

Le previsioni a breve e medio termine: come interpretarle?

Claudio CASSARDO

Docente al Dipartimento di Fisica e centro NatRisk - Università di Torino
Coordinatore del gruppo «cambiamenti climatici» del Green Office di UniTo

claudio.cassardo@unito.it

claudiocassardo.wordpress.com

www.agi.it/blog-italia/autore/claudio_cassardo/

www.climalteranti.it



Gli argomenti di cui vi parlerò

- I modelli (numerici, matematici, ...)
 - ❑ Cosa sono? Caratteristiche, storia, ...
- I modelli meteorologici
 - ❑ GCM e LAM (alla mesoscala)
 - Caratteristiche e inizializzazioni, la rete osservativa, le equazioni
 - ❑ Risoluzione e rappresentatività territoriale
- L'incertezza delle previsioni, la predicibilità e i limiti delle previsioni del tempo
 - ❑ Le previsioni di insieme
 - ❑ Come interpretarle?

Cos'è un modello numerico?

- Un modello è un codice numerico in grado di risolvere le equazioni fondamentali dei processi e dei fenomeni studiati, al fine di prevedere il valore futuro delle variabili in un momento successivo
- Esempio: l'equazione del secondo grado $y=ax^2+bx+c$ ha due soluzioni reali e distinte solo se $\Delta=b^2-4ac > 0$; in questo caso le due soluzioni sono:

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

- Il nucleo di un modello delle equazioni di secondo grado è dato dalle due seguenti istruzioni (in Fortran 90):

$$X1 = (-B - \text{SQRT}(B*B-4*A*C)) / (2.*A)$$

$$X2 = (-B + \text{SQRT}(B*B-4*A*C)) / (2.*A)$$

Le equazioni primitive di un modello meteorologico

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla \bar{V} = -\frac{\nabla p}{\rho} - 2\bar{\Omega} \times \bar{V} + \bar{g} + \bar{F}_V$$

Vento

Conservazione della
quantità di moto

$$C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla T \right) = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} + Q + F_T$$

Temperatura

Conservazione
dell'energia

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla \rho = -\rho \nabla \cdot \bar{V}$$

Densità

Conservazione
della massa

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla q = \frac{S_q}{\rho} + F_q$$

Umidità
specifica

Conservazione
del vapore acqueo

$$p = \rho R T$$

Pressione

Equazione di stato

Caratteristiche di ogni modello

- Le soluzioni del modello **sono valide solo se rientrano nelle ipotesi**
- Ottenere una soluzione analitica per alcune equazioni è problematico dal punto di vista matematico e in alcuni casi **è impossibile** (come nel caso delle equazioni di Navier-Stokes)
- Ogni operazione richiede del **tempo per il calcolo**, quindi è necessario cercare di ridurre al minimo il numero di equazioni utilizzate (se e quando possibile) per ridurre i tempi di calcolo: infatti il calcolo della soluzione analitica può richiedere tempi lunghi e risorse onerose
- In questi casi, è preferibile ottenere una **soluzione approssimata**; il continuo progresso dei calcolatori consente di ottenere **soluzioni numeriche** che possono avvicinarsi molto bene alla realtà (con i limiti dei risultati di Lorenz per i sistemi caotici)

Un modello «in poche parole»

➤ Un'equazione prognostica ha la forma: $\frac{\partial u}{\partial t} = f(u, v, w, T, q, \dots)$

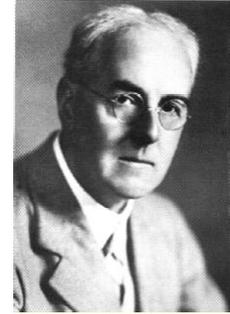
➤ Può essere «semplificata» in: $\frac{\Delta u}{\Delta t} \cong f(u, v, w, T, q, \dots)$

➤ Che significa, in pratica, risolvere su ogni punto griglia l'equazione algebrica: $u_{nuovo} \cong u_{vecchio} + \Delta t f(u, v, w, T, q, \dots)$

➤ Per poterla risolvere occorrono i valori iniziali di tutte le variabili per stimare $u_{vecchio}$ e la funzione $f(u, v, w, T, q, \dots)$

Storia: da Richardson a Charney

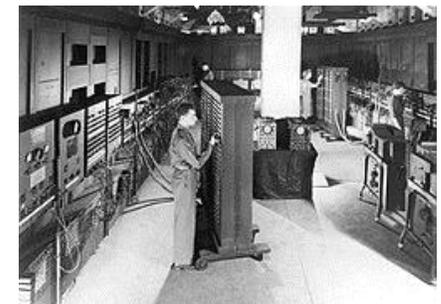
- L. F. Richardson (1922) risolse numericamente un modello prognostico meteorologico (**a mano!**)
- Il suo tentativo fallì per gli errori nelle inizializzazioni delle variabili e perché il suo modello era numericamente instabile
- **Il primo tentativo riuscito** di integrare un modello (con un computer) risale al 1950, quando il gruppo di **Charney**, Fjorton e Von Neumann usò un modello di integrazione numerica dell'equazione barotropica della vorticità
- Il calcolatore elettronico utilizzato fu il titanico **ENIAC** (Electronic Numerical Integrator And Computer). Il modello aveva un grigliato di 15 x 18 punti e un solo livello verticale



Lewis Fry Richardson (1881-1953)
Fisico britannico



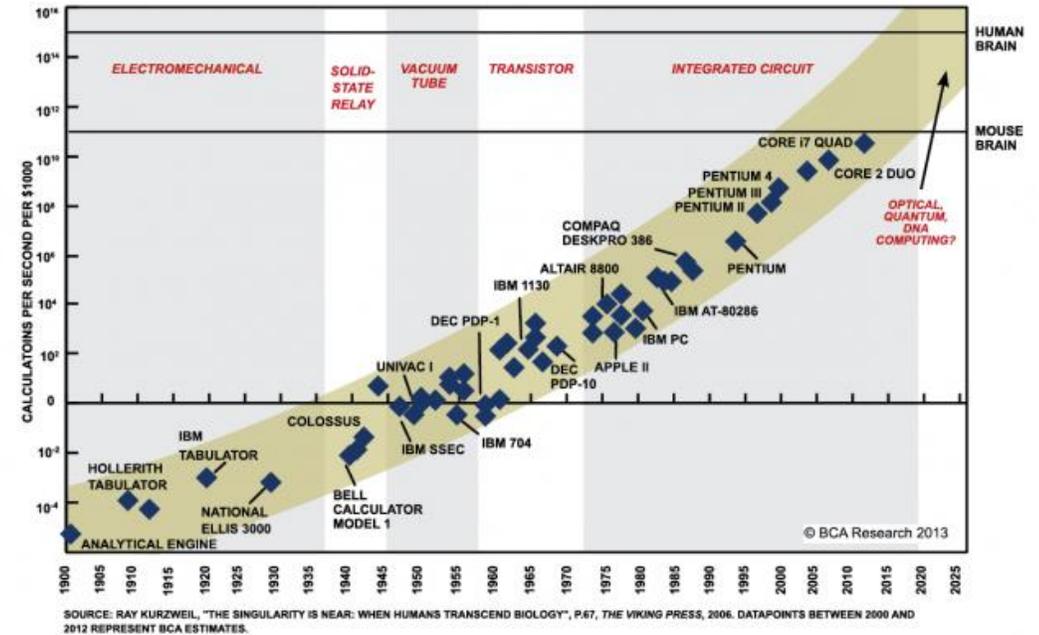
Jule Gregory Charney (1917-1981)
Meteorologo statunitense



Il gigantesco ENIAC

Tipi di modelli in meteorologia

➤ Lo studio della fisica atmosferica ha avuto un notevole sviluppo dopo la creazione di numerosi modelli di simulazione numerica grazie al miglioramento continuo delle prestazioni dei calcolatori elettronici

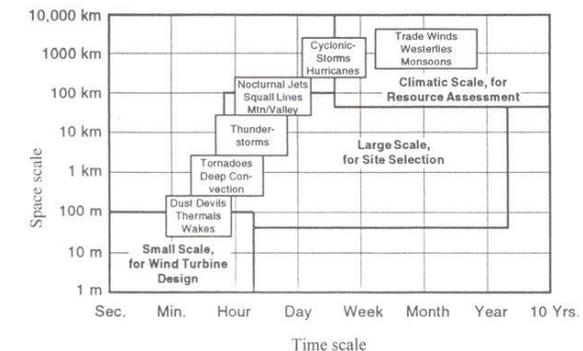
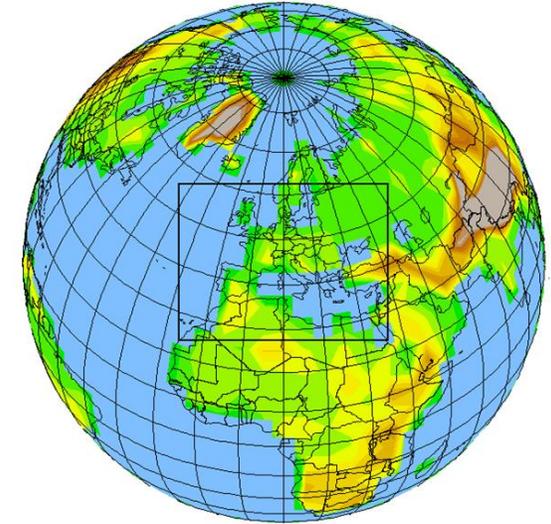


➤ I modelli numerici utilizzati nella fisica dell'atmosfera possono essere classificati in base alla scala studiata nelle seguenti categorie:

- ❑ **Modelli di circolazione generale (o modelli globali) (GCM)**
- ❑ **Modelli alla mesoscala, o modelli regionali, o modelli ad area limitata (LAM)**

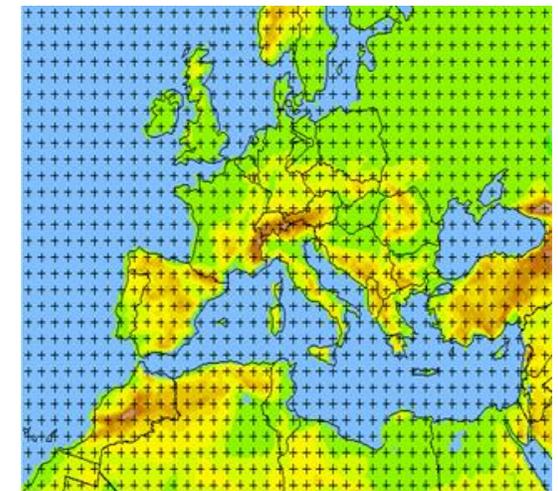
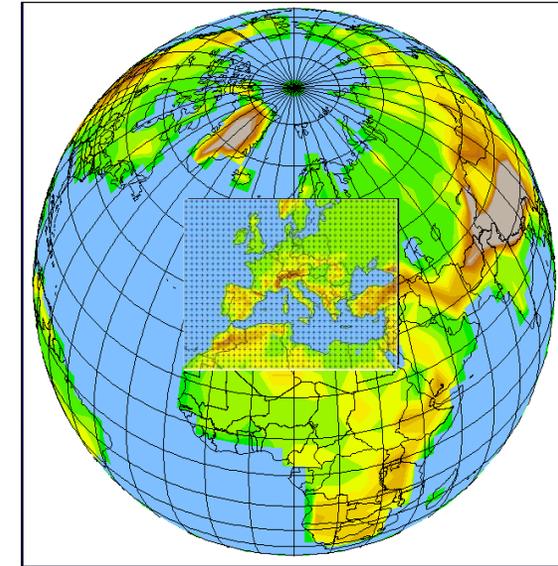
I GCM (modelli generali di circolazione)

- I modelli di circolazione generale (GCM) simulano il comportamento della circolazione atmosferica su scala planetaria
- Sono utilizzati principalmente per previsioni meteorologiche su scala globale o emisferica e hanno una dimensione orizzontale del punto della griglia di 10-50 km
- I fenomeni fisici studiati hanno scale temporali e spaziali che coprono un intervallo di 15 ordine di grandezza (da 10^{-7} m - percorso medio molecolare libero - a 10^7 m - onde planetarie): non tutti possono essere considerati nei GCM



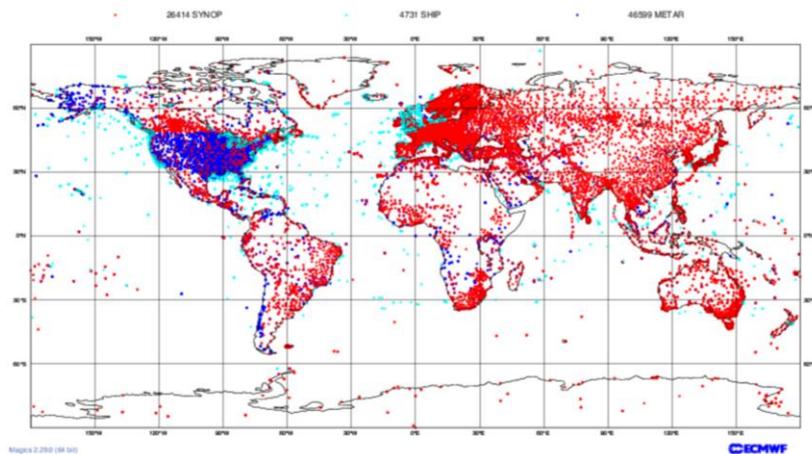
I modelli alla mesoscala

- I modelli alla mesoscala, chiamati anche modelli regionali o modelli ad area limitata (LAM), sono sviluppati per studiare fenomeni su scale più piccole di quelle dei GCM (100 m – 10 km), cioè dalla microscala alla scala sinottica (cicloni, brezze, ciclogenesi, temporali, ...)
- Questi modelli richiedono condizioni al contorno aggiuntive (hanno un bordo laterale) e sono più accurati (risoluzione maggiore)
- Le condizioni al contorno laterali sono normalmente prese dai GCM, mentre le condizioni iniziali possono essere prese sia dai GCM sia dalle osservazioni
- I modelli a mesoscala vengono utilizzati per prevedere fenomeni violenti con allarme a breve termine (12-24 ore) o per valutare anomalie peculiari causate dalla particolare morfologia o caratteristiche della regione esaminata
- Tali modelli sono configurati normalmente per funzionare su ogni scala con selezioni e ottimizzazioni appropriate e preliminari dei parametri del modello

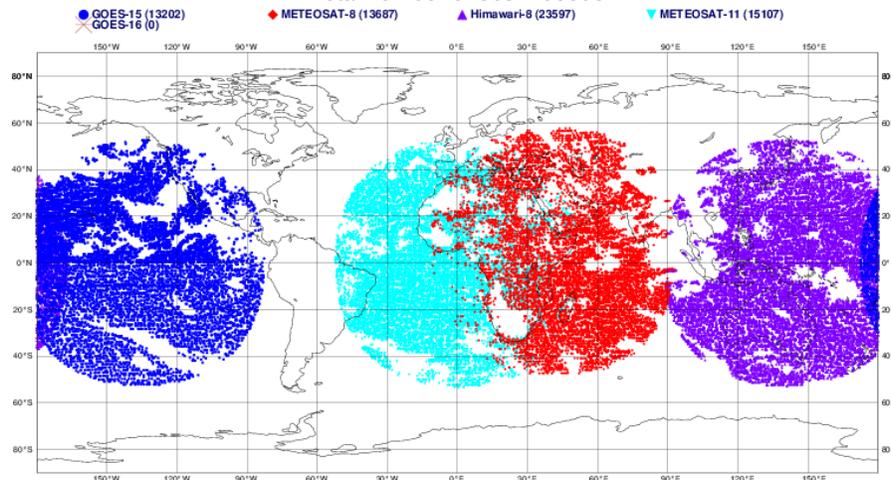


La rete osservativa: vari tipi di dati

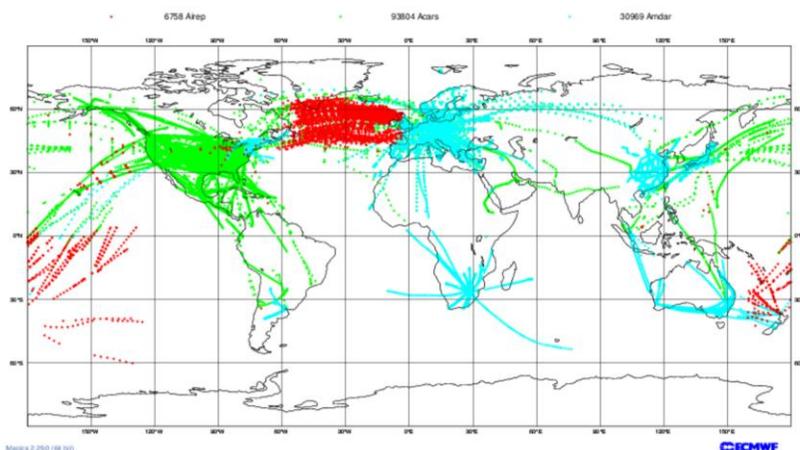
ECMWF Data Coverage (All obs DA) - Synop-Ship-Metar
26/Sep/2016; 12 UTC
Total number of obs = 77744



ECMWF data coverage (used observations) - GEOSTATIONARY RADIANCES
24/06/2018 12
Total number of obs = 65593



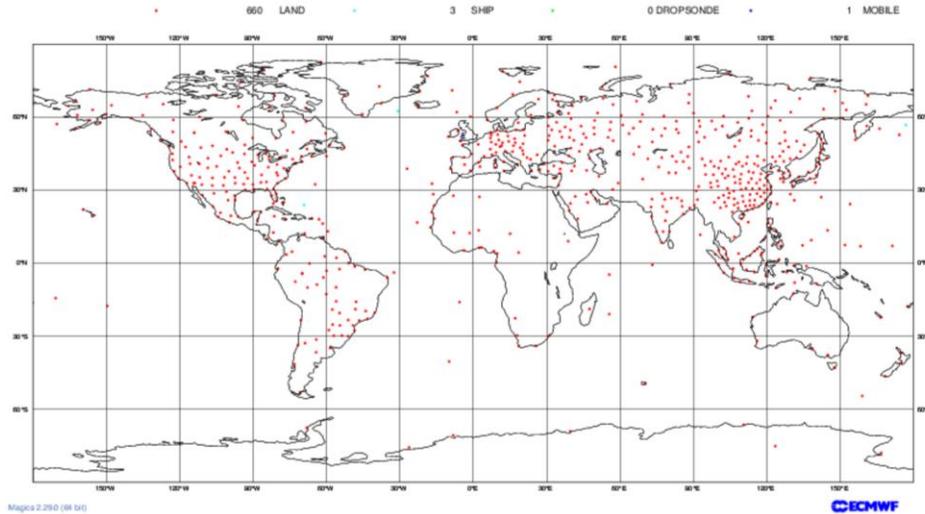
ECMWF Data Coverage (All obs DA) - Aircraft
26/Sep/2016; 12 UTC
Total number of obs = 131531



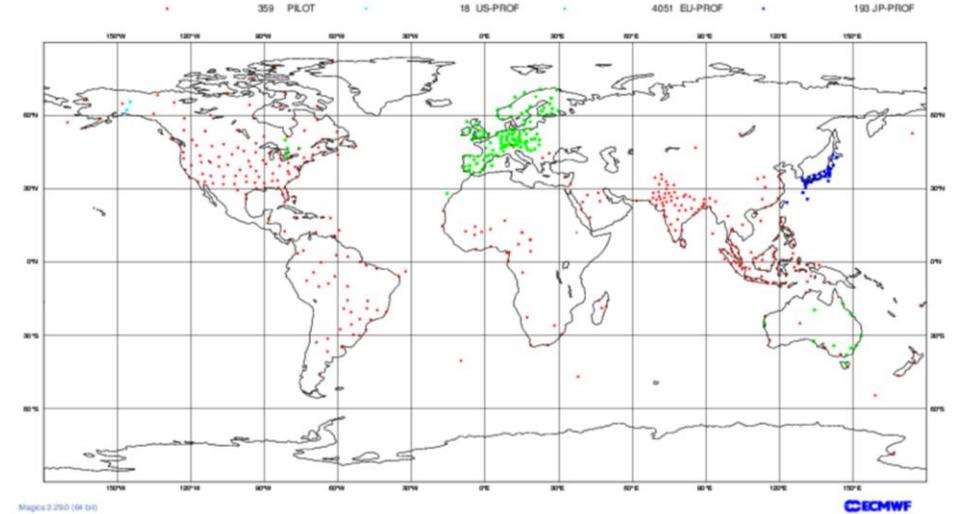
- Le condizioni iniziali necessarie per i GCM sono calcolate dai dati delle circa 78.000 osservazioni delle stazioni meteo e delle circa 700 stazioni di radiosonde, più tutti gli altri dati
- Osservazioni su terraferma, boe, navi, aerei effettuate alle ore sinottiche principali (00, 06, 12, 18 UTC)
- Osservazioni da satellite

La rete osservativa: altri dati

ECMWF Data Coverage (All obs DA) - Temp
26/Sep/2016; 12 UTC
Total number of obs = 664



ECMWF Data Coverage (All obs DA) - Pilot-Profiler
26/Sep/2016; 12 UTC
Total number of obs = 4621



- TEMP: radiosondaggi con palloni (00 e 12 UTC)
 - ✓ Misurano T, RH, p, u, v, w



- PILOT: palloni sonda che misurano il vento

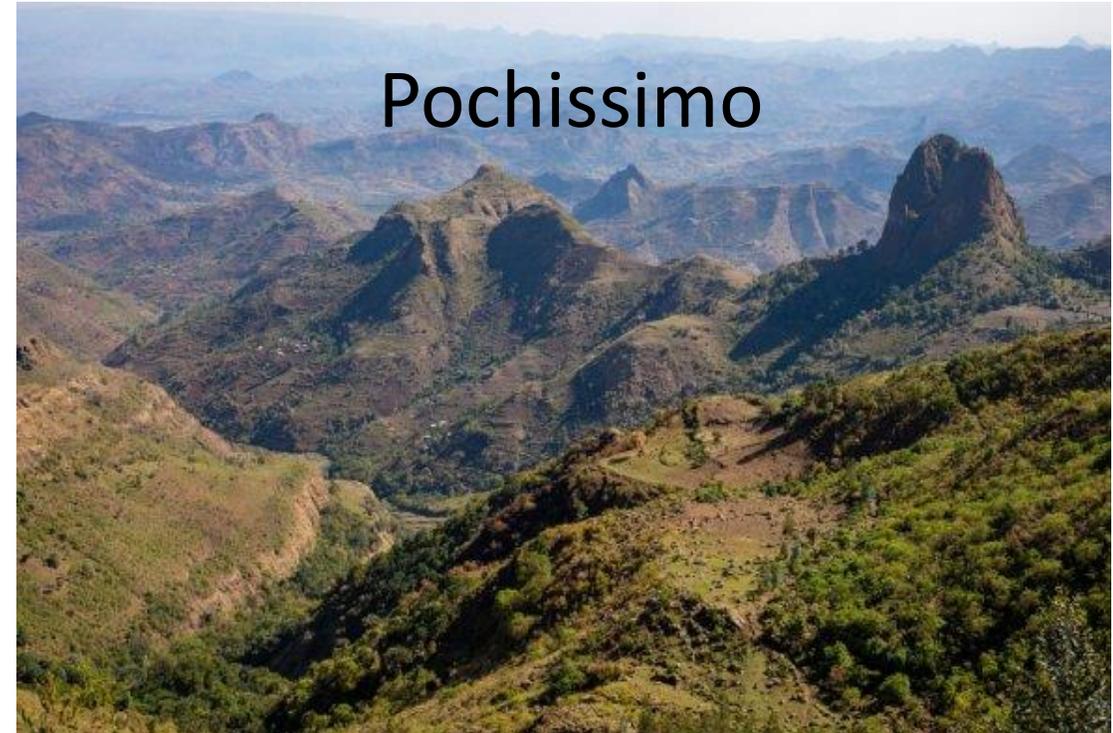
Quanto un modello rappresenta il territorio?

- Un modello risolve delle equazioni in tanti singoli punti
- Quanto questi punti sono rappresentativi della situazione reale?

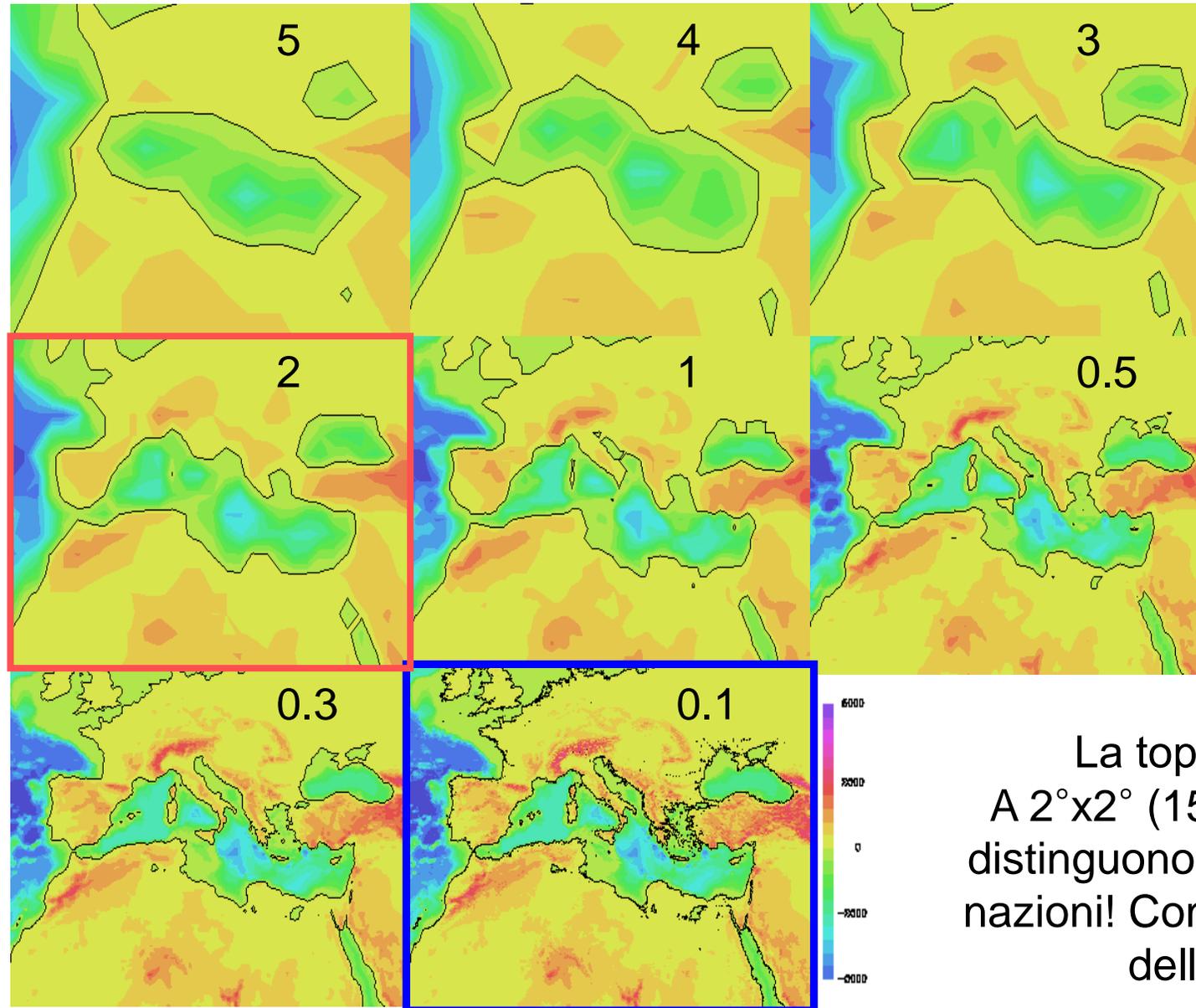
Molto



Pochissimo



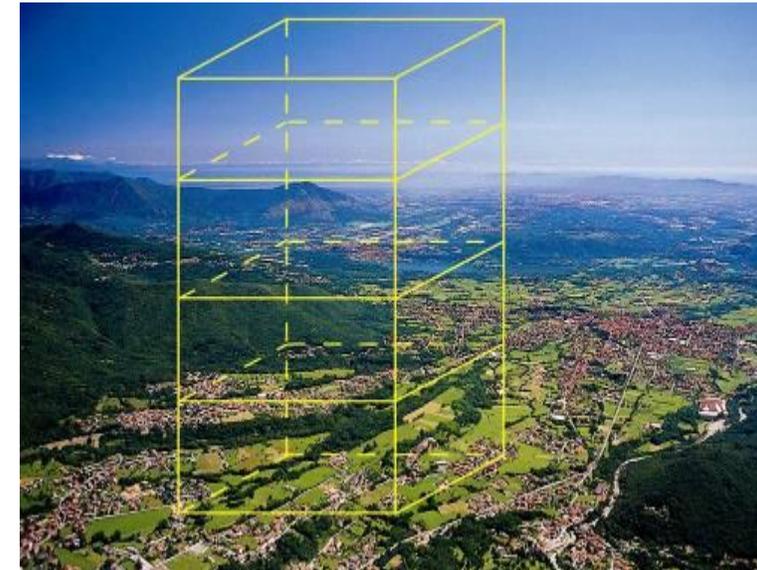
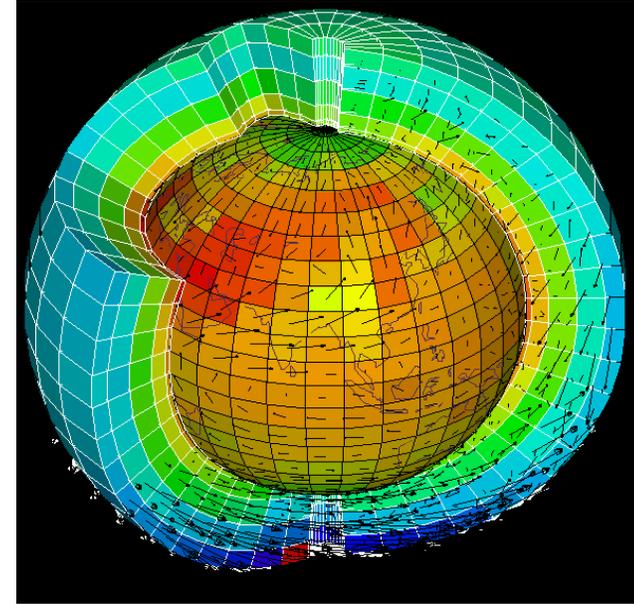
Vediamo questo giochino... cosa c'è in questa immagine?



La topografia! Ma...
A $2^\circ \times 2^\circ$ (150x150 km) non si distinguono neppure le singole nazioni! Come credere ai valori delle variabili?

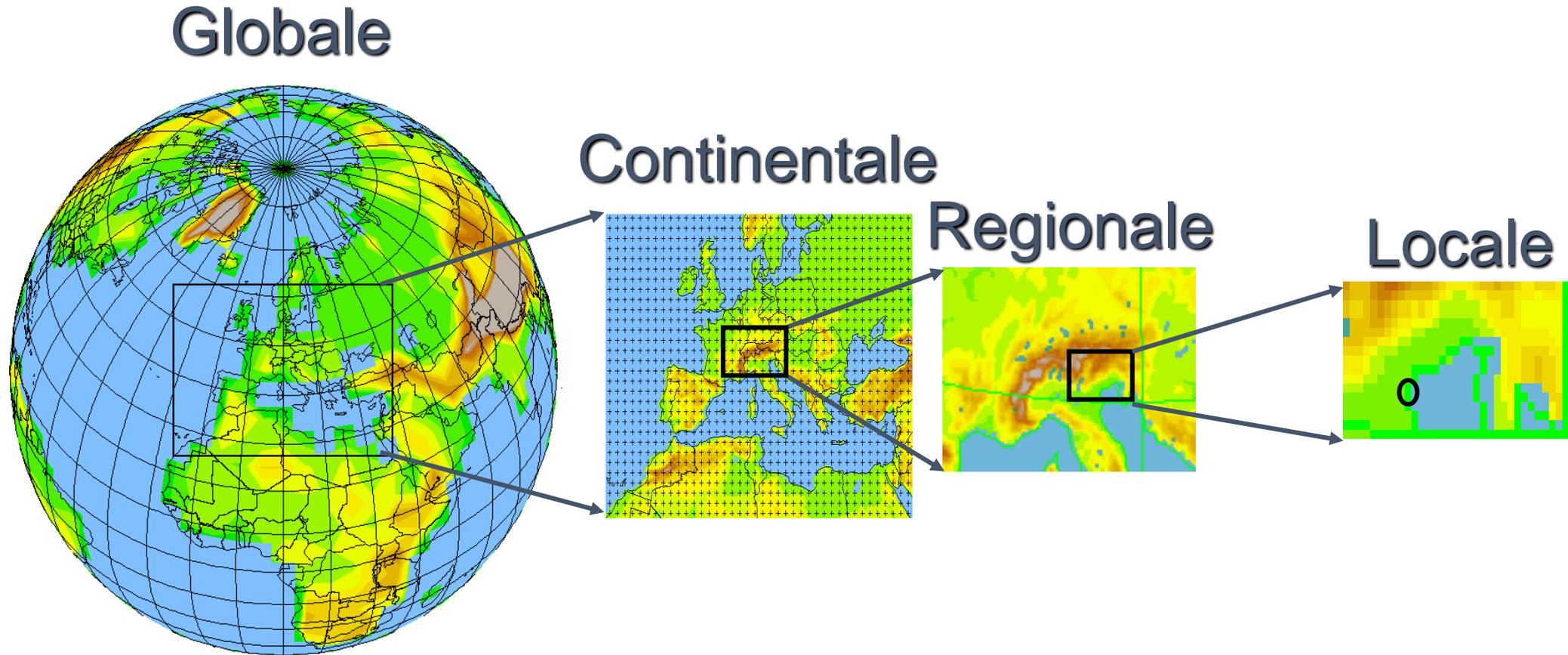
Abbiamo parlato di punti griglia...

- Dividere il volume in «cubetti» 3D
- In ogni “cubetto”, le variabili sono assegnate al baricentro
- Il volume del cubetto può variare con quota e latitudine
- L'ampiezza del cubetto dipende dalla risoluzione del modello (minore ampiezza, maggiore risoluzione)
- Per i modelli meteo globali, la risoluzione è 10-20 km; per i modelli globali di clima, 75-200 km



Un modo per dettagliare le scale locali

Le simulazioni «in cascata»



La previsione deterministica: fin quando vale?

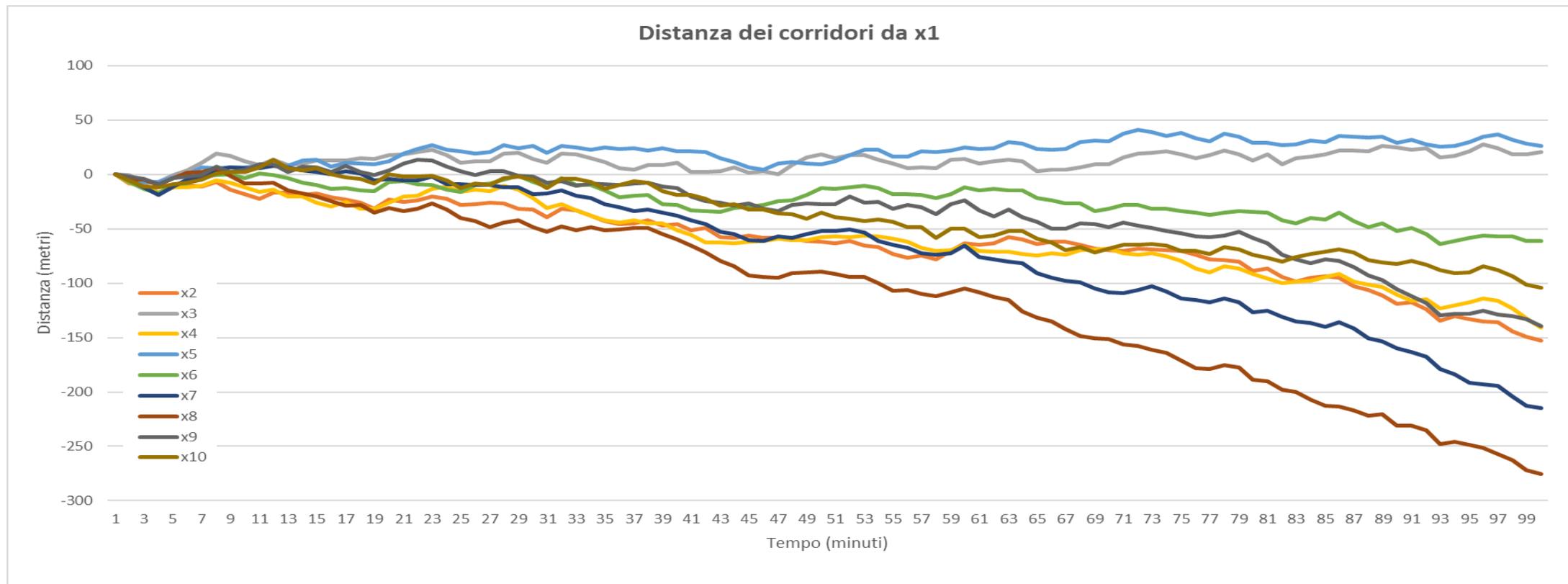
- Fino a quando ha senso continuare a integrare l'equazione algebrica:

$$u_{nuovo} \cong u_{vecchio} + \Delta t f(u, v, w, T, q, \dots) ?$$

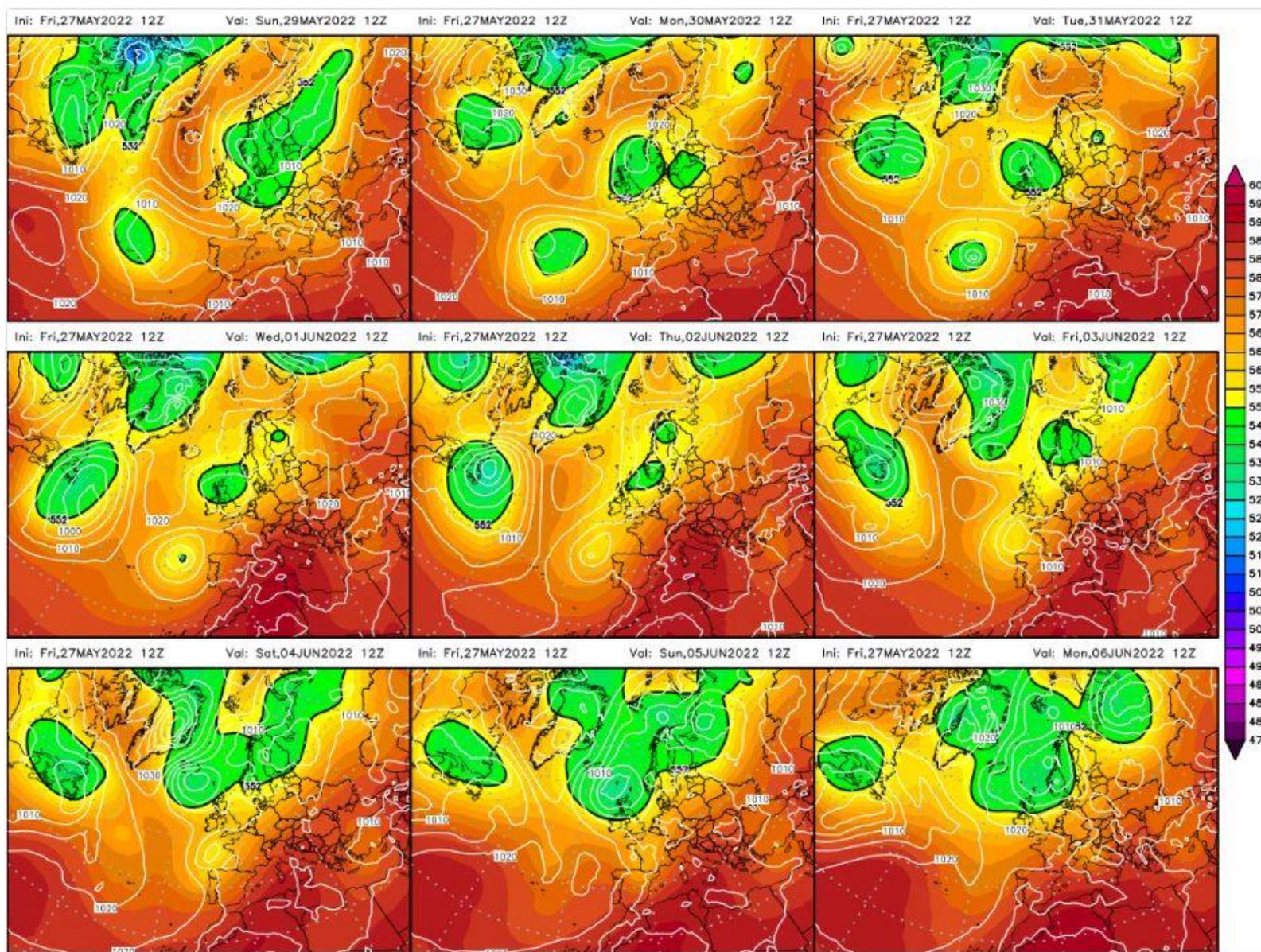
- Non è che, avendo a disposizione meno misure rispetto ai punti griglia per inizializzare $u_{vecchio}$ e la funzione $f(u, v, w, T, q, \dots)$, ho un errore sui valori iniziali che può propagarsi fino a rendere crescente l'errore sul valore finale?

Quando un sistema è complesso, serve un approccio statistico...

- Immaginiamo una gara di corsa con centomila partecipanti
- Prendiamo a riferimento dieci atleti: x_1, x_2, \dots, x_{10}
- All'inizio tutti si muovono insieme, poi col passare del tempo emergono delle differenze tra loro... e le differenze aumentano nel tempo, in modo non regolare
- Se li ho «scelti bene», quei dieci sono rappresentativi dei centomila



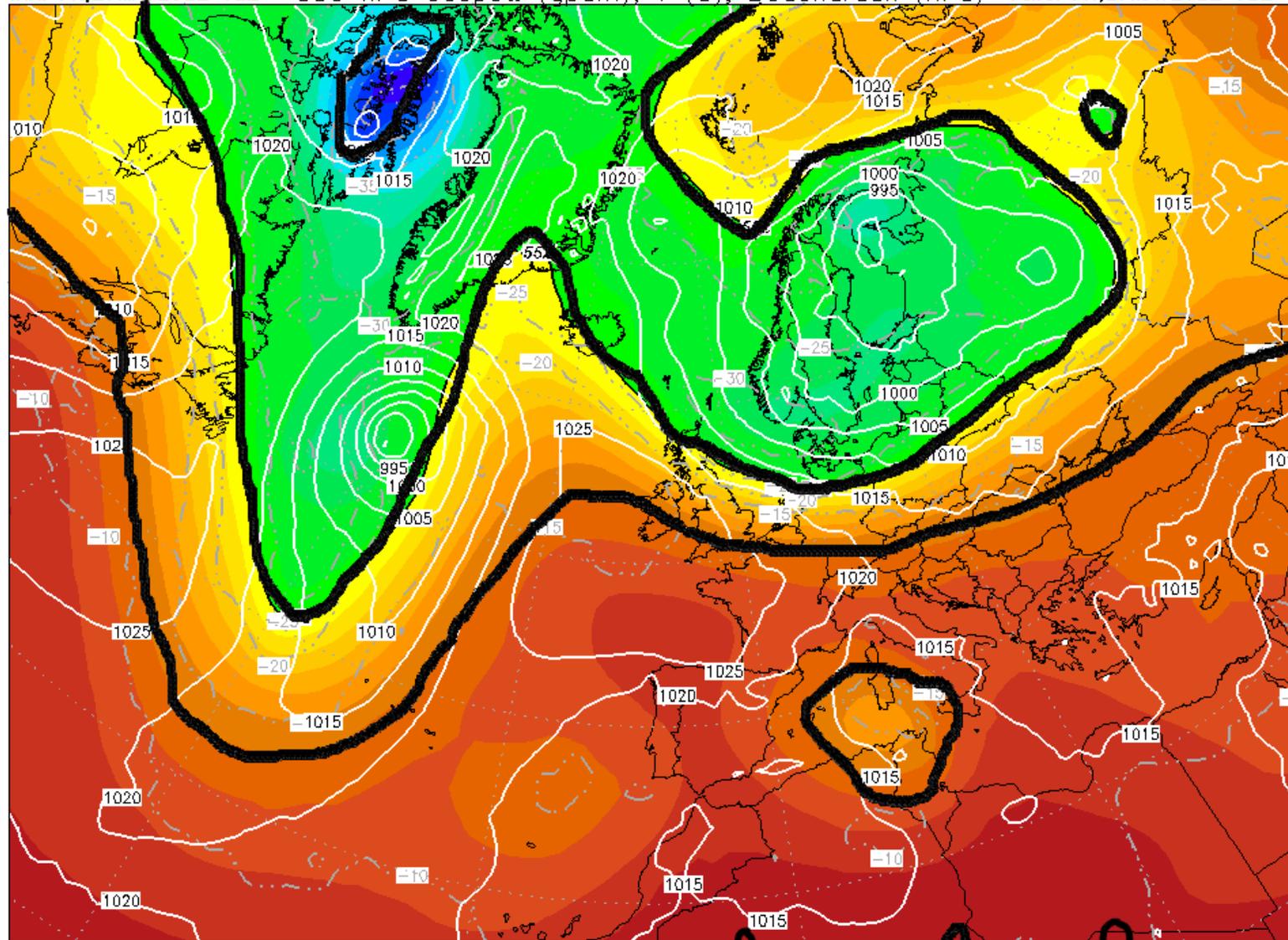
E quindi? Ecco la previsione di un modello per 10 giorni



- Linee bianche: pressione (isobare al livello del mare)
- Linee nere e colori: altezza di geopotenziale a 500 hPa (in pratica, la quota a cui la pressione è 500 hPa, circa la metà rispetto al valore a livello del mare)

Prendiamo tante simulazioni «simili» e guardiamole

Init: Fri,27MAY2022 12Z 500 hPa Geopot. (gpm), T (C), Bodendruck (hPa) Valid: Fri,27MAY2022 12Z



Data: GFS OPER 0.250°
WWW.WETTERZENTRALE.DE

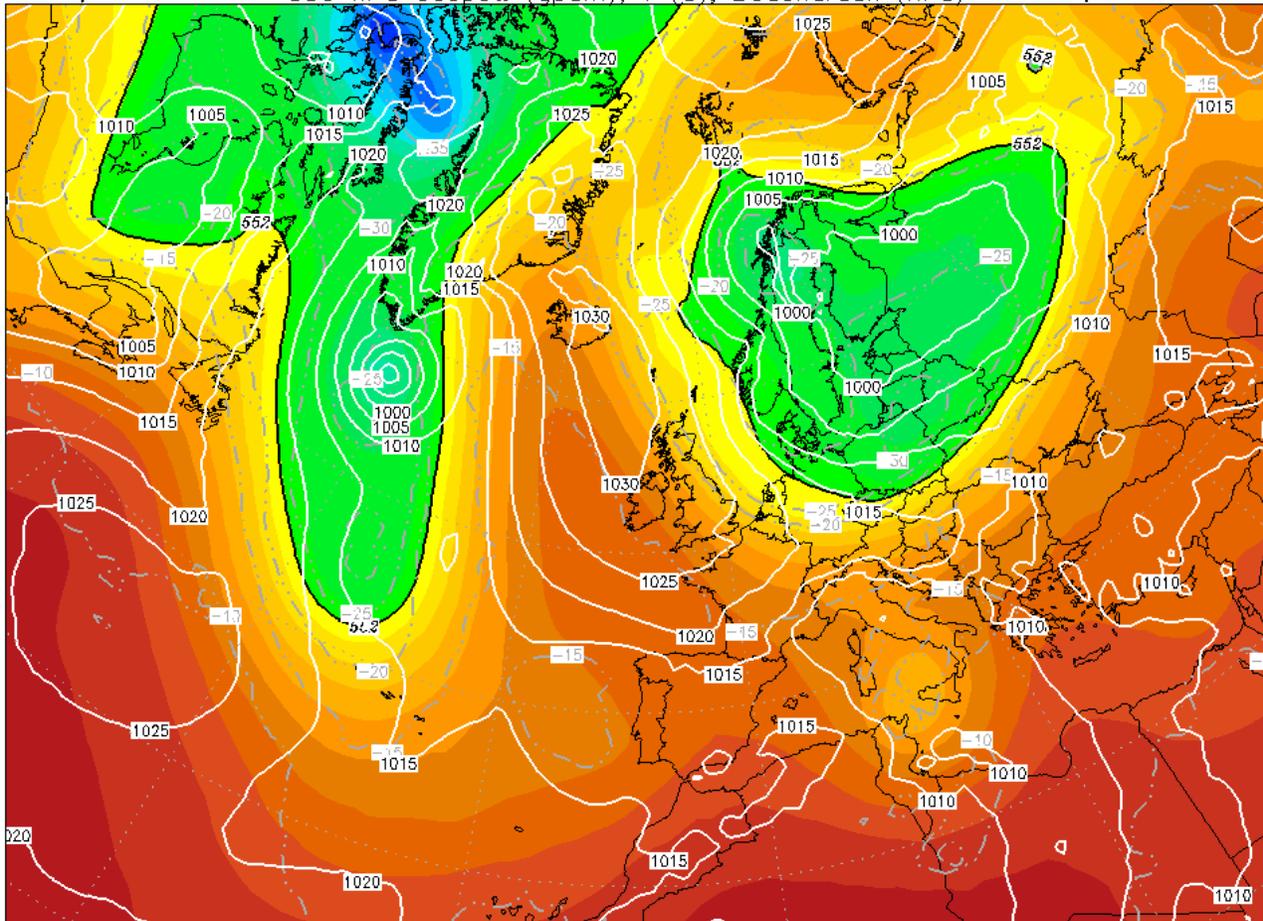
476 480 484 488 492 496 500 504 508 512 516 520 524 528 532 536 540 544 548 552 556 560 564 568 572 576 580 584 588 592 596 600

- Il metodo si chiama **EPS (Ensemble Prediction System)**
- L'IFS di ECMWF usa 50 simulazioni, il GFS ne usa 30
- Qui ho scelto GFS perché è più facile ottenerne le mappe (da www.wetterzentrale.de)
- Per farlo, selezioniamo **alcune isoipse** e confrontiamole tra le varie simulazioni
- Scegliamo le isoipse:
 - ✓ 5160 m
 - ✓ 5520 m
 - ✓ 5760 m

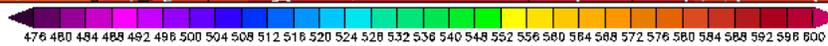
All'inizio sono molto ravvicinate ...

Secondo giorno

Init: Fri,27MAY2022 12Z 500 hPa Geopot. (gpdm), T (C), Bodendruck (hPa) Valid: Sat,28MAY2022 12Z



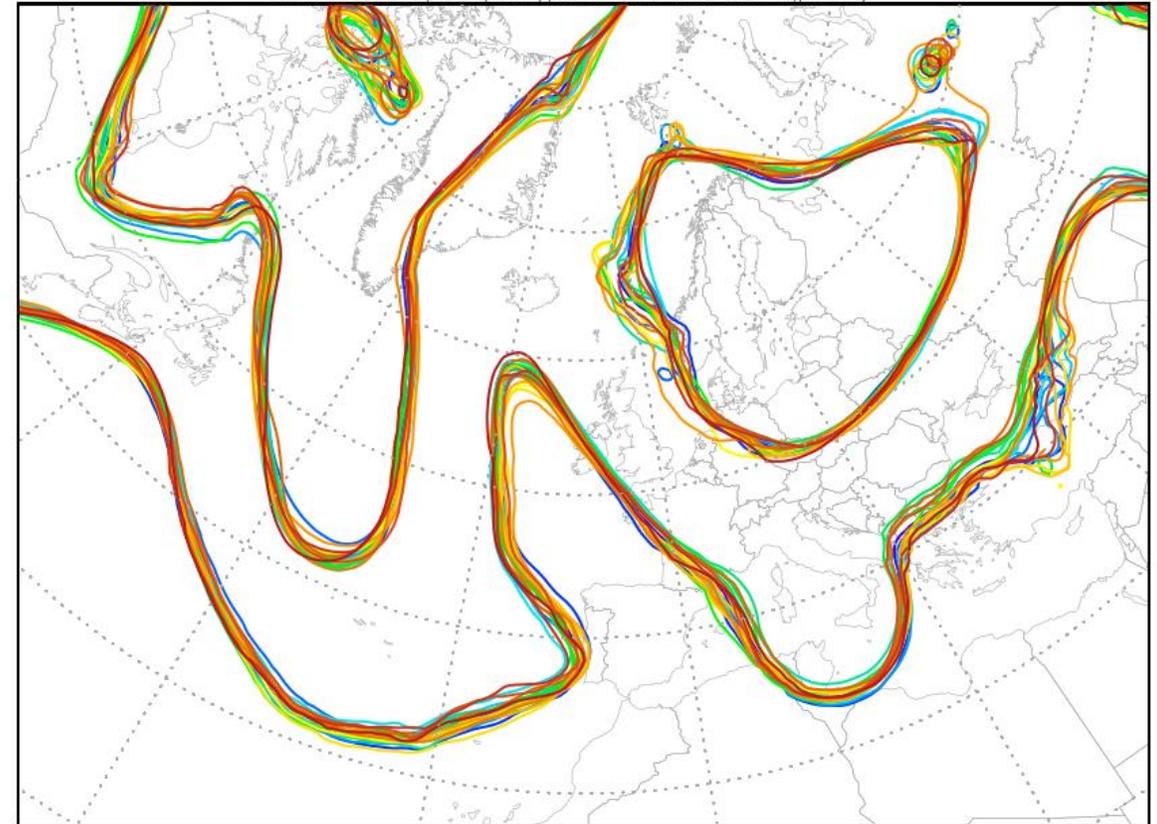
Data: GFS OPER 0.250°
WWW.WETTERZENTRALE.DE



Valid: Sat,28MAY2022 12Z

Init: Fri,27MAY2022 12Z

500 hPa Geopot. (Isohypsen: 516 552 576 gpdam)



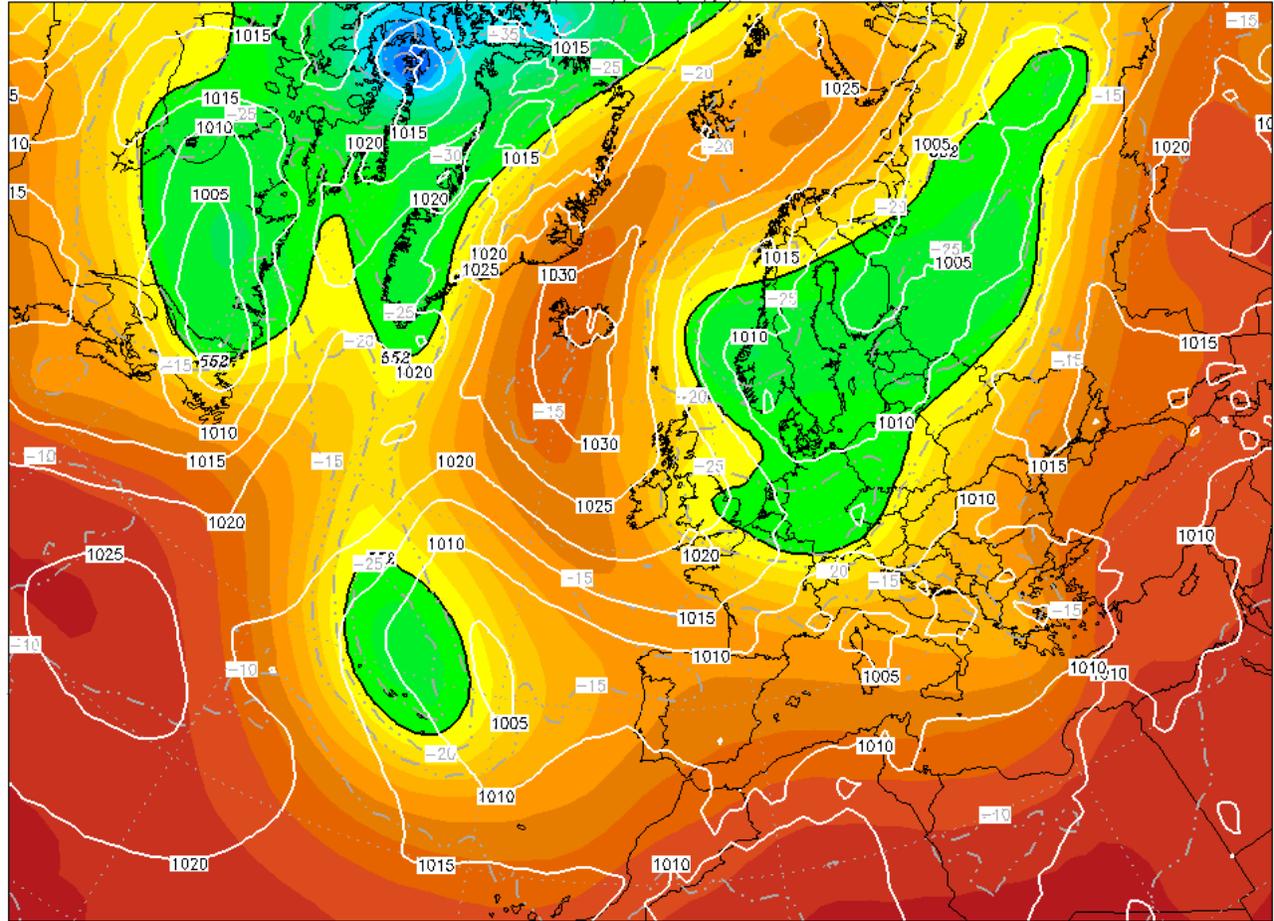
Data: GFS ENS
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

... poi tendono gradualmente ad allargarsi ...

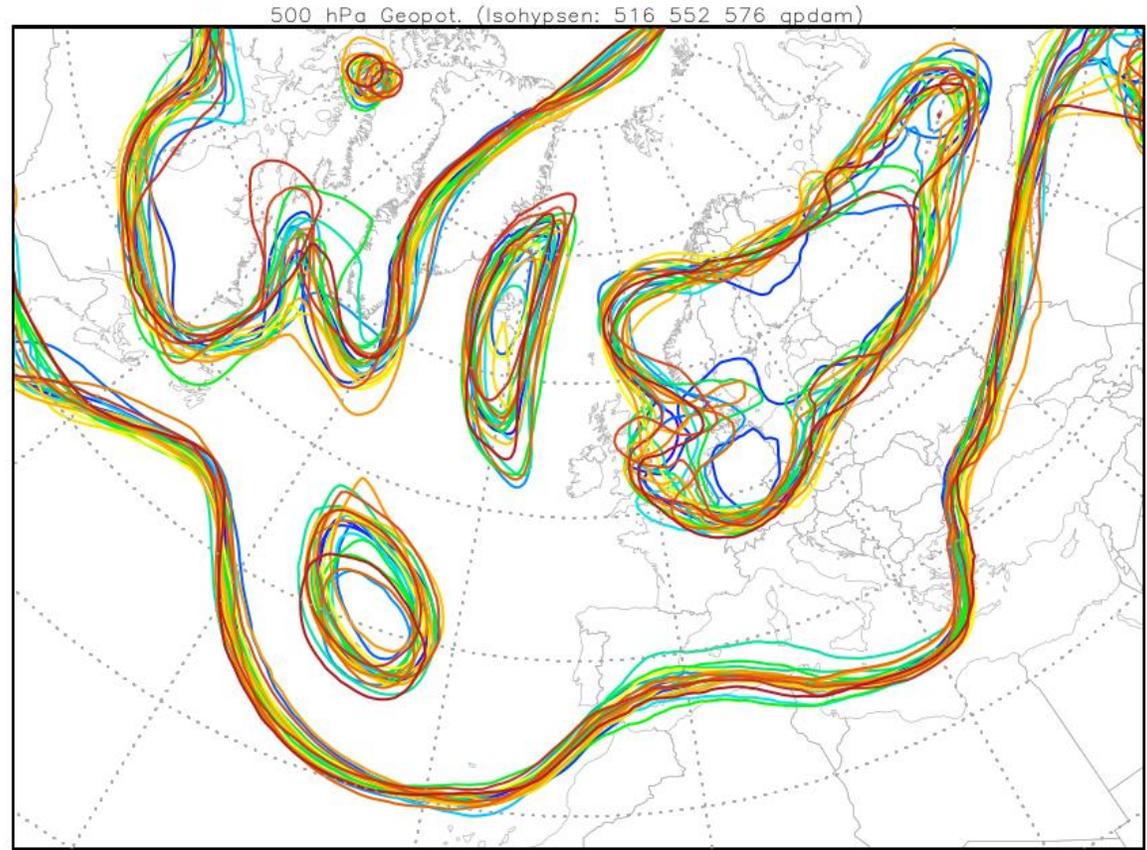
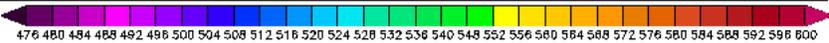
Terzo giorno

Init: Fri,27MAY2022 12Z 500 hPa Geopot. (gpdm), T (C), Bodendruck (hPa) Valid: Sun,29MAY2022 12Z Init: Fri,27MAY2022 12Z

Valid: Sun,29MAY2022 12Z



Data: GFS OPER 0.250°
WWW.WETTERZENTRALE.DE

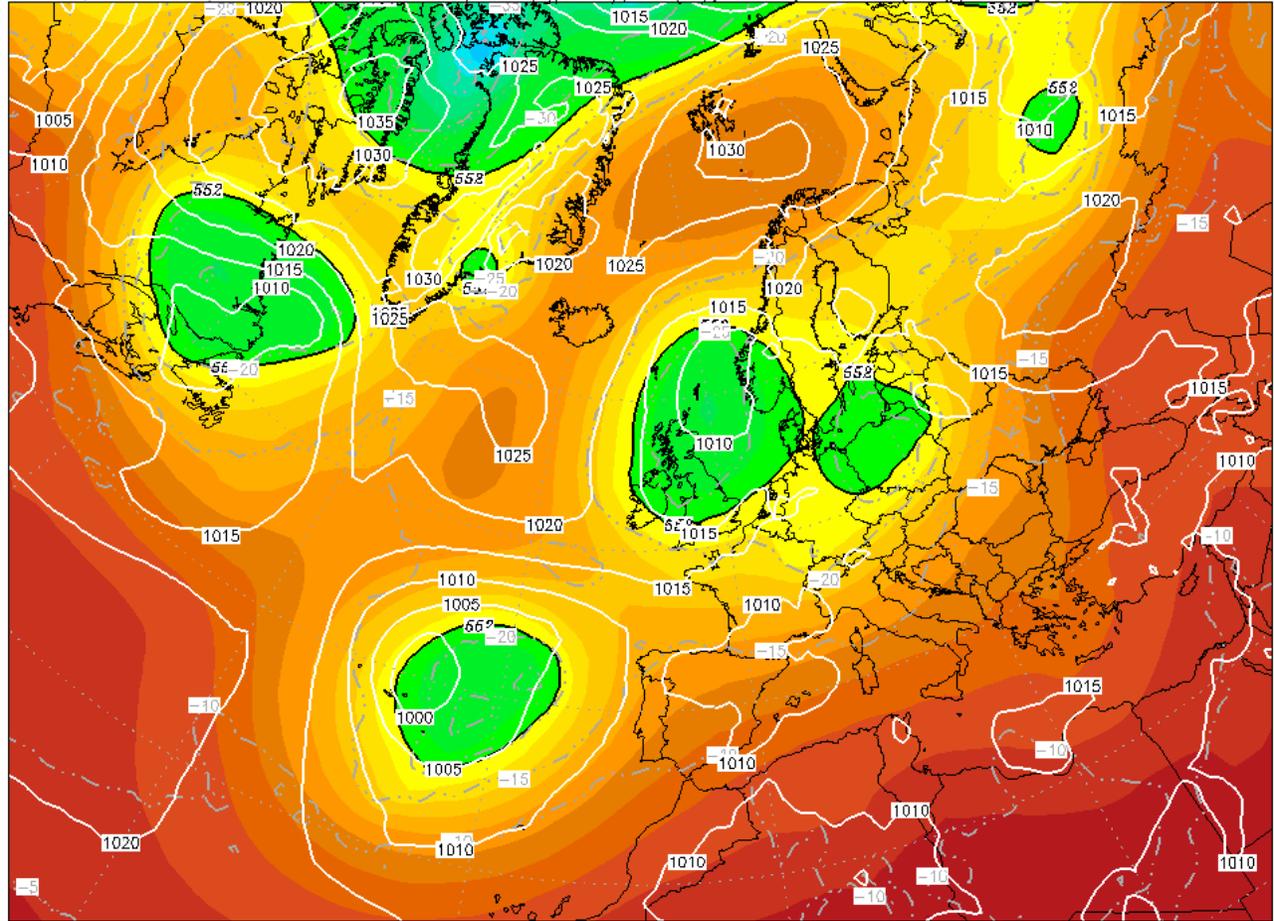


Data: GFS ENS
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

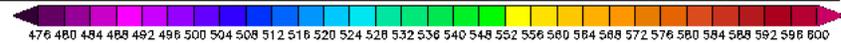
... sempre di più ...

Quarto giorno

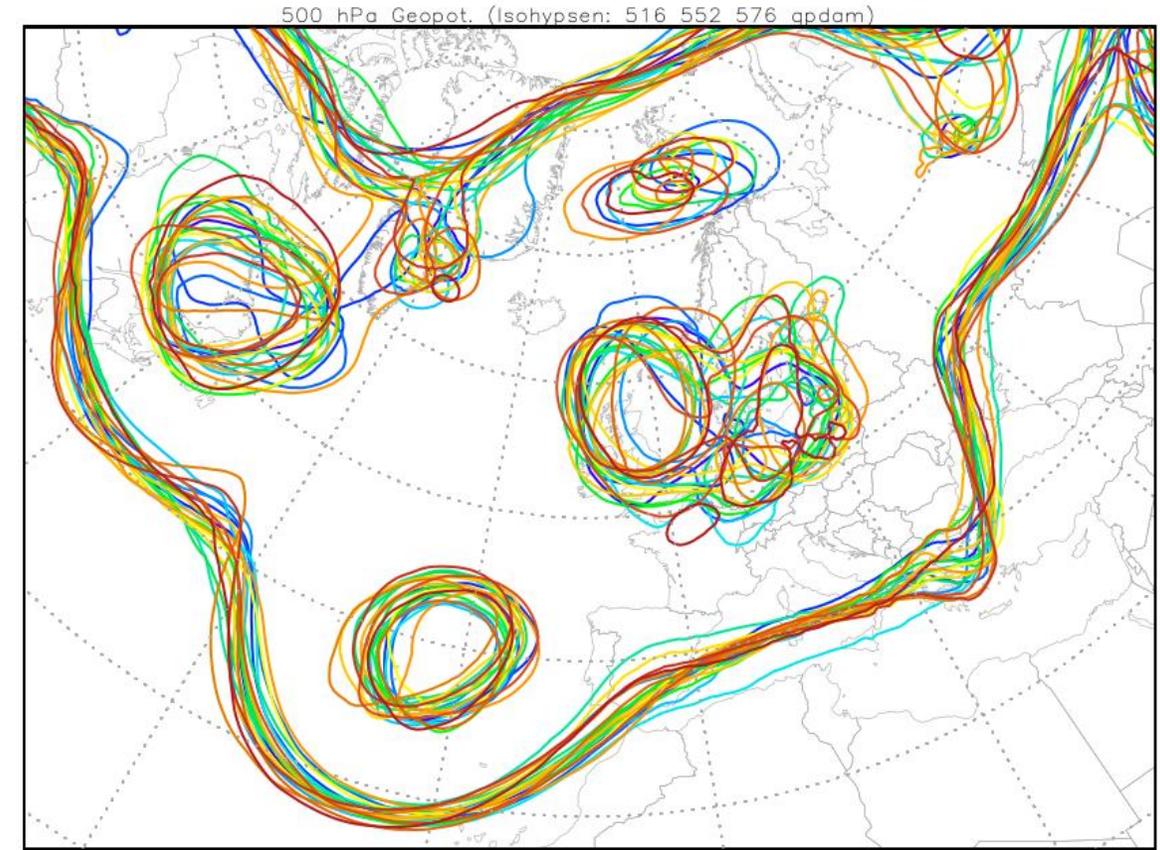
Init: Fri,27MAY2022 12Z 500 hPa Geopot. (gpm), T (C), Bodendruck (hPa) Valid: Mon,30MAY2022 12Z



Data: GFS OPER 0.250°
WWW.WETTERZENTRALE.DE



Valid: Mon,30MAY2022 12Z

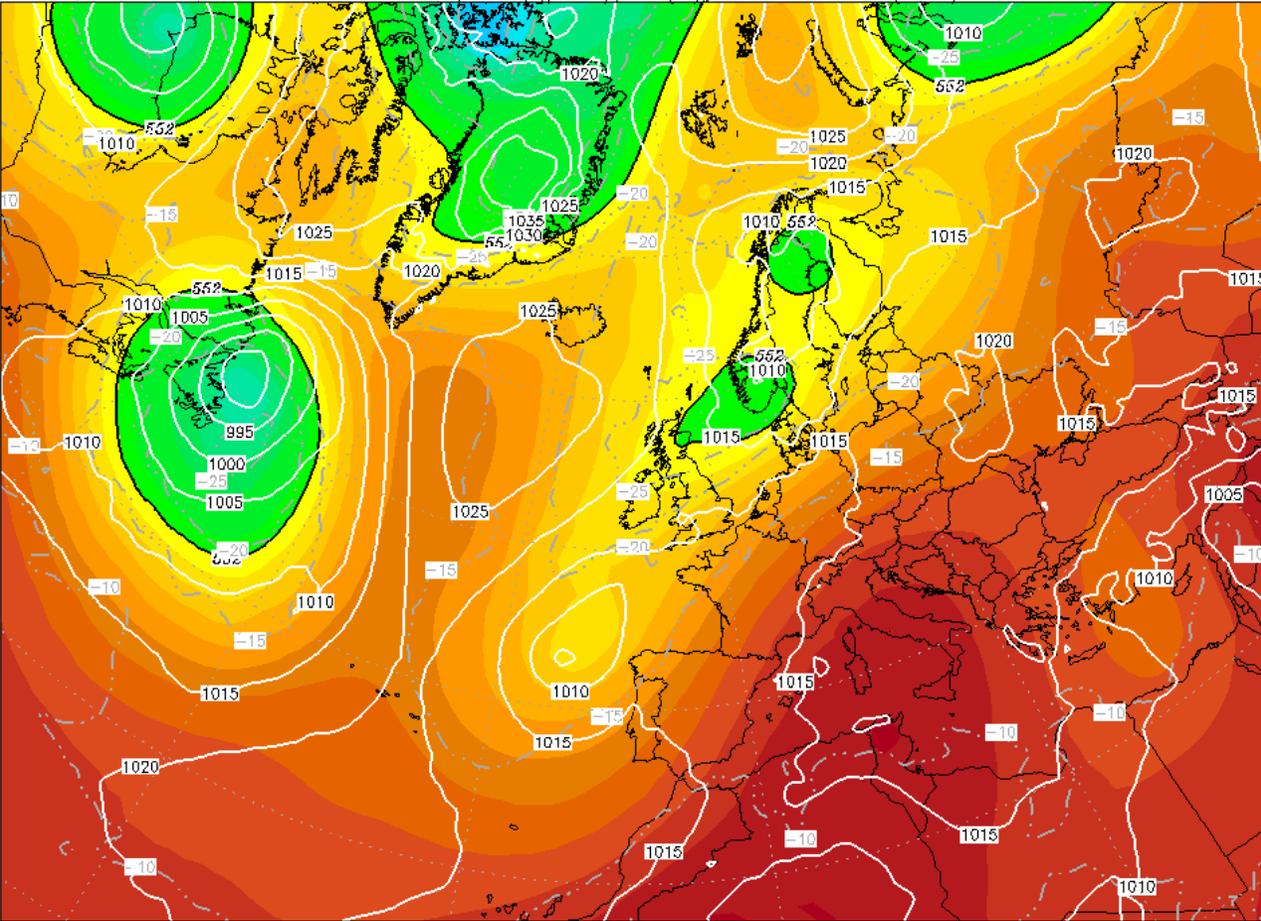


Data: GFS ENS
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

... fino a descrivere situazioni meteorologiche diverse

Settimo giorno

Init: Fri,27MAY2022 12Z 500 hPa Geopot. (gpdm), T (C), Bodendruck (hPa) Valid: Thu,02JUN2022 12Z



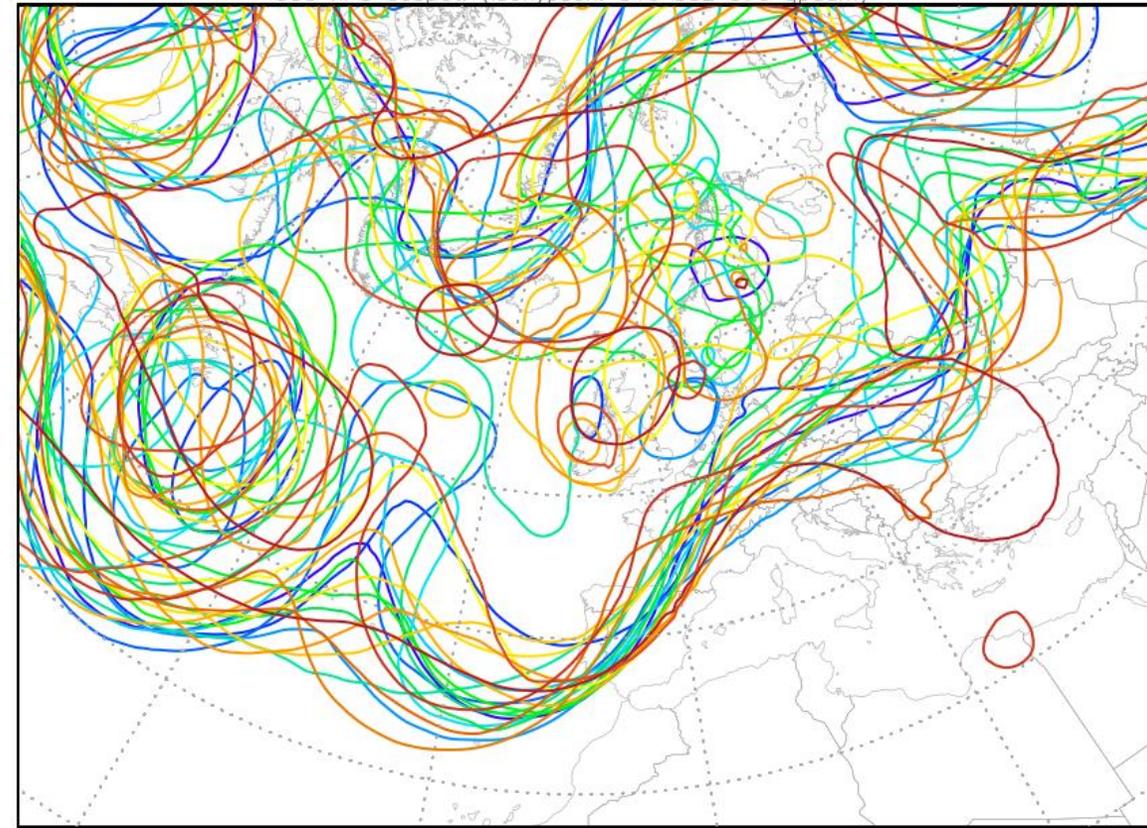
Data: GFS OPER 0.250°
WWW.WETTERZENTRALE.DE



Valid: Thu,02JUN2022 12Z

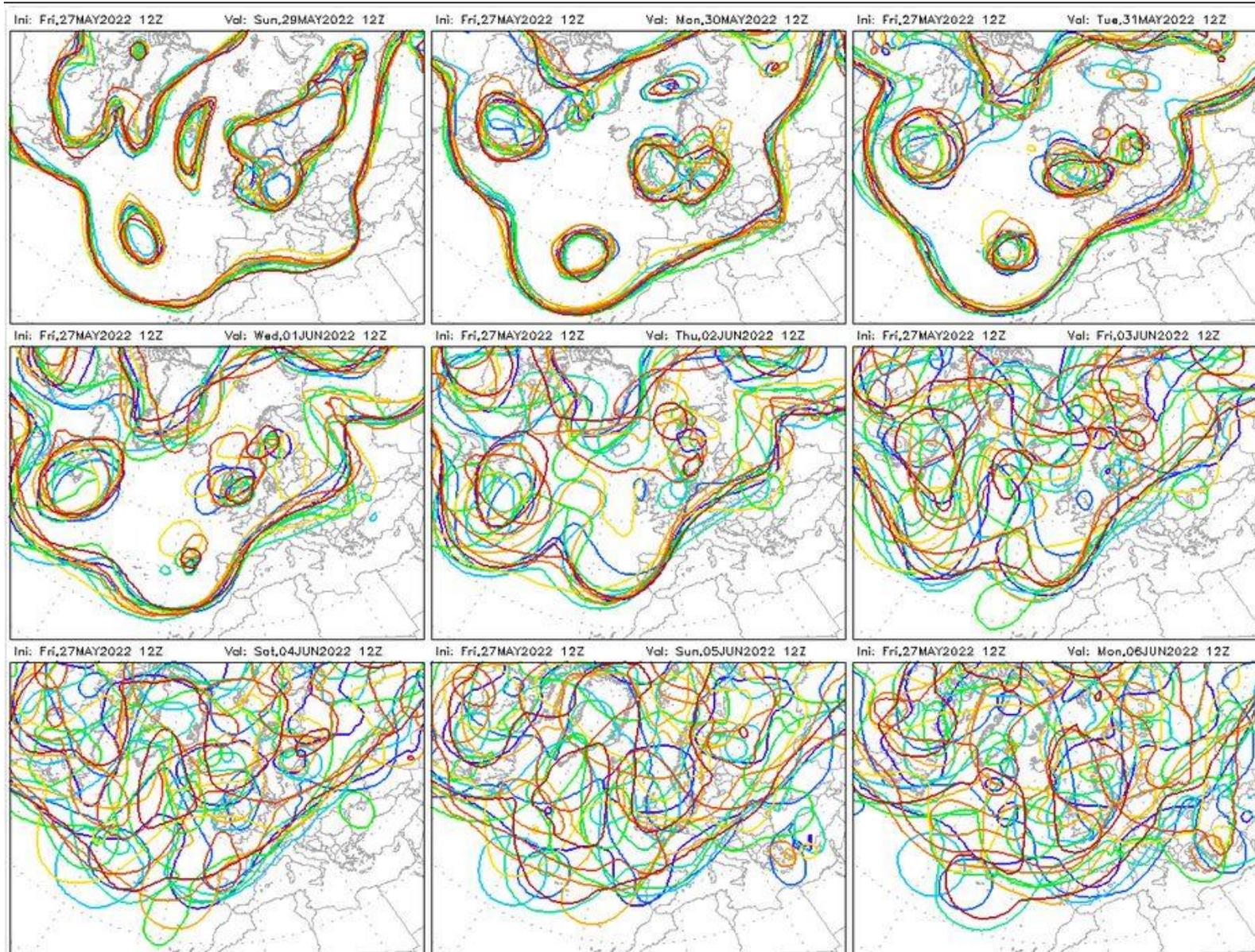
Init: Fri,27MAY2022 12Z

500 hPa Geopot. (Isohypsen: 516 552 576 gpdm)

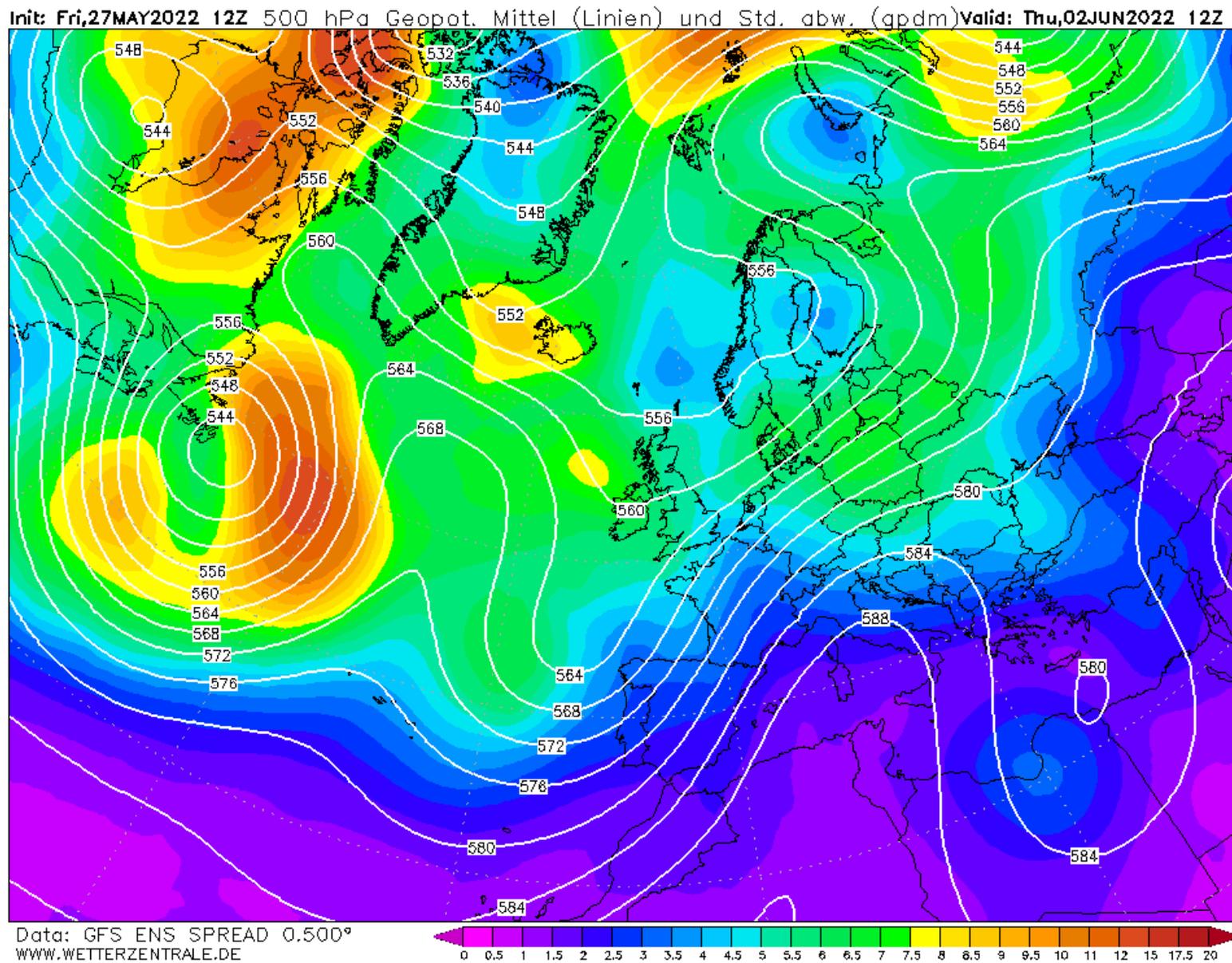


Data: GFS ENS
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

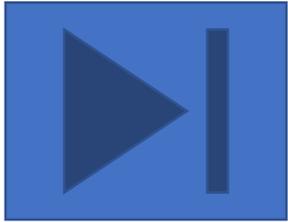
Ecco gli spaghetti-plot per 10 giorni di previsione



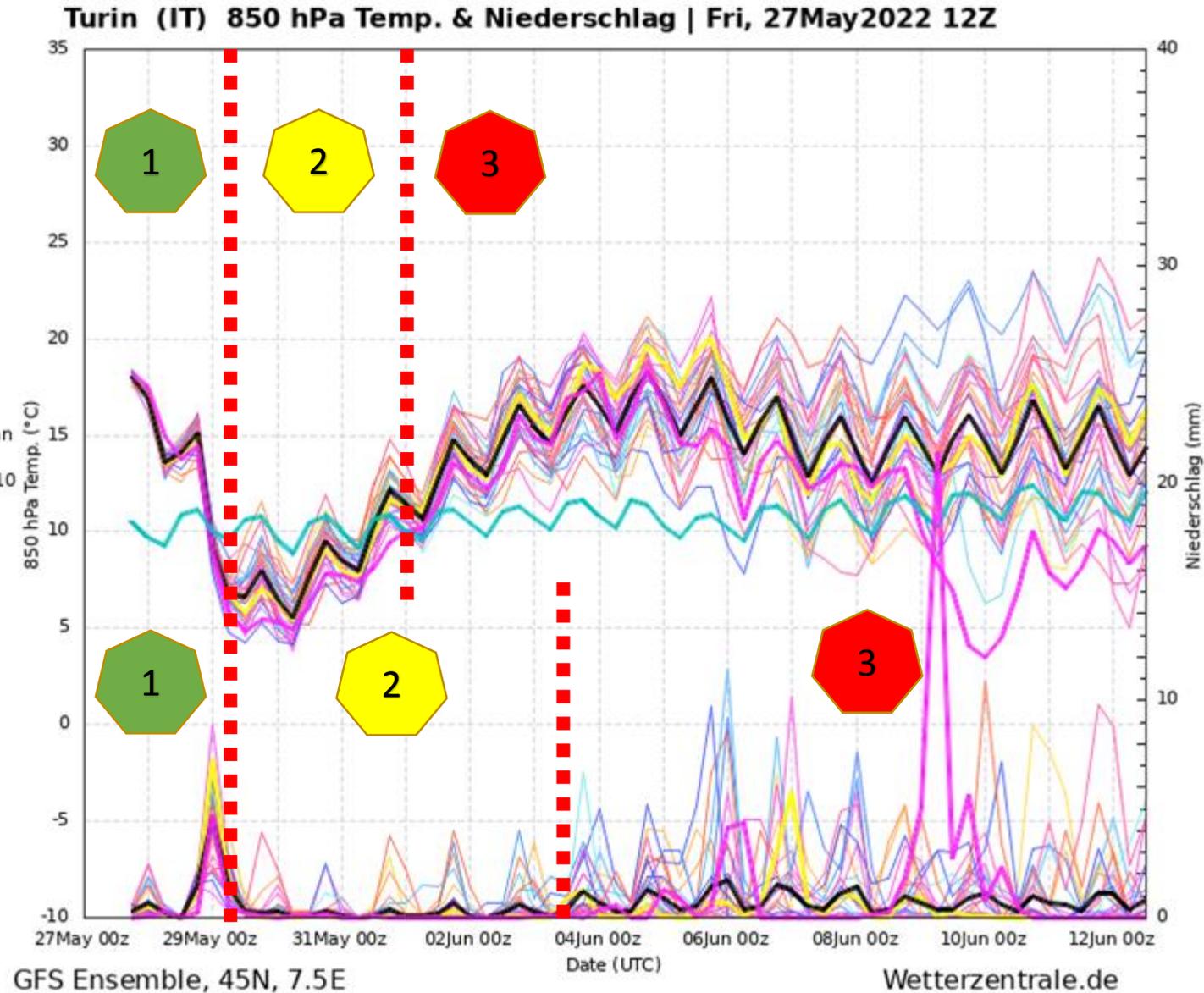
L'affidabilità della previsione possiamo vederla anche così



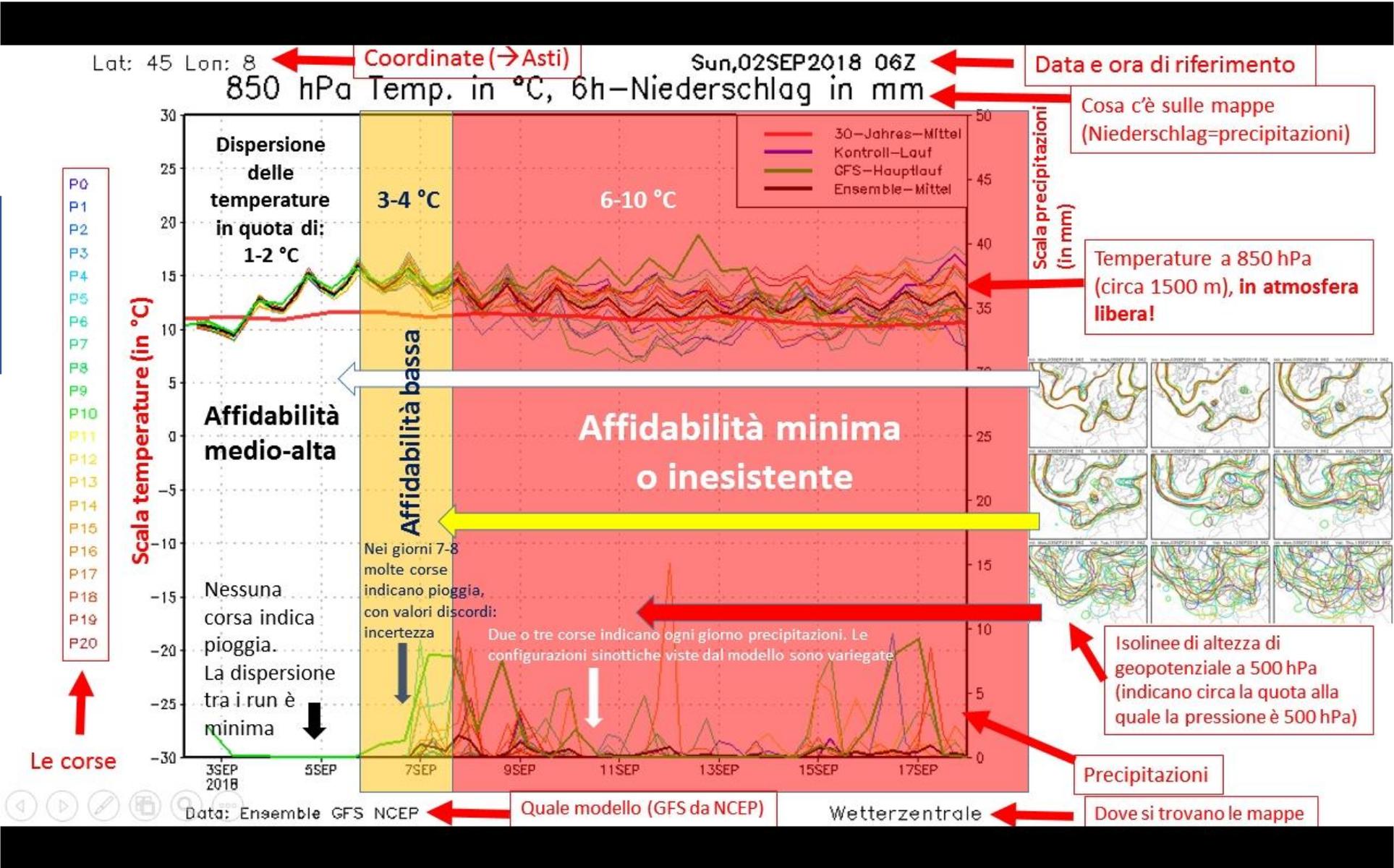
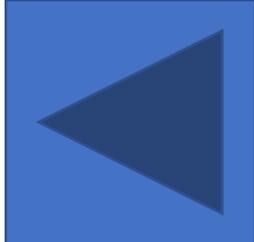
O anche così... e in questo caso...



1. Affidabile
2. Poco affidabile
3. Per nulla affidabile



Ecco come interpretare questa mappa



I limiti delle previsioni del tempo

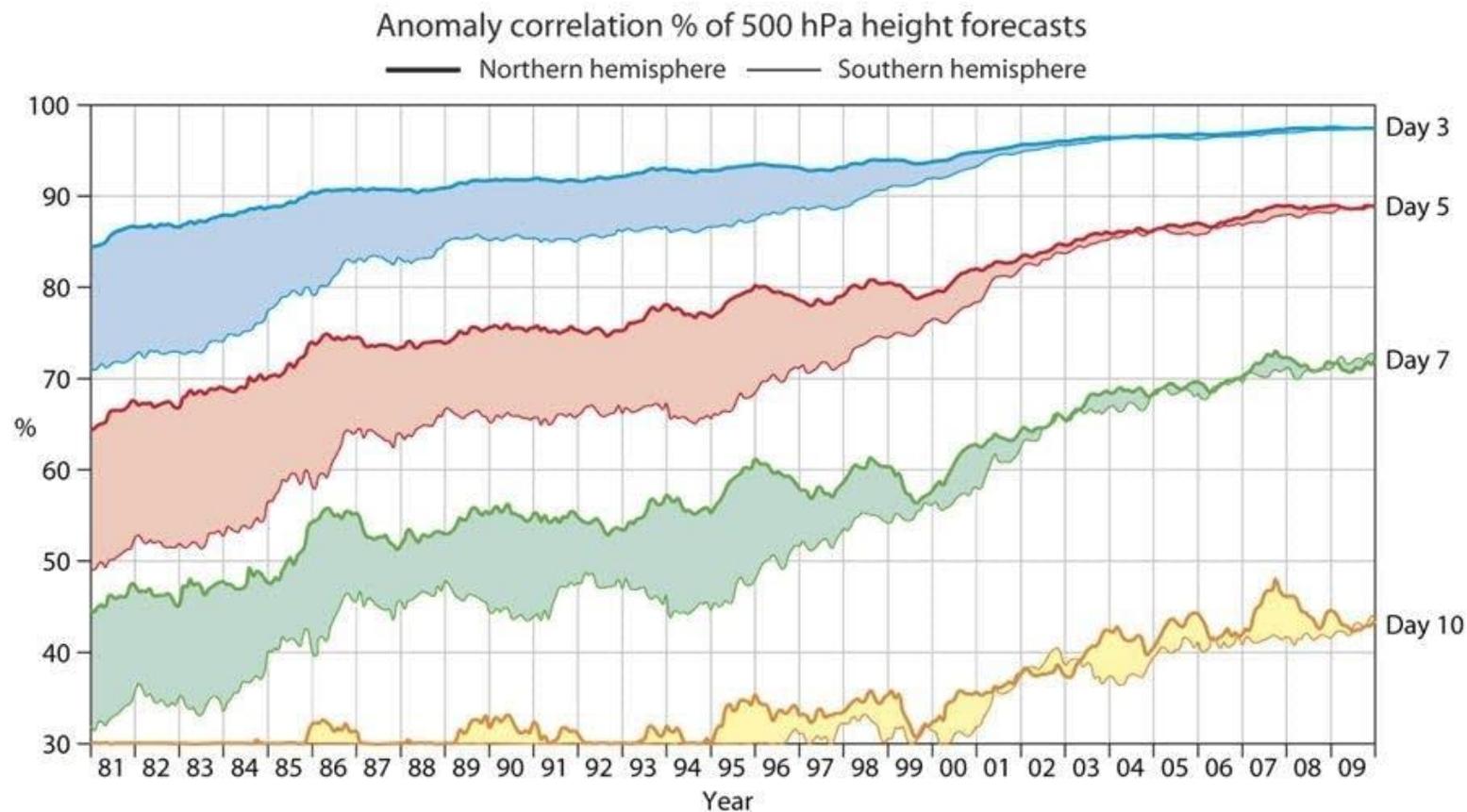
- Le previsioni del tempo hanno senso solo per pochi giorni, al più una settimana
- La prevedibilità è limitata dall'abilità del modello e dal numero di osservazioni inadeguate, ma anche se fossero perfette, il limite di predicibilità non supererebbe le due settimane (Ed Lorentz)
- Questo limite è una proprietà dell'atmosfera stessa, e non è un fallimento della meteorologia!

Ma allora le app meteo sui cellulari?

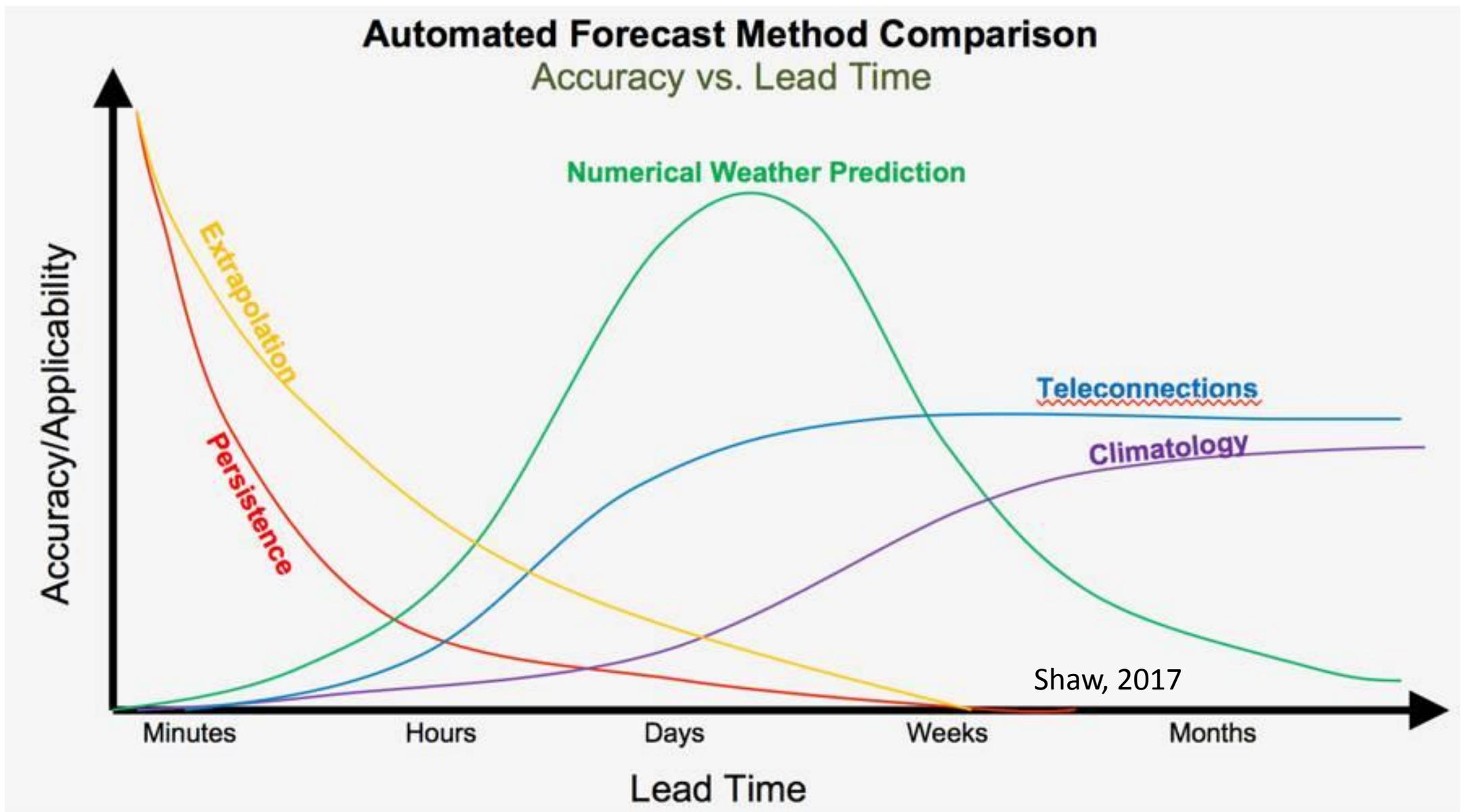


Del resto, i modelli migliorano...

Evolution of ECMWF NWP forecast skill



... anche se ...

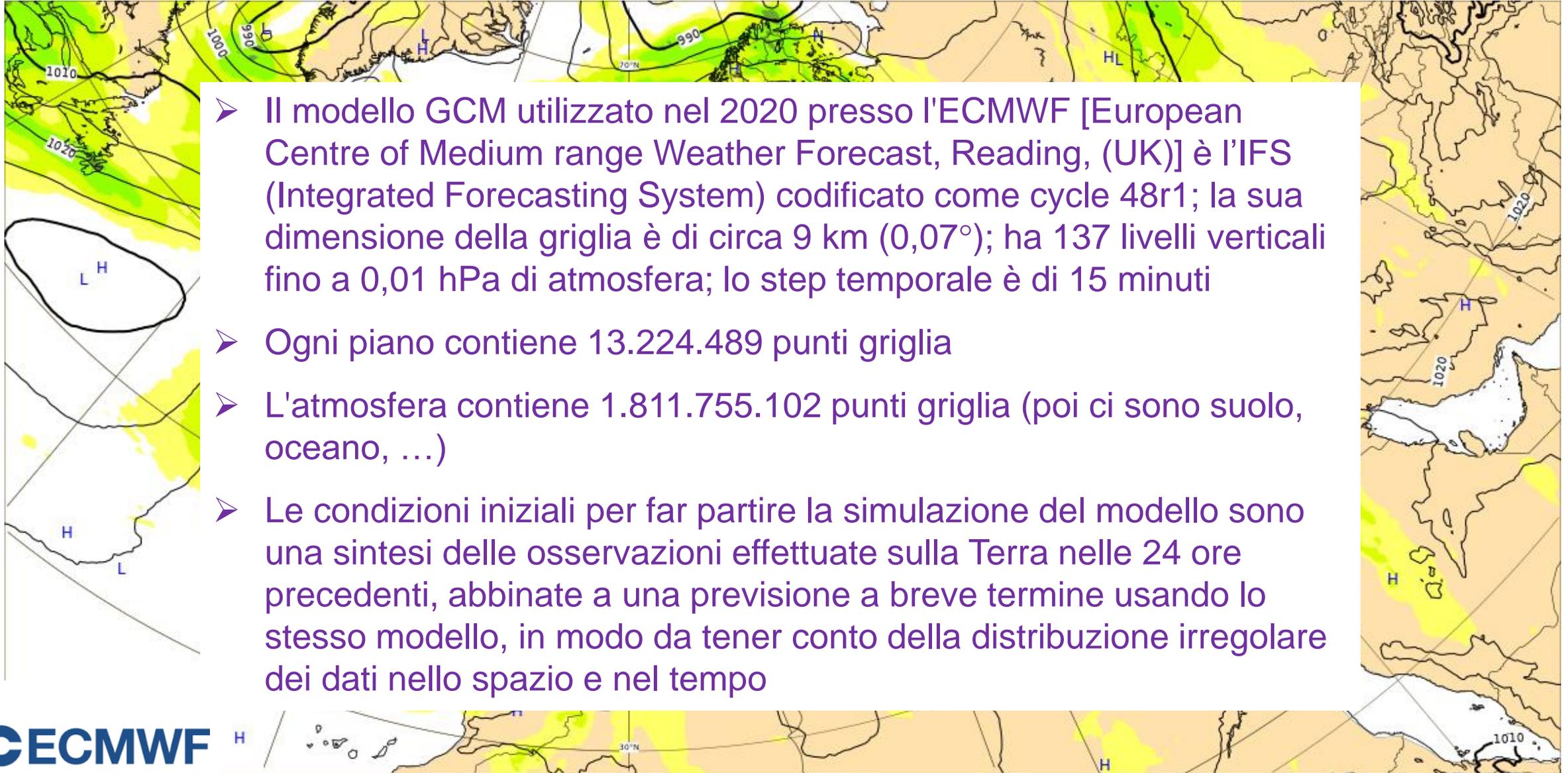


A scenic landscape featuring a calm lake in the foreground that perfectly reflects the sky and the surrounding environment. The sky is a mix of deep blues and vibrant oranges, suggesting a sunset or sunrise. In the middle ground, there is a dense forest of evergreen trees. The background consists of rugged mountains with some rocky peaks and patches of green and yellow vegetation. The overall mood is peaceful and majestic.

Grazie!!!

Avete una terra è una fortuna...

Il modello GCM IFS-ECMWF (1)



- Il modello GCM utilizzato nel 2020 presso l'ECMWF [European Centre of Medium range Weather Forecast, Reading, (UK)] è l'IFS (Integrated Forecasting System) codificato come cycle 48r1; la sua dimensione della griglia è di circa 9 km (0,07°); ha 137 livelli verticali fino a 0,01 hPa di atmosfera; lo step temporale è di 15 minuti
- Ogni piano contiene 13.224.489 punti griglia
- L'atmosfera contiene 1.811.755.102 punti griglia (poi ci sono suolo, oceano, ...)
- Le condizioni iniziali per far partire la simulazione del modello sono una sintesi delle osservazioni effettuate sulla Terra nelle 24 ore precedenti, abbinate a una previsione a breve termine usando lo stesso modello, in modo da tener conto della distribuzione irregolare dei dati nello spazio e nel tempo

Il modello GCM IFS-ECMWF (2)

- L'inizializzazione usa i dati di circa 78.000 stazioni (**assimilazione**), e la procedura è chiamata **optimum 4-D interpolation**
- Il numero di equazioni risolte dai modelli IFS ad ogni step temporale è **2.3 10^8** (230 milioni)
- Nel 2020, per fare una **previsione per 10 giorni servivano 4 10^{13} operazioni** (40.000 miliardi): un supercalcolatore in grado di eseguire 5 10^{11} operazioni/s necessitava di **3 ore di calcolo**
- A questo tempo vanno aggiunte le operazioni di **assimilazione** (per un **totale giornaliero di 4 10^{12} operazioni**)
- IFS/ECMWF gira ogni 6 ore (4 run al giorno)

