservazioni o analisi per la determinazione oggettiva di alcuni indici statistici (errore medio, scarto quadratico medio, ecc.).

VERSUS - Process Manager - Mozilla Firefox

VERSUS - Process M... x

172.16.1.8/versus//ProcessMonitor.php

Home Information Consortium Related links Contact

Documents User Manual Technical Manual Glossary Version

Logout Administration User Process Acquisition Manager Acquisition Registration Score Manager Batch Execution Queue Manager Configuration Verification

Process Administration

Acquisition Manager

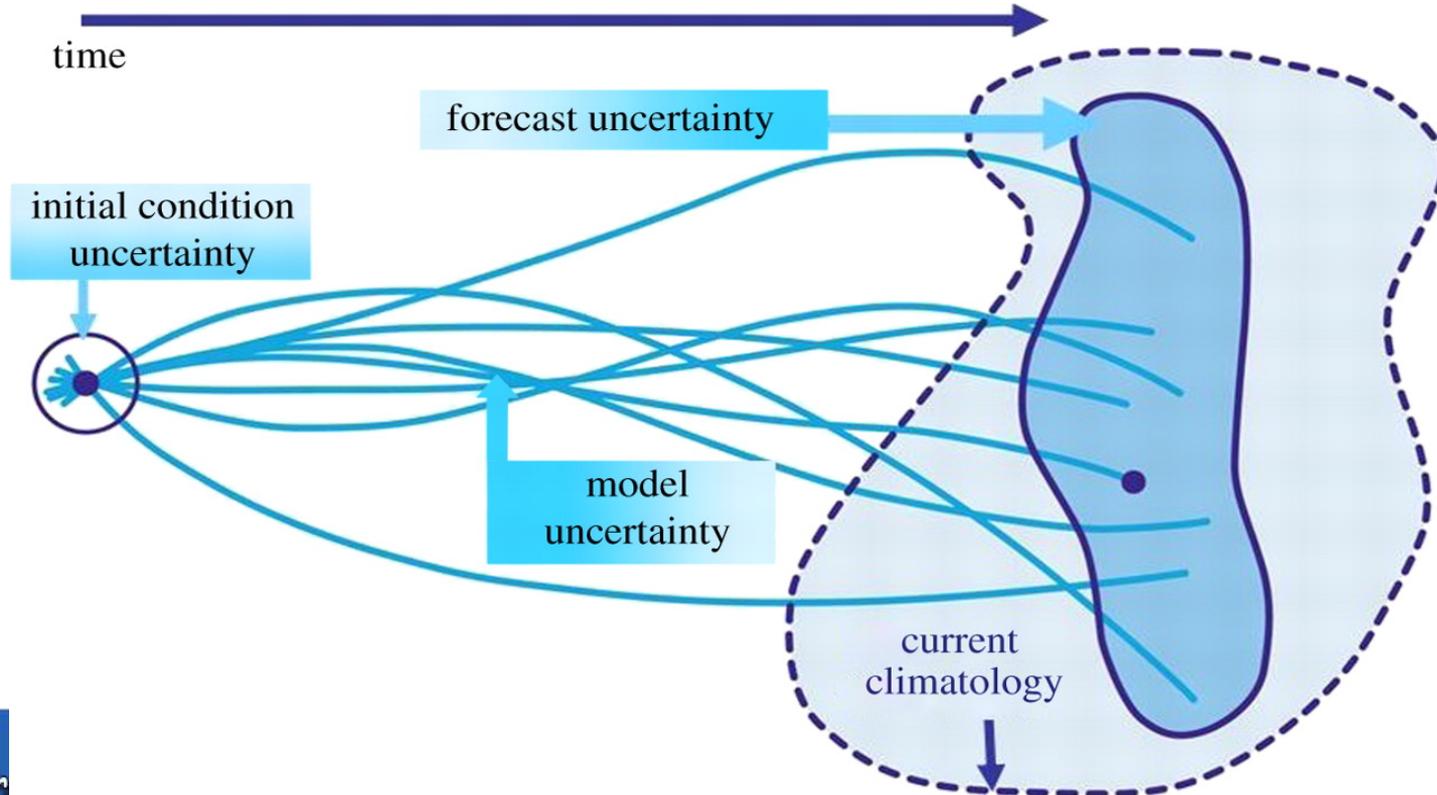
Name	Process	Status	Acq Files	Error Files	Backup Files	Report	Modify	Logs	Delete
All AreaTEMP Station	Started	Online	0	0	0				
BUFR for swiss stations	Started	Online	0	0	18				
Common area bufr	Started	Online	0	0	958				
Common area bufr_temp	Started	Online	0	0	694				
FE_Area_grib	Started	Online	0	0	0				
FE_BUOY	Started	Online	0	800	10900				
FE_CA_ALL	Started	Online	111	6	60956				
FE_CA_PREC	Started	Online	0	0	13202				
FE_CA_TCC	Started	Online	0	0	13047				
FE_CA_UPPER_GRIE	Started	Online	0	0	1196				



Aeronauti

Incertezza dello Stato Iniziale

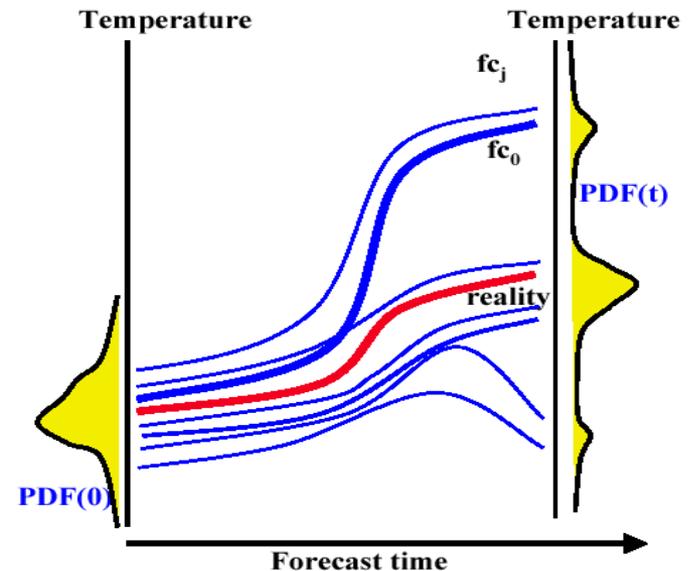
Lo stato iniziale dell'atmosfera non può essere determinato in maniera esatta. Una minuscola variazione nelle condizioni iniziali di un sistema caotico può farlo evolvere in un modo completamente diverso da quello atteso.



ENSEMBLE FORECASTING

- Generalmente un singolo “control forecast” è integrato a partire dall’analisi
- Nell’ensemble forecasting sono generati piu’ forecast perturbando leggermente le condizioni iniziali (o usando differenti modelli)
- Lo spread tra i membri dell’ensemble da un’informazione sull’errore della previsione

- Range di possibili soluzioni, la media delle quali è generalmente più accurata della singola previsione **deterministica**
- Base quantitativa per una previsione **probabilistica**

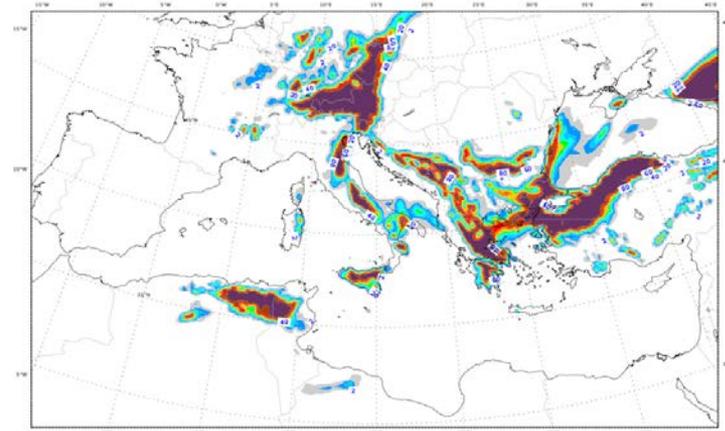


ENSEMBLE FORECASTING: PRODOTTI

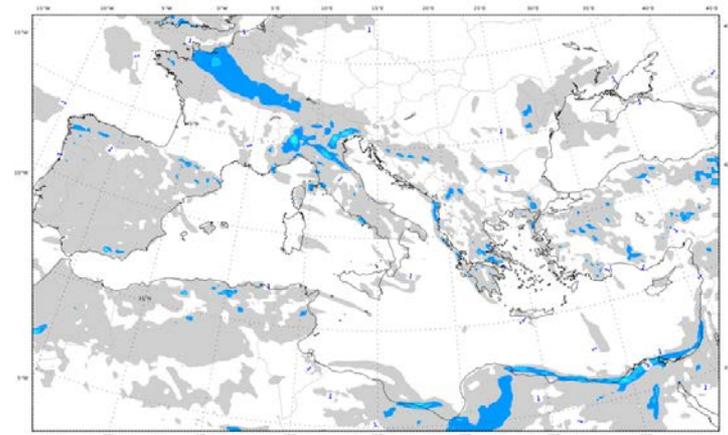
Probabilità:

EPS può essere usato per stabilire la probabilità di un evento

COSMOME_EPS 31 December 2014 00UTC Forecast T+6 VT: Wednesday 31 December 2014 06UTC
6h Snowfall (convective + stratiform) probability > 0.2 mm



COSMOME_EPS 04 January 2015 00UTC Forecast T+6 VT: Sunday 04 January 2015 06UTC
2 m Temperature uncertainty (2 x Standard Deviation) degrees Celsius



Lo spread può essere usato per identificare aree con errore potenzialmente elevato

Incertezza:



Progressi in AM nell'Assimilazione Dati

Optimal Interpolation (OI)

3D-VAR*

Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF)

ASSIMILAZIONE DATI @ SERVIZIO METEO AM

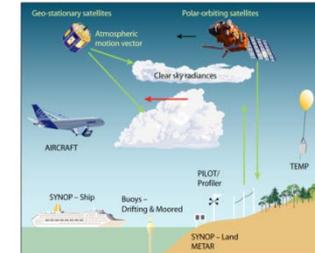
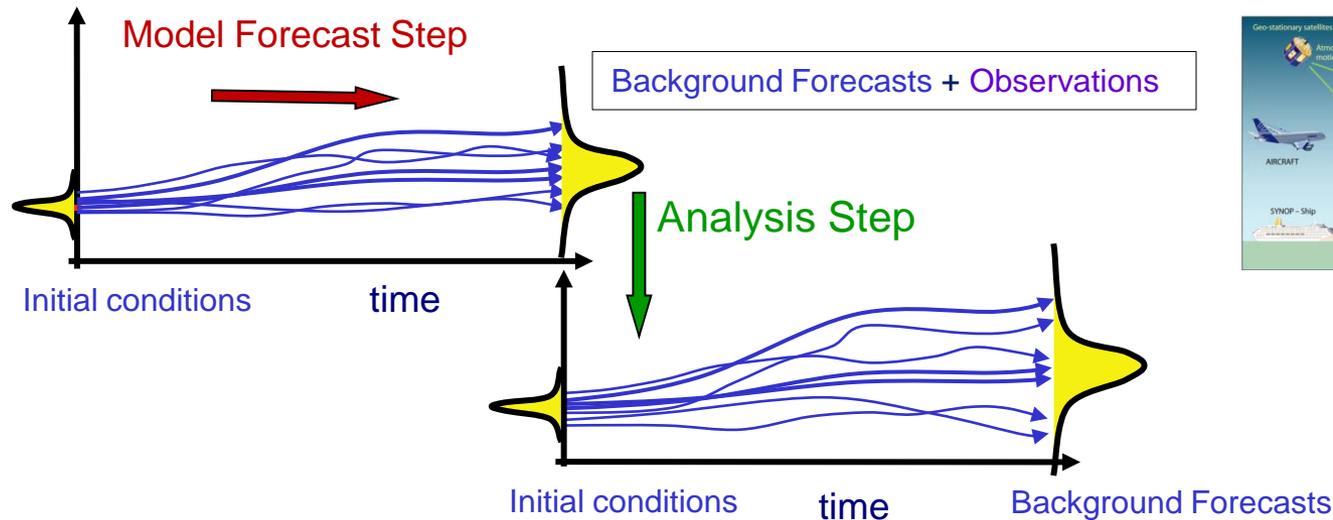
1999

2002

2011

* 3D-VAR: 3 Dimensional Variational Assimilation

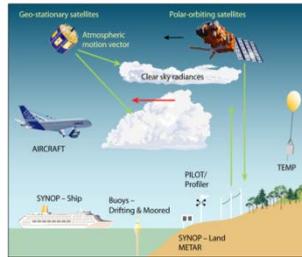
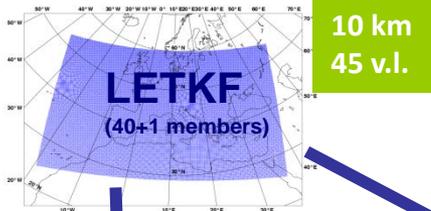
Assimilazione Dati di tipo "Ensemble" (LETKF)



Il Sistema di Previsioni Numeriche del Servizio Meteorologico AM

Ensemble Data Assimilation:

Operational since June 2011

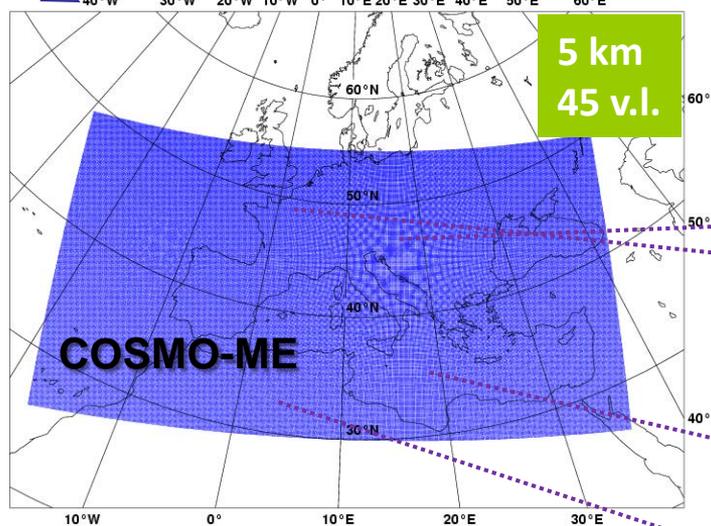


Local Area Modeling:

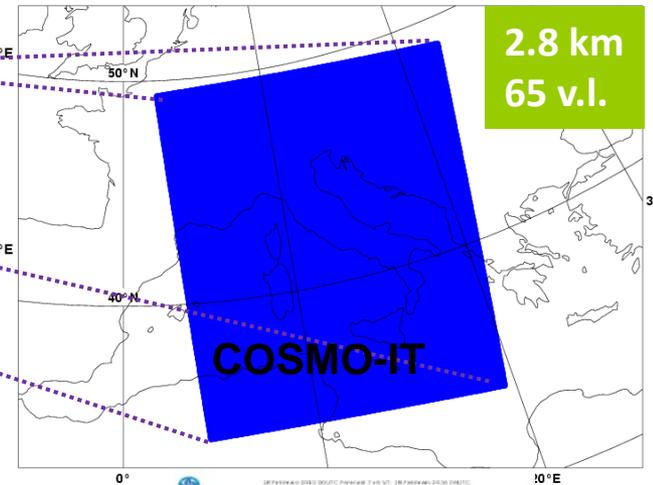
Ensemble Analysis

Deterministic Analysis

COSMO-ME (7km) ITALIAN MET SERVICE

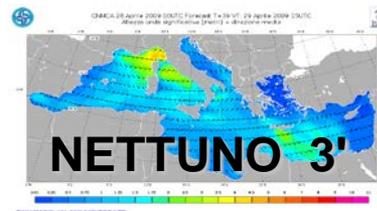
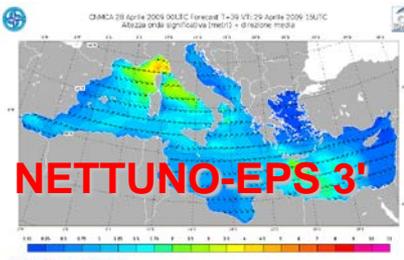


COSMO-IT (2.8km) ITALIAN MET SERVICE

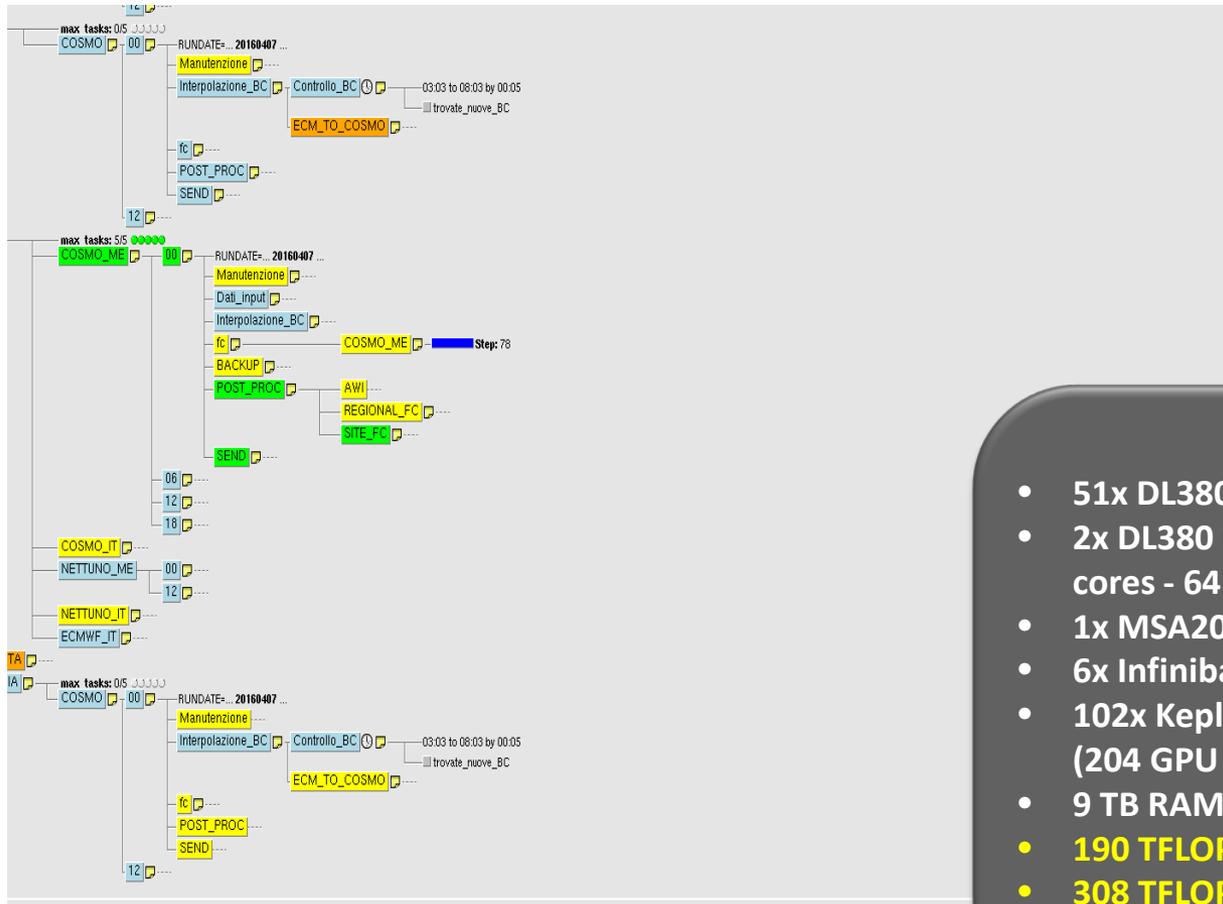


Ensemble Prediction System:

**10 km
45 v.l.**



Servizio Meteorologico AM -Suite Operativa NWP-



- 51x DL380 G9 Computing Nodes
- 2x DL380 G9 Management Nodes (2x12 Haswell cores - 64 GB)
- 1x MSA2040 DAS
- 6x Infiniband 36p FDR switches
- 102x Kepler K80 GPUs (24 GB)
(204 GPU units \approx 500K GPU cores)
- 9 TB RAM
- 190 TFLOPS peak
- 308 TFLOPS peak (BOOST)





FENOMENI INTENSI
Previsti Fenomeni Intensi

Consulta la MAPPA >

Cerca PREVISIONE per località

Previsioni Meteorologiche per L'AQUILA (AQ)

Altre località: L'AQUILA (AQ)

Aggiungi ai preferiti

Altitudine: 721 m

3 GIORNI

ANDAMENTO GIORNALIERO

ANDAMENTO TEMPERATURE

OGGI

DOMANI

DOPODOMANI

17/01/2017	FEN. INTENSI	TEMPO	PROB.PRECIP.	TEMP.(°C)	T.PERC.(°C)	UMIDITÀ(%)	VENTO(KM/H)	RAFFICHE(KM/H)
01:00			70%	-3	-3	84	5	14
04:00			90%	-2	-2	93	5	11
07:00			90%	-1	-3	81	9	18
10:00			80%	0	0	91	3	20
13:00			50%	1	-1	88	9	14
16:00			30%	2	-6	75	16	31
19:00			70%	2	-6	82	16	32
22:00			90%	2	2	79	5	29

Aggiornamento pagina: 16/01/2017 11:53 UTC.

PALERMO



10

13

16

19

22



9°

9°

9°

7°

6°

PALERMO

LUNEDÌ 16 GENNAIO

9°



W 19 Km/h

Cloud 90%

MAR 17



6° / 10°

MER 18



5° / 11°





GRAZIE PER L'ATTENZIONE

www.meteoam.it



Aeronautica Militare

Torrise L. - I Modelli Numerici di Previsione - Convegno Pristem, Trento, 7-9 Aprile 2017

