



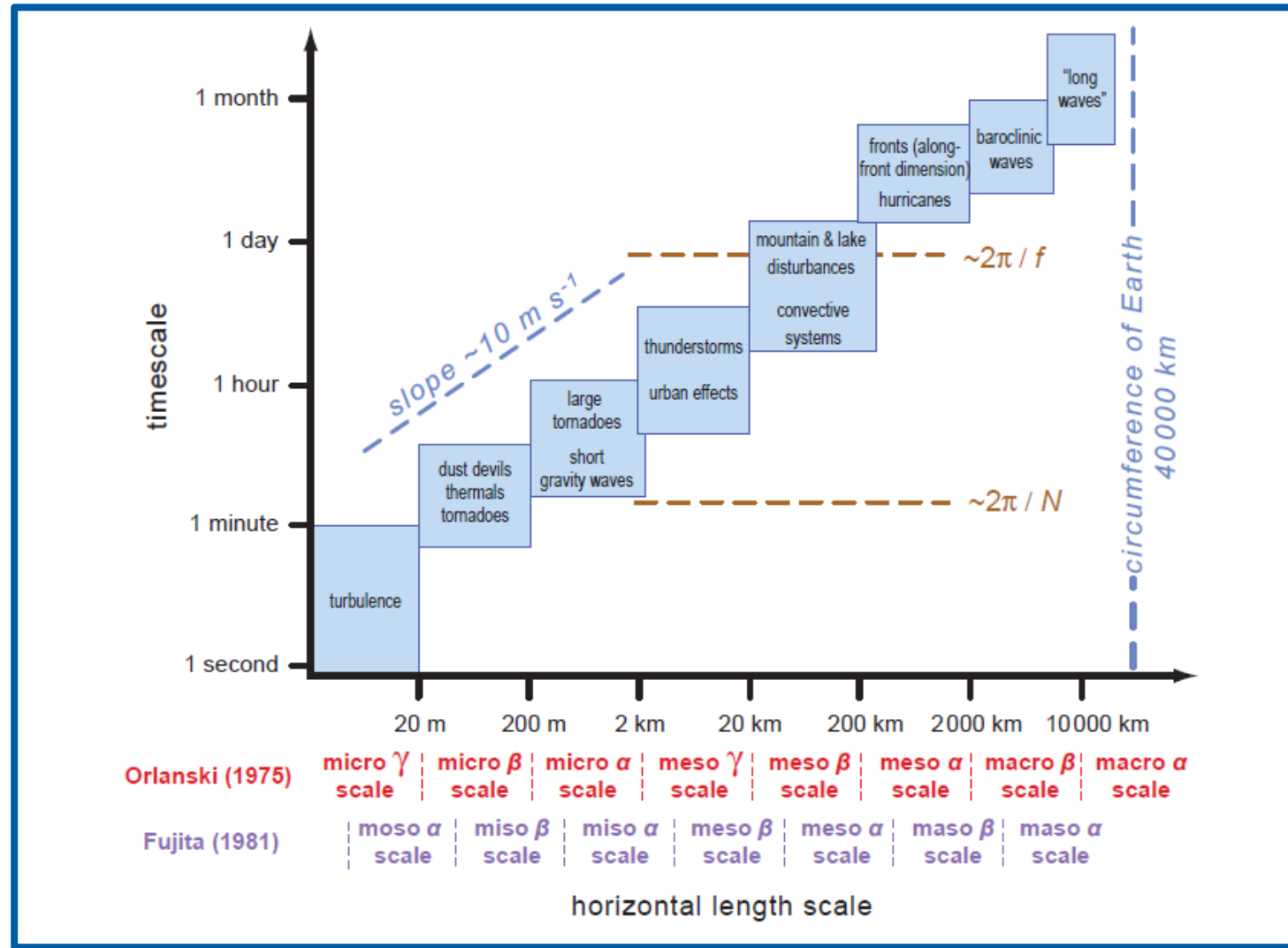
**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE**

MODELLI NUMERICI e SISTEMI DI RILEVAMENTO

Corso di Fisica dell'atmosfera
Termodinamica e processi alla mesoscala

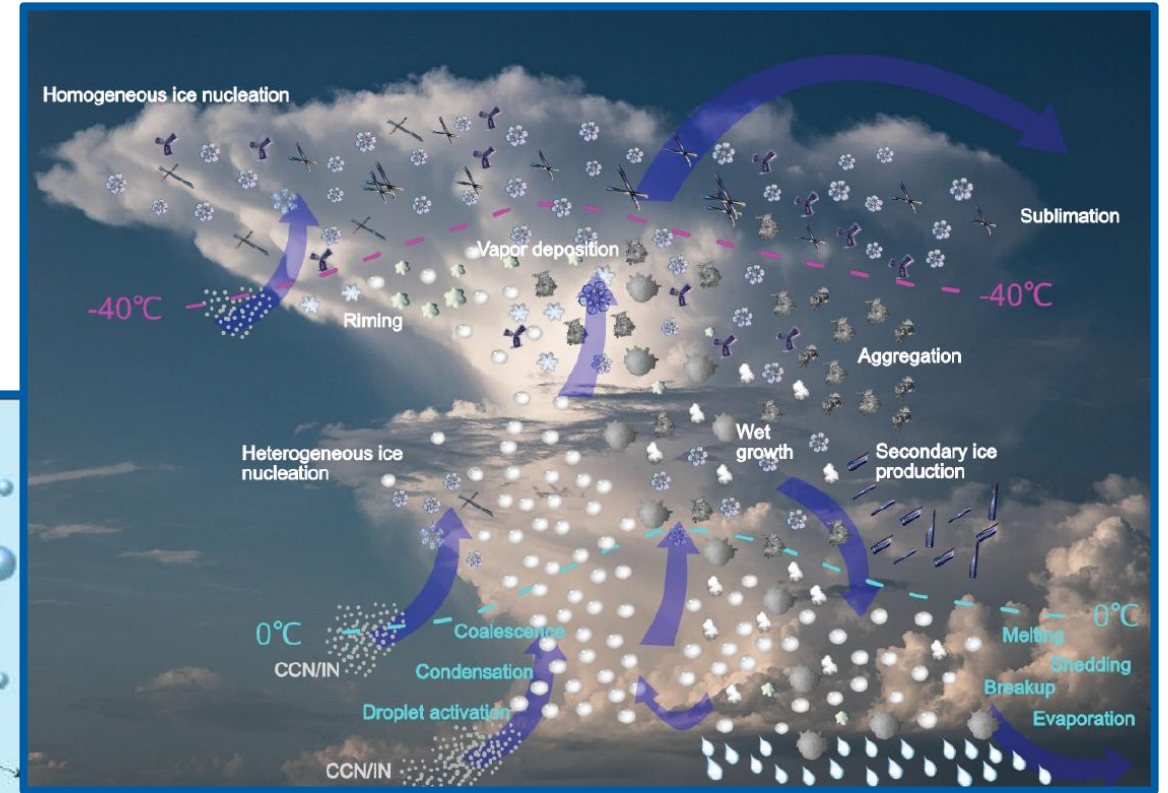
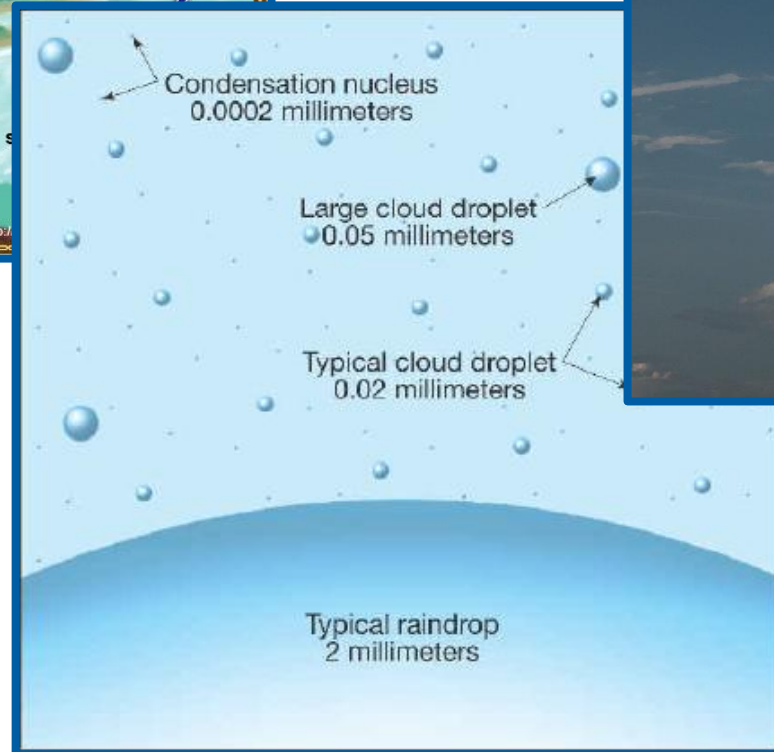
Dott. Francesco Sioni

Tempi e spazi

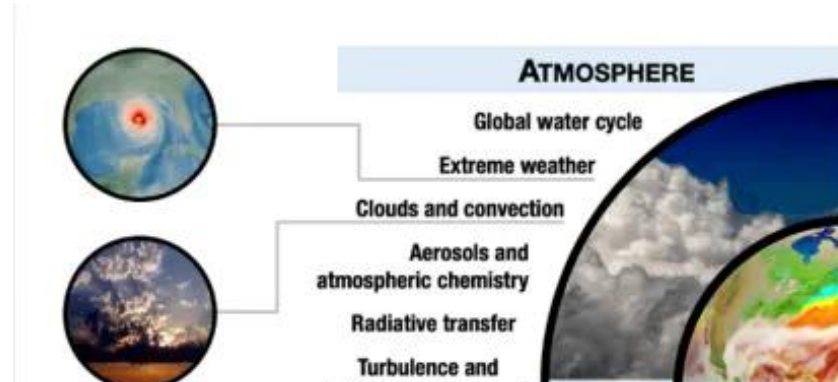


Markowski and Richardson, 2011

I processi in atmosfera



Il sistema Terra



[UCAR](#)

La scuola di meteorologia di Bergen

«The principal task of any meteorological institution of education and research must be to bridge the gap between the mathematician and practical man, that is, to make the weather man realize the value of a modest theoretical education, and to induce the theoretical man to take an occasional glance at the weather map.»

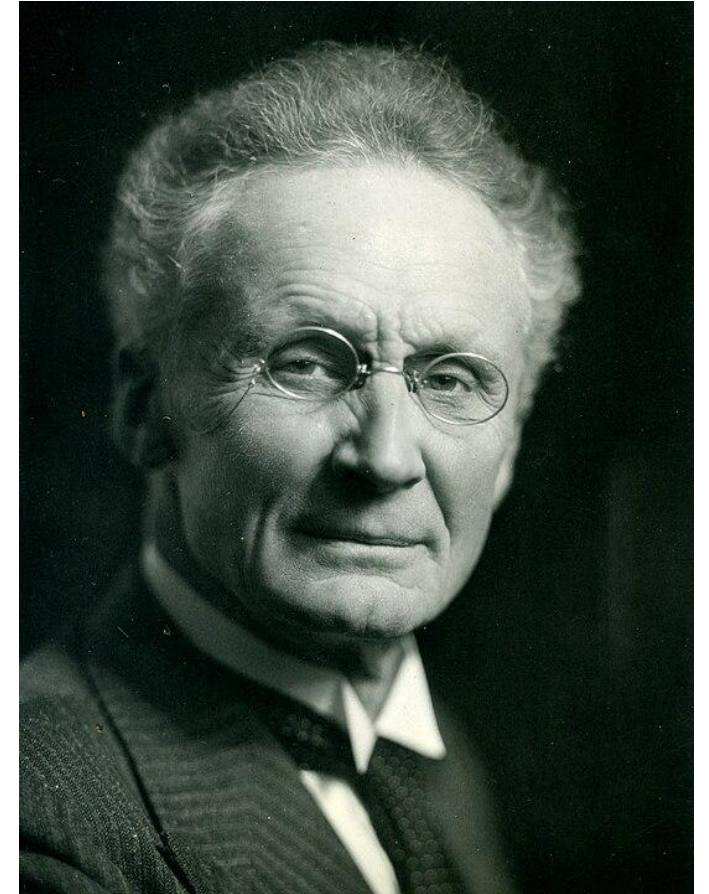
C.G. Rossby (1934) in Comments on Meteorological Research"



Bjerkenes – Manifesto della meteorologia (1904)

«Se è vero, come ritiene ogni scienziato, che gli stati successivi dell'atmosfera derivano da quelli precedenti secondo leggi fisiche, si concorderà sul fatto che le condizioni necessarie e sufficienti per una soluzione razionale del problema delle previsioni meteorologiche sono le seguenti:

- *Avere una conoscenza elevata dello stato attuale dell'atmosfera (**stato DIAGNOSTICO**)*
- *Conoscere le leggi della fisica che permettono di capire come da uno stato dell'atmosfera si passi a quello successivo nel tempo. Ovvero conoscere come l'atmosfera evolve nel tempo (**stato PREDITTIVO**)»*



Max Margules – Sulla relazione tra le variazioni barometriche e l'equazione di continuità (1904)

- Studia la variazione della pressione nel tempo
- $\frac{\partial p_s}{\partial t} = - \int_0^{\infty} \nabla \cdot (\rho v) dz$
- Margules dimostrò nel 1906 che il calcolo è molto soggetto a errori e può fornire risultati assurdi
- Per ottenere una stima accurata della tendenza della pressione, sarebbe necessario conoscere i venti con una precisione ben oltre il limite pratico
- Egli concluse che qualsiasi tentativo di prevedere i cambiamenti sinottici con questo metodo era destinato al fallimento.
- Conclude che qualsiasi tentativo di prevedere il tempo era «immorale e dannoso per la reputazione di un meteorologo».

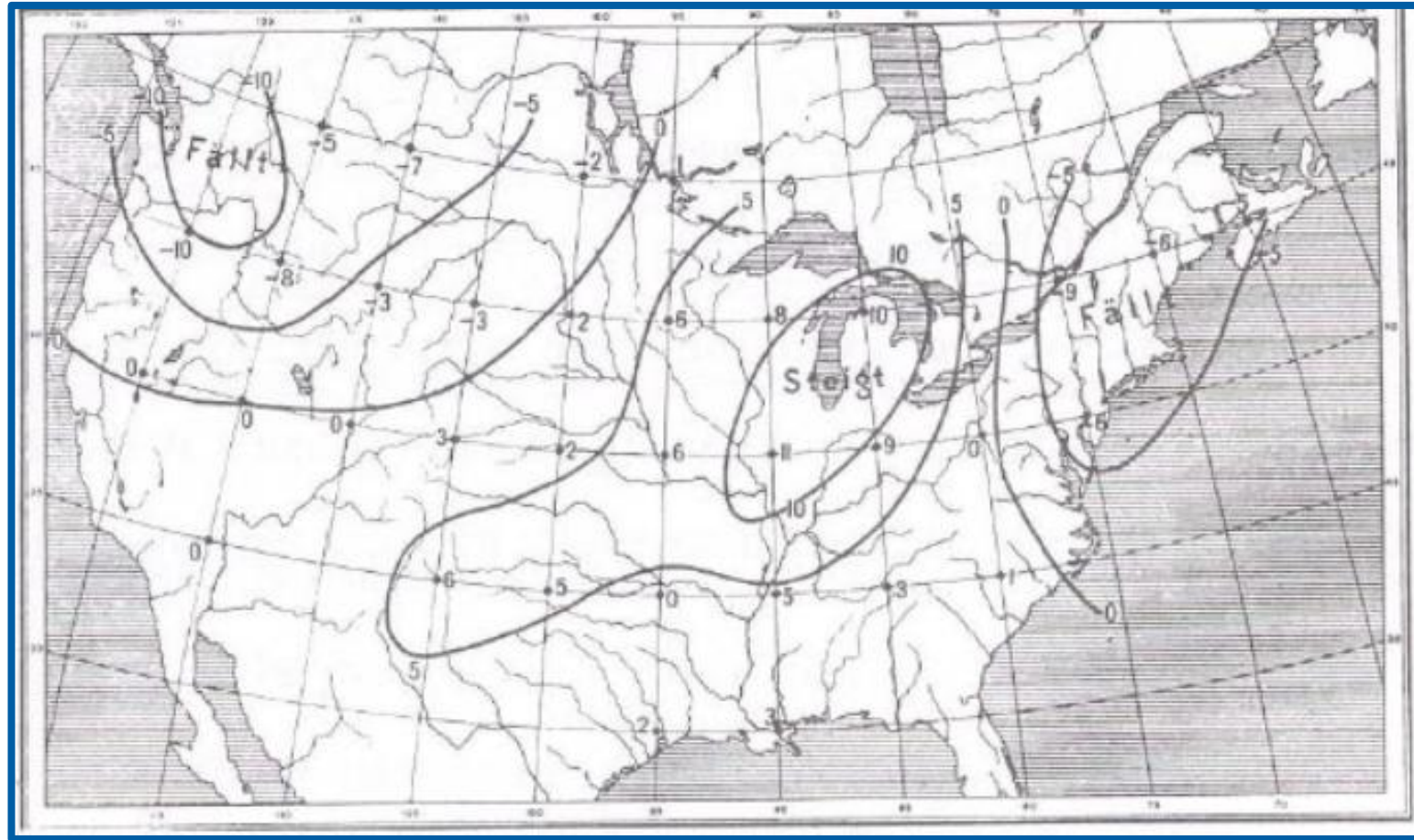


Felix Maria Exner – Primo tentativo di previsione della pressione (1904)

- Exner vuole verificare se Margules ha ragione e tenta il calcolo diretto sperando di ottenere buoni risultati con dati di buona qualità
- Exner lavora con dati osservativi reali su un reticolo europeo molto sparso. Calcola numericamente le derivate spaziali del campo di vento usando differenze finite su questi punti, e integra verticalmente usando i pochi livelli disponibili (sostanzialmente superficie e un livello in quota).
- Si ottiene una prima previsione realistica

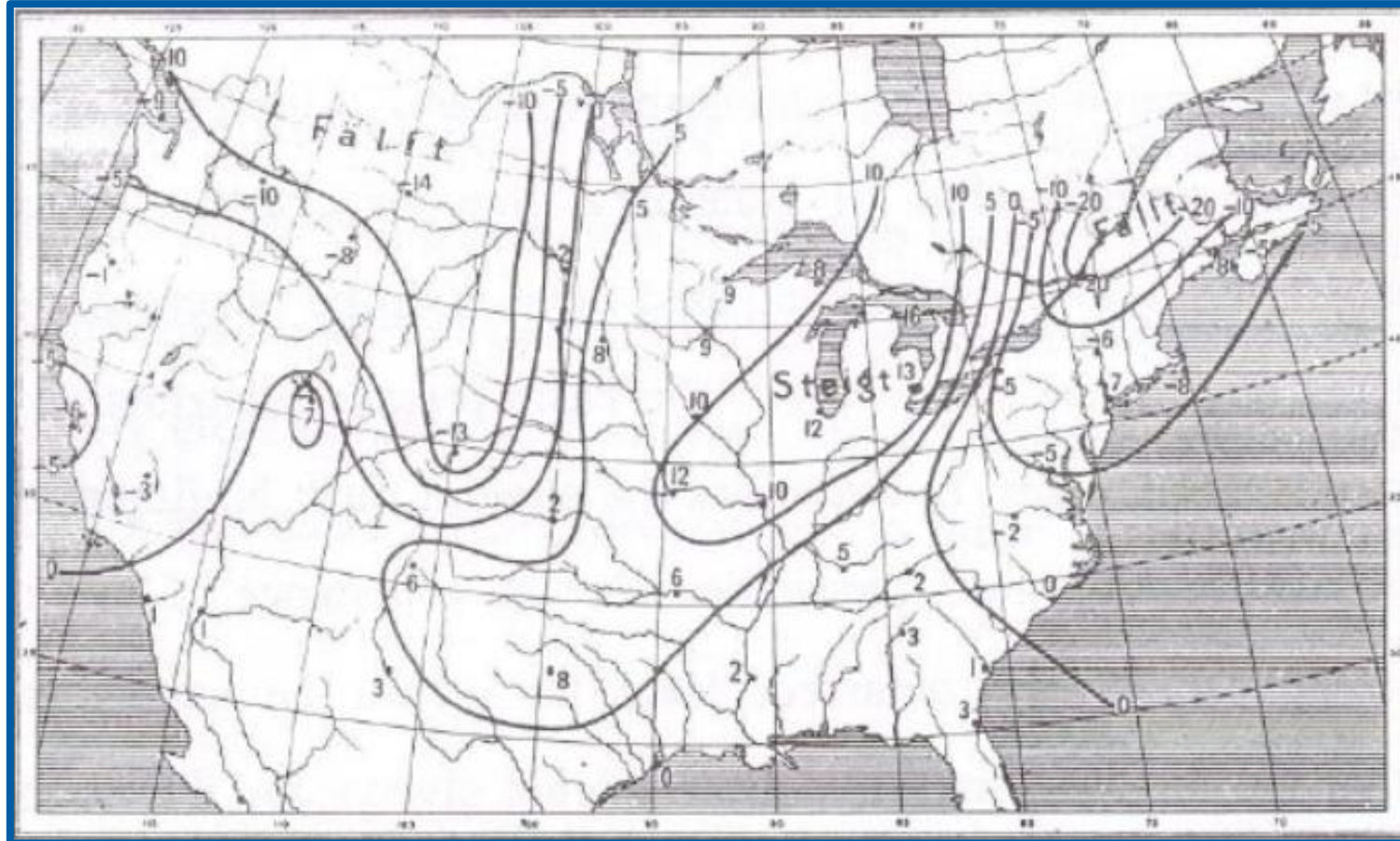


Felix Maria Exner – Primo tentativo di previsione della pressione (1904)



Variazione della pressione (in centinaia di pollice) **PREVISTA** tra le 20 e le 24 del 3 Gennaio 1895

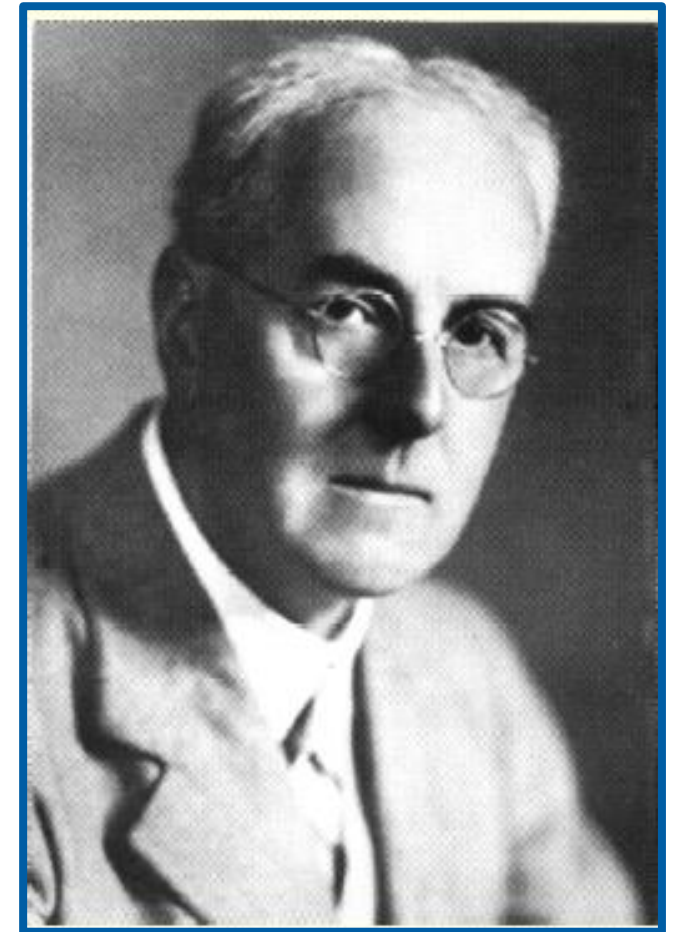
Felix Maria Exner – Primo tentativo di previsione della pressione (1904)



Variazione della pressione (in centinaia di pollice) **OSSERVATA** tra le 20 e le 24 del 3 Gennaio 1895

Lewis Fry Richardson – Applicazione numerica delle previsioni (1910)

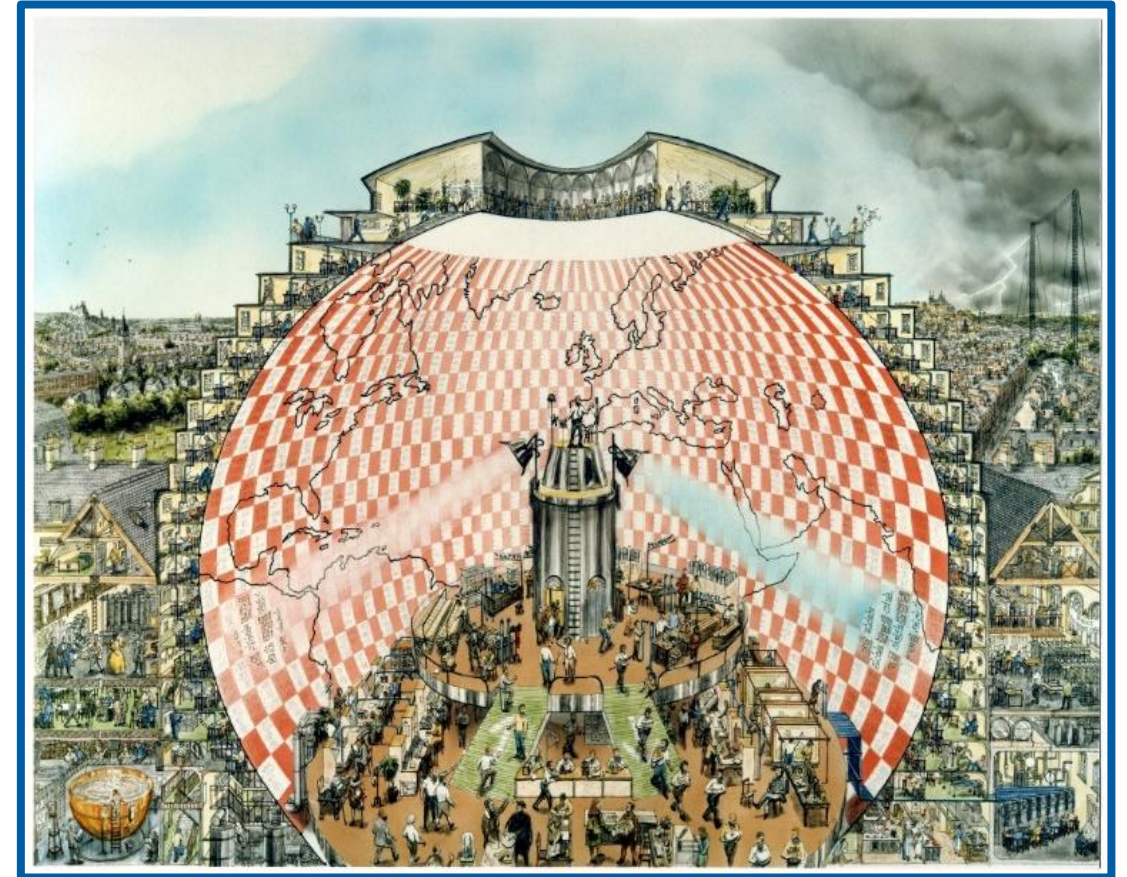
- Nel 1922 pubblica *Weather Prediction by Numerical Process* in cui ipotizza la necessità di risolvere numericamente e integralmente le equazioni del moto
- Nel 1910 effettua il primo tentativo con questo metodo (a mano ovviamente)
- Cerca di prevedere la variazione di pressione in 6 ore in un punto usando le osservazioni.
- A differenza di Exner usa le equazioni primitive complete. Divide l'atmosfera in 5 strati verticali e usa un reticolo orizzontale con celle di circa 200 km di lato centrate sull'Europa centrale
- Prevede una variazione di **146 hPa in 6 ore!** 🤖
- Il problema non era nel metodo ma nell'uso dei dati: *il campo di vento e il campo di pressione reali hanno sempre piccole inconsistenze rispetto al bilanciamento geostrofico esatto. Queste inconsistenze, eccitano fortemente le onde di gravità nelle equazioni primitive, producendo oscillazioni di pressione enormi e rapide che dominano le tendenze a breve termine ma non hanno alcun significato meteorologico.*



La fantastica fabbrica di previsioni secondo Richardson

In *Weather Prediction by Numerical Process* descrive anche:

- Edificio enorme con venti piani, di forma sferica e con una vasta camera centrale.
- Sui muri ci dev'essere una mappa del globo divisa in celle rosse (pressione) e bianche (venti)
- 64000 computer (calcolatori umani) all'opera contemporaneamente (anticipa il calcolo parallelo moderno)
- Il direttore delle operazioni è al centro e sfrutta dei fari per segnalare chi è troppo avanti con i conti (rosso) e chi invece è indietro (blu)

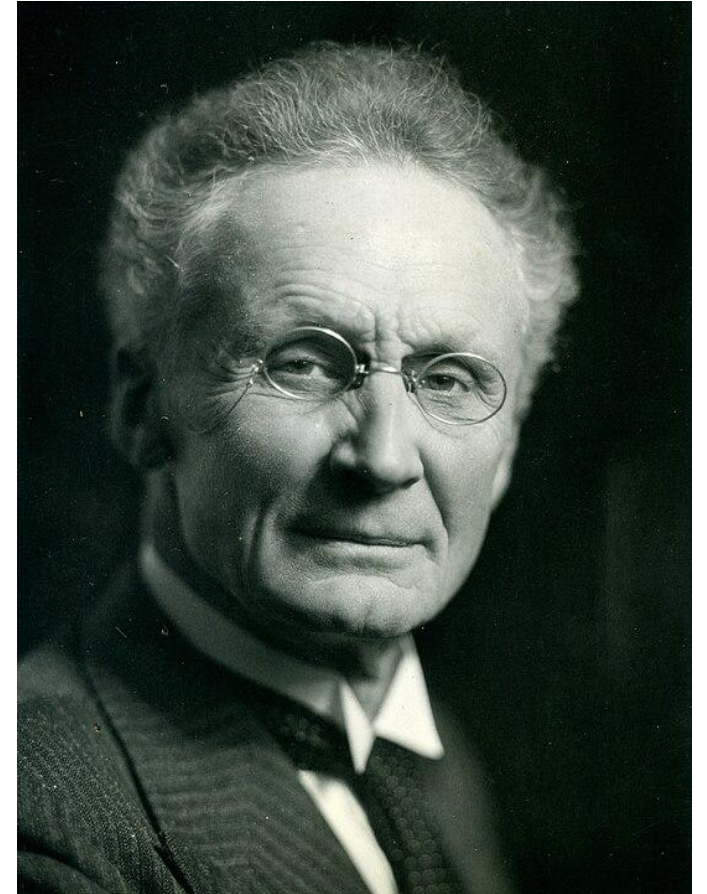


Stephen Conlin, "Weather Forecasting Factory"
(1986)

Bjerkenes – Meteorology as an exact science (1914)

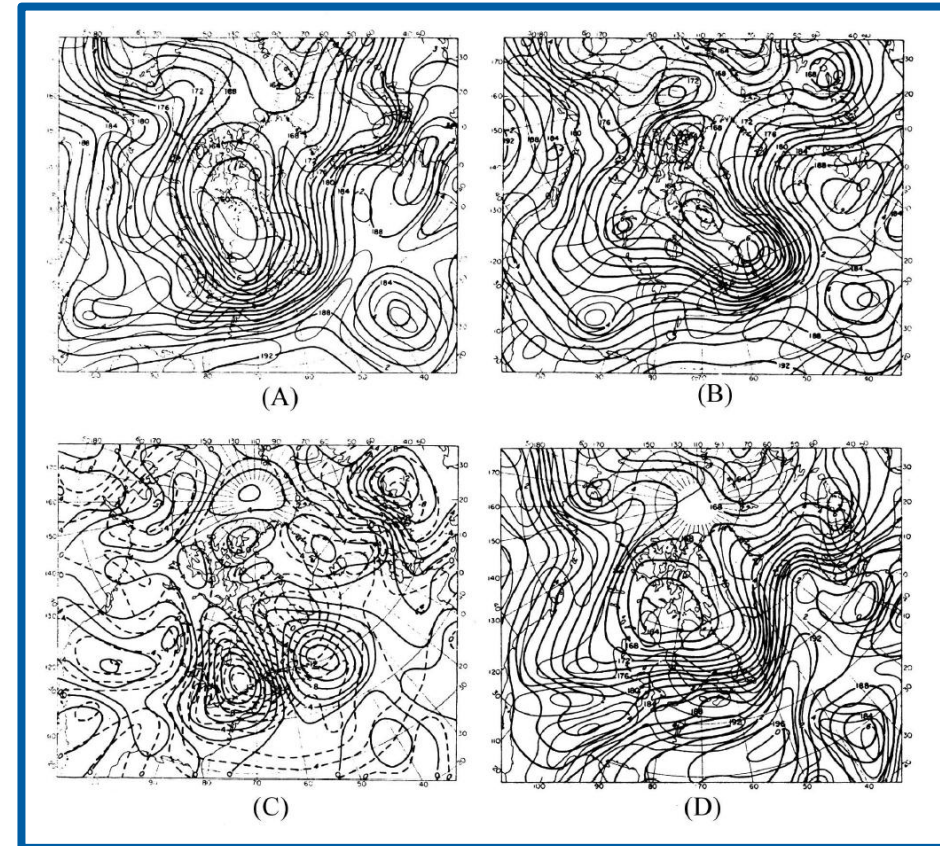
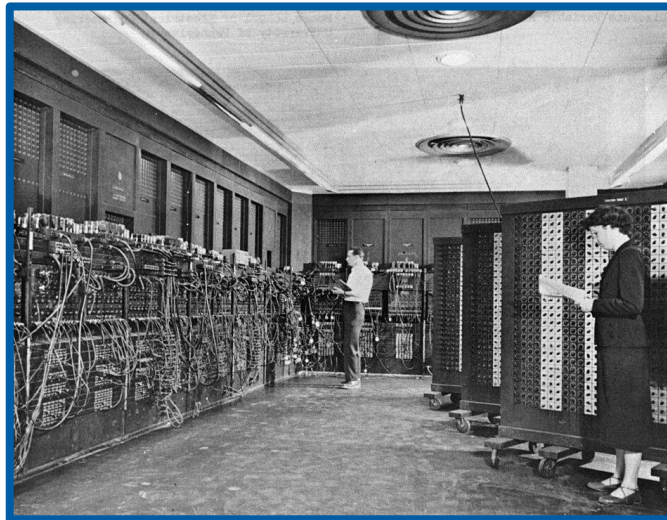
An objection sometimes raised against this kind of work is that a predetermination of the weather, even if it should be possible, would take far too much time to be utilized in practice. What is the use of learned men requiring three weeks to calculate what the weather does in three hours? Though the author does not hope personally to reach the goal, he would be more than content with calculating by many years' indefatigable work even the weather from one day to the other. This would, in fact, mean the scientific solution of the problem and practical achievements would soon be forthcoming.

“It may take years to bore a tunnel through a mountain. Many workers may not live to see the day of piercing the tunnel. Still, this will not prevent others from some day traversing the mountain at the speed of express trains.”



1950 – la prima previsione fatta da un computer

- ENIAC = quarto computer elettronico digitale della storia (Potenza 140 kW)
- Team leader: Jule Charney. Progetto che comprendeva anche Von Neumann Platzman, Smagorinsky
- 24 ore di computazione per elaborare la previsione per 24 ore dopo in quota
- Lynch and Lynch (2008) hanno riprodotto la soluzione dell'ENIAC su un Nokia 6300 in meno di un secondo.



Prima previsione numerica della storia

Oggi – il supercomputer di Metoffice

- Met Office Cray XC40
- Operativo dal 2016
- 14×10^{12} operazioni aritmetiche al secondo (due milioni di conti al secondo per ogni persona presente sulla Terra)
- 2 petabyte di memoria di RAM
- 24 petabyte di storage
- 460000 core di computazione (contro i 64000 computer previsti da Richardson)
- stima: per entro la fine del suo corso determinerà un beneficio a livello socio-economico di 2 miliardi di sterline in UK grazie alle previsioni di eventi estremi
- gestisce 215 milioni di osservazioni meteorologiche



Le previsioni meteorologiche numeriche

1. Set di equazioni

- Equazioni che descrivano il moto e la termodinamica dell'atmosfera
- Equazioni che descrivano l'interazione del flusso atmosferico con un ampio range di processi fisici (parametrizzazioni)

2. Forma discretizzata di tali equazioni in un computer (modello meteorologico = «Rappresentazione matematica delle interazioni tra atmosfera, oceani, superficie terrestre e criosfera, che avvengono a scale spaziali e temporali diverse»)

3. Condizioni iniziali da cui far partire l'integrazione

- Misure sufficienti per inizializzare il modello (sistema di osservazione)
- Preparazione delle osservazioni su una griglia di calcolo (assimilazione dei dati)

Le equazioni primitive in coordinate cartesiane

1. Equazioni di conservazione della quantità di moto

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} + 2\vec{\Omega} \times \vec{u} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \vec{g} + F$$

2. Equazione di stato

$$p = \rho R_d T_v$$

3. Equazione termodinamica

$$\frac{D\theta}{Dt} = \frac{\theta Q}{c_p T}$$

4. Equazione di continuità

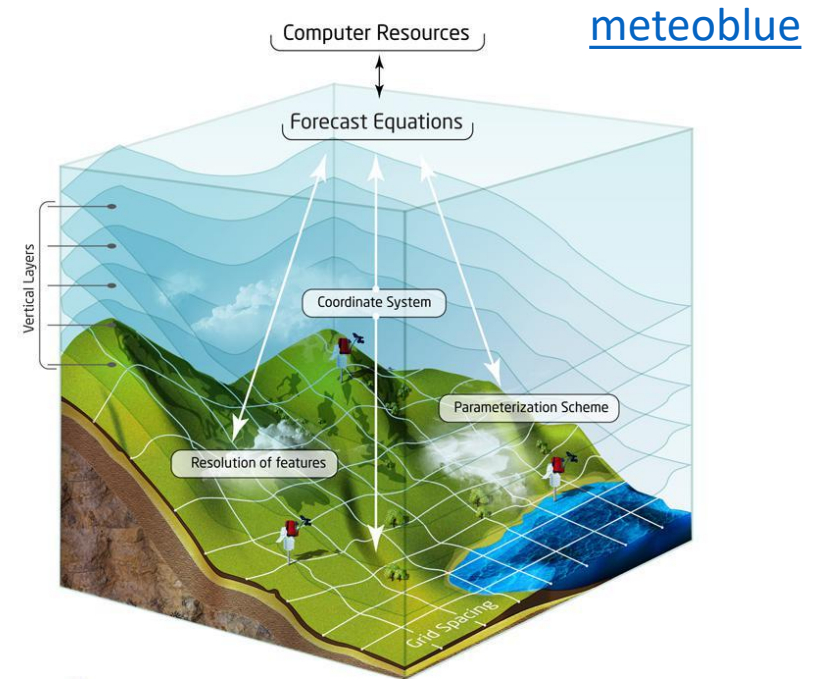
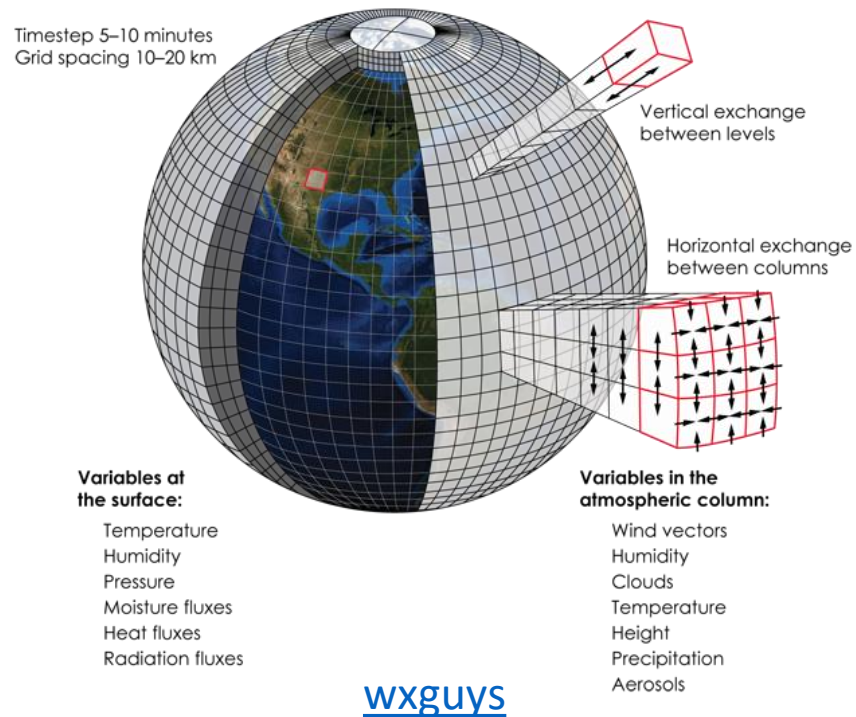
$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0$$

5. Equazioni per la conservazione delle varie fasi dell'acqua (q_v , q_i , q_l):

$$\frac{Dq_x}{Dt} = S_{q_x}$$

Tutte equazioni prognostiche tranne (2) che è diagnostica

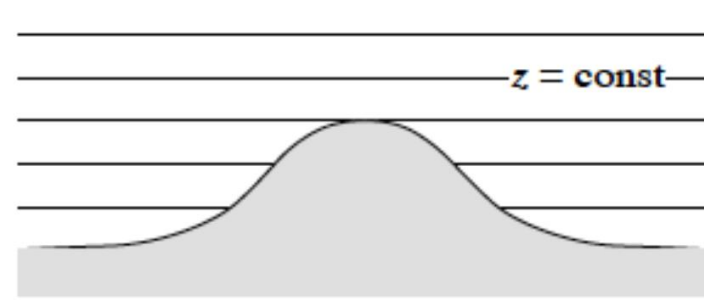
Discretizzazione delle equazioni



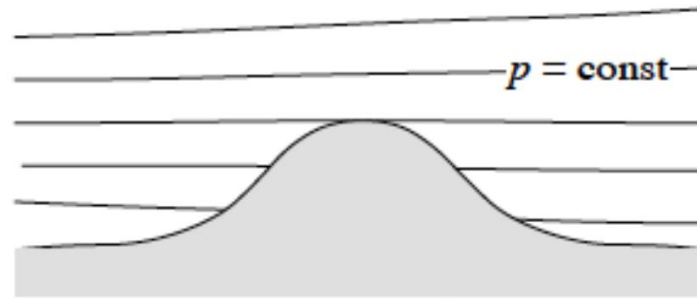
A causa della capacità computazione limitata è necessario ricorrere alla discretizzazione ovvero:

1. Lo spazio continuo del sistema Terra viene diviso in unità discrete chiamate «punti griglia» che conterrà un'informazione media in quel volume riguardante una variabile atmosferica
2. La progressione continua del tempo viene anch'essa discretizzata in timesteps
3. Le equazioni primitive devono essere riscritte con approssimazioni numeriche

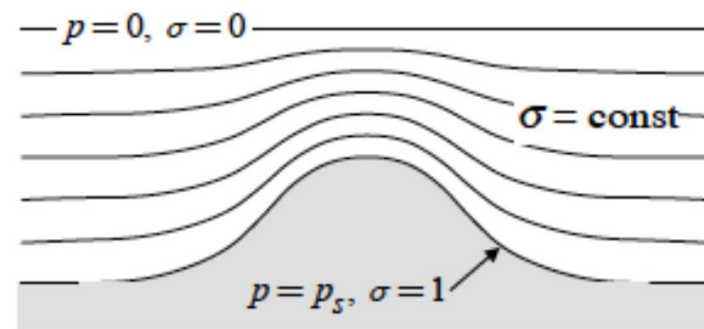
Discretizzazione verticale



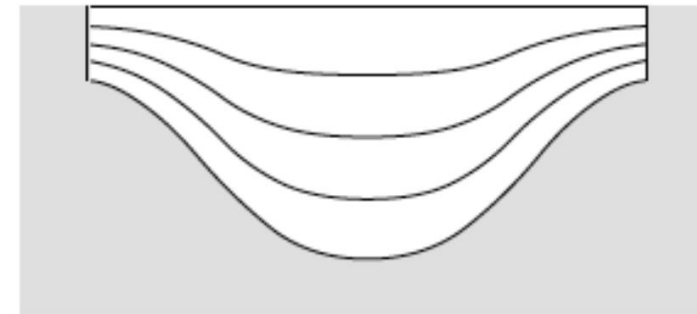
Height coordinates



Pressure coordinates

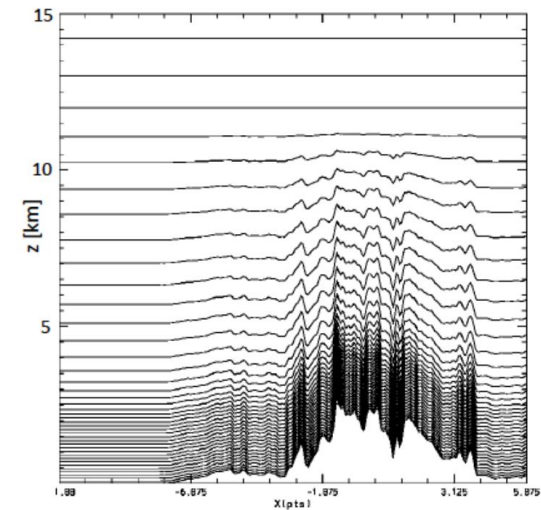


Terrain-following coordinates
(σ -coordinates)



Terrain-following coordinates
in ocean models

- Le equazioni primitive scritte in coordinate di altezza o di pressione non sono adatte alle previsioni meteorologiche in territorio complesso perché intersecano il terreno
- Per questo si utilizzano le coordinate σ che coincidono con il terreno al suolo e coincidono con le coordinate di pressione in quota
- $$\sigma = \frac{p - p_t}{p_s - p_t}$$



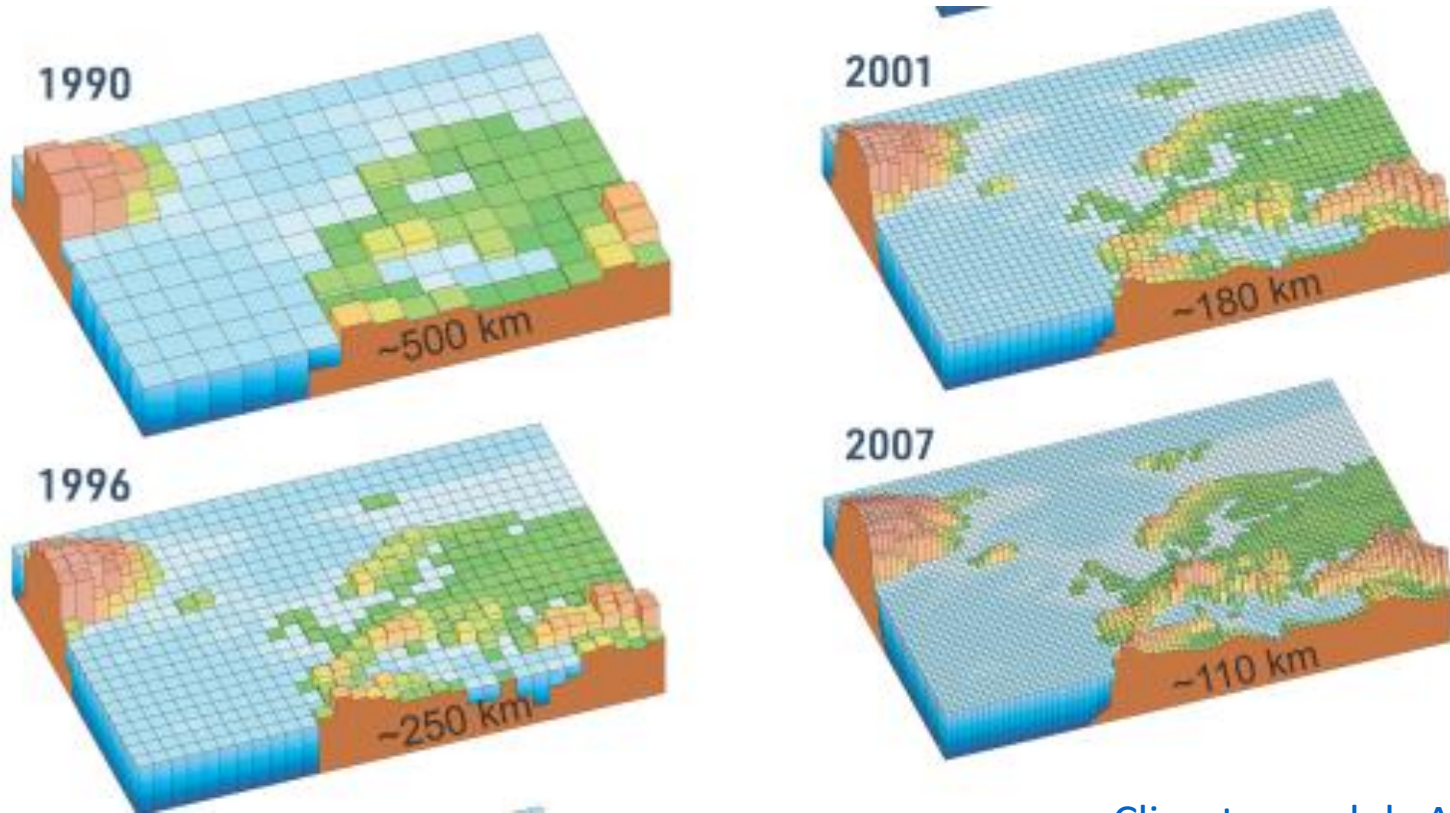
Chow et al., 2019

Chow et al., 2019

Approssimazione idrostatica

- Nei modelli alla mesoscala l'equazione completa dei moti verticali viene semplificata
- $$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + F_z \quad \rightarrow \quad 0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g$$
- Trascuro le accelerazioni verticali e l'attrito
- L'approssimazione elimina quindi la propagazione verticale delle onde sonore (che può avvenire solo con compressione/espansione dell'aria e variazione locale della densità)
- w viene diagnosticata dalla continuità $\omega = -\rho g w$

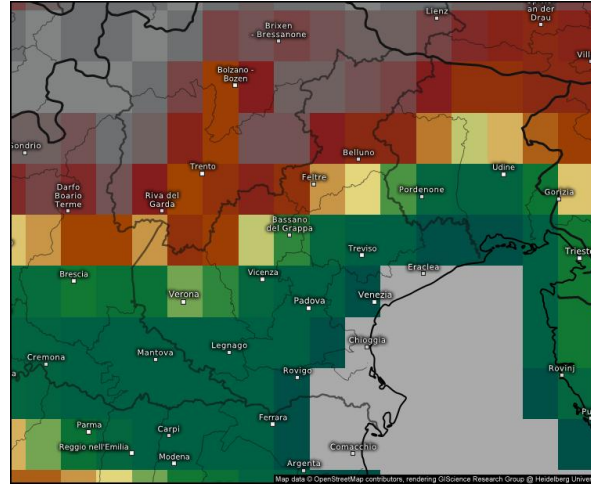
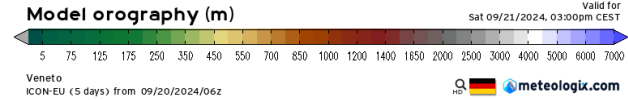
Discretizzazione orizzontale



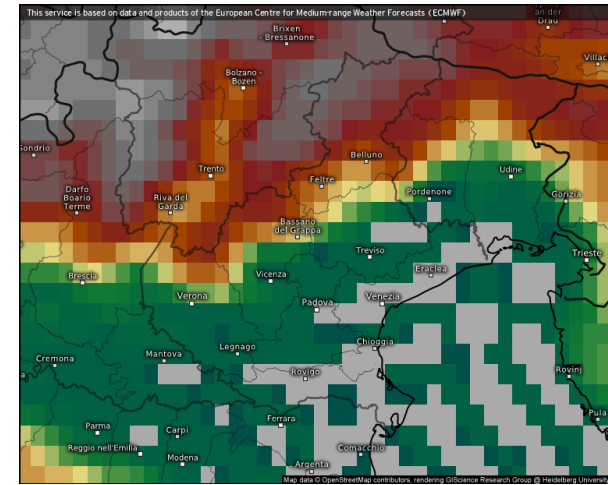
Climate models ARS

- La risoluzione orizzontale è fondamentale per simulare l'orografia.
- In generale maggiore è la risoluzione del modello, migliori sono le performance, specie in casi estivi convettivi.
- La risoluzione spaziale è fortemente dipendente dalla potenza computazionale disponibile

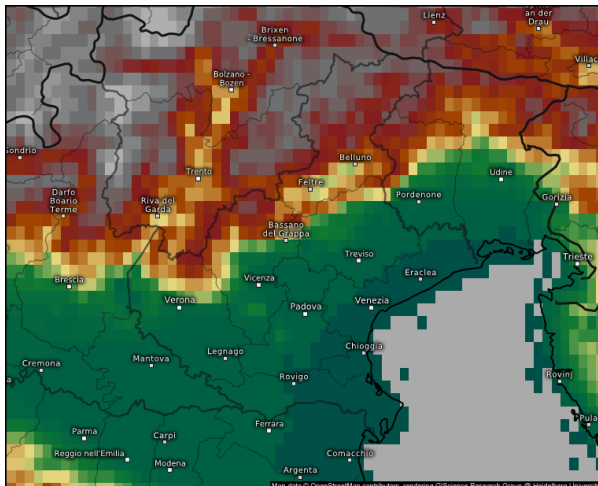
L'orografia del Triveneto vista da vari modelli



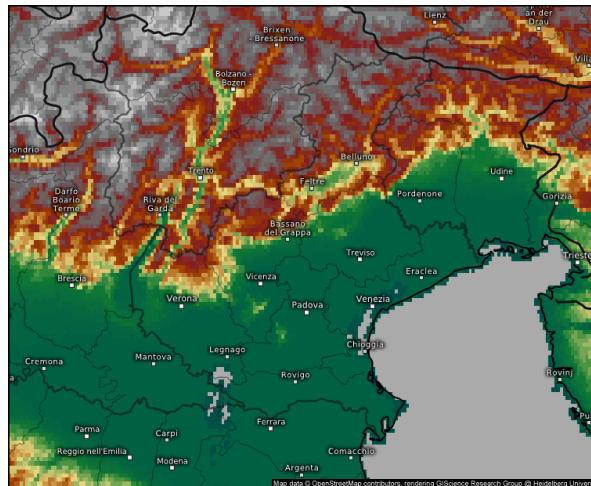
GFS (0.25° 28 km)



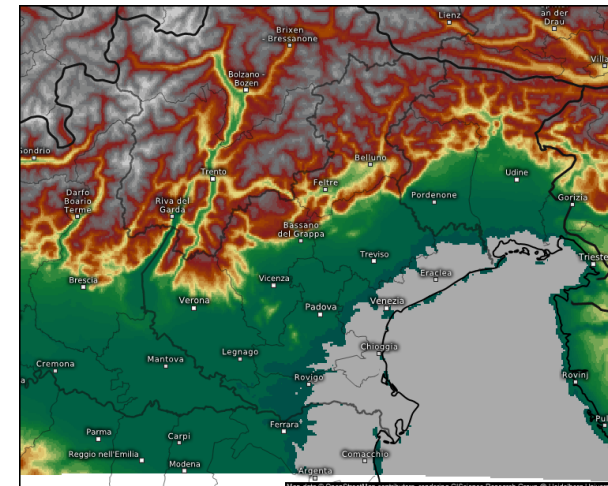
ECMWF IFS HRES (0.1° 9 km)



ICON-EU (0.0625° 7 km)

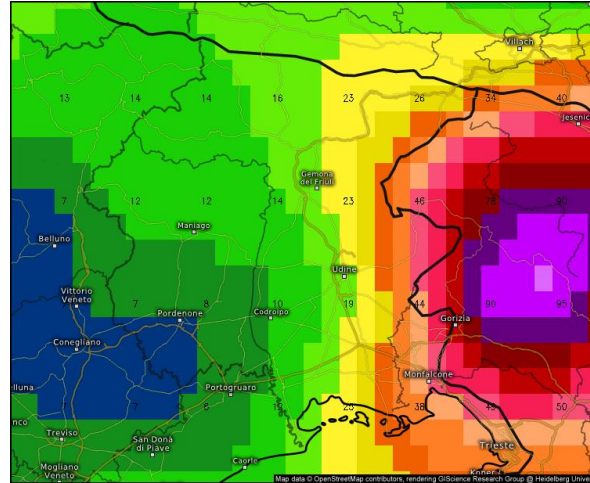
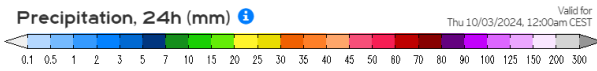


ICON-D2 (0.02° 2.2 km)

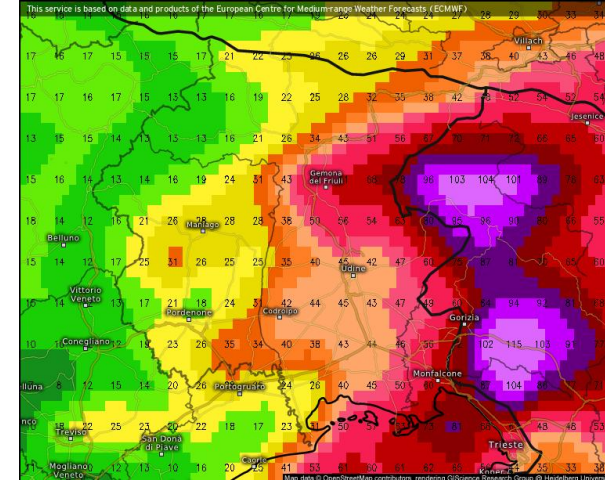


SWISS SUPERHD (1km)

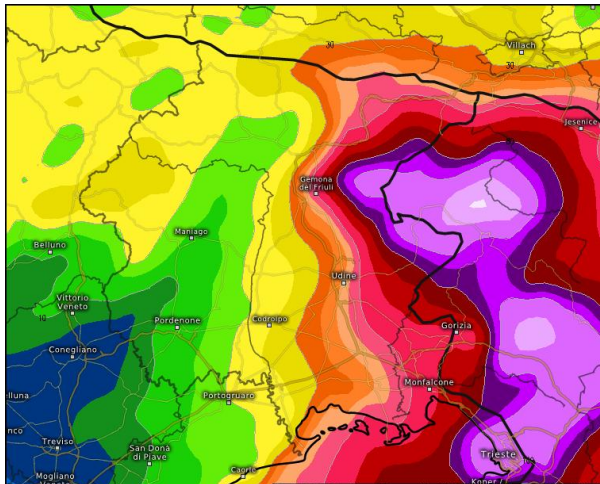
Piogge simulate e dipendenza dalla risoluzione



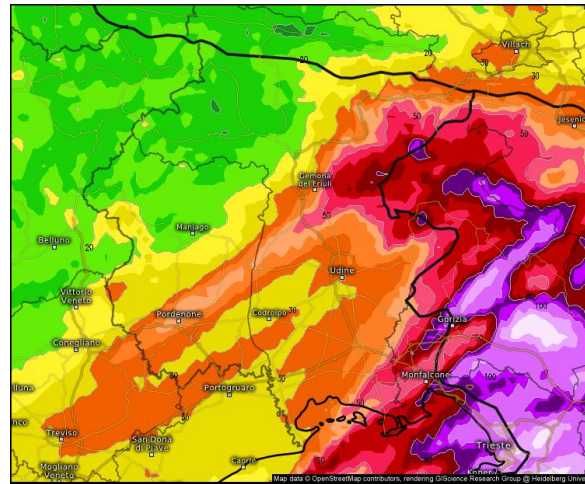
GFS (0.25° 28 km)



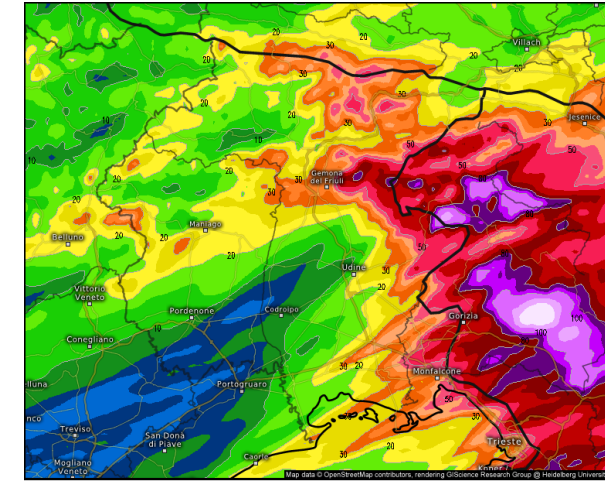
ECMWF IFS HRES (0.1° 9 km)



ICON-EU (0.0625° 7 km)



ICON-D2 (0.02° 2.2 km)



SWISS SUPERHD (1km)

Hydrostatic system in pressure coordinates

Horizontal momentum equations $\frac{Du}{Dt} - fv = -\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_p + F^x$ $\frac{Dv}{Dt} + fu = -\left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)_p + F^y$

with $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u\left(\frac{\partial}{\partial x}\right)_p + v\left(\frac{\partial}{\partial y}\right)_p + \omega\frac{\partial}{\partial p}$ and $\omega = \frac{Dp}{Dt}$

Hydrostatic equation $\frac{\partial\phi}{\partial p} = -\frac{1}{\rho}$

Equation of state $p = \rho RT$

Thermodynamic equation $\frac{DT}{Dt} = \frac{\omega}{\rho c_p} + H$

Continuity equation $\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_p + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)_p + \frac{\partial\omega}{\partial p} = 0$

Boundary conditions at top: $p=0: \omega=0$

Boundary conditions at surface: $p=p_s: \omega = \partial p_s / \partial t + \mathbf{v}_s \cdot \nabla_h p_s$ $\phi = g z_s$

Hydrostatic system in sigma coordinates

Horizontal momentum equations $\frac{Du}{Dt} - fv = -\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_\sigma - \frac{RT}{p_s} \frac{\partial p_s}{\partial x} + F^x$

with $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u\left(\frac{\partial}{\partial x}\right)_\sigma + v\left(\frac{\partial}{\partial y}\right)_\sigma + \dot{\sigma} \frac{\partial}{\partial \sigma}$ and $\dot{\sigma} = \frac{D\sigma}{Dt}$

Hydrostatic equation $\frac{\partial\phi}{\partial\sigma} = -\frac{RT}{\sigma}$

$$\sigma = \frac{p}{p_s}$$

Equation of state $\sigma p_s = \rho RT$

Thermodynamic equation $\frac{DT}{Dt} = \frac{RT}{c_p \sigma p_s} \omega + H$ $\omega = \sigma \left[\frac{\partial p_s}{\partial t} + u \frac{\partial p_s}{\partial x} + v \frac{\partial p_s}{\partial y} \right] + \dot{\sigma} p_s$

Continuity equation $\frac{\partial p_s}{\partial t} + \nabla_\sigma \cdot (p_s \mathbf{v}) + p_s \frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma} = 0$

Boundary conditions at top: $p = 0: \sigma = 0, \dot{\sigma} = 0$

Boundary conditions at surface: $p = p_s: \sigma = 1, \dot{\sigma} = 0$ $\phi = g z_s$

Vertical wind and surface pressure

If the variables u, v, T, p_s are known, the vertical wind $\dot{\sigma}$ may be diagnosed

Integrate continuity equation from $\sigma' = 0$ to $\sigma' = \sigma$

Secondo passo:
computazione di $\dot{\sigma}$ al tempo t

$$\frac{\partial p_s}{\partial t} + \nabla_{\sigma} \cdot (p_s \mathbf{v}) + p_s \frac{\partial \dot{\sigma}}{\partial \sigma} = 0 \quad \Rightarrow \quad \sigma \frac{\partial p_s}{\partial t} + \int_0^{\sigma} \nabla_{\sigma} \cdot (p_s \mathbf{v}) d\sigma' + p_s \dot{\sigma} \Big|_{\sigma} = 0$$

Solve for vertical wind:

$$\dot{\sigma}(\sigma) = -\frac{\sigma}{p_s} \frac{\partial p_s}{\partial t} - \frac{1}{p_s} \int_0^{\sigma} \nabla_{\sigma} \cdot (p_s \mathbf{v}) d\sigma'$$

Prognosis of surface pressure tendency:

Apply for $\sigma = 1$ and
use lower boundary
condition $\dot{\sigma}(1) = 0$

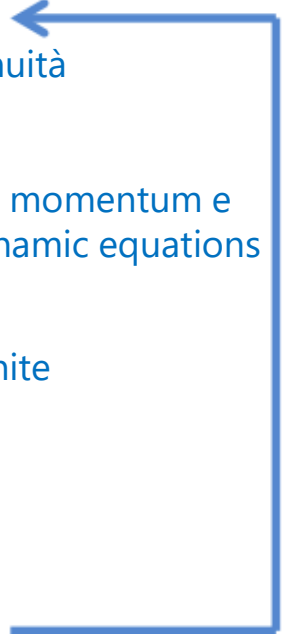
$$\frac{\partial p_s}{\partial t} = - \int_0^1 \nabla_{\sigma} \cdot (p_s \mathbf{v}) d\sigma$$

Primo passo: computazione
di $p_s(t+dt)$ sfruttando $v(t)$ e
 $p_s(t)$

Ban, 2020

Integration in sigma-coordinates

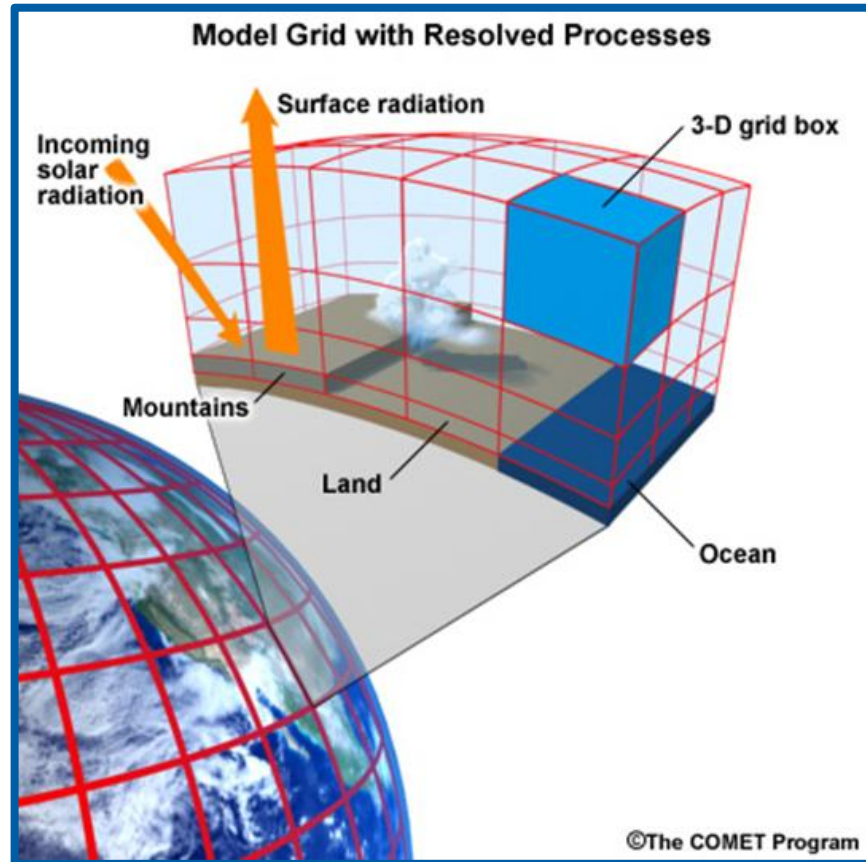
Variables u, v, T, p_s and ϕ known at time t

- Computation of surface pressure tendency $\partial p_s / \partial t$ Attraverso continuità
 - Diagnosis of vertical wind $\bar{\sigma}$ Attraverso continuità
 - Computation of tendencies $\partial u / \partial t, \partial v / \partial t$ and $\partial T / \partial t$ Attraverso momentum e thermodynamic equations
 - Time step for u, v, T and p_s to time $t + \Delta t$ Scrivo semplicemente le tendenze come differenze finite
 - Diagnosis of geopotential ϕ Attraverso l'idrostatica
- 
- $t + n\Delta t$
 $n = 1, \dots, N$

Variables u, v, T, p_s and ϕ known at time $t + \Delta t$

Non posso scambiare l'ordine di calcolo!

Parametrizzazioni



- Molti processi si sviluppano a scale molto piccole, tali da non poter essere rappresentati alle scale della griglia computazionale
- I processi che non sono risolti esplicitamente alla risoluzione del modello sono **parametrizzati**

Parametrizzazioni



- Le parametrizzazioni esprimono le tendenze dovute ai processi su scala subgrid in termini di variabili risolte. Ad esempio:
 - Forza di attrito F dovuta ai processi dello strato limite:
$$F = F(u, v, \omega, T, z, \dots)$$
 - Riscaldamento diabatico H dovuto alla condensazione del vapore:
$$H = H(u, v, \omega, T, p, \dots)$$
- Le equazioni includono gli effetti dei processi su piccola scala (subgrid-scale) che non sono risolti dal modello ma influenzano le scale e i processi risolti
- Le parametrizzazioni specificano un effetto medio o atteso di un processo sulle variabili risolte
- I processi parametrizzati contribuiscono in modo sostanziale alle incertezze nelle previsioni meteorologiche e nei modelli climatici.

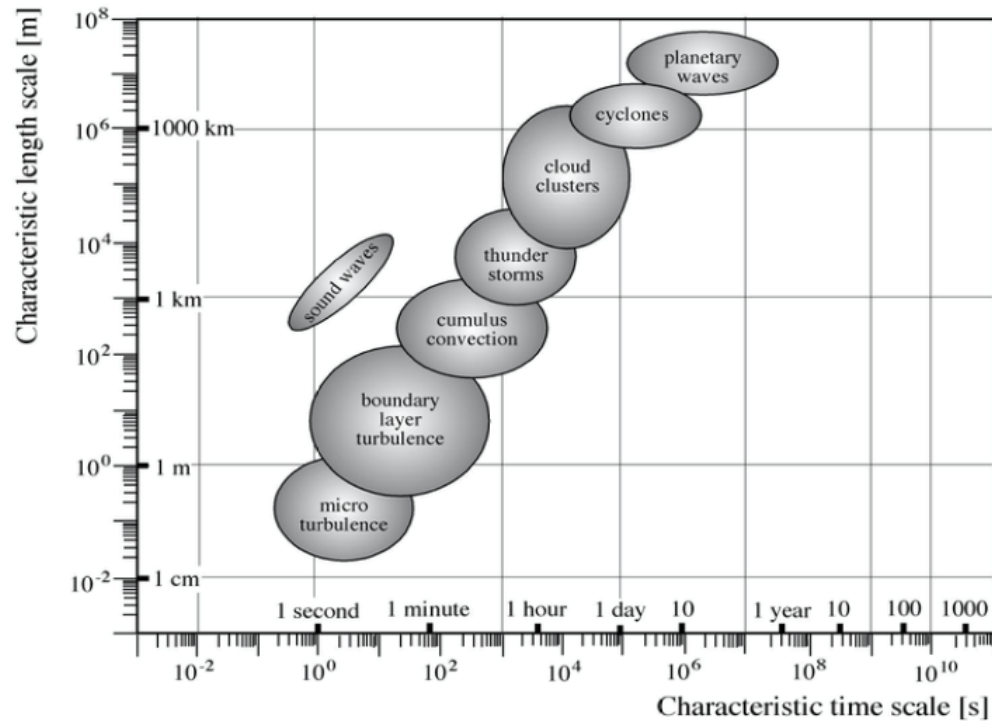
Parametrizzazioni



Esistono 3 approcci per sviluppare le parametrizzazioni:

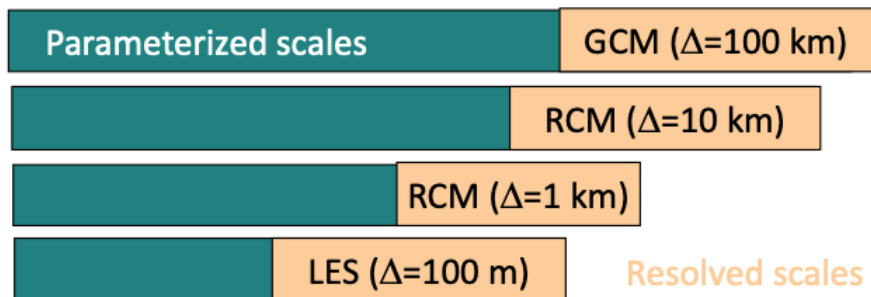
- 1) Ricavarle dai principi teorici della fisica (metodo preferibile)
- 2) Utilizzare dati osservativi
- 3) Utilizzare modelli di convection (Cloud-resolving models (CRM) o Large Eddy Simulations (LES) e considerarli come «la verità»

Parametrizzazioni e risoluzione spaziale

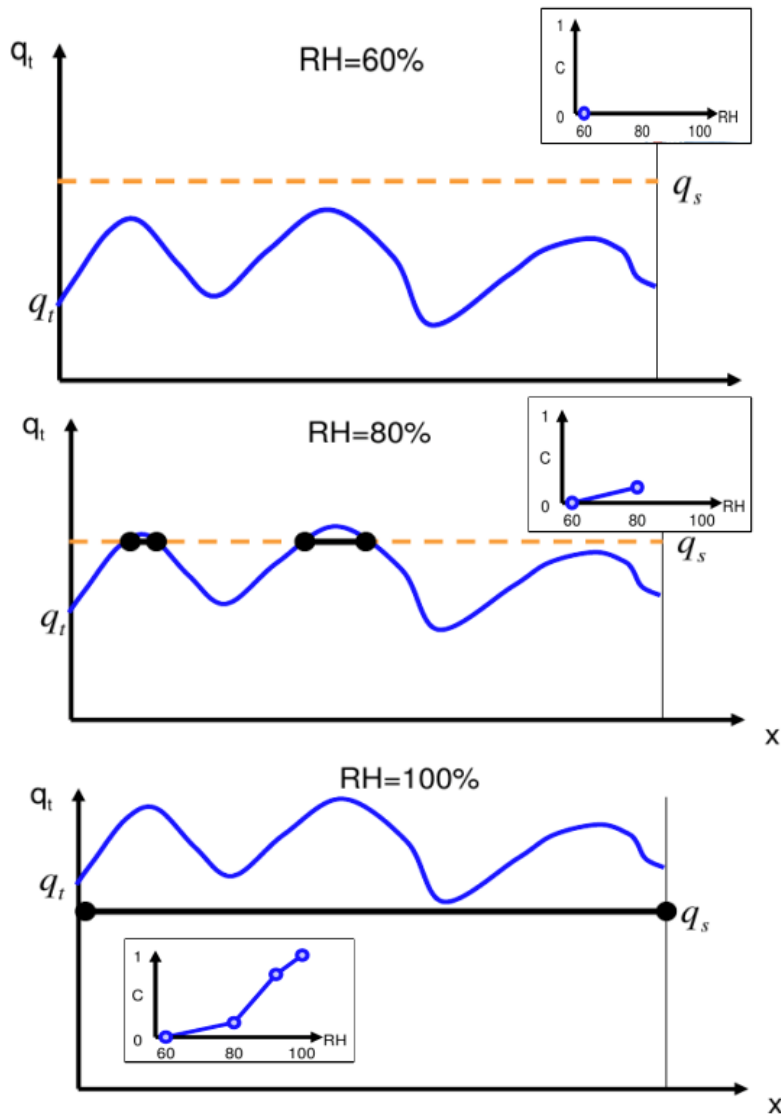


Andando verso risoluzioni sempre maggiori alcuni schermi di parametrizzazione non sono più necessari o diventano obsoleti

- GCM = Global Circulation Model
- RCM = Regional Circulation Model
- LES = Large Eddy Simulation



Parametrizzazione delle nubi



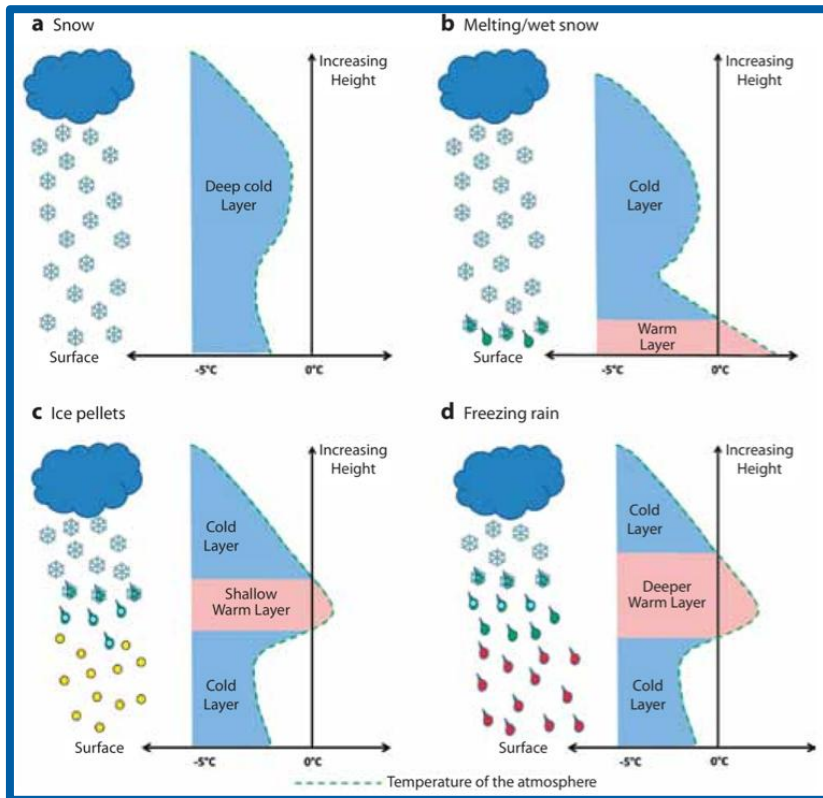
Tompkins, 2008

- A differenza di altre variabili (u, v, T, q) non c'è un'equazione primitiva prognostica per la nuvolosità (cloud fraction)
- Eppure è necessaria per valutare gli effetti delle nubi sulla radiazione e sui budget di energia alla superficie
- Il metodo più facile è quello basato sull'Umidità Relativa ovvero

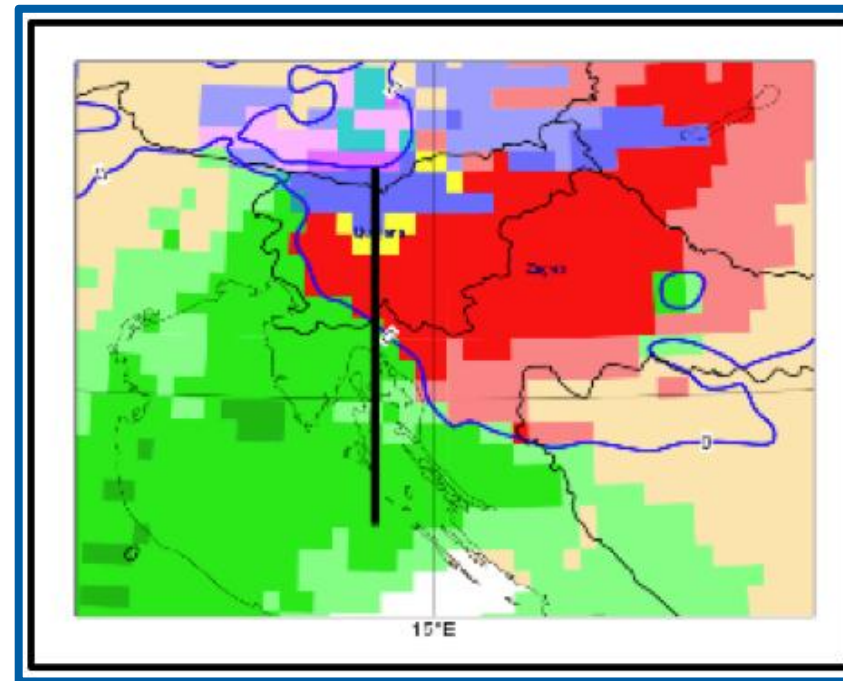
$$C = 1 - \sqrt{\frac{1-RH}{1-RH_{crit}}}$$
 dove RH è un parametro regolabile dipendente dall'altezza e dalla risoluzione del modello
- Questo schema però può portare al «cloud-blinking» ovvero piccole variazioni di RH fanno comparire o scomparire una nube
- La microfisica delle nubi è gestita in realtà da sistemi più complessi con equazioni prognostiche ma anche parametrizzate per la parte liquida e di ghiaccio nella nube ($\frac{\partial q_l}{\partial t} = \dots, \frac{\partial q_i}{\partial t} = \dots$) che tiene conto di avvezione, diffusione, condensazione, fusione, congelamento, evaporazione, deposizione, aggregazione, sublimazione ...
- Parametrizzazioni ancora più complesse (2nd moment schemes) non contengono solo equazioni per i mixing ratio ma anche per la concentrazione numerica N [#/ m^3] ($\frac{\partial N_l}{\partial t} = \dots, \frac{\partial N_i}{\partial t} = \dots$)

Parametrizzazione del tipo di precipitazioni

- I mixing ratio calcolati e che evolvono nel tempo sono solo q_v , q_i e q_l
- Tuttavia i modelli possono fornire anche il tipo di precipitazione al suolo: pioggia, pioggia mista neve, neve bagnata, neve asciutta, gelicidio (freezing rain), neve tonda (ice pellets)
- Si basa unicamente su: altezza del melting layer ($T_W=1^\circ\text{C}$), temperatura a 2m, profilo verticale della temperatura



ECMWF Forecast User Guide



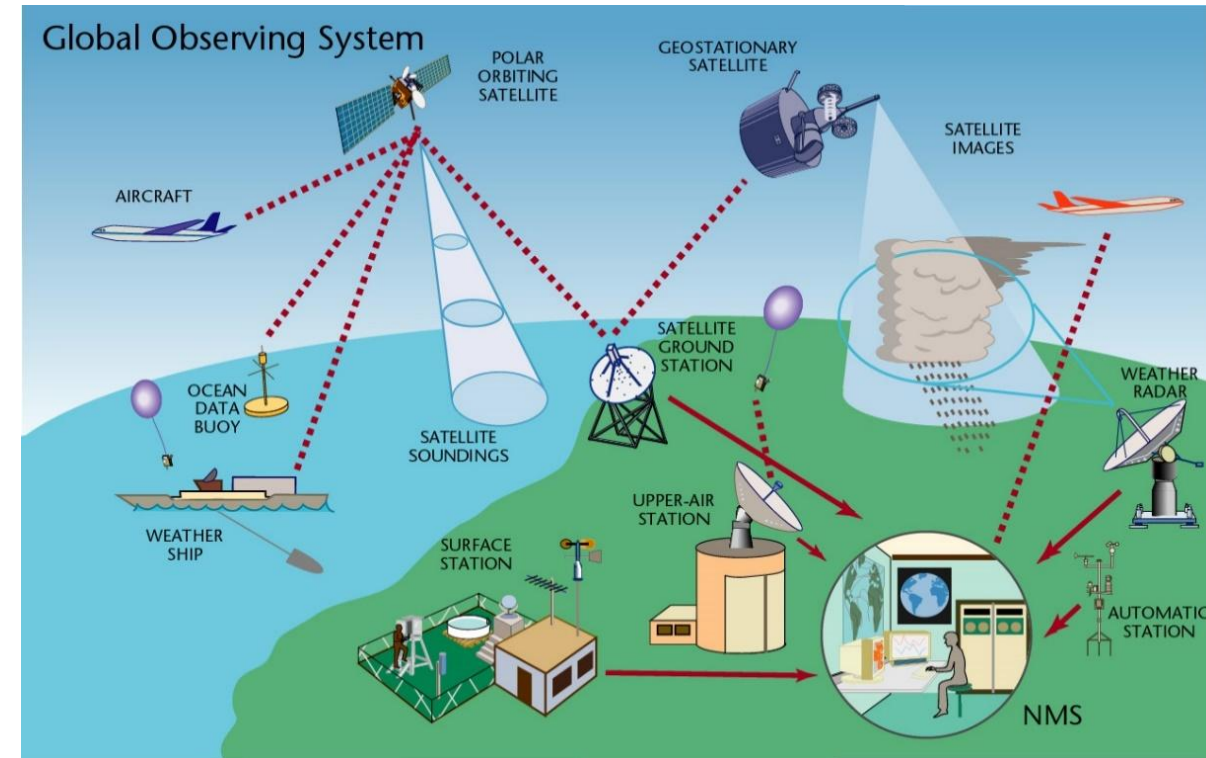
Verde=pioggia, blu=neve,
giallo=ice pellets, rosso =
gelicidio

Parametrizzazione del PBL

- PBL = «parte di troposfera direttamente influenzata dalla presenza della superficie terrestre e risponde alla forzante data da tale superficie con tempi di un'ora o inferiori» (Stull,1998)
- La struttura del PBL è dominata da processi alla superficie che generano moti turbolenti
- La griglia nei normali modelli di NWP è troppo larga per risolvere la turbolenza
- Quando si applica la decomposizione di Reynolds ($\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}'$) alle equazioni del moto compaiono termini non lineari nelle perturbazioni come $\overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'}$, $\overline{\mathbf{u}'\mathbf{v}'}$, $\overline{\mathbf{u}'\mathbf{w}'}$, ecc. ecc.
- Le parametrizzazioni del PBL si occupano di «chiudere» questi flussi, ovvero descrivere le perturbazioni in termini dei valori medi
- La parametrizzazione più semplice è la chiusura locale di prim'ordine (local k-theory) $\overline{\mathbf{u}'\mathbf{w}'} = -K_M \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$, $\overline{\theta'\mathbf{w}'} = -K_H \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z}$ dove K_M e K_H sono coefficienti per la dispersione turbolenta
- La chiusura di secondo ordine fa lo stesso ma con le perturbazioni di ordine superiore, $\overline{\mathbf{u}'\mathbf{v}'\mathbf{w}'}$, $\overline{u'^2\mathbf{w}'}$, $\overline{v'^2\mathbf{w}'}$, ecc. ecc.
- L'incertezza nella parametrizzazione del PBL rimane nei coefficienti empirici (K_H , K_M , ecc. ecc.)

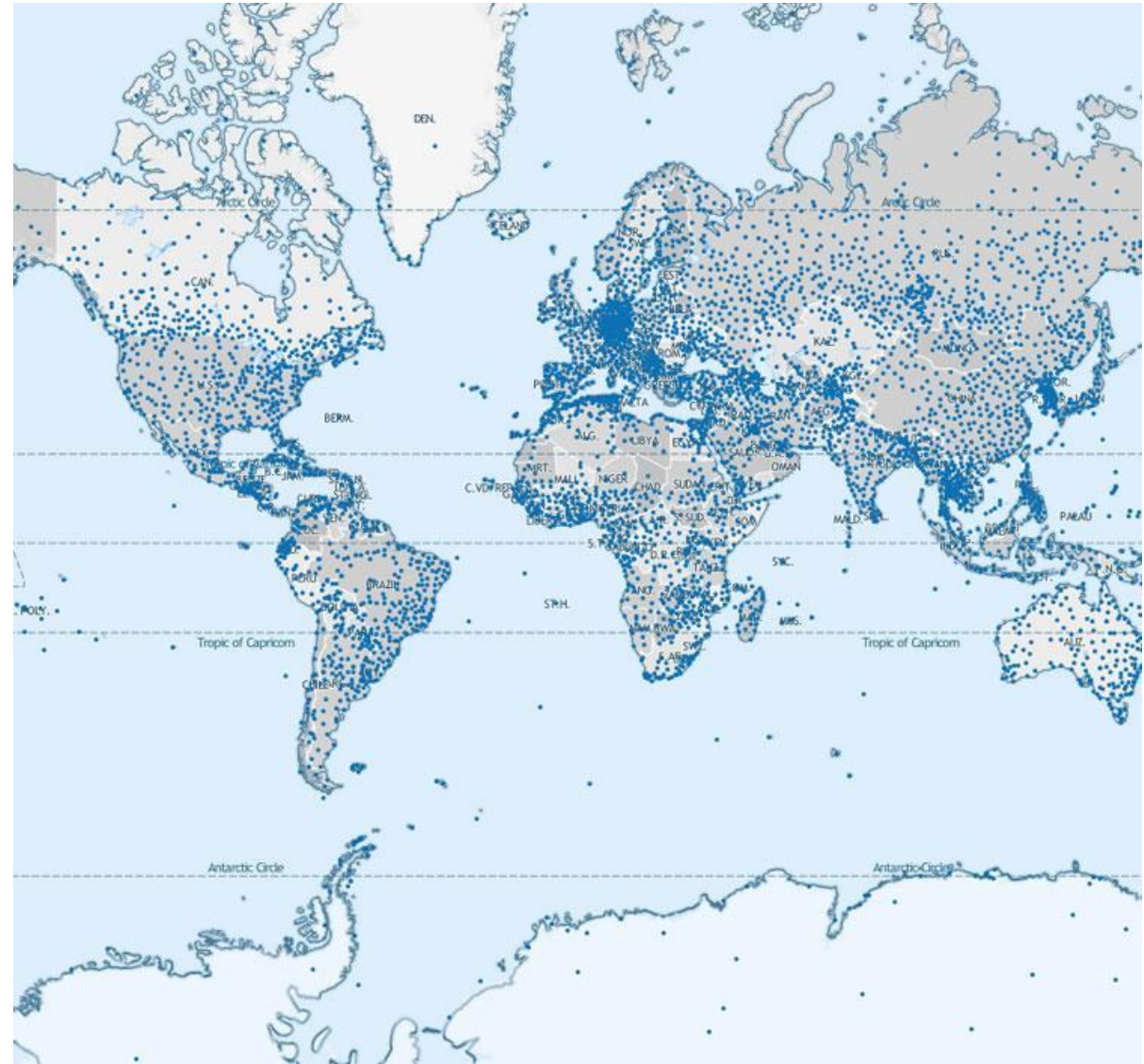
Global Observing System

- Il Global Observing System (GOS) è un sistema internazionale coordinato di osservazione dell'atmosfera e degli oceani, gestito dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO), che fa parte delle Nazioni Unite
- Scopi:
 - Previsioni del tempo e allerte meteo
 - Monitoraggio del clima e dei cambiamenti climatici
 - Ricerca scientifica atmosferica e oceanografica
 - Supporto alla navigazione aerea e marittima
- I dati raccolti confluiscono nel Sistema di Telecomunicazione Globale (GTS), una rete di scambio dati che li distribuisce in tempo reale ai centri meteorologici nazionali e internazionali (come l'ECMWF), dove vengono assimilati nei modelli numerici di previsione del tempo.



Stazioni meteorologiche

- Oltre 11000 stazioni meteorologiche a terra
- Dati misurati e inviati almeno ogni 3 ore
- Misurazioni di: pressione atmosferica, velocità e direzione del vento, temperatura e umidità relativa



Misurazione della temperatura

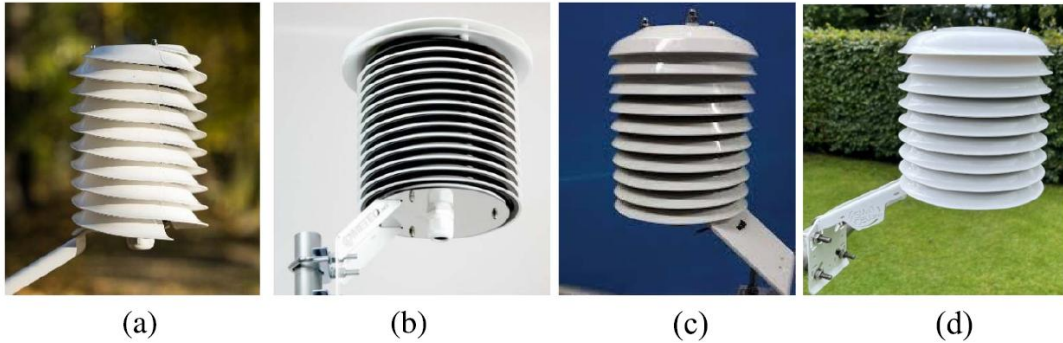
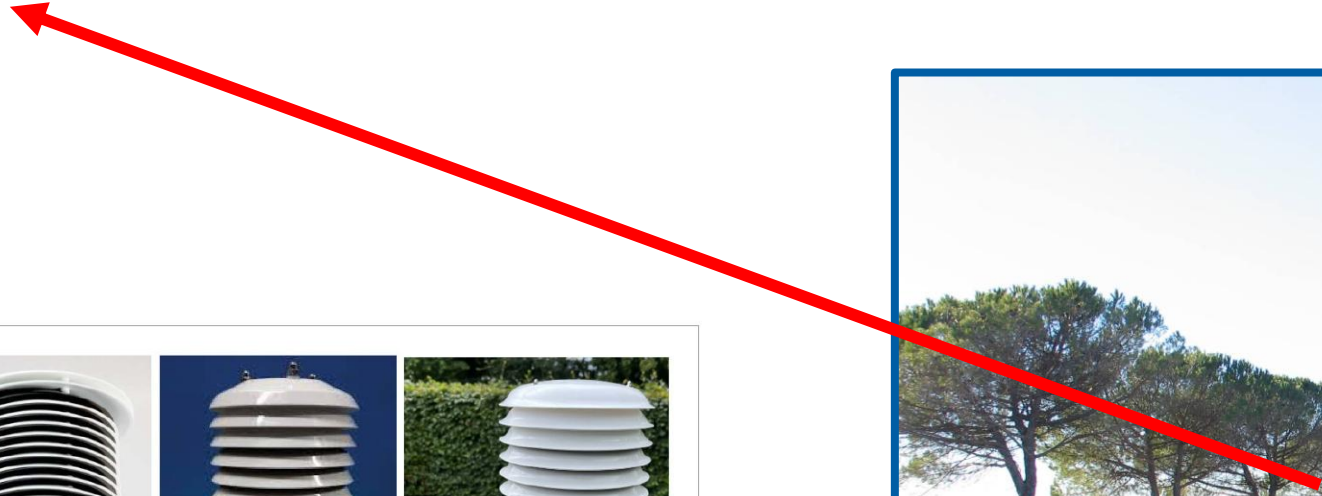


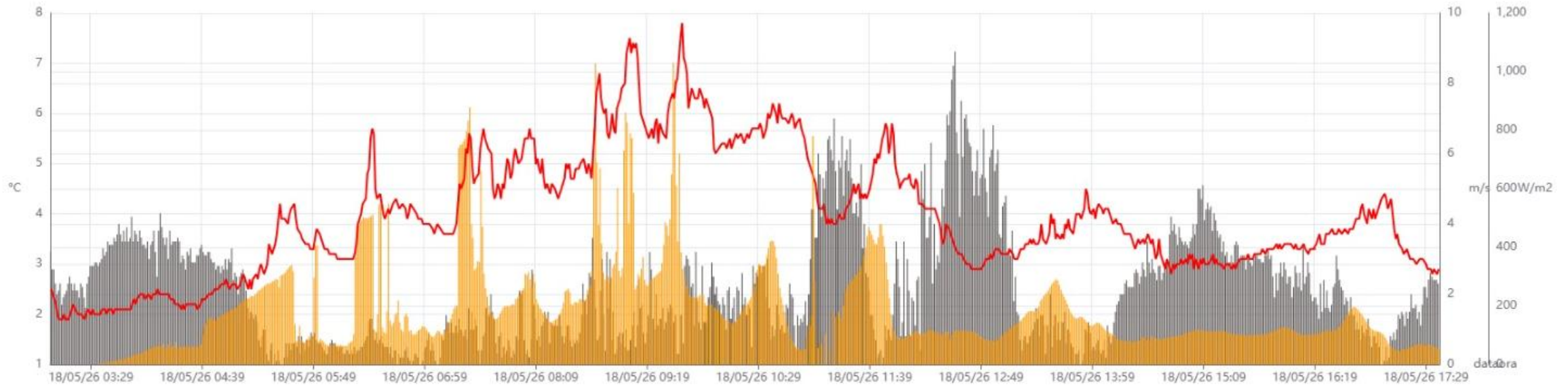
Figure 3. Images of the radiation shields from manufacturers' illustrative materials: (a) BARANI—MS. PRO 3, (b) COMET—F8001, (c) METSPEC—RAD10 and (d) SIAP + MICROS-SMarTCELLino.

Table 1. Technical specifications of the shields from manufacturers' documents.

Shield	Meteoshield pro 3	Rad10	F8001	SmartCELLino
Abbreviation	BAR-3	RAD10	COMET	SMART
Manufacturer	BARANI	METSPEC	COMET	SIAP + MICROS
Weight (g)	450	2400	500	900
Height (mm)	226	252	208	200
Width (mm)	170	250	123	180

Salvador et al., 2026

Misurazione della temperatura



Rosso = Temperatura a 1.80 m; giallo = radiazione solare diretta; grigio = vento

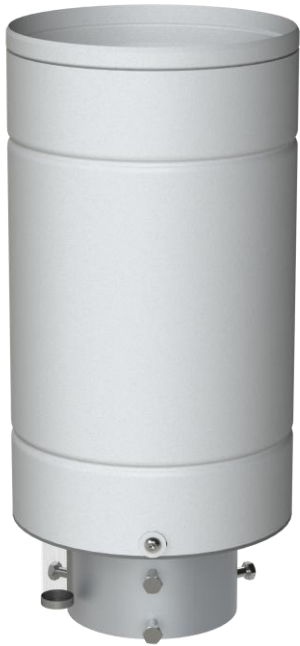
Misurazione del vento



Misurazione della pioggia

Si misura in mm

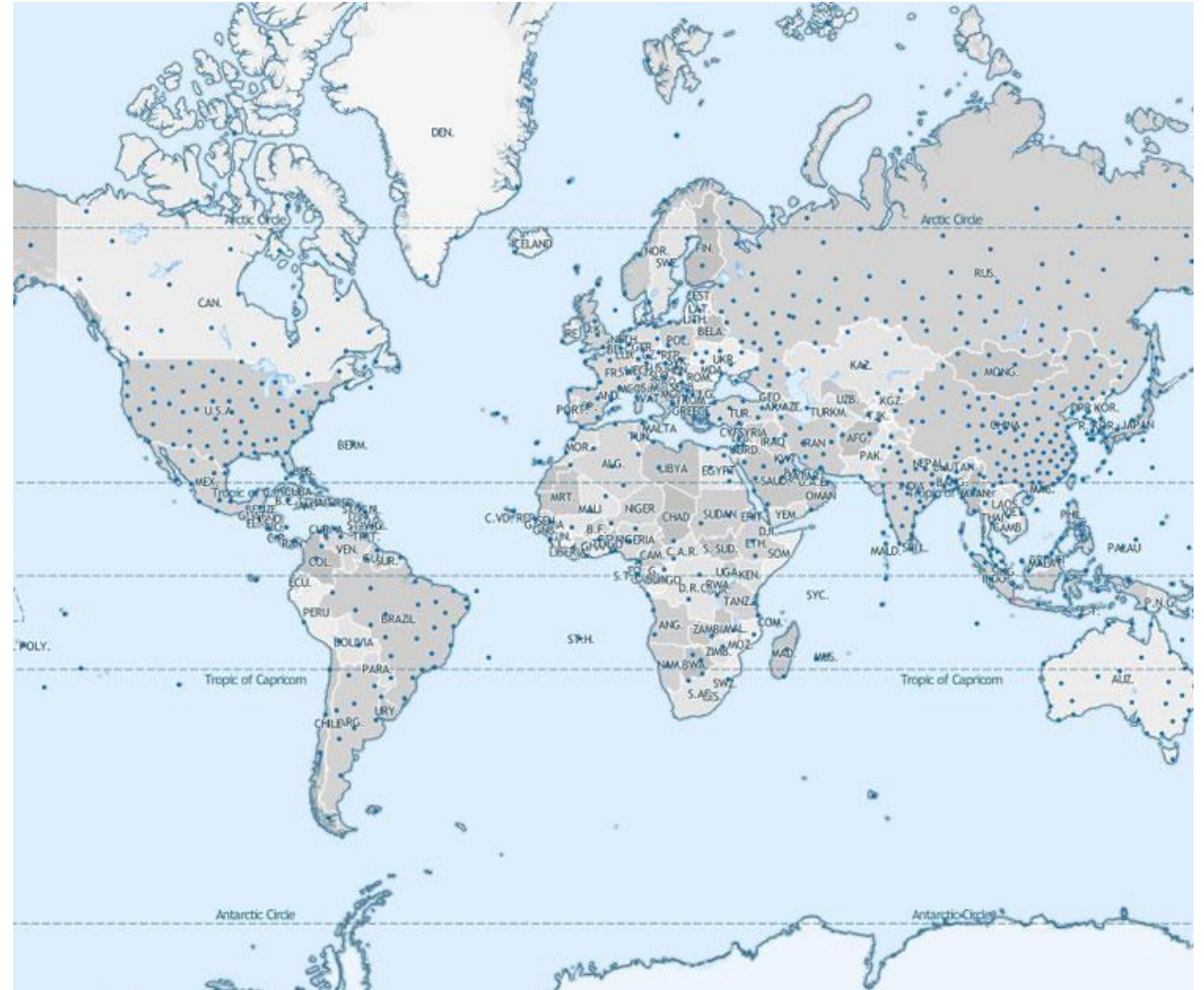
$$1 \text{ mm} = 1 \text{ L/m}^2$$



Funzionamento pluviometro a bascula

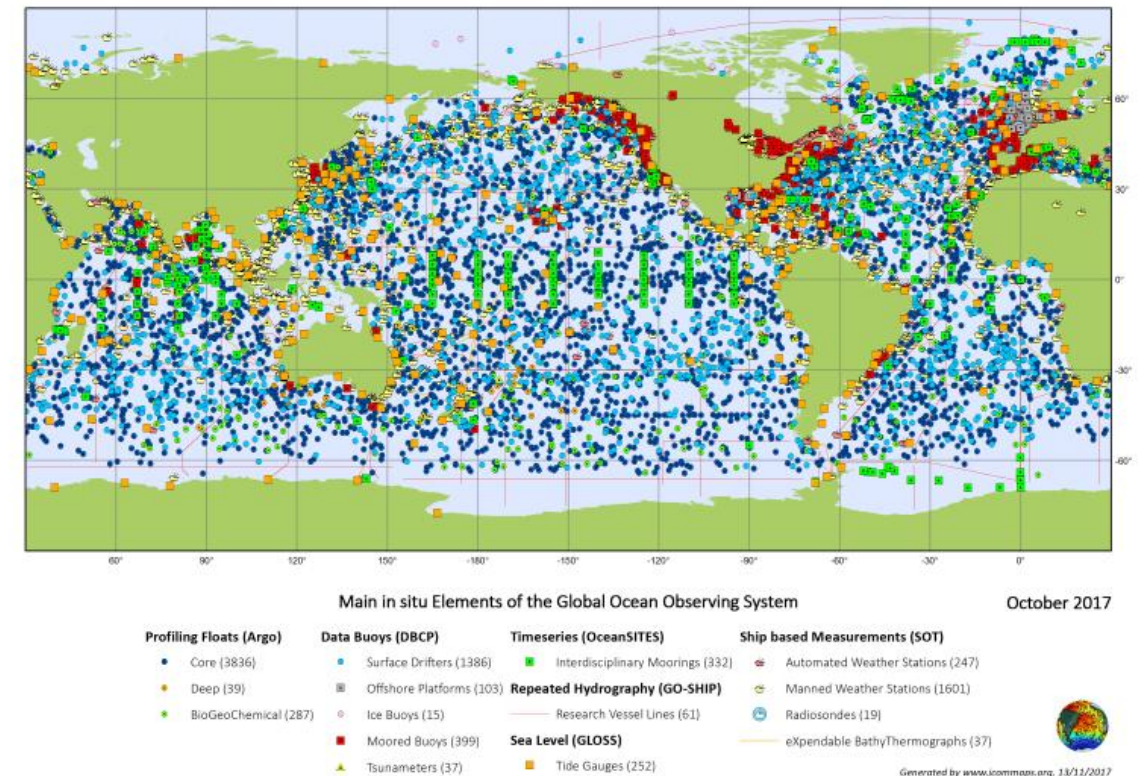
Radiosondaggi

- Rete globale di circa 1.300 stazioni di rilevamento in quota, le radiosonde
- Misurazioni di pressione, velocità del vento, temperatura e umidità da appena sopra il suolo fino a quote di 30 km.
- Oltre due terzi delle stazioni effettuano osservazioni alle 00:00 UTC e alle 12:00 UTC.
- Tra le 100 e le 200 stazioni effettuano osservazioni una volta al giorno.

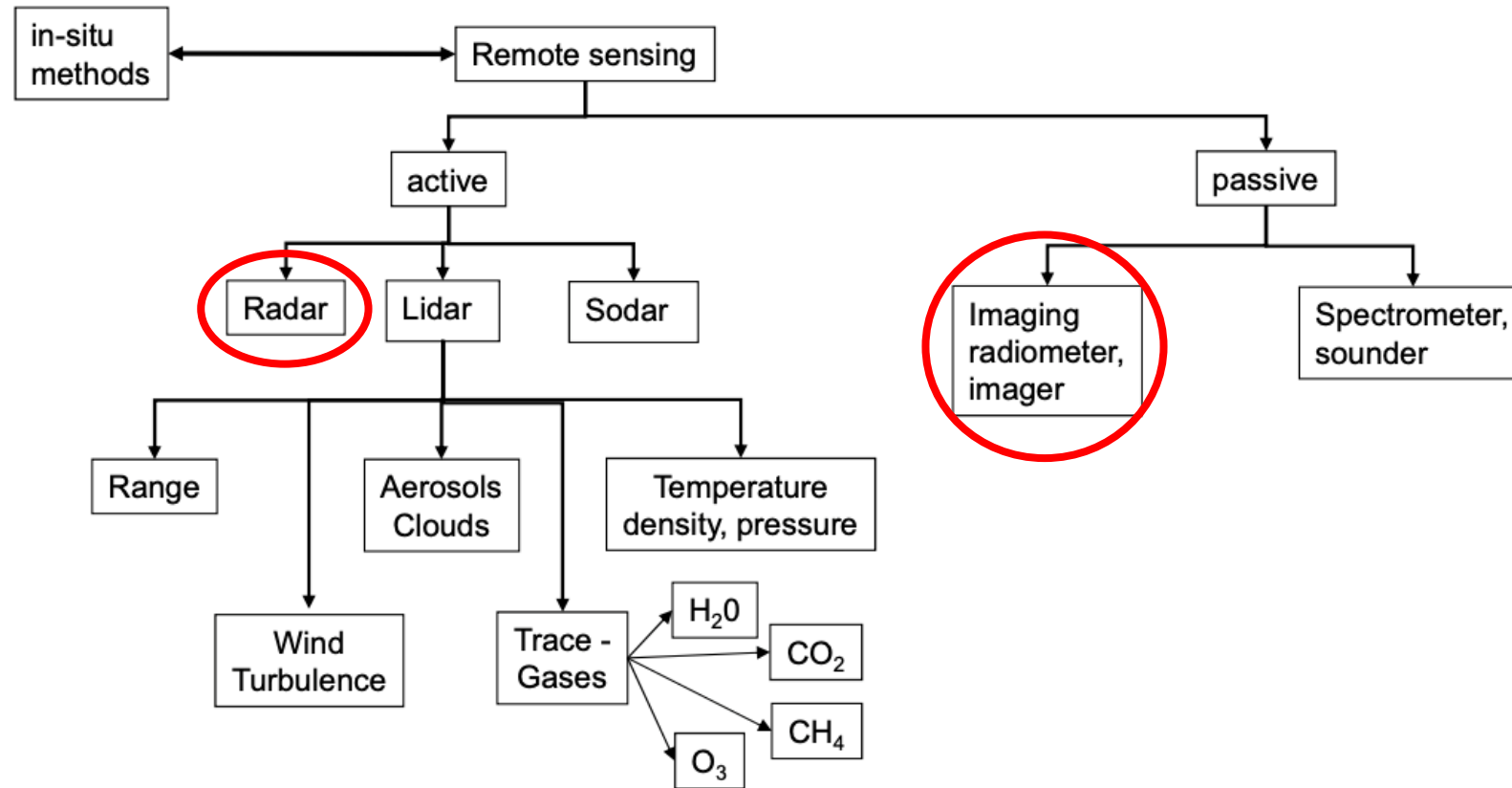


Osservazioni marine

- Sugli oceani si utilizzano: navi, boe fisse e galleggianti e piattaforme fisse.
- Le osservazioni effettuate dalle navi comprendono le stesse variabili delle stazioni di superficie terrestri, ma anche la temperatura della superficie del mare, dell'altezza delle onde e del loro periodo.
- Il numero di navi di osservazione è di circa 4.000.
- Il programma operativo di boe alla deriva, composto da circa 1.200 boe, fornisce oltre 27.000 rilevamenti della temperatura della superficie del mare al giorno.
- La metà delle boe galleggianti riporta anche la pressione a livello del mare, fornendo circa 14.000 rapporti al giorno.



Overview su Remote Sensing

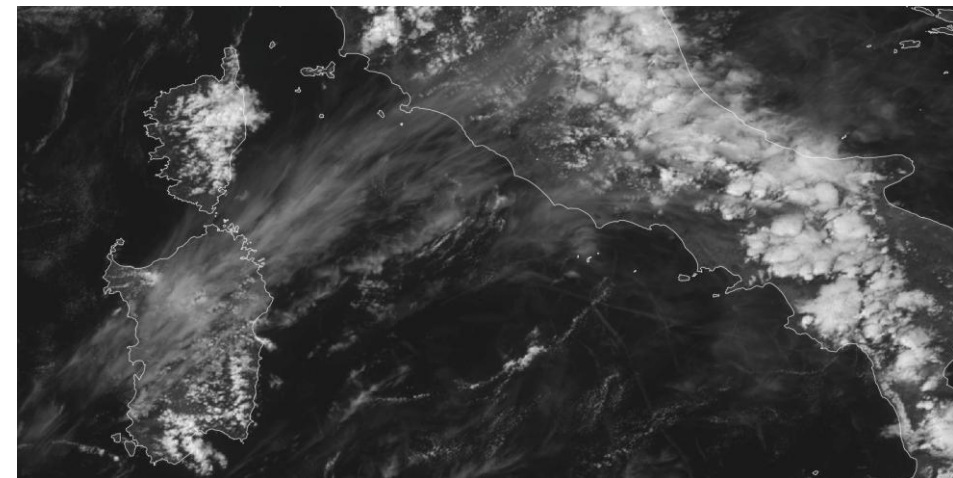


Remote sensing/Telerilevamento = misurazione o osservazione di un oggetto da distanza tramite un mezzo artificiale, senza interferire con il mezzo che si interpone

Satelliti

ESA, Earth Observing System

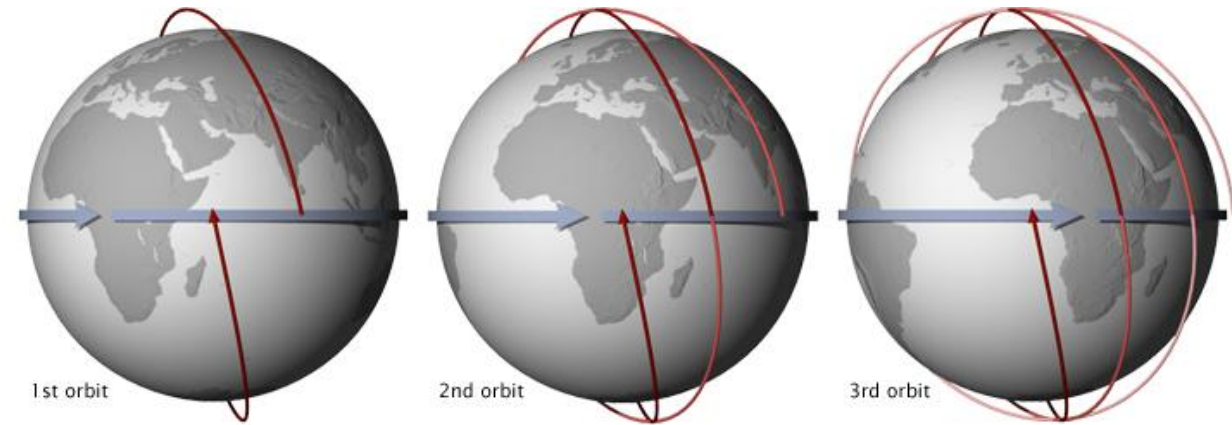
- **satellite meteorologico** = satellite artificiale in orbita terrestre utilizzato per raccogliere informazioni sulle condizioni meteo-atmosferiche di vaste zone del pianeta
- 3 satelliti operativi in orbita polare
- 6 satelliti operativi geostazionari
- diversi satelliti di ricerca e sviluppo
- dotati di sensori ottici nel visibile e nell'infrarosso
- diversi satelliti in orbita polare sono dotati di strumenti di sondaggio in grado di fornire profili verticali di temperatura e umidità in aree prive di nuvole.
- I satelliti geostazionari possono essere utilizzati per misurare la velocità del vento nei tropici tracciando le nuvole e il vapore acqueo



MTG – Meteosat FCI VIS0.6μm – 18/05/2026 12:40 UTC

Satelliti polari

- I satelliti possono restare in orbita (circolare) attorno alla terra solo se la gravità bilancia la forza centrifuga
- $F_c = \frac{m v^2}{r} = G \frac{mM}{r^2} = F_g \rightarrow v^2 = G \frac{M}{r} \rightarrow r = G \frac{M}{v^2}$
- Con periodo $T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi r^{3/2}}{\sqrt{GM}} = \frac{2\pi(R+h)^{3/2}}{\sqrt{GM}}$
- Il periodo non dipende dalla massa del satellite ma aumenta all'aumentare della distanza dalla terra
- I satelliti polari ruotano a basse quote di circa 300-400 km oppure 700-800 km
- Il periodo di rotazione è di 90-100 minuti ovvero riescono a percorrere 16 orbite al giorno
- Le orbite sono calcolate, nella maggior parte dei casi, in modo che siano sincronizzate con il sole. In altre parole alle località che si trovano all'equatore, incrociate dall'orbita del satellite, l'ora locale è la medesima.



[Dristhtiiias](#)

Satelliti geostazionari

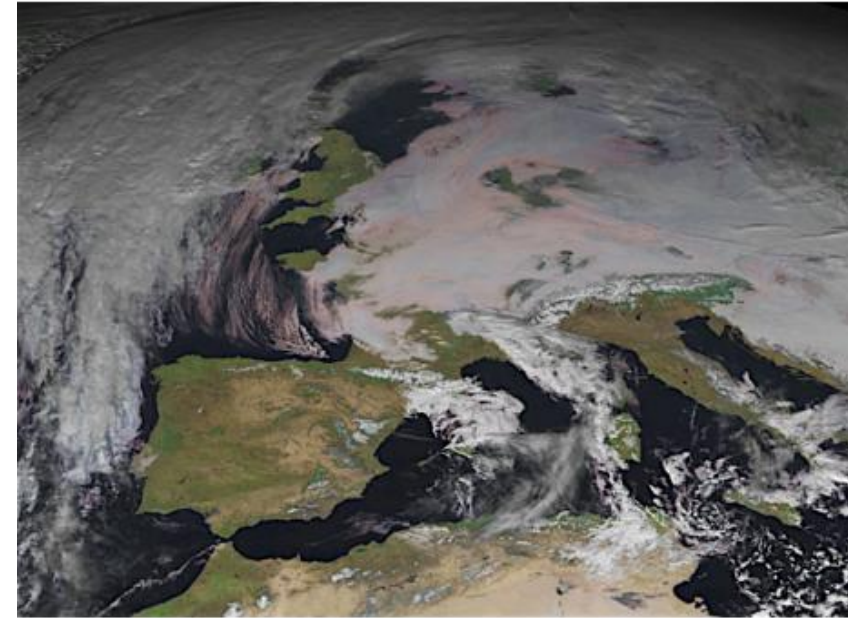


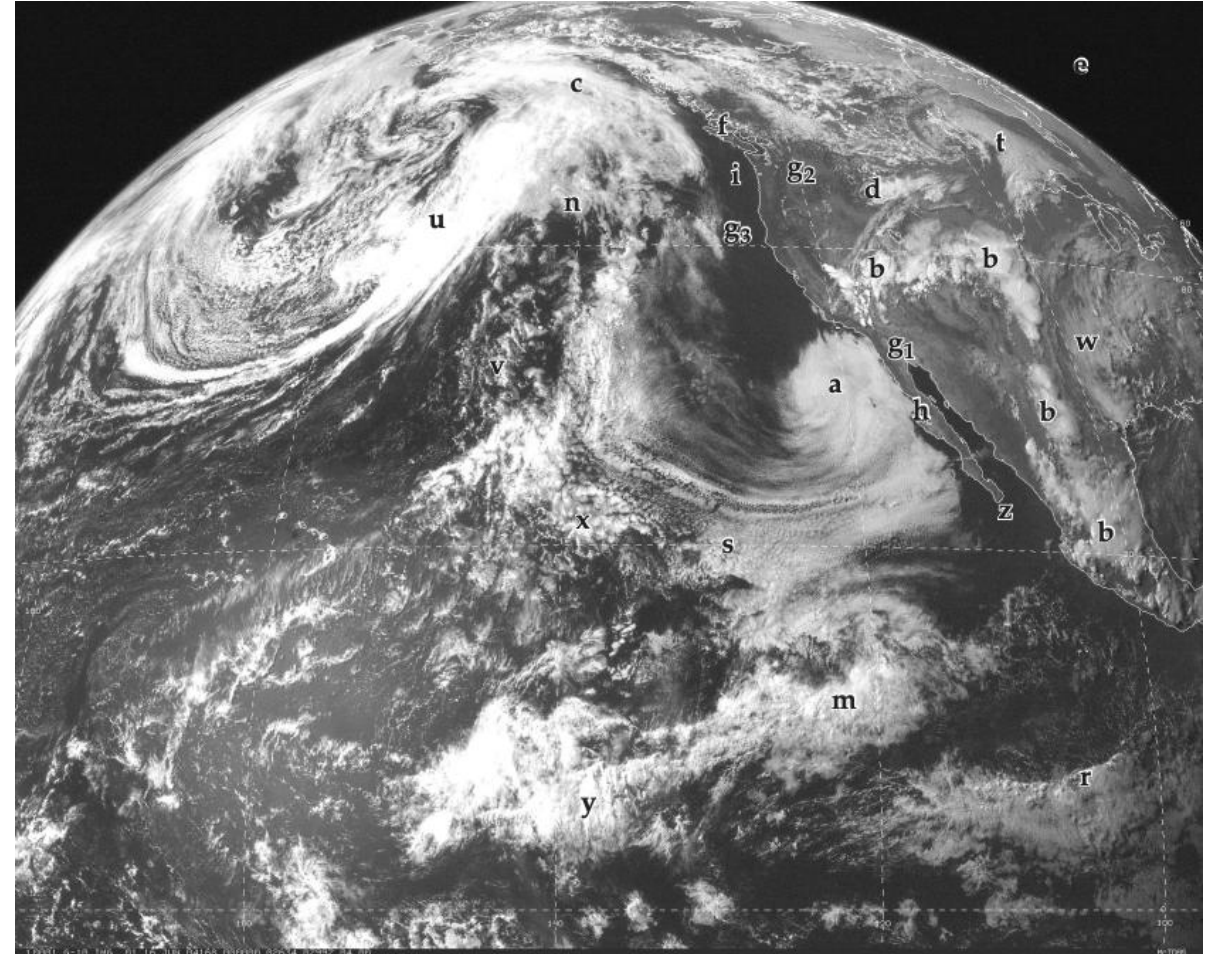
Figure 8.11

Top: Example of Earth disk image from Meteosat-10 (MSG), which was launched in July 2012, and is parked at 0° longitude.

- I satelliti geostazionari sono in orbita sopra l'equatore in modo che il loro periodo coincida con la rotazione della terra
- Se $T=24$ ore allora $h=35800$ km
- I satelliti geostazionari osservano quindi sempre lo stesso punto
- L'angolo di osservazione impedisce la visione ai poli. Le latitudini massime sono di 60° - 70° .
- L'immagine terrestre non viene ottenuta in un solo istante ma attraverso uno scan che richiede tempo.

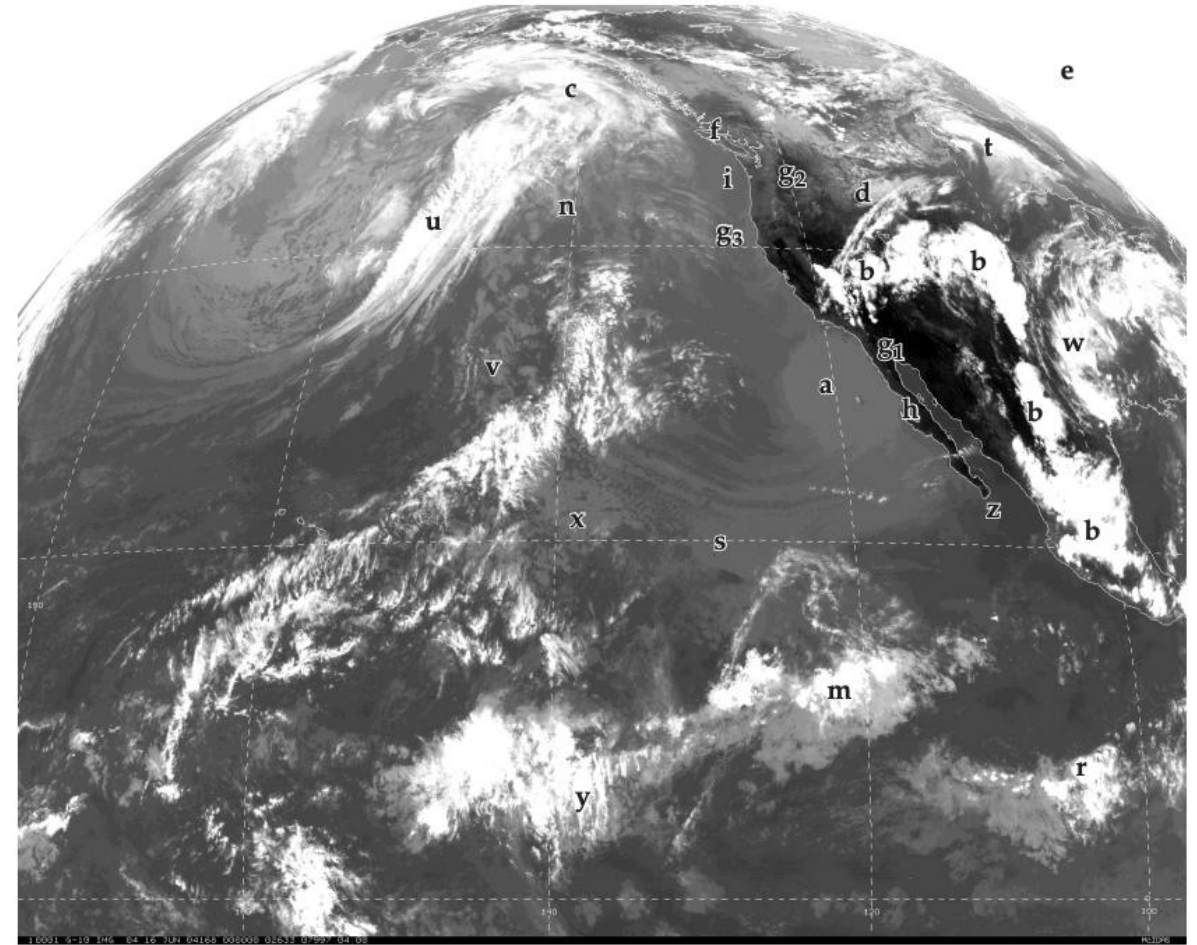
Canale Visibile

- I satelliti sono provvisti di un **radiometro** che misura radiazione EM in vari canali proveniente dalla terra
- Tra i 600-800 nm c'è il canale visibile che riceve radiazione EM riflessa dalla superficie terrestre, dal mare e dalle nubi.
- Fornisce immagini simili a quelle che si avrebbe guardando ad occhio nudo
- Le immagini hanno rilevanza solo di giorno
- Le gradazioni di grigio rappresentano l'albedo



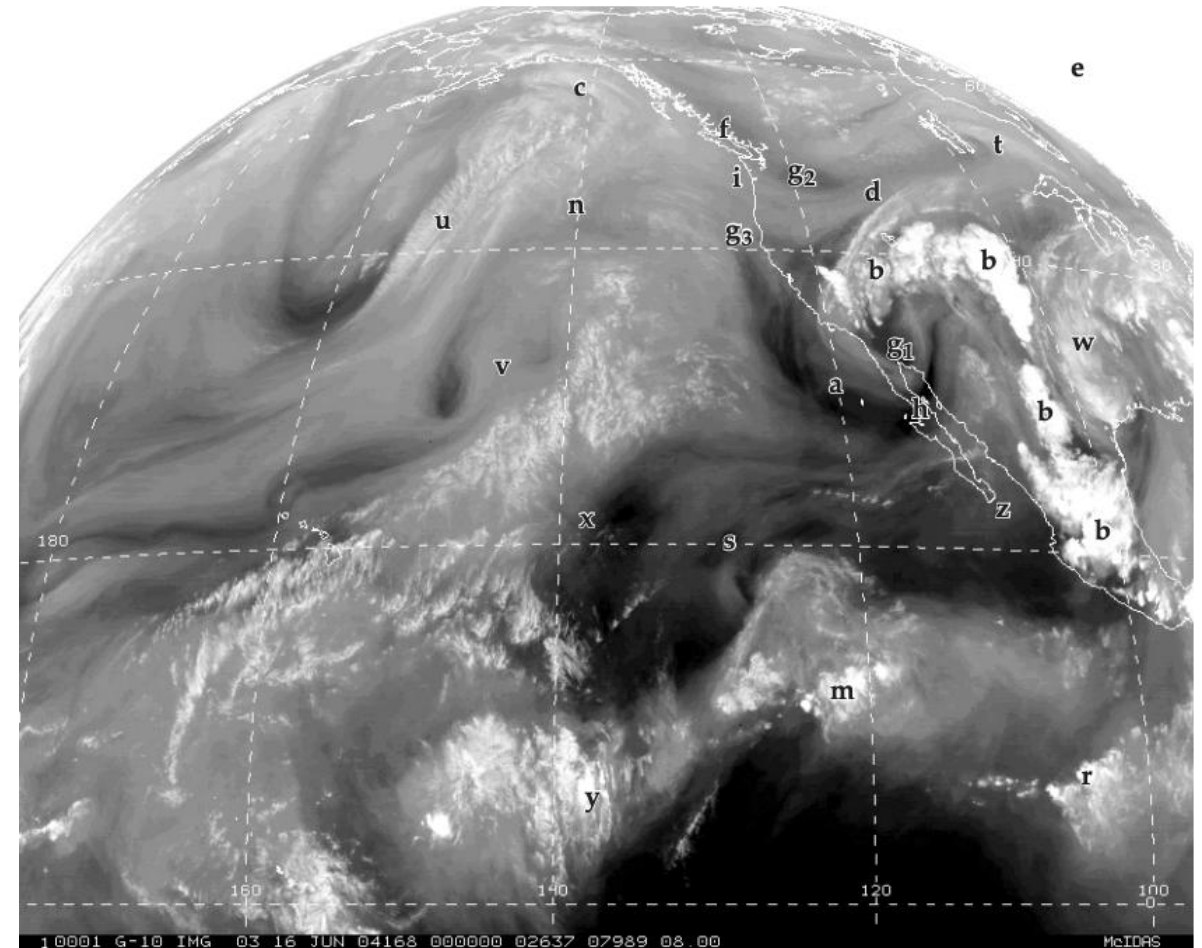
Canale Infrarosso

- Tra 1-30 μm c'è il canale infrarosso che riceve radiazione EM dagli strati nuvolosi otticamente densi posti alle quote più elevate e la radiazione emessa dalla superficie
- Il canale (in particolare 10-12.5 μm) è trasparente alla radiazione proveniente dalla superficie terrestre
- Le immagini sono utili h24 (anche di notte)
- La radiazione è correlata alla temperatura
- Le immagini sono solitamente in scala di grigi: temperature più fredde appaiono più bianche e quelle più calde più scure.
- Le nuvole di colore bianco indicano nuvole alte (cirri, incudini temporalesche, ecc.), mentre le nuvole grigio scuro sono nuvole basse (strati, nebbia, ecc.).



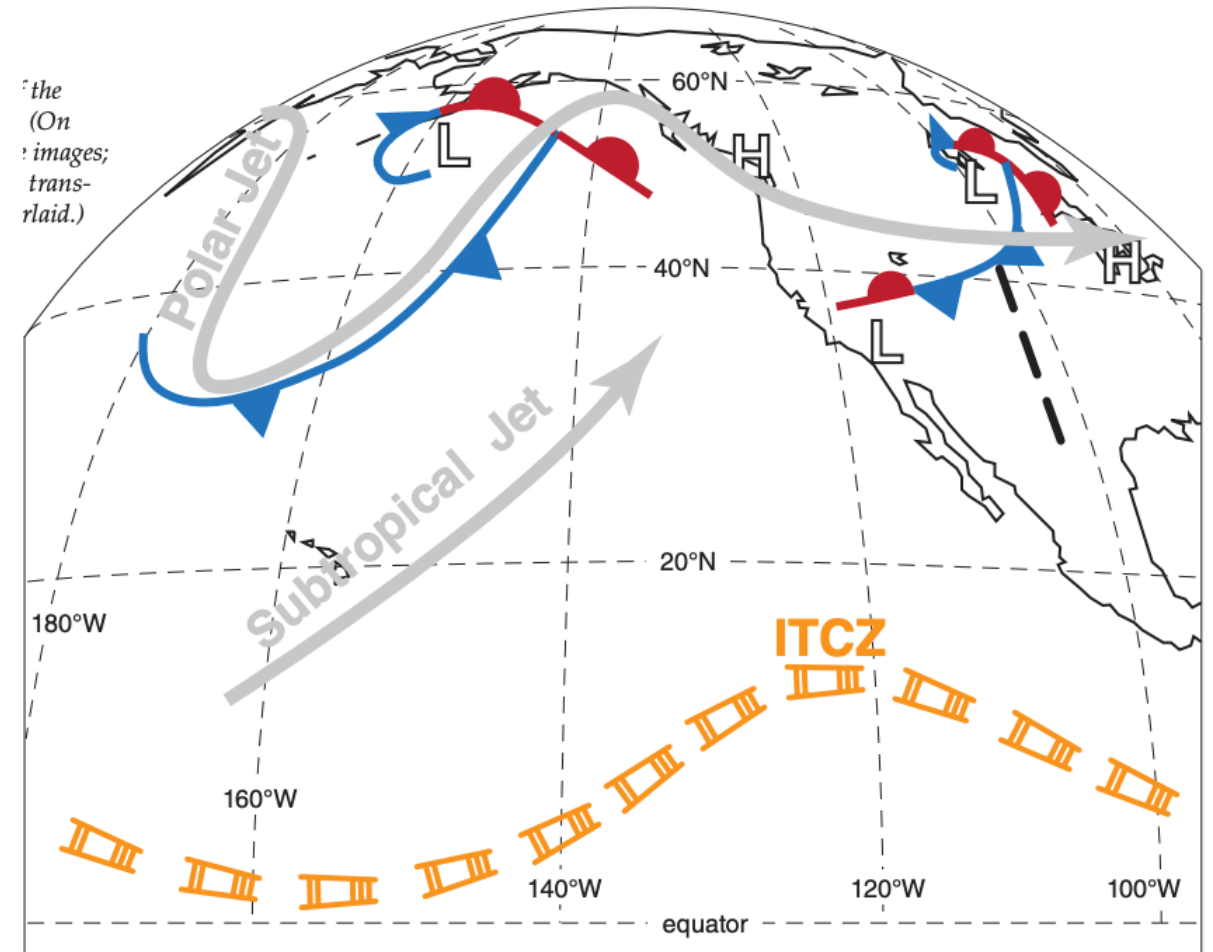
Canale WV

- A $6.7\mu\text{m}$ c'è il canale vapore acqueo più frequentemente usato
- È una delle lunghezza d'onda in cui l'acqua assorbe radiazione che riceve i) dagli strati nuvolosi otticamente densi posti alle quote più elevate ii) dalla superficie
- Dà indicazione principalmente dell'umidità relativa negli strati 300-600 hPa
- Aria più secca in quota → colori più scuri
- Aria più umida in quota → colori più chiari
- Le immagini forniscono dati sia di giorno che di notte
- le animazioni delle sequenze di immagini mostrano il movimento dell'aria, indipendentemente dalla presenza o meno di nuvole
- forniscono le condizioni medie su uno spesso strato nella troposfera superiore



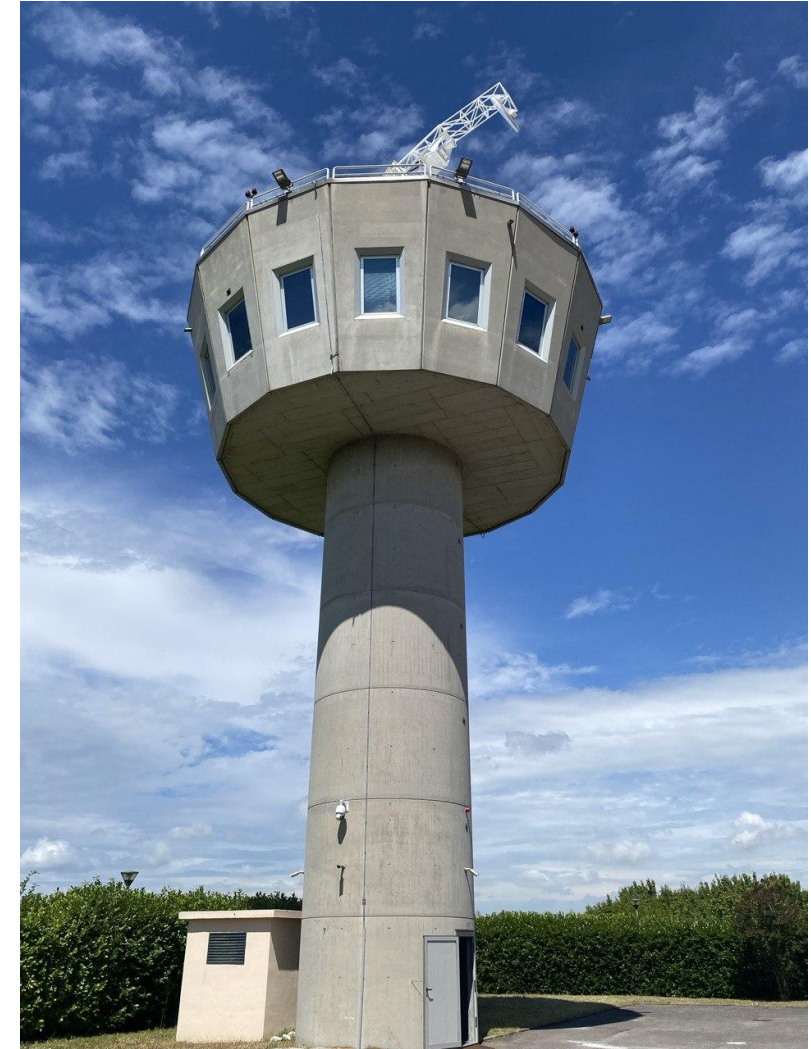
Interpretazione

- a) Nebbia o strati nei bassi livelli (anche n)
- b) Temporalì (anche m)
- c) Cirri, cirrostrati o cirrocumuli
- d) Nubi alle medie quote
- e) Spazio
- f) Montagne con neve sulle cime (non sono nubi)
- g) Superfici marine o terrestri
- h) Folding della tropopausa
- u) Ramo ascendente della corrente a getto



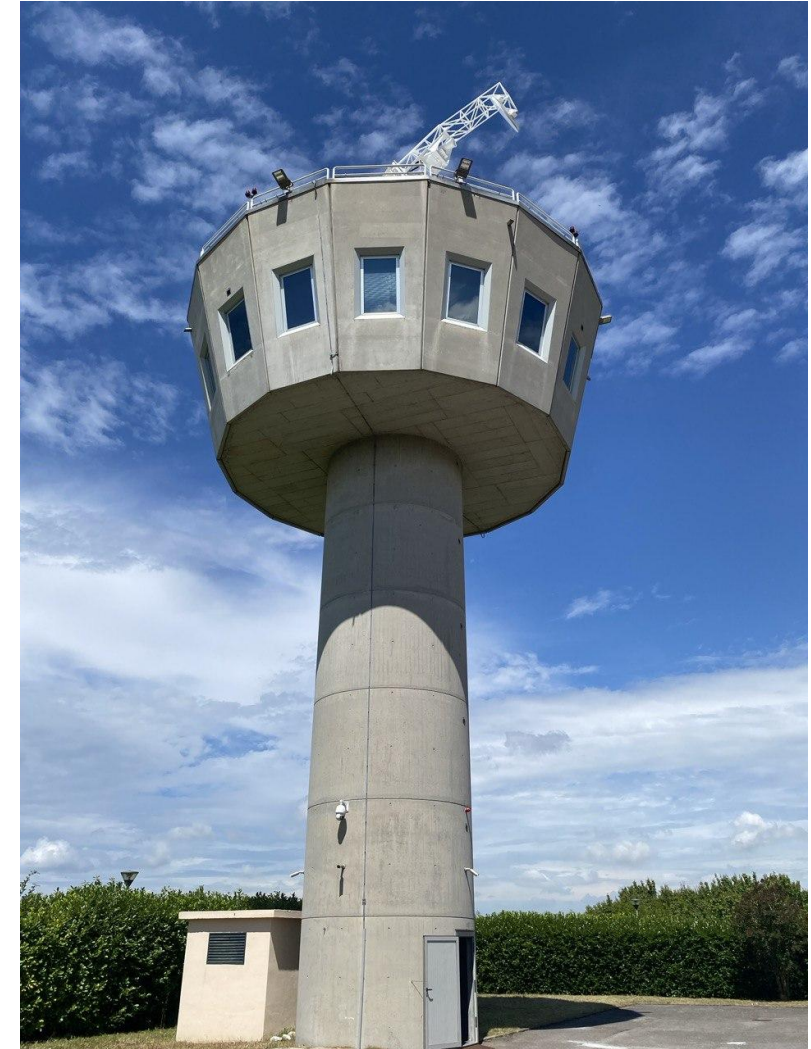
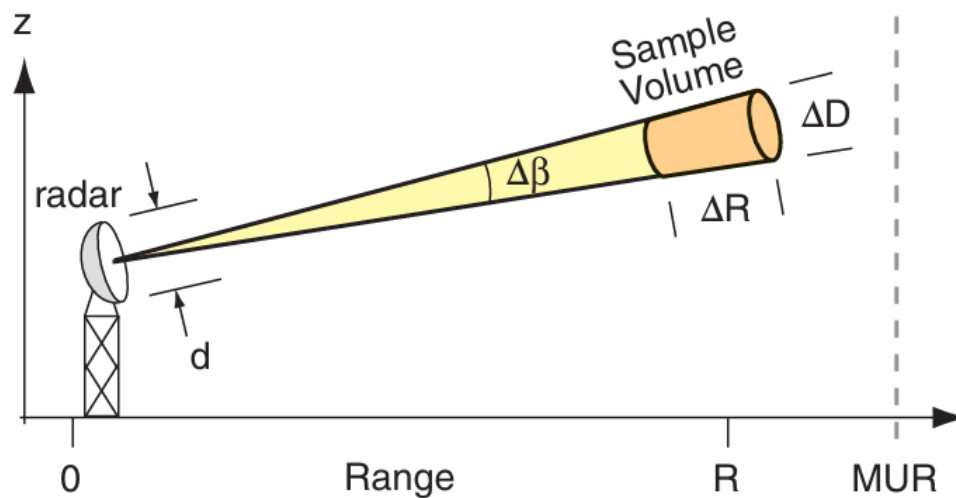
Il radar meteorologico

- RADAR = RAdio Detection and Ranging
- Il radar si basa sull'invio di onde EM (nello specifico microonde $\lambda \approx 1-10$ cm) nello spazio tramite l'antenna che permette di focalizzarle in una precisa direzione
- Quando l'onda EM colpisce un oggetto (target) le sue cariche elettriche vengono eccitate in moto oscillatorio. Questo determina la riemissione di parte dell'energia in tutte le direzioni (scattering/diffusione).
- Un'ulteriore parte di questa raggiunge di nuovo l'antenna (backscatter), il segnale viene digitalmente amplificato e processato.
- La **distanza** è quindi misurabile tramite il tempo impiegato dal segnale per percorrere andata e ritorno.
- La **posizione** è legata alla direzione di puntamento dell'antenna (simmetria conica)

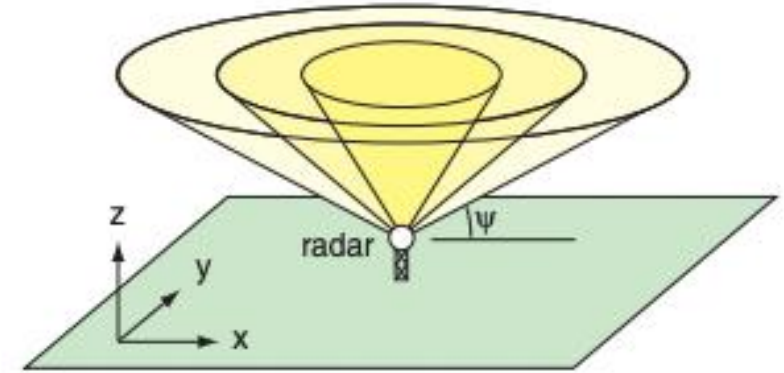
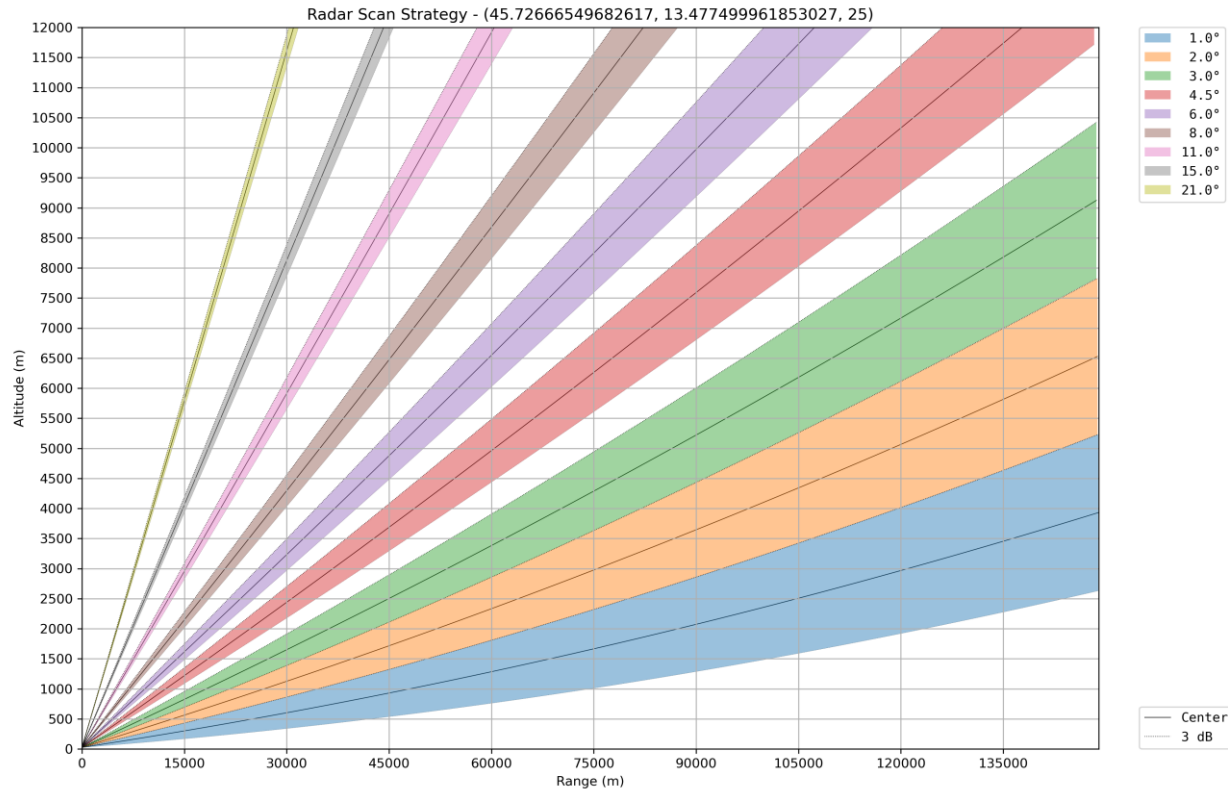


Il radar meteorologico

- I radar si distinguono a seconda della lunghezza d'onda.
- Maggiore la lunghezza d'onda, minore l'attenuazione (si «vede» più lontano) e minore la capacità di detezione di target piccoli
 - Banda S ($\lambda \approx 7.5-15$ cm) : in grado di individuare insetti ed uccelli, ampio range (500 km) ma l'antenna è enorme (9 km)
 - Banda C ($\lambda \approx 3.75-7.5$ cm) : la maggior parte dei radar in Europa sono in questa banda
 - Banda K ($\lambda \approx 0.75-2.5$ cm): riescono a vedere anche precipitazioni molto piccole ma sono a corto raggio, tipicamente usati negli aeroporti



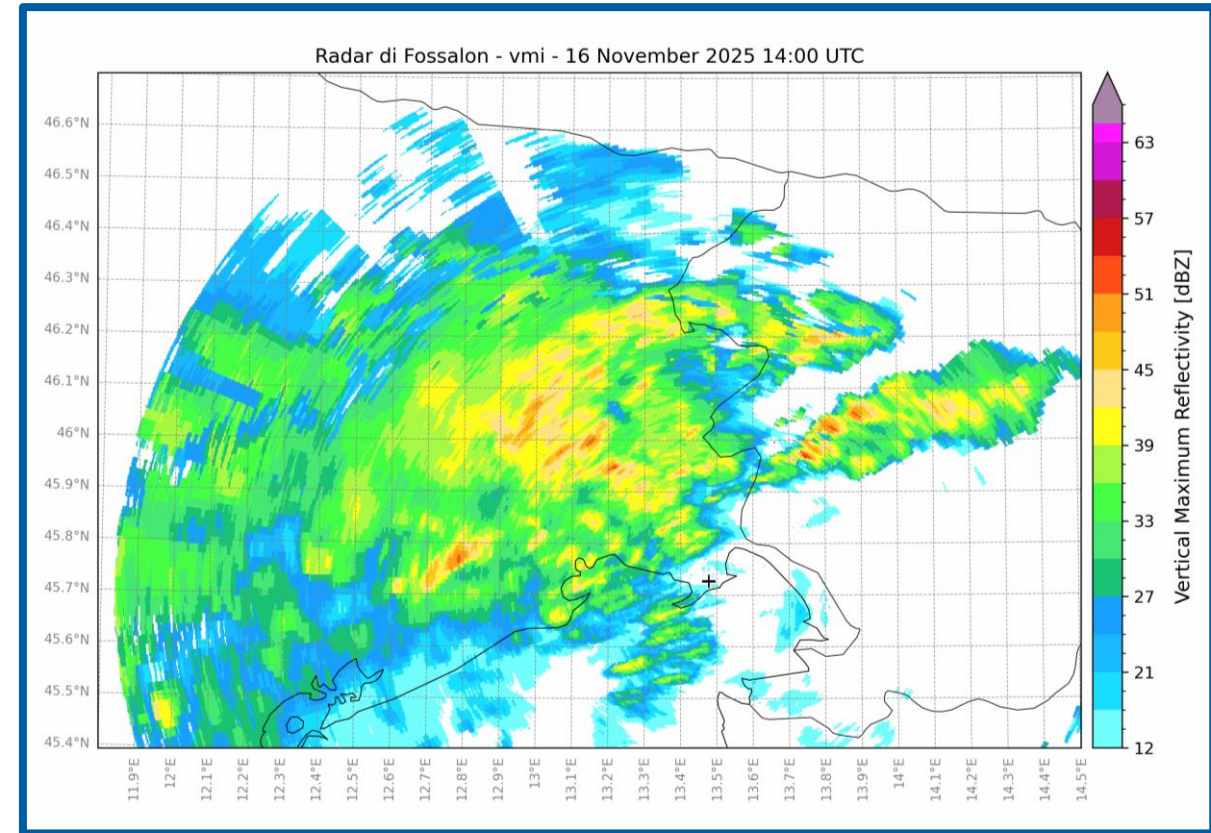
Il radar meteorologico



- L'antenna trasmette impulsi di durata molto breve ($\Delta t \approx 0.5-10 \mu s$) a una specifica frequenza chiamata PRF (pulse repetition frequency)
- La scansione avviene a simmetria conica cambiando l'angolo di elevazione e poi l'azimuth
- Una scansione viene completata ogni 4-10 minuti

Riflettività

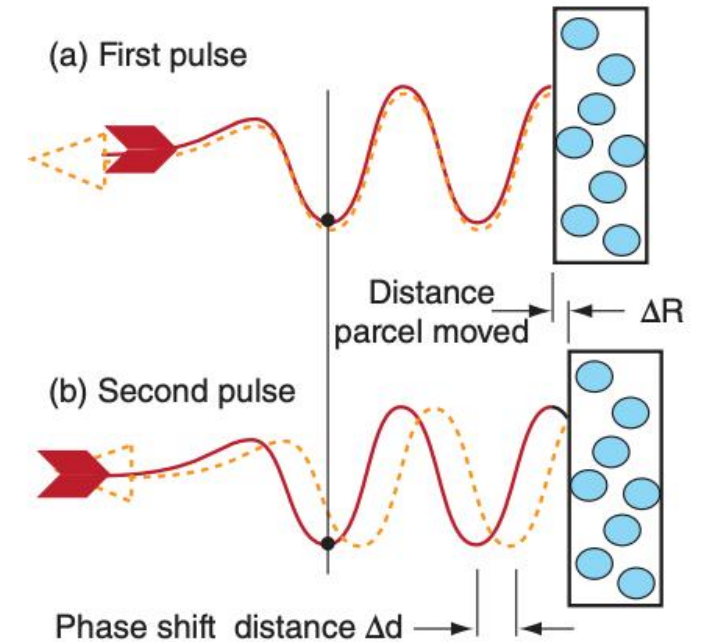
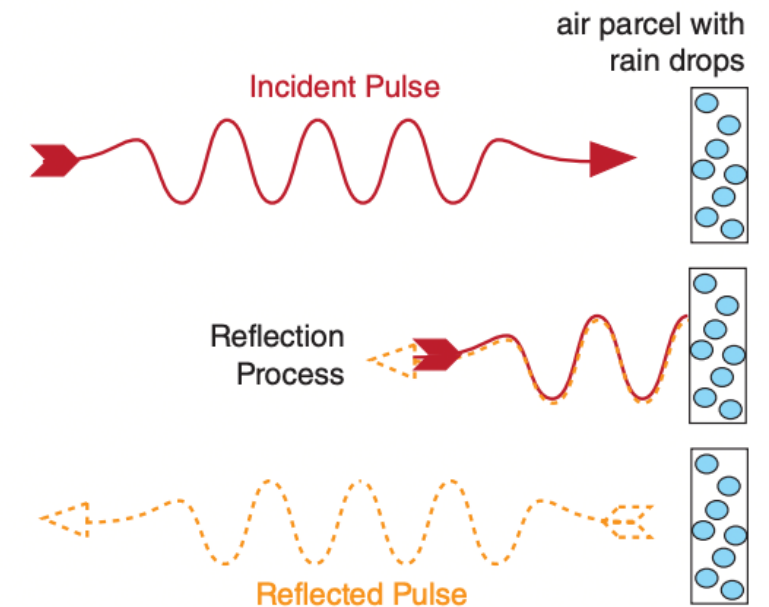
- La variabile radar più frequentemente consultata è la riflettività $Z = \frac{\sum D_i^6}{V} \left[\frac{mm^6}{m^3} \right]$ che è il risultato su un volume V della somma dei diametri (alla sesta) delle precipitazioni presenti
- Z è fortemente dipendente dalla dimensione delle precipitazioni: 1 goccia di 3 mm dà il medesimo contributo di 729 gocce di 1 mm
- La riflettività è di solito graficata nelle mappe in decibel $dbZ = 10 \log(Z)$
 - 25-30 dbZ → neve asciutta o pioggia debole
 - 40-50 dbZ → pioggia intensa
 - >60 dbZ → rovesci convettivi molto intensi o grandine
- La riflettività dipende anche dall'indice di rifrazione (la neve riflette molto meno della pioggia)
- Molte volte dalla riflettività viene dedotto anche il rate di precipitazione tramite un'equazione empirica (relazione di Marshall-Palmer) $RR = a_1 \cdot 10^{a_2}$



Radar di Fossalon 16/11/2025 16.00 locali – 17/11/2025 9.00 locali

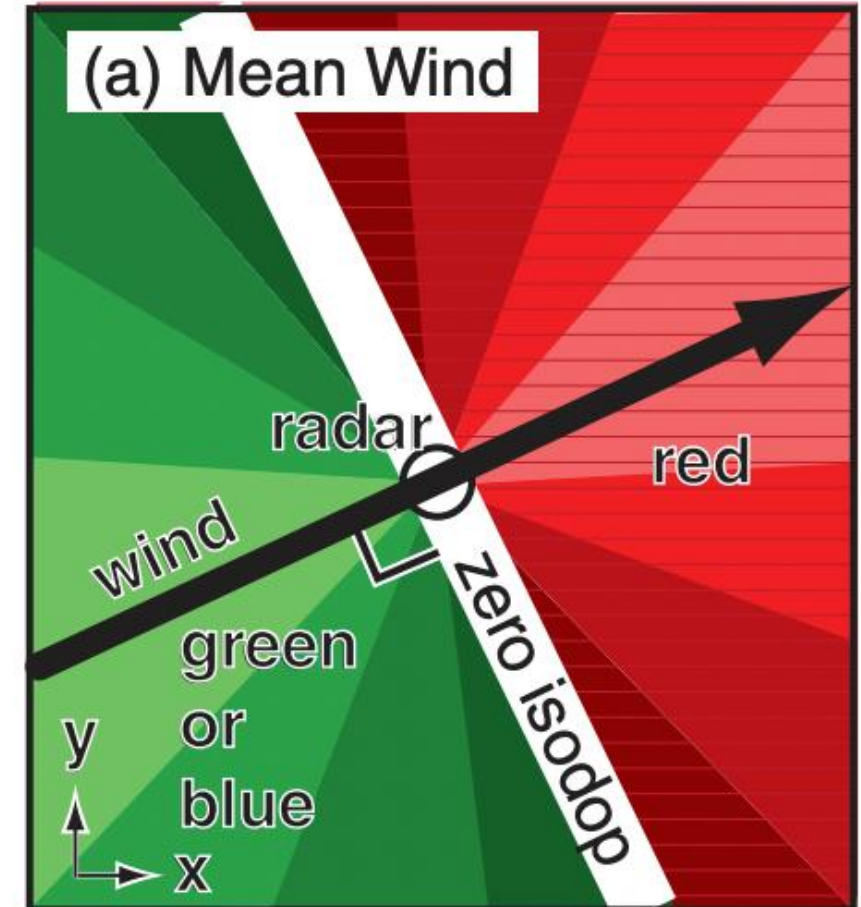
Doppler

- I radar trasmettono un segnale di frequenza nota ν . Una volta diffuse dalle idrometeore in movimento, le onde EM che ritornano al radar hanno una frequenza diversa, pari a $\nu \pm \Delta\nu$ (effetto Doppler).
- In verità la variazione di frequenza è così piccola che è difficile misurarla per questo non si misura lo shift in frequenza ma in **fase** dell'onda EM.
- Si consideri un impulso che viene scatterato da una massa d'aria contenente goccioline. Quando tale massa si trova in una determinata posizione e viene «illuminata» da un impulso radar, può verificarsi una differenza di fase misurabile (differenza nella posizione dei minimi d'onda) tra l'onda incidente e quella diffusa.
- Se la massa d'aria si è spostata a una distanza leggermente diversa dal radar quando arriva l'impulso successivo, si avrà uno sfasamento diverso rispetto a quello del primo impulso.



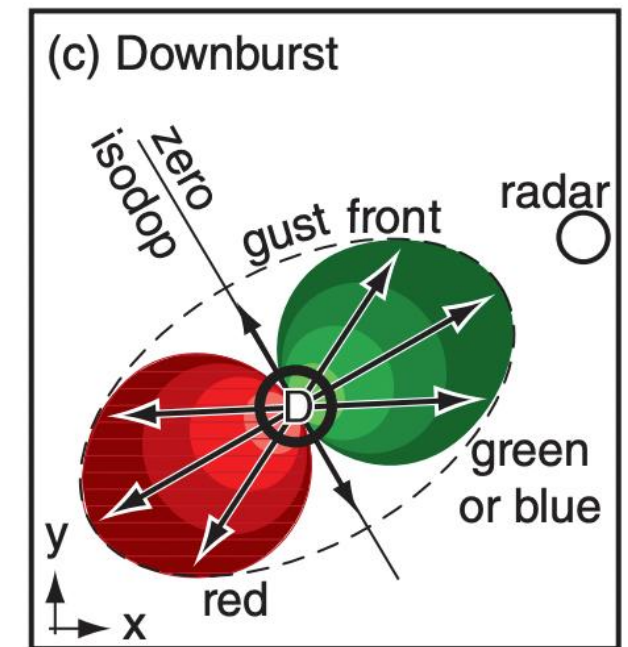
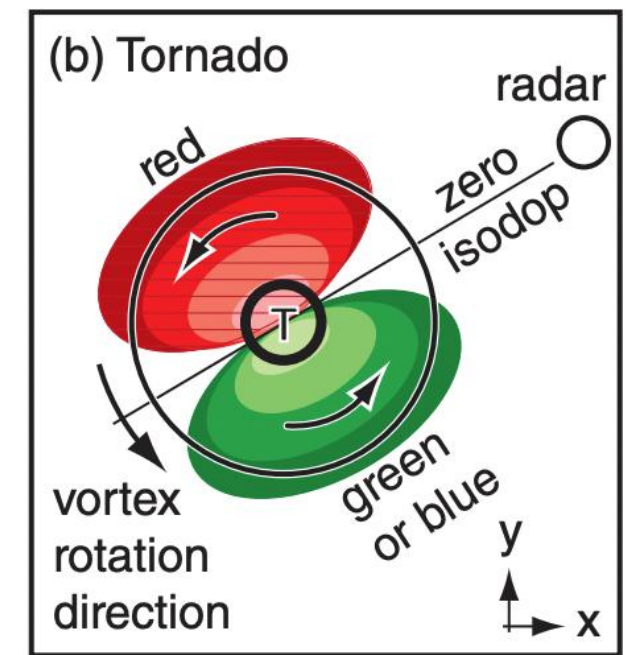
Interpretazione doppler

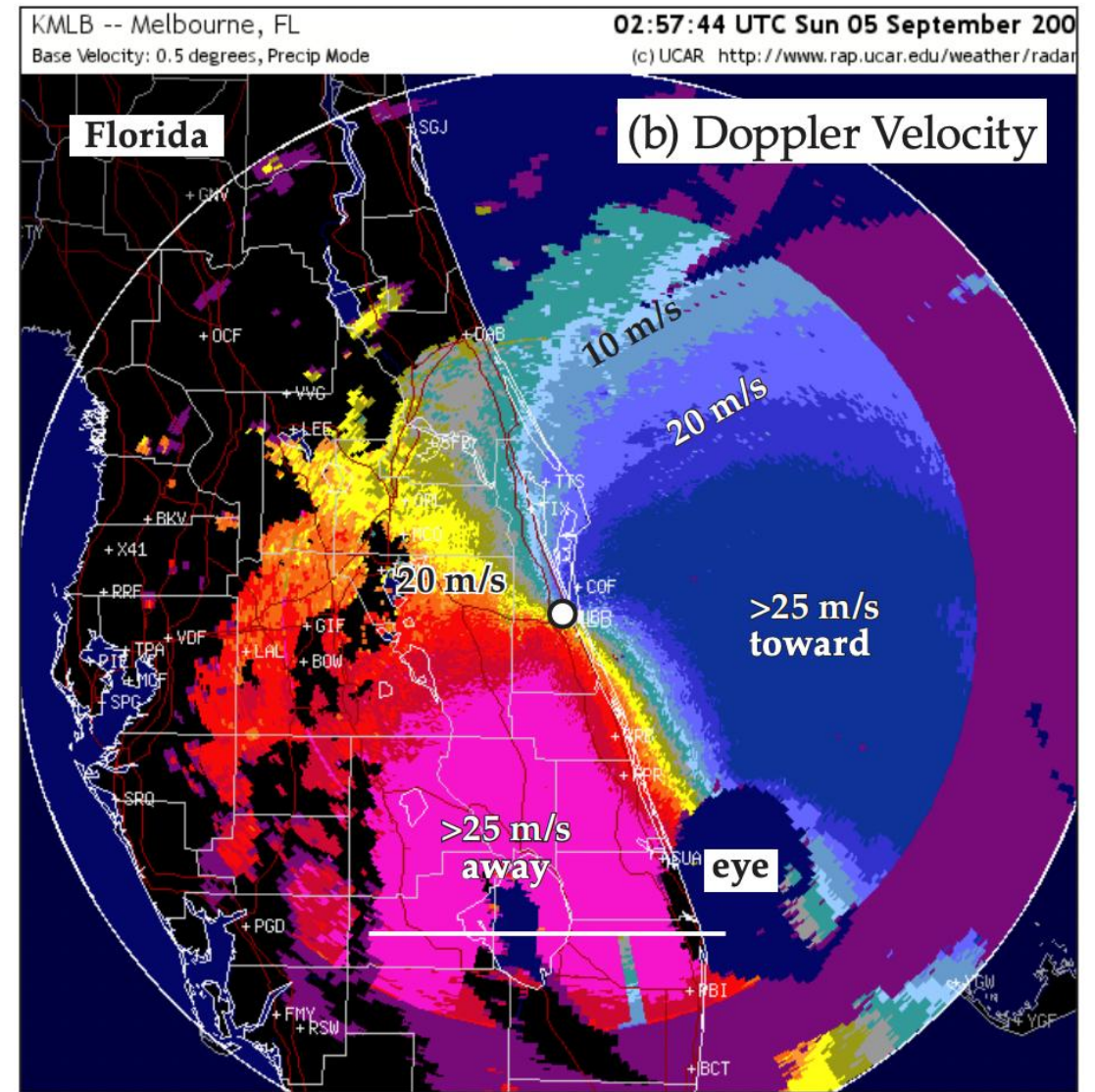
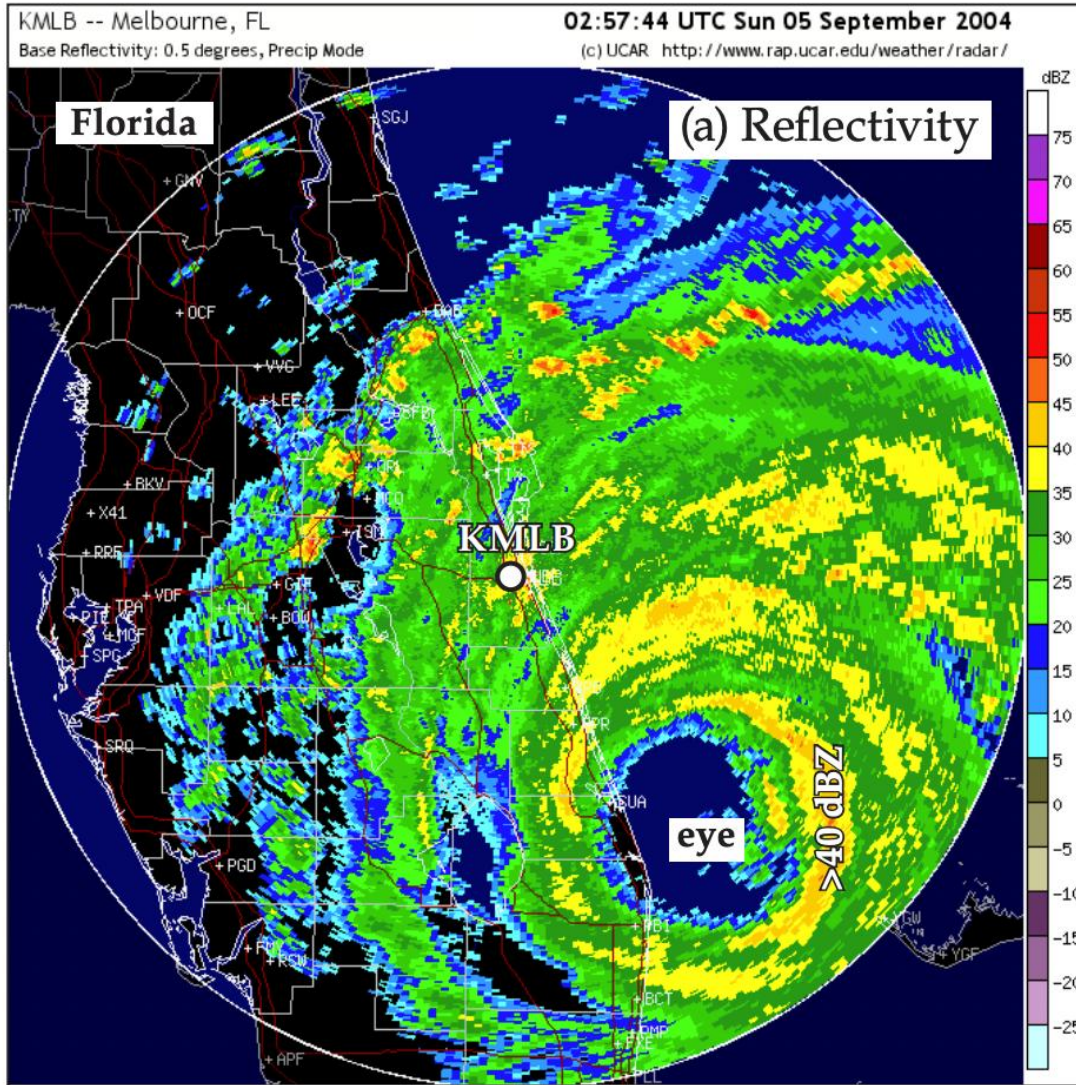
- Tramite il doppler non si misura la velocità reale ma unicamente la velocità radiale ovvero la componente della velocità lungo la direzione del radar
- La velocità radiale di un target è sempre minore o al più uguale alla velocità reale
- Velocità positive (in figura verde; $dR/dt > 0$) → target in allontanamento dal radar
- Velocità negative (in figura rosso; $dR/dt < 0$) → target in avvicinamento al radar
- Il doppler radar è quindi in grado di permettere l'individuazione della direzione dei venti in modo continuo (in caso di assenza di stazioni meteo) sia vicino al suolo che in quota



Segnali nel doppler

- La rotazione dei mesocicloni nelle supercelle (o molto più difficilmente i tornado) possono essere individuati nel campo doppler tramite il «doppietto mesociclonico»
- Si tratta di zone affiancate con velocità opposte i pixel rossi e verdi più luminosi uno accanto all'altro, con la linea di velocità zero che attraversa il centro del tornado e segue una linea radiale proveniente dal radar.
- I downburst in uscita dai temporali impattano il suolo e divergono (si espandono)
- Il radar Doppler vede i downburst come regioni vicine di venti radiali in movimento opposto
- Il segnale di downburst si distingue da quello di mesociclone perché la zona a velocità radiale zero è perpendicolare al raggio dal radar, e con la regione a velocità negative sempre più vicina al radar.





Funzionamento modello numerico

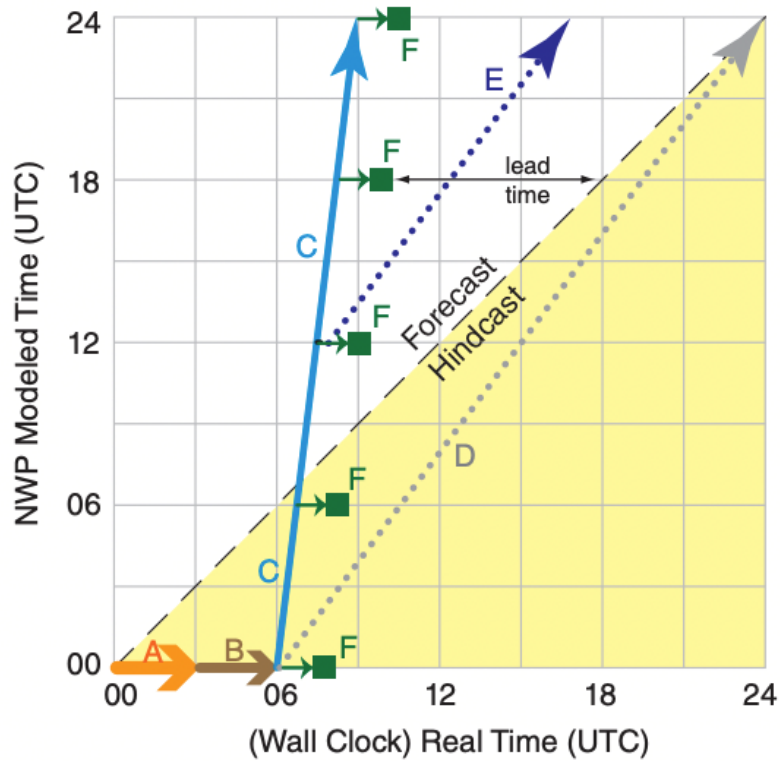


Figure 20.12

Hypothetical forecast schedule, for a 00 UTC initialization.

A: wait for weather observations to arrive.

B: data assimilation to produce the analysis (ICs).

C: coarse-mesh forecast.

D: fine-mesh forecast, initialized from 00 UTC.

E: fine-mesh forecast initialized from coarse forecast at 12 h.

F: post-processing and creation of products (e.g., weather maps).

- i. Le osservazioni dal GOS devono essere raccolte. Passano attraverso un sistema di controllo automatico dei dati che ne verifica la qualità ed elimina i dati sospetti.
- ii. **Pre-processing.** Le osservazioni registrate in vari tempi e luoghi devono essere rimappate in una griglia omogenea che faccia da condizioni iniziali (**analisi**). Le condizioni iniziali a questo punto sono già n ore più vecchie rispetto al presente.
- iii. Il modello gira su dei timestep iniziali «già passati» (**hindcast**)
- iv. Il modello procede calcolando le variabili di interesse per timestep molto piccoli (compatibili con la stabilità dei metodi numerici). Una volta raggiunti dei timestep chiave (6,12,18,00 UTC...) i campi vengono salvati.
- v. Tali campi passano attraverso il **post-processing** per essere poi graficati.

Funzionamento modello numerico

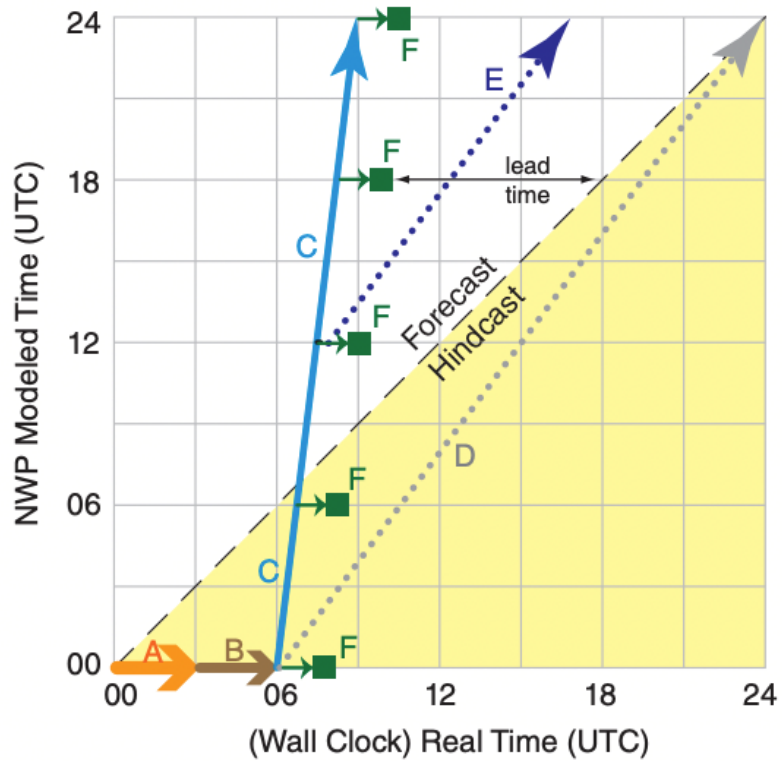


Figure 20.12

Hypothetical forecast schedule, for a 00 UTC initialization.

A: wait for weather observations to arrive.

B: data assimilation to produce the analysis (ICs).

C: coarse-mesh forecast.

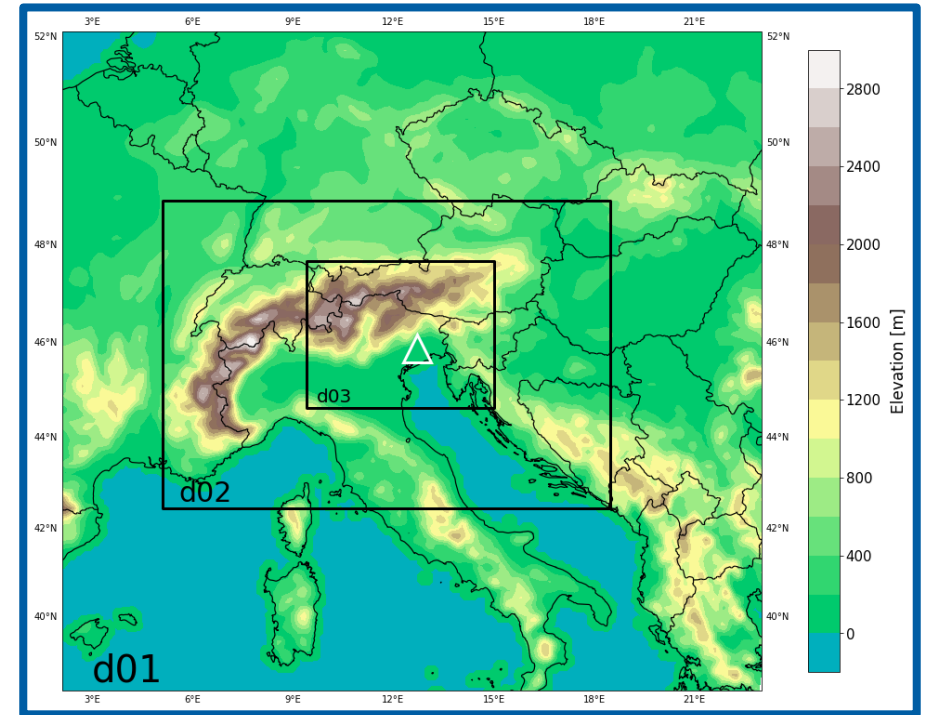
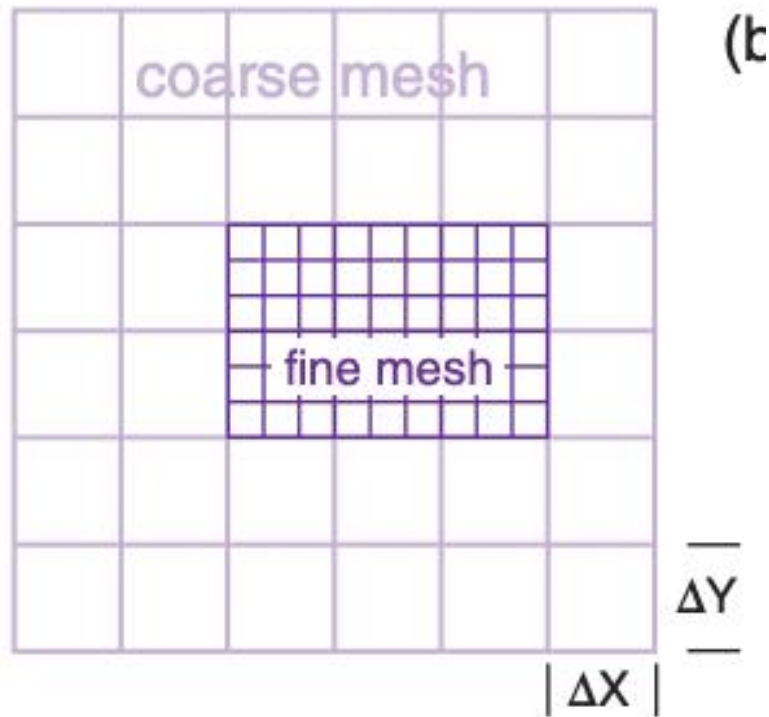
D: fine-mesh forecast, initialized from 00 UTC.

E: fine-mesh forecast initialized from coarse forecast at 12 h.

F: post-processing and creation of products (e.g., weather maps).

- Con **lead time** si indica quanto la previsione è «avanti» rispetto al tempo presente
- Un modello a bassa risoluzione (C in fig.) potrebbe richiedere 3 ore di calcolo per ogni 24 ore di previsione.
- Un modello ad alta risoluzione richiede sicuramente più tempo per l'esecuzione. Il modello (D) impiega 18 ore per effettuare una previsione di 24 ore (se inizializzato dalle condizioni iniziali delle 00 UTC, potrebbe non uscire mai dall'hindacast)
- È possibile inizializzare il modello ad alta risoluzione dalla previsione del modello a bassa risoluzione delle 12 UTC (**nesting**).

Nesting



- È possibile utilizzare una griglia grossolana su un dominio esteso per coprire i sistemi meteorologici sinottici.
- Al suo interno, si inserisce una griglia più fine su un dominio più piccolo per catturare i dettagli alla mesoscala dove sono più necessari.
- Tipicamente, la maglia fine ha una dimensione della griglia orizzontale (ΔX) pari a 1/3 (o 1/5) della dimensione della griglia a maglia grossolana
- **One-way nesting:** la griglia grossolana viene risolta per prima e il suo output viene applicato come condizioni al contorno variabili nel tempo alla griglia più fine.
- **Two-way nesting:** entrambe le griglie vengono risolte insieme e le caratteristiche di ciascuna griglia vengono inserite nell'altra ad ogni passo temporale.

La «silenziosa rivoluzione» delle previsioni del tempo

REVIEW

Bauer et al. (2015), Nature

doi:10.1038/nature14956

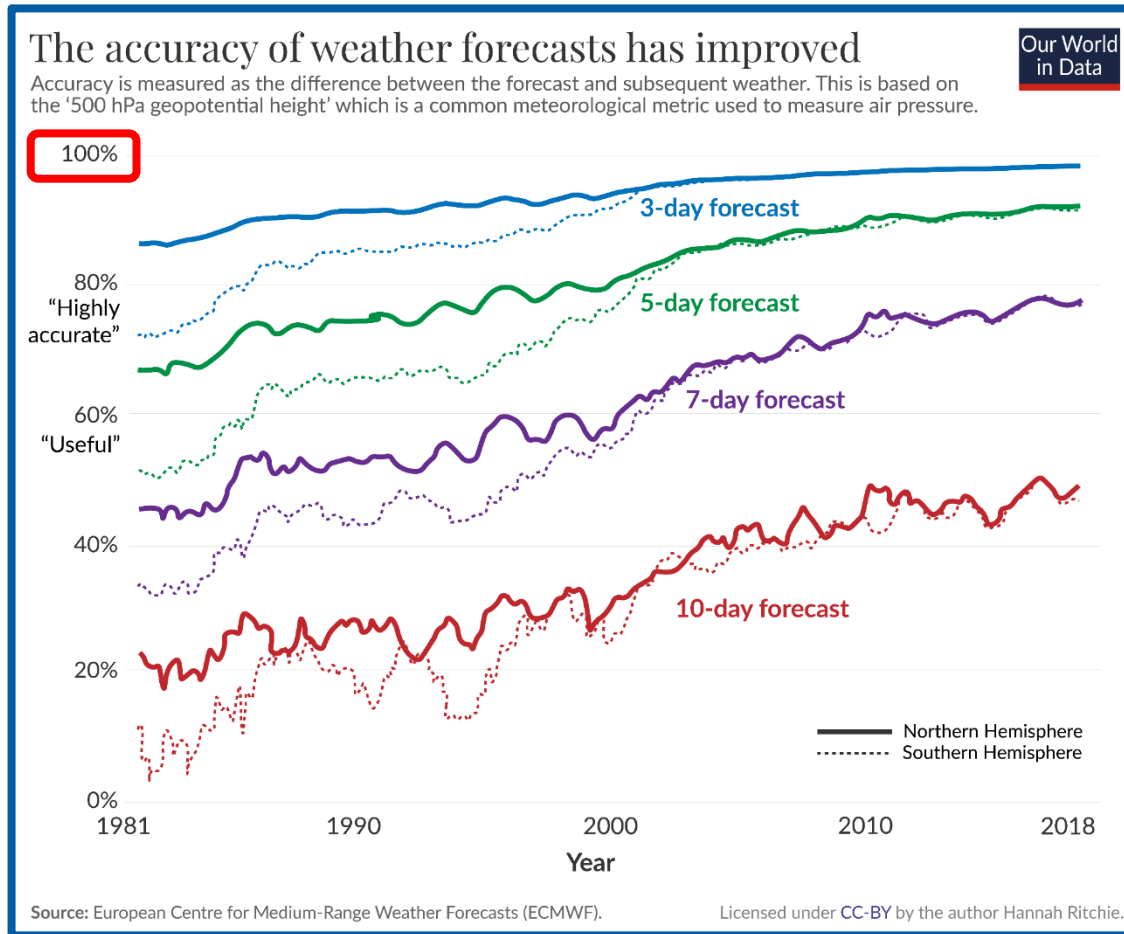
The quiet revolution of numerical weather prediction

Peter Bauer¹, Alan Thorpe¹ & Gilbert Brunet²

«I progressi nella previsione numerica del tempo rappresentano una rivoluzione silenziosa, poiché sono il risultato di un accumulo costante di conoscenze scientifiche e di avanzamenti tecnologici nel corso di molti anni che, con poche eccezioni, non sono stati accompagnati dall'aura di scoperte fondamentali nella fisica. Tuttavia, l'impatto della previsione numerica del tempo è tra i più significativi in qualsiasi ambito della scienza fisica.

*Come problema computazionale, **la previsione meteorologica globale è paragonabile alla simulazione del cervello umano e dell'evoluzione dell'Universo primordiale, ed è effettuata quotidianamente nei principali centri operativi in tutto il mondo.**»*

La «silenziosa rivoluzione» delle previsioni del tempo



Fattori determinanti per il miglioramento:

- Maggiori osservazioni (satelliti)
- Metodi di ensemble (spaghetti)
- Maggiore comprensione dei processi fisici
- Parametrizzazioni di processi per cui non esistono equazioni
- Maggiore potere computazionale e supercomputer sempre più potenti
- Uso di AI e ML

Accuratezza della previsione del Geopotenziale a 500 hPa dal modello ECMWF [fonte: [Our world in data](https://ourworldindata.org/)]

Bibliografia

- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: an introductory survey* (Vol. 92). Elsevier.
- Markowski, P., & Richardson, Y. (2011). *Mesoscale meteorology in midlatitudes*. John Wiley & Sons.
- Stull, R. (2015). *Practical meteorology: an algebra-based survey of atmospheric science*. University of British Columbia.
- Ban N., Slide dal corso *Numerical Modelling of Weather and Climate*, 2020

- Bjercknes, V. (1914). Meteorology as an exact science. *Monthly weather review*, 42(1), 11-14.
- Chow, F.K., Schär, C.M., Ban, N., Lundquist, K.A., Schlemmer, L., & Shi, X. (2019). Crossing Multiple Gray Zones in the Transition from Mesoscale to Microscale Simulation over Complex Terrain. *Atmosphere*.
- Tompkins, A. M. (2008, September). Cloud parametrization. In *Proc. ECMWF Seminar on Parametrization of Subgrid Physical Processes* (pp. 27-62).
- Lynch, P. and Lynch, O. (2008), Forecasts by PHONICAC. *Weather*, 63: 324-326.
- Salvador, M., Visalli, G., Tuzzi, S., Trevisan, M., Pucillo, A., Micheletti, S., & Zardi, D. (2026). Comparative assessment of high-performance naturally ventilated radiation shields for air temperature measurements. *Measurement Science and Technology*, 37(9), 095801.

Sitografia

- [Glossario meteorologia American Meteorological Society](#)
- [Sito WMO](#)