



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ
ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΚΑΙΡΟΥ**

Κ. Λαγουβάρδος

**Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος
Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών**



ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΚΑΙΡΟΥ

- **Επίλυση των εξισώσεων** που περιγράφουν την εξέλιξη της ατμόσφαιρας
 1. Δυναμικές εξισώσεις
 2. Θερμοδυναμικές εξισώσεις
 3. Εξισώσεις διατήρησης
- **Δεν υπάρχει αναλυτική λύση**
 1. εύρεση ακριβούς αναλυτικής λύσης απλοποιημένης μορφής των εξισώσεων
 2. αριθμητική επίλυση των βασικών εξισώσεων πάνω σε ένα **πλέγμα**

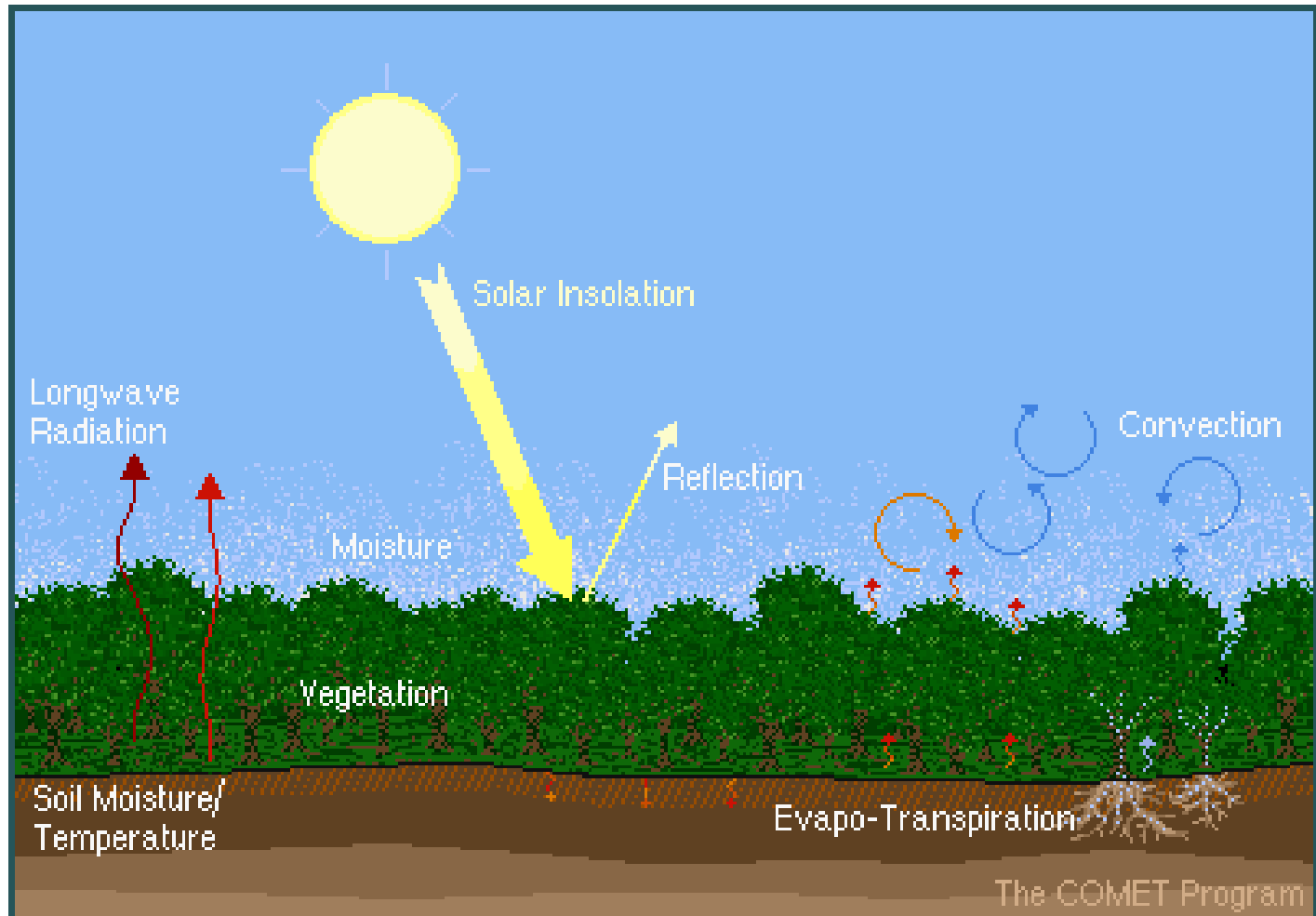


ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

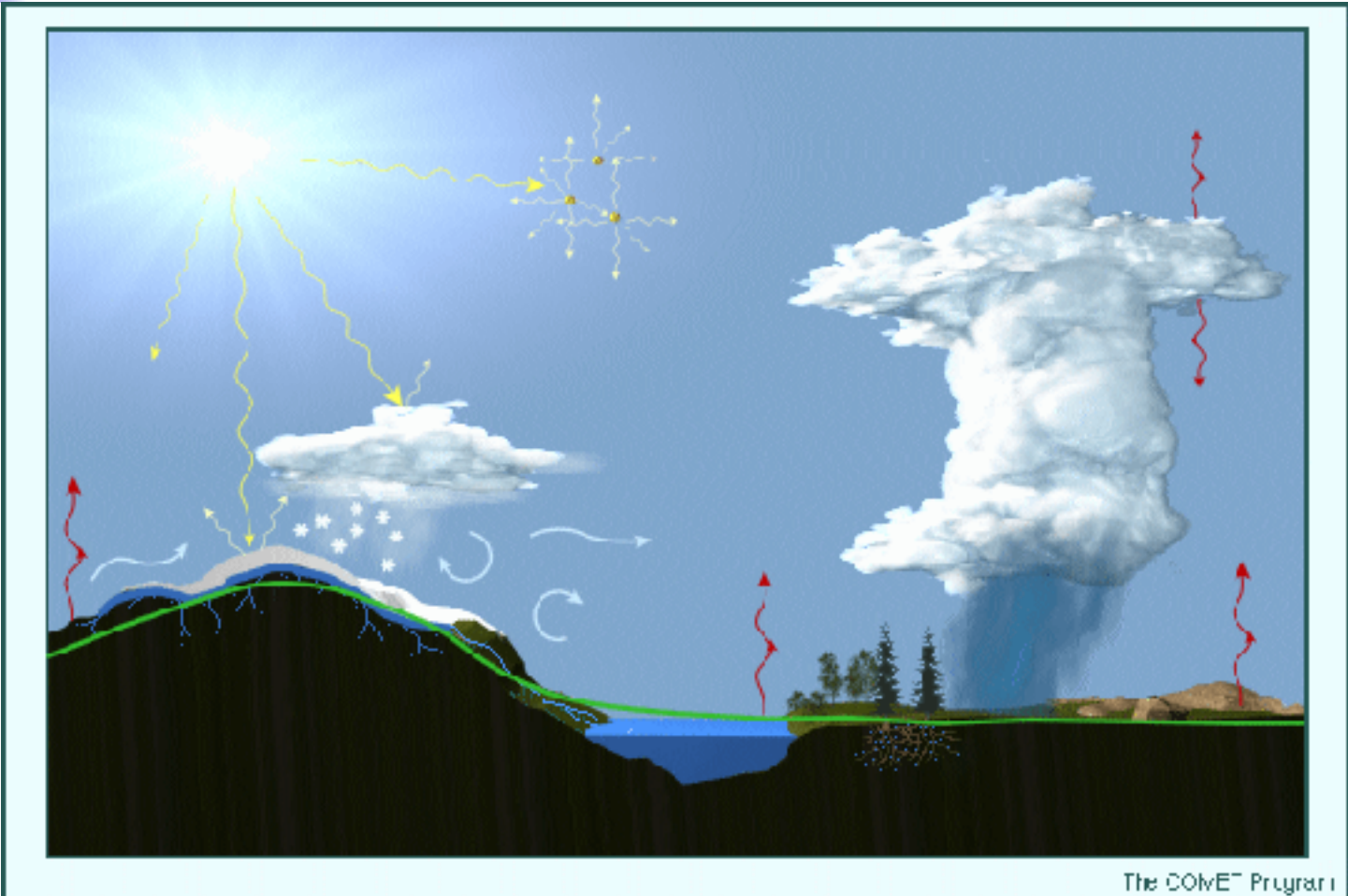
- 1922 : Richardson, πρόταση για πρόγνωση με αριθμομηχανές
- 1950 : Στον ENIAC πρόγνωση για τρεις περιπτώσεις
- 1966 : παγκόσμια κάλυψη, τοπογραφία, παραμετροποιήσεις (USA)

- 1970 : Ίδρυση του Ευρωπαϊκού Κέντρου Πρόγνωσης (ECMWF)
 - 1979 : πρώτη πρόγνωση καιρού
 - σήμερα : 10ήμερη πρόγνωση, **οριζόντια ανάλυση** ~40 km.

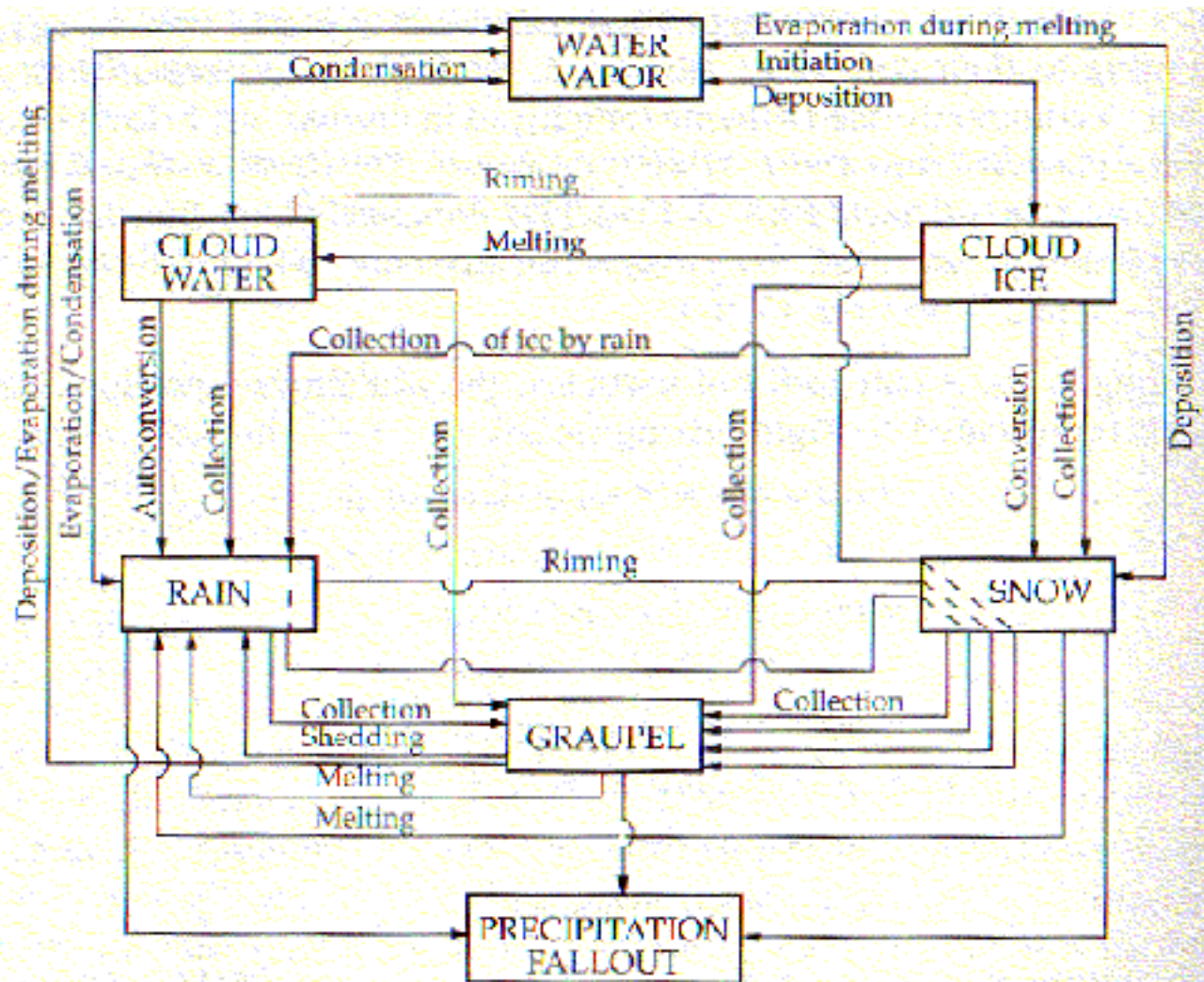
Φυσικές διεργασίες



Φυσικές διεργασίες



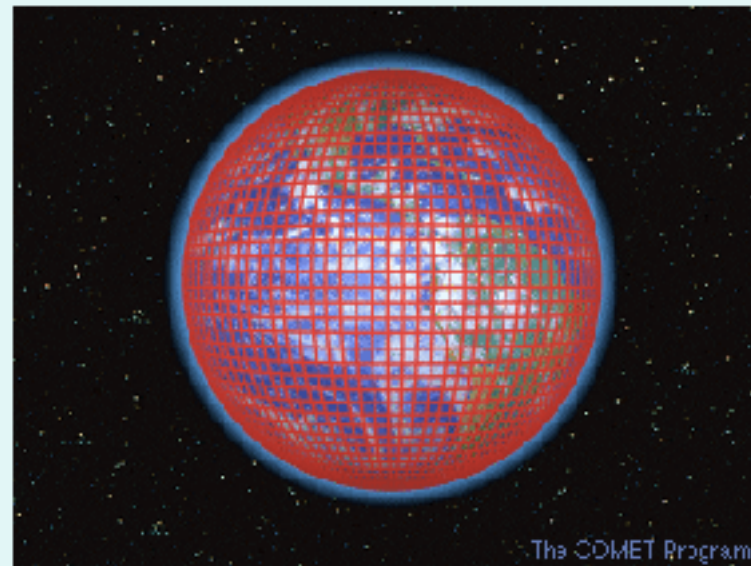
Μικροφυσική νεφών



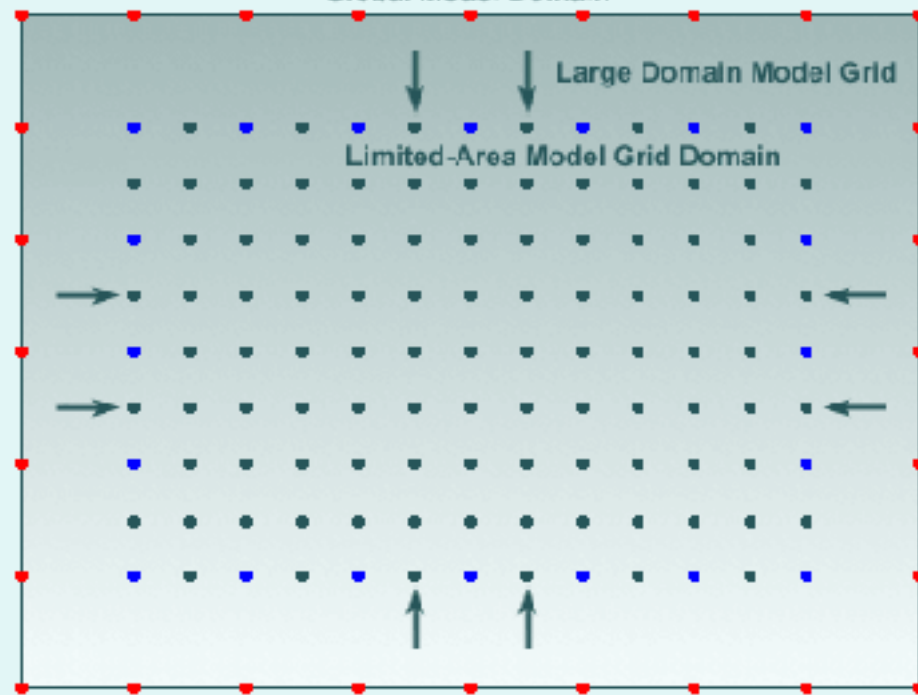
ΠΛΕΓΜΑ (Grid)

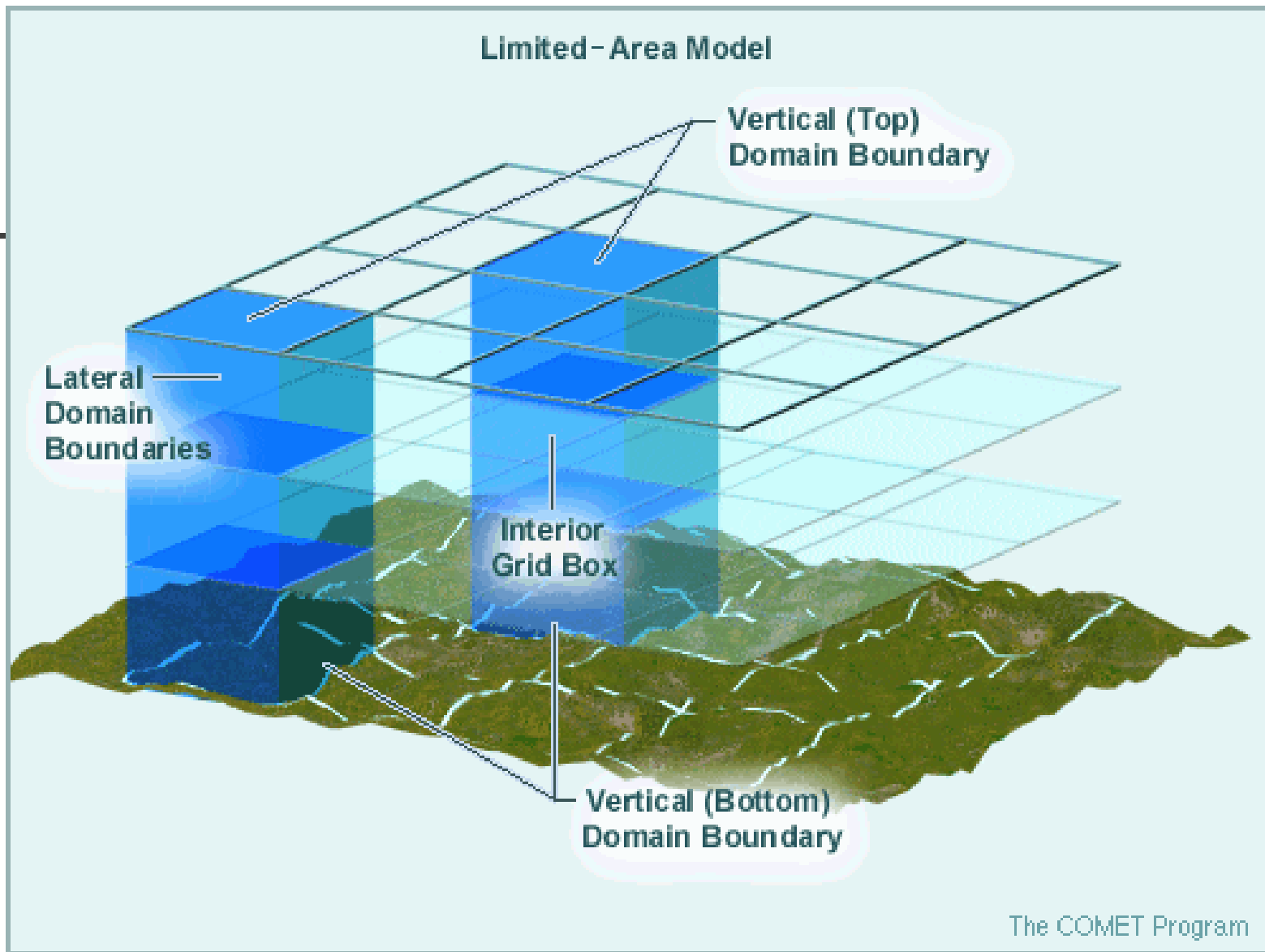
Αναπαράσταση των
διαδικασιών σε πλέγμα

Ανάγκη για
πραγματοποίηση πολύ
μεγάλου αριθμού
υπολογισμών



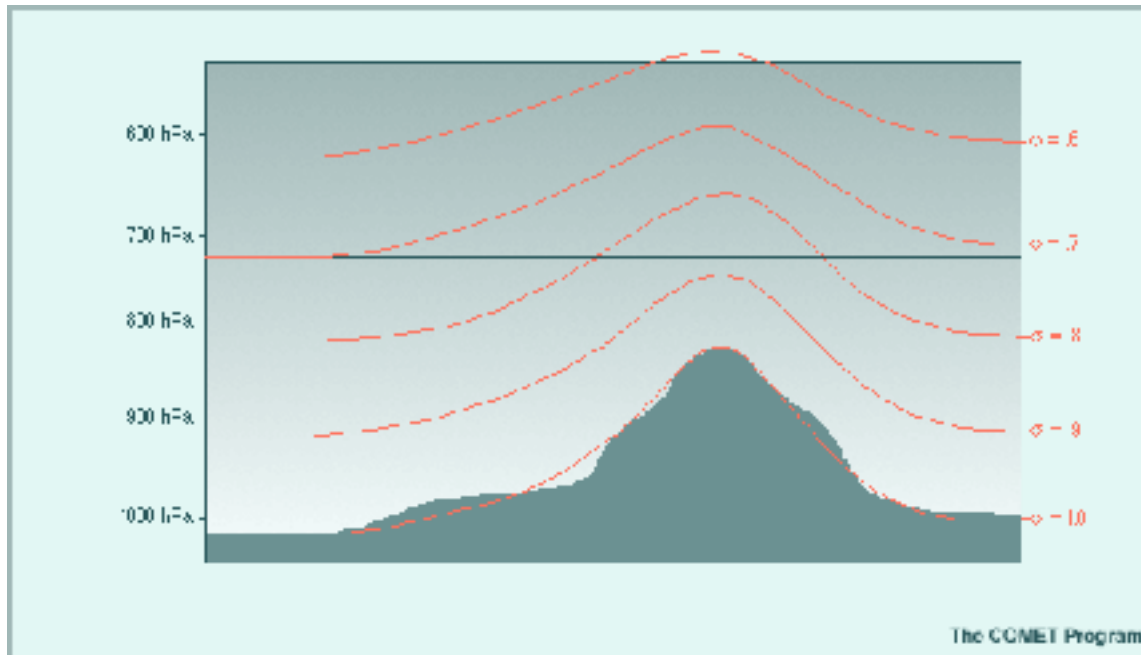
Global Model Domain



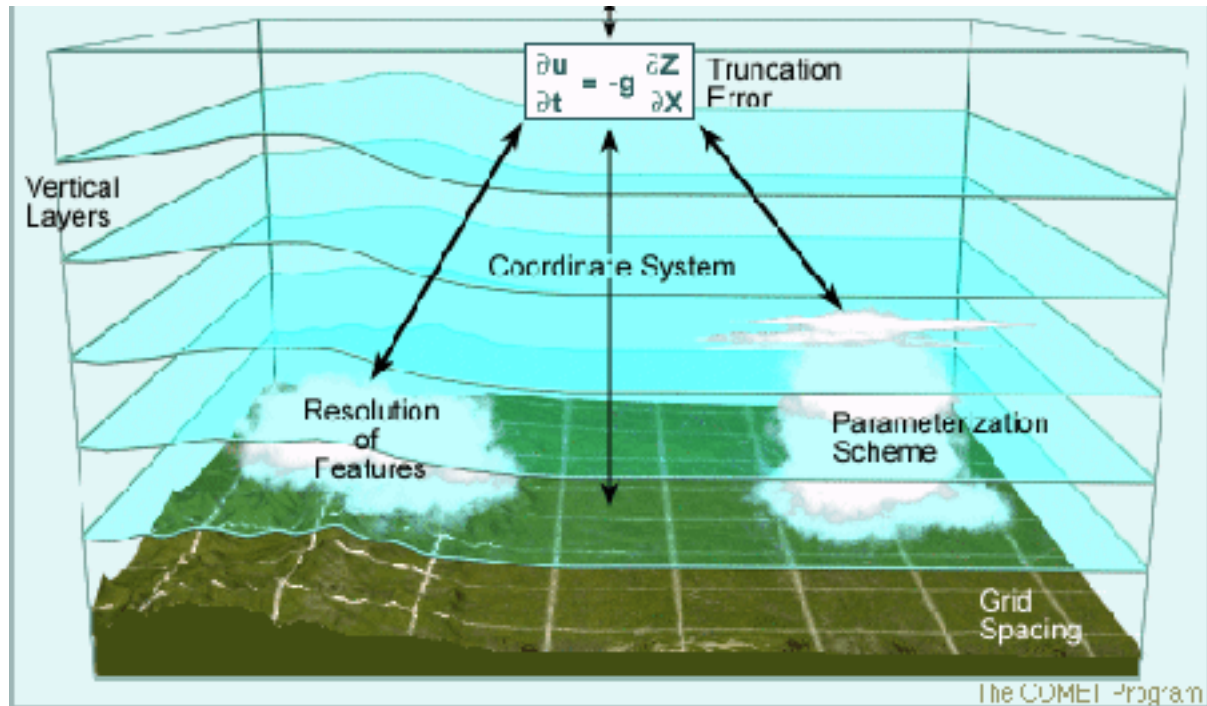


Τρισδιάστατη αναπαράσταση πλέγματος μοντέλου

Κατακόρυφες συντεταγμένες



Κατακόρυφες συντεταγμένες



Τρισδιάστατη απεικόνιση συντεταγμένων σίγμα (σ)



Βασικές εξισώσεις αριθμητικών μοντέλων (προγνωστικές εξισώσεις)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} + fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + F_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z} - fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + F_y$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y} - w \frac{\partial T}{\partial z} + H$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -u \frac{\partial q}{\partial x} - v \frac{\partial q}{\partial y} - w \frac{\partial q}{\partial z} + E - P$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -u \frac{\partial c}{\partial x} - v \frac{\partial c}{\partial y} - w \frac{\partial c}{\partial z} + \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right)_{\text{συμπύκνωση}} - \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right)_{\text{εξάτμιση}} - \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right)_{\text{βροχή}}$$

u,v,w: συνιστώσες ανέμου, f: παράμετρος Coriolis, p: πίεση, F: τριβή

T: θερμοκρασία, H: λανθάνουσα θερμότητα

q: σχετική υγρασία, E= εξατμισοδιαπνοή, P: βροχή

c: υδρατμοί



Βασικές εξισώσεις αριθμητικών μοντέλων (διαγνωστικές εξισώσεις)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

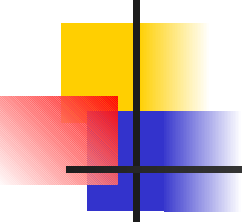
$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$$

$$P = \rho RT$$

Η πρώτη εξίσωση είναι η **εξίσωση συνέχειας**

Η δεύτερη εξίσωση είναι η **υδροστατική εξίσωση**

Η τρίτη εξίσωση είναι η **καταστατική εξίσωση**



Δεν υπάρχει αναλυτική λύση για τις εξισώσεις που περιγράφουν την εξέλιξη της ατμόσφαιρας (μή γραμμικές, μερικές διαφορικές)

Οπότε είτε

→ εύρεση ακριβούς αναλυτικής λύσης απλοποιημένης μορφής των εξισώσεων

Πχ. γεωστροφικός άνεμος

$$V_g = \frac{1}{\rho f} \frac{\partial p}{\partial n}$$

ρ : πυκνότητα, $f=10^{-4} \text{ s}^{-1}$, p : πίεση,

n : διεύθυνση κάθετη στις ισοβαρείς



ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΚΑΙΡΟΥ

- δημιουργία ενός απλοποιημένου μοντέλου για το οποίο μπορούν να επιλυθούν οι εξισώσεις *αρχικές προσπάθειες αριθμητικής πρόγνωσης περιγράφοντας την ατμόσφαιρα σαν ένα στρώμα ρευστού που περιβάλλει την γή*
- αριθμητική επίλυση των βασικών εξισώσεων *επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων με την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών σε διακριτά σημεία (grid points)*



Επίλυση εξισώσεων-μέθοδος πεπερασμένων διαφορών

Αντικαθιστούμε μια συνεχή διαφορά $\partial N / \partial x$ με διακριτές διαφορές $\Delta N / \Delta x$.

Χρησιμοποιώντας ανάπτυξη σε σειρές Taylor, μπορούμε να γράψουμε:

$$N_{x+\Delta x} = N_x + \Delta x \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{1}{2} (\Delta x)^2 \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{1}{6} (\Delta x)^3 \frac{\partial^3 N}{\partial x^3} + \frac{1}{24} (\Delta x)^4 \frac{\partial^4 N}{\partial x^4} + \dots \quad (\text{A})$$

$$N_{x-\Delta x} = N_x - \Delta x \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{1}{2} (\Delta x)^2 \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} - \frac{1}{6} (\Delta x)^3 \frac{\partial^3 N}{\partial x^3} + \frac{1}{24} (\Delta x)^4 \frac{\partial^4 N}{\partial x^4} + \dots \quad (\text{B})$$

Αφαίρεση της (B) από την (A) δίνει:

$$\frac{\partial N}{\partial x} = \frac{N_{x+\Delta x} - N_{x-\Delta x}}{2 \Delta x} + O(\Delta x)^2$$

Κεντρική διαφορά (centered difference)

$O(\Delta x)^2$: σφάλμα αποκοπής

Αριθμητική επίλυση εξισώσεων

Derivative form of simplified moisture equation

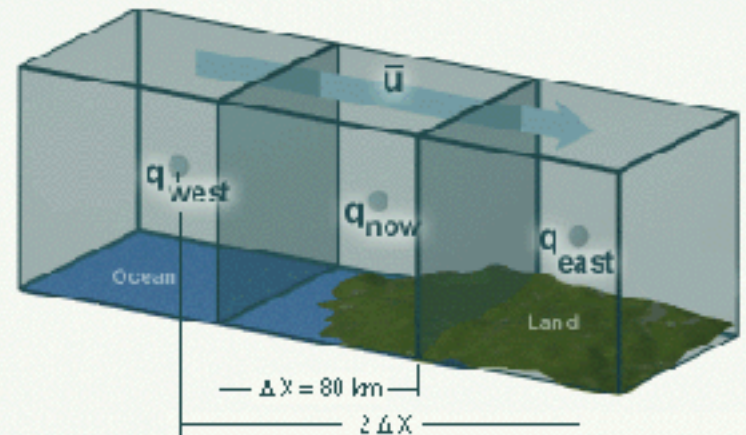
$$\frac{\partial q}{\partial t} = -U \frac{\partial q}{\partial x}$$

Finite difference form of simplified moisture equation

$$\frac{(q^{t+1} - q^t)_{x,y}}{\Delta t} = -\bar{U} \frac{q^t_{k+1,y} - q^t_{k-1,y}}{2\Delta x}$$

Written more conceptually

$$q^{\text{forecast}} - q^{\text{now}} = -\bar{U} \frac{\Delta t}{2\Delta x} (q_{\text{east}} - q_{\text{west}})^{\text{now}}$$



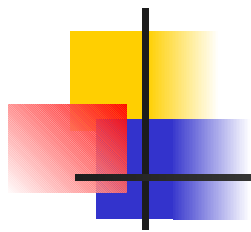
q^{now} - Current Moisture Value at Forecast Point

$q_{\text{east}} - q_{\text{west}}$ - Represents the Moisture Gradient Across Adjacent Grid Points

\bar{U} - Represents the Average Wind Between q_{west} and q_{east}

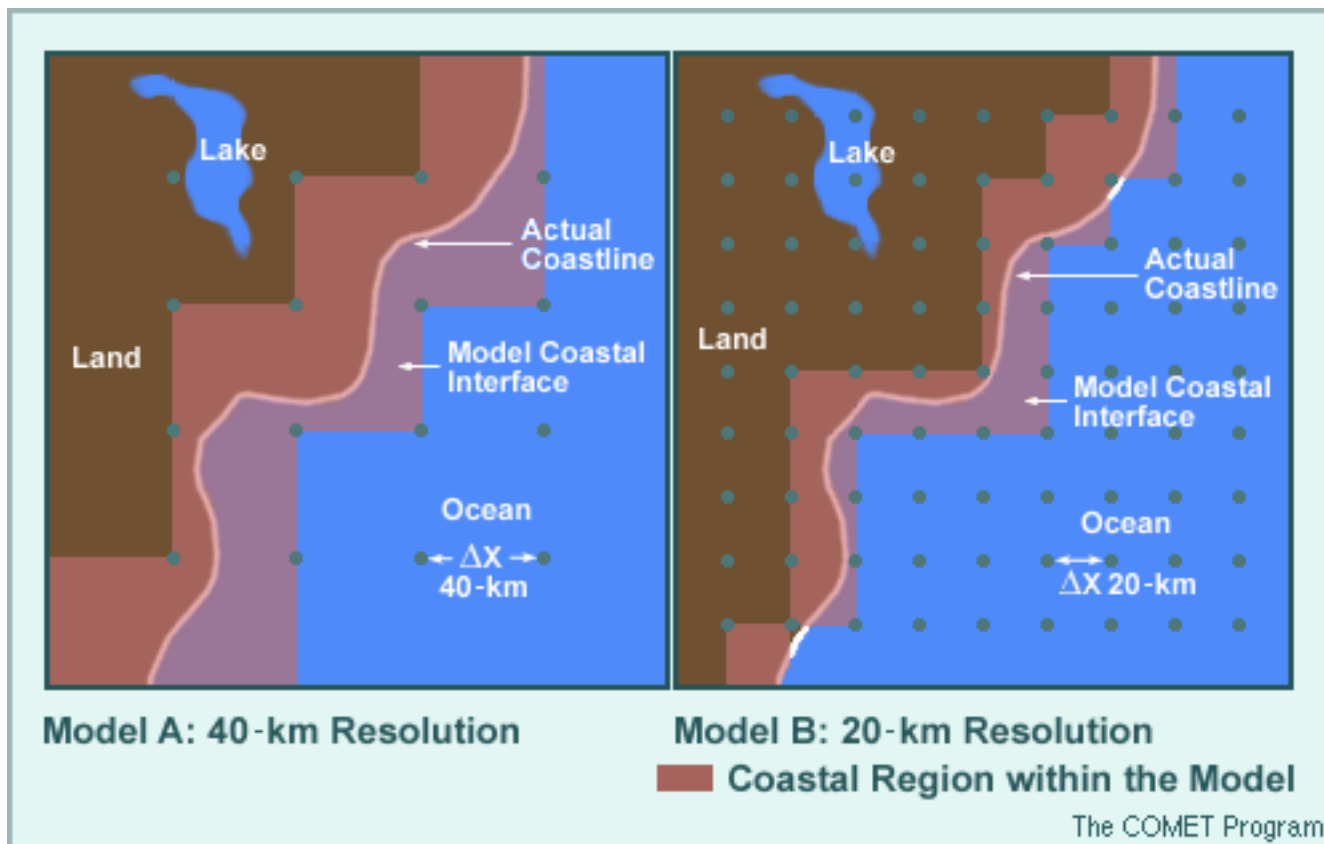
The COMET Program

Αριθμητική επίλυση της προγνωστικής εξίσωσης μεταβολής της υγρασίας, χρησιμοποιώντας προς τα εμπρός διαφορές για το χρόνο και κεντρικές διαφορές για το χώρο.

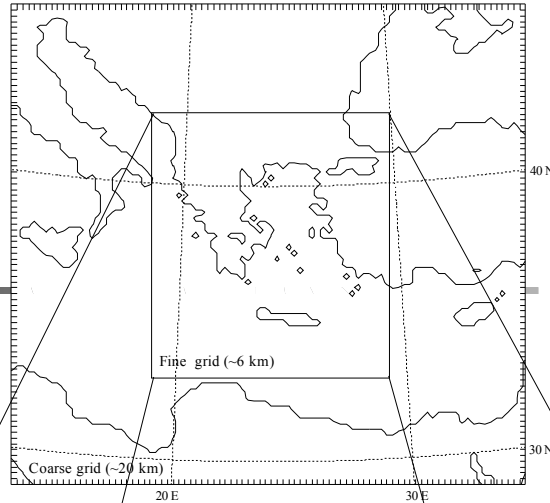
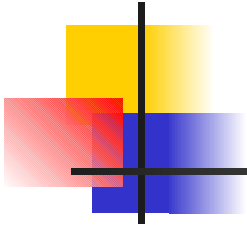


ΕΝΟΤΗΤΑ Β'

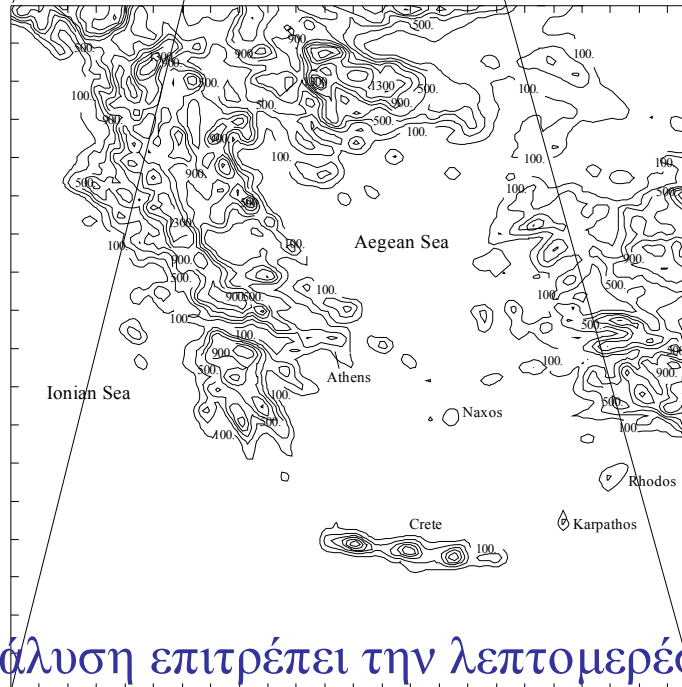
Οριζόντια ανάλυση



Η μεγαλύτερη ανάλυση επιτρέπει την λεπτομερέστερη περιγραφή των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών (πχ. κατανομή ξηράς-θάλασσας) της περιοχής μελέτης



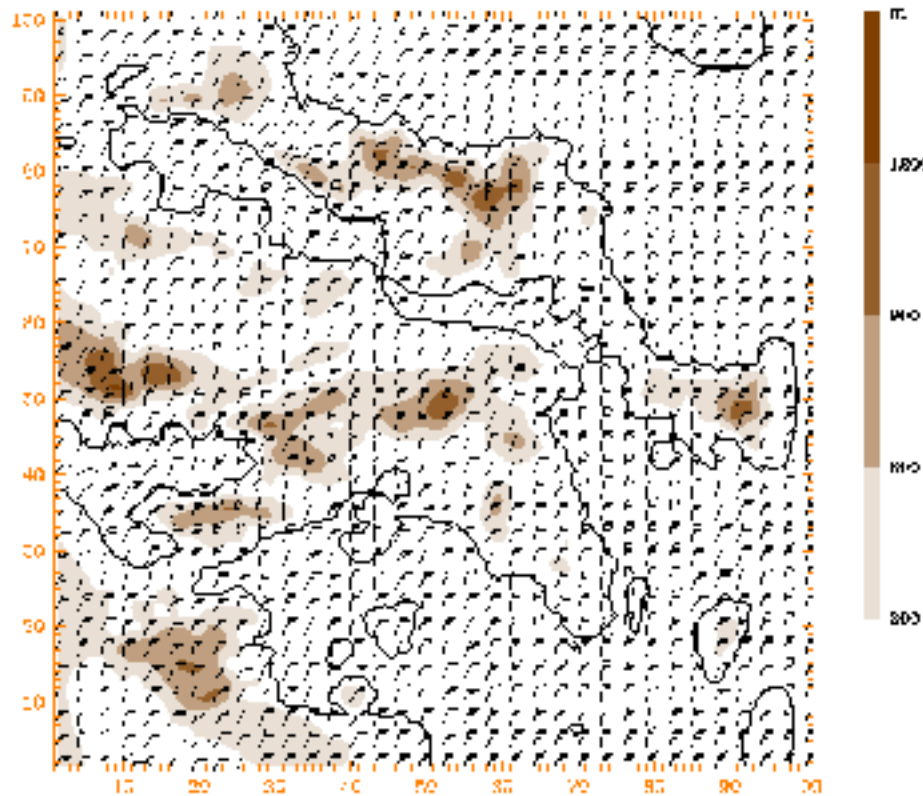
$\Delta x = 21 \text{ km}$



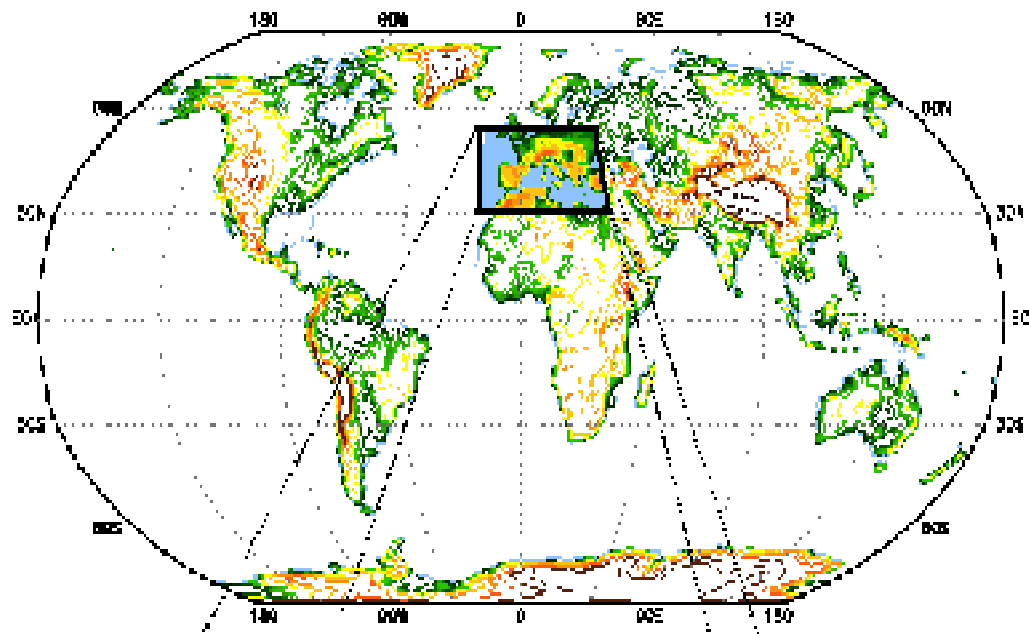
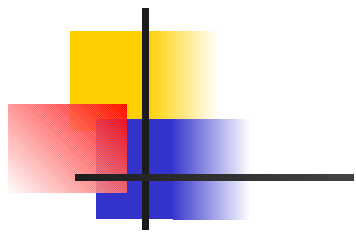
$\Delta x = 6 \text{ km}$

Η μεγαλύτερη ανάλυση επιτρέπει την λεπτομερέστερη περιγραφή των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών (πχ. τοπογραφίας) της περιοχής μελέτης.

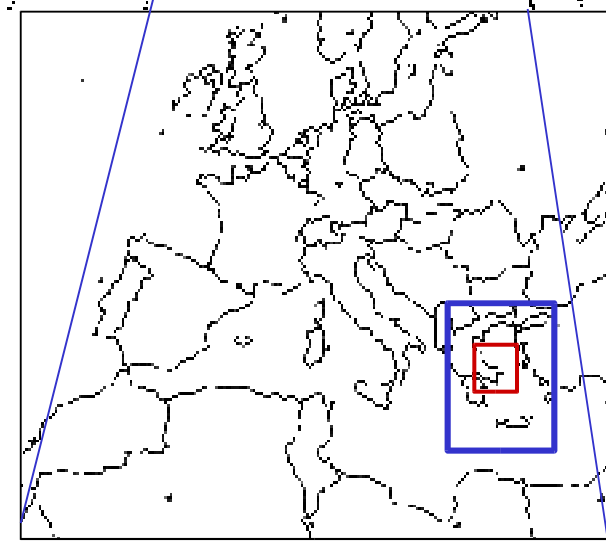
Οριζόντια ανάλυση



Η μεγαλύτερη ανάλυση όμως απαιτεί πολύ μεγαλύτερο αριθμό υπολογισμών.



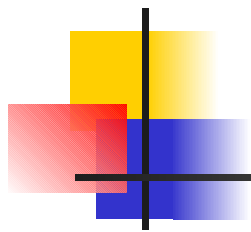
Global Circulation Model



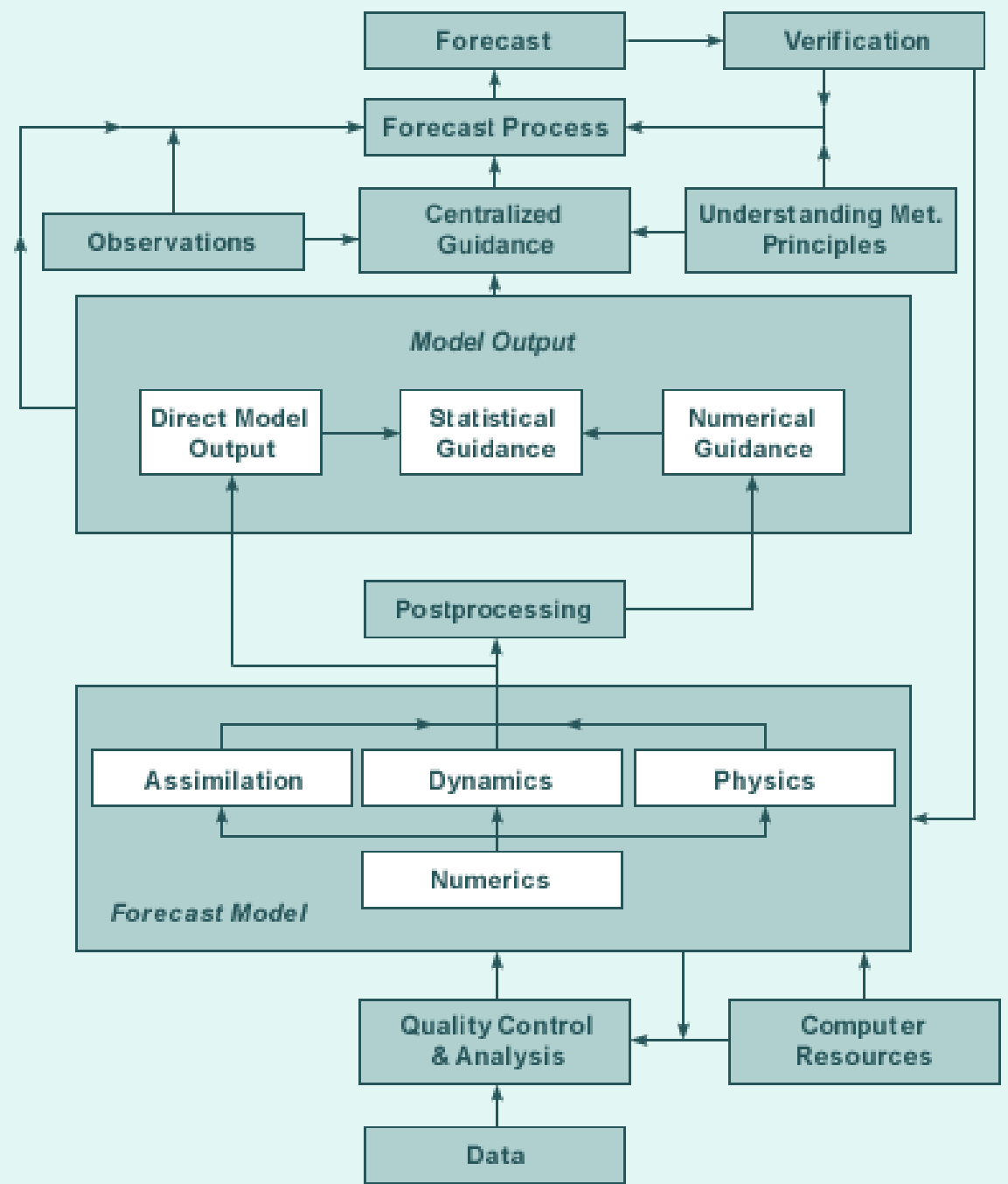
Limited Area Model Domain1

Limited Area Model Domain2

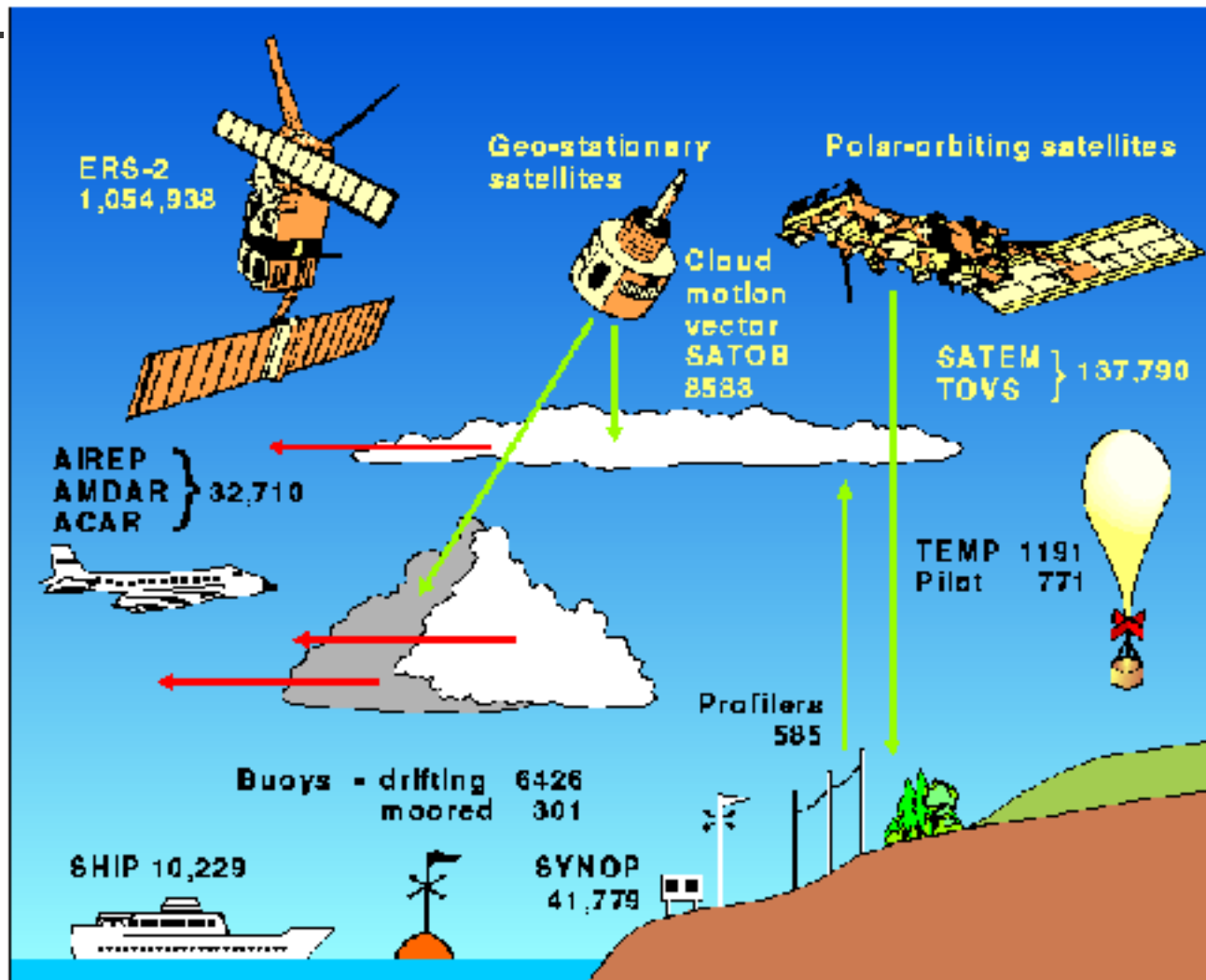
Limited Area Model Domain3



Γραφική αναπαράσταση των διαδικασιών σε ένα αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης καιρού



Αρχικές συνθήκες



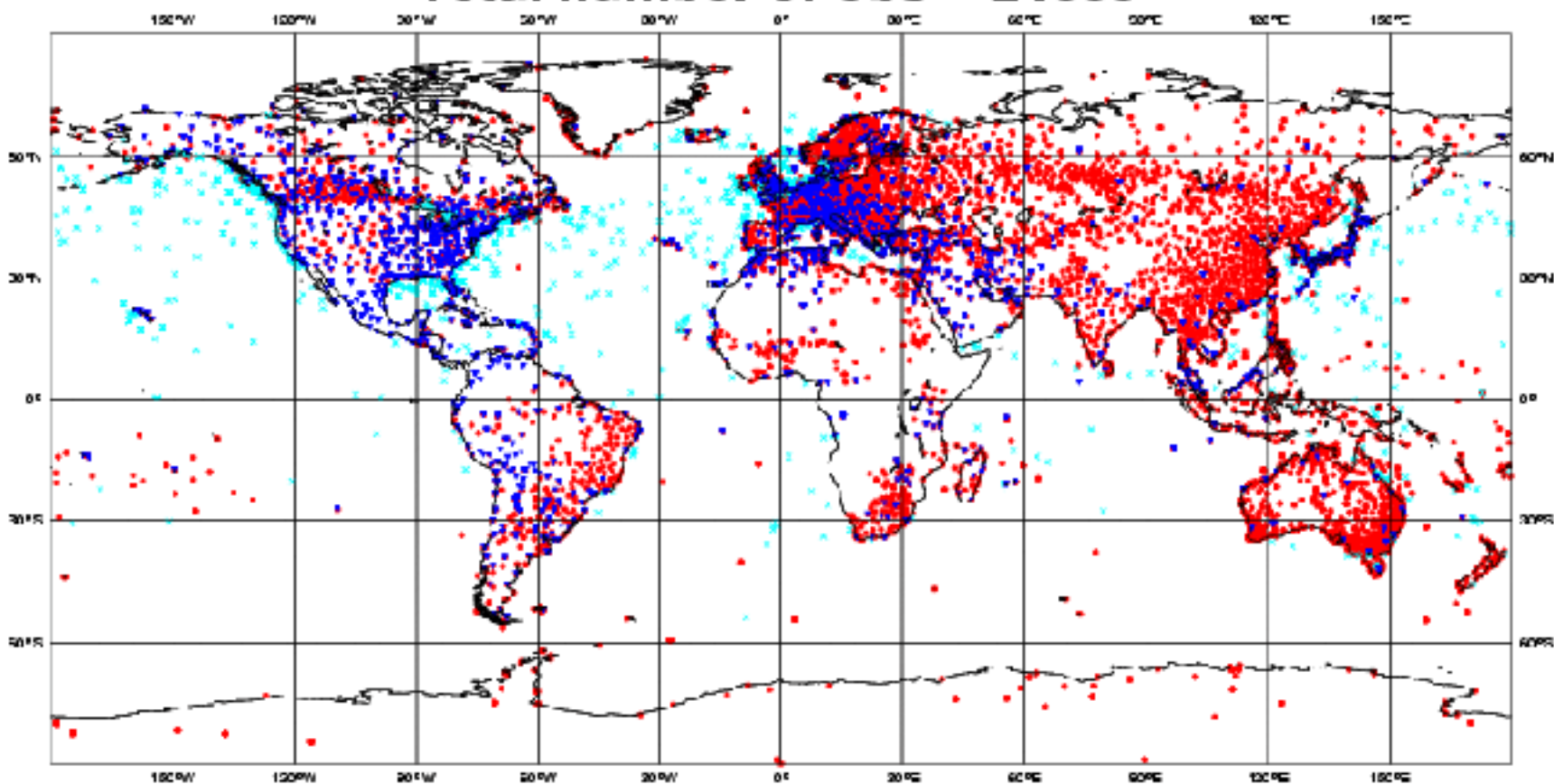
Obs Type

- 13646 SYNOP
- 1530 SHIP
- 9379 METAR

ECMWF Data Coverage (All obs) - SYNOP/SHIP

02/JUN/2004; 00 UTC

Total number of obs = 24605



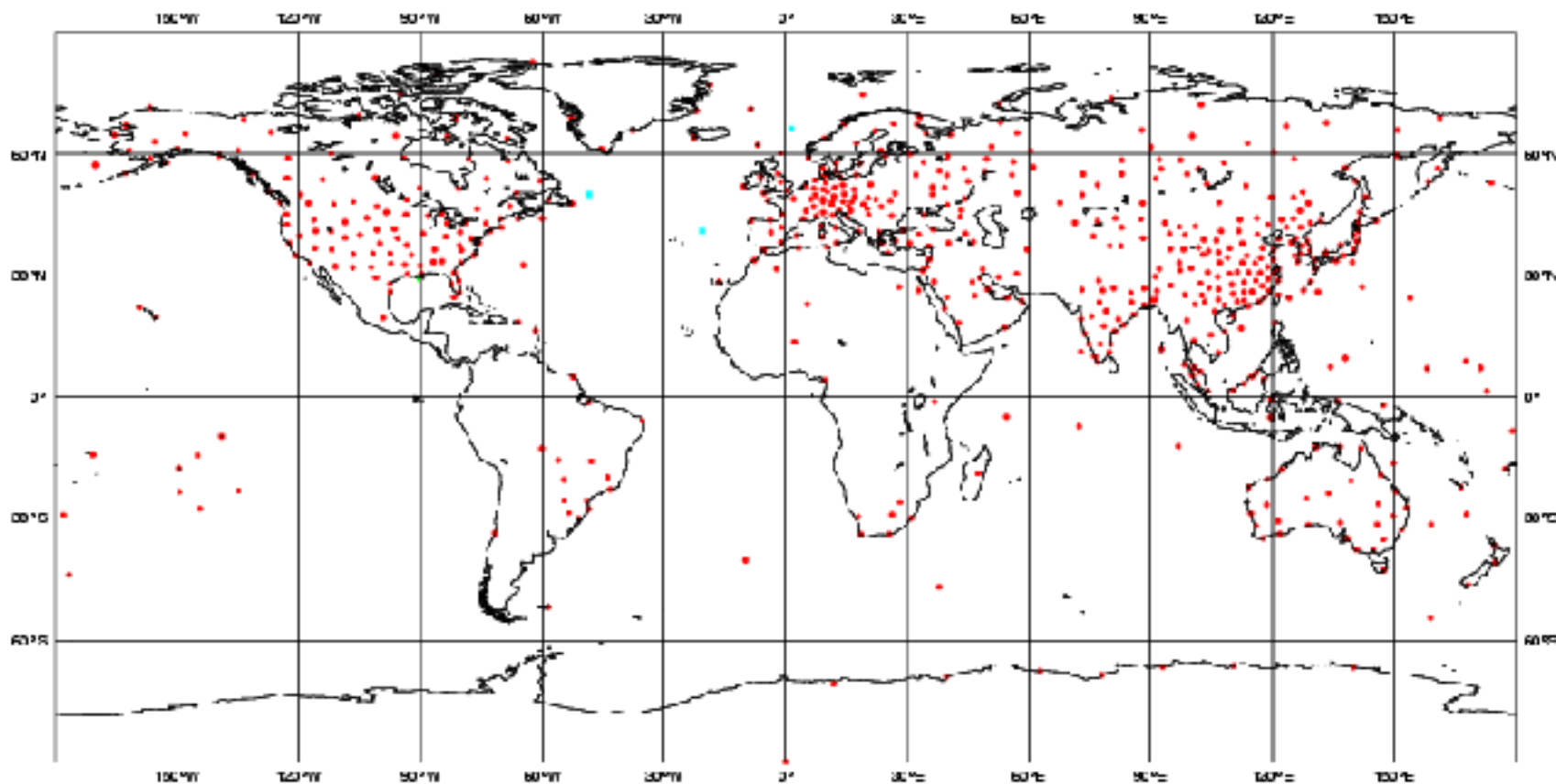
Obs Type

• 577 LAND • 3 SHIP • 1 DROPSONDE

ECMWF Data Coverage (All obs) - TEMP

02/JUN/2004; 00 UTC

Total number of obs = 581



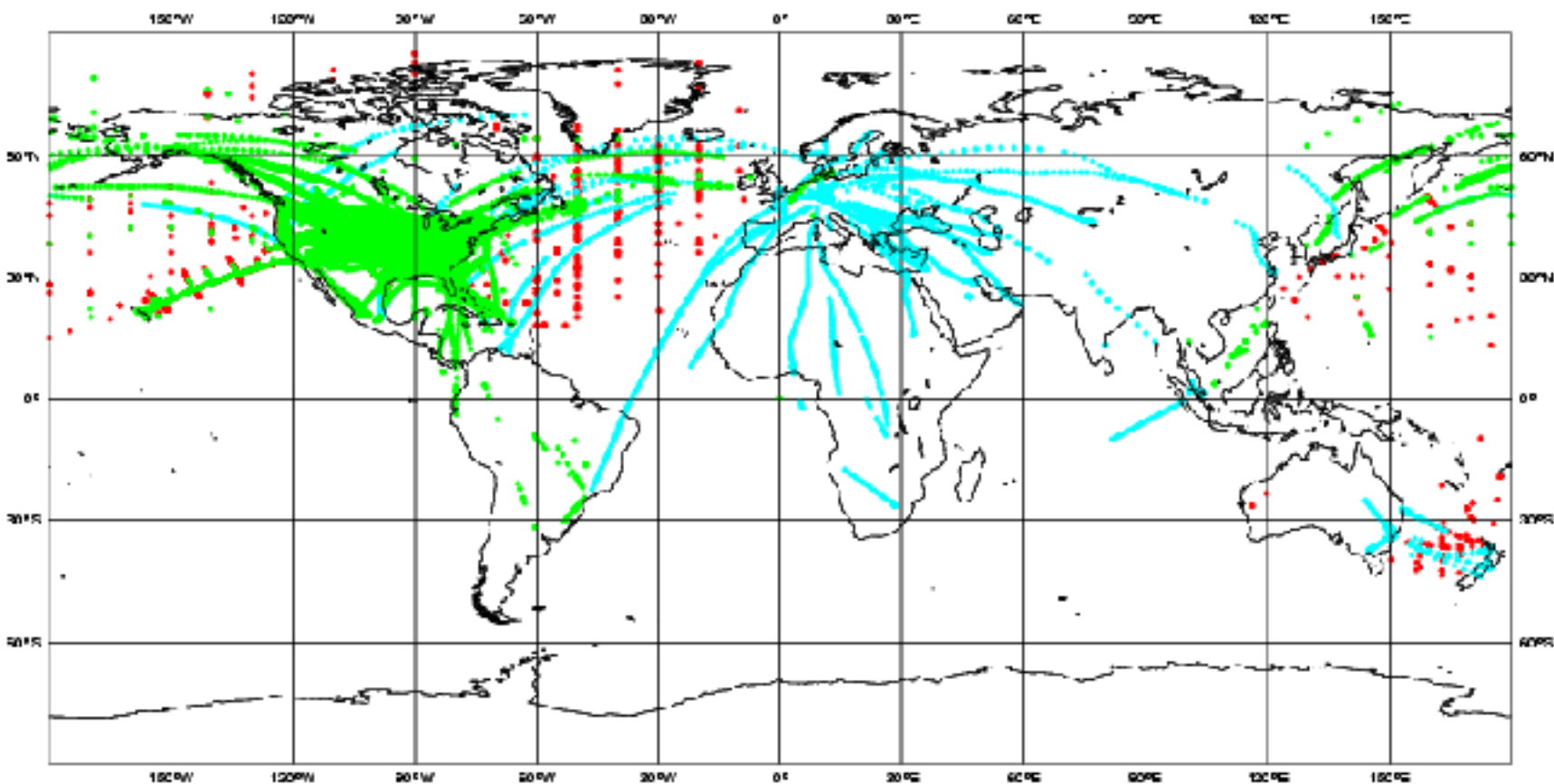
ECMWF Data Coverage (All obs) - AIRCRAFT

02/JUN/2004; 00 UTC

Total number of obs = 36791

Obs Type

- 7446 AIREP
- 3512 AMDAR
- 25833 ACARS



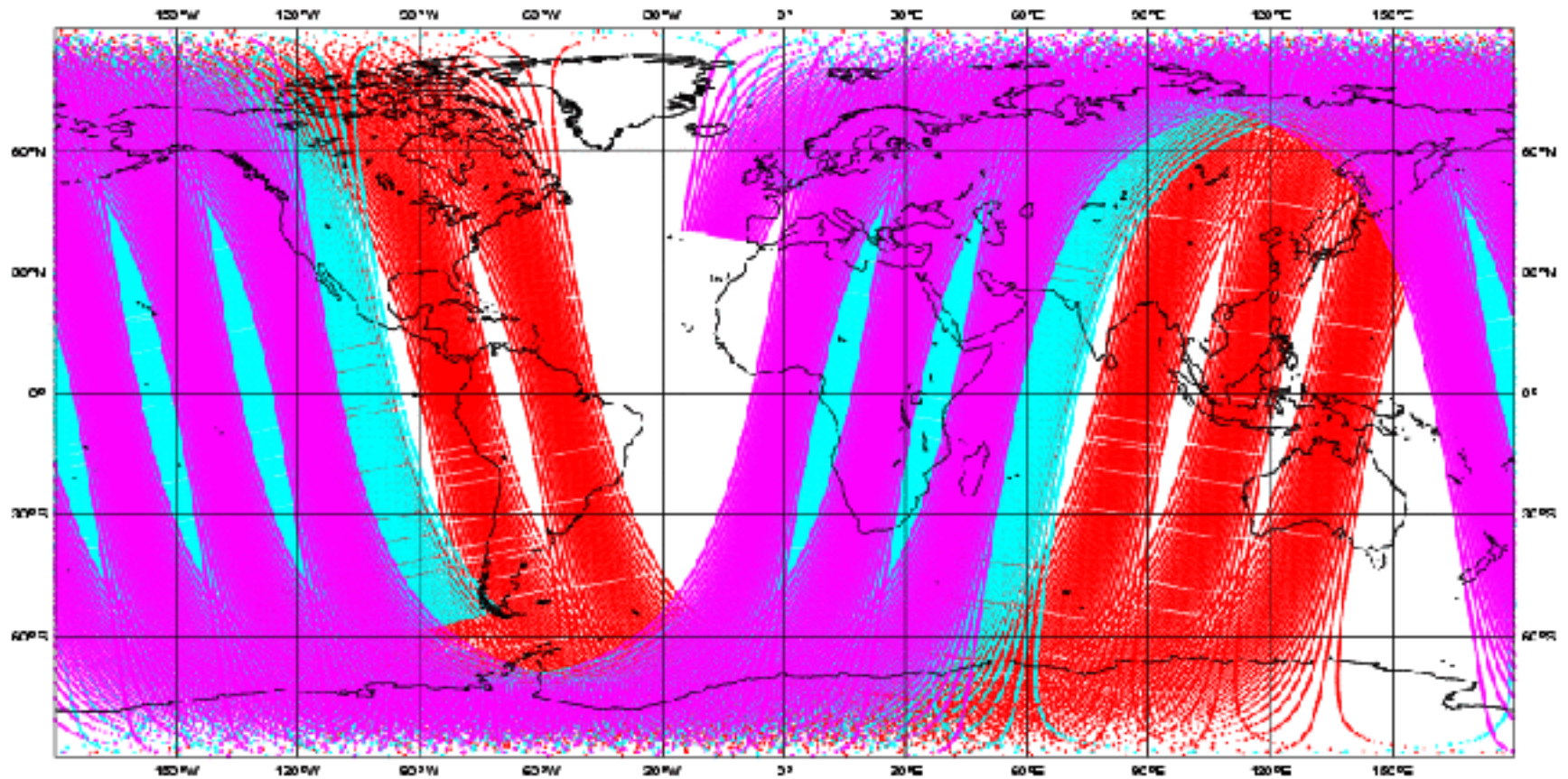
Obs Type

- 70005 N15-AMSUA
- 70107 N15-AMSUA
- 0 N17-AMSUA
- 80702 AQJA-AMSU

ECMWF Data Coverage (All obs) - ATOVS

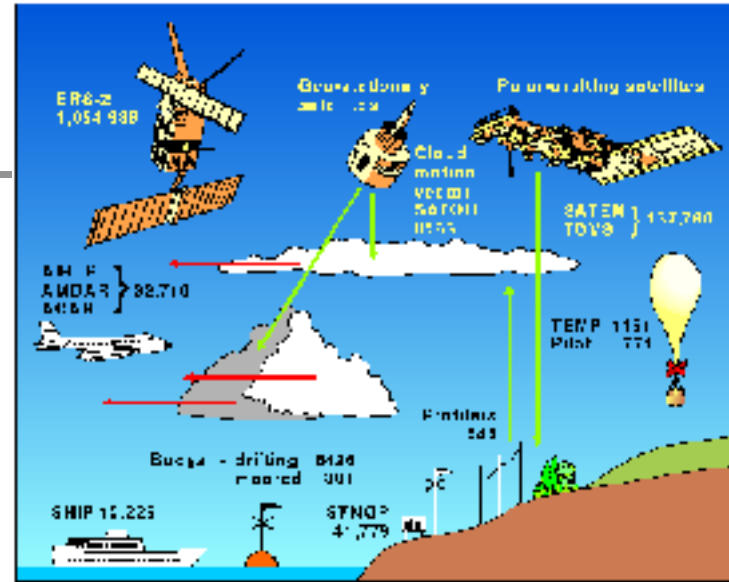
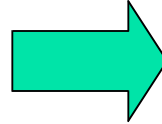
02/JUN/2004; 00 UTC

Total number of obs = 239274

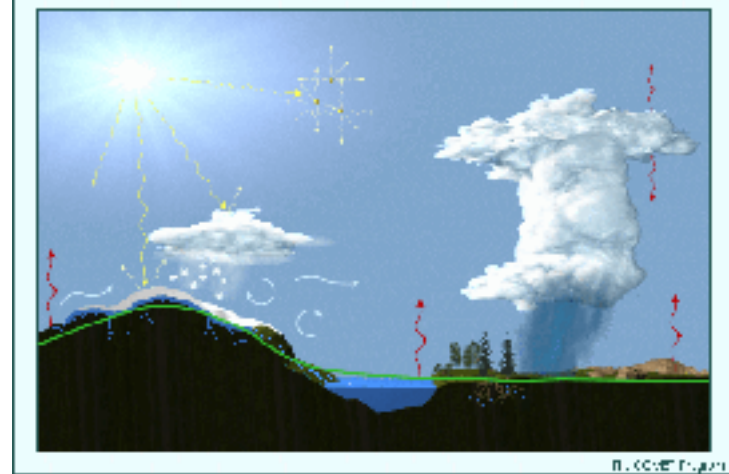
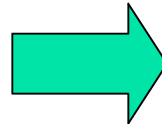


Σφάλματα πρόγνωσης

Έλλειψή γνώση της αρχικής κατάστασης της ατμόσφαιρας και της επιφάνειας της Γης



Έλλειψή κατανόηση των φυσικών διεργασιών



Αποτέλεσμα:

χρονικός περιορισμός της αξιοπιστίας της πρόγνωσης

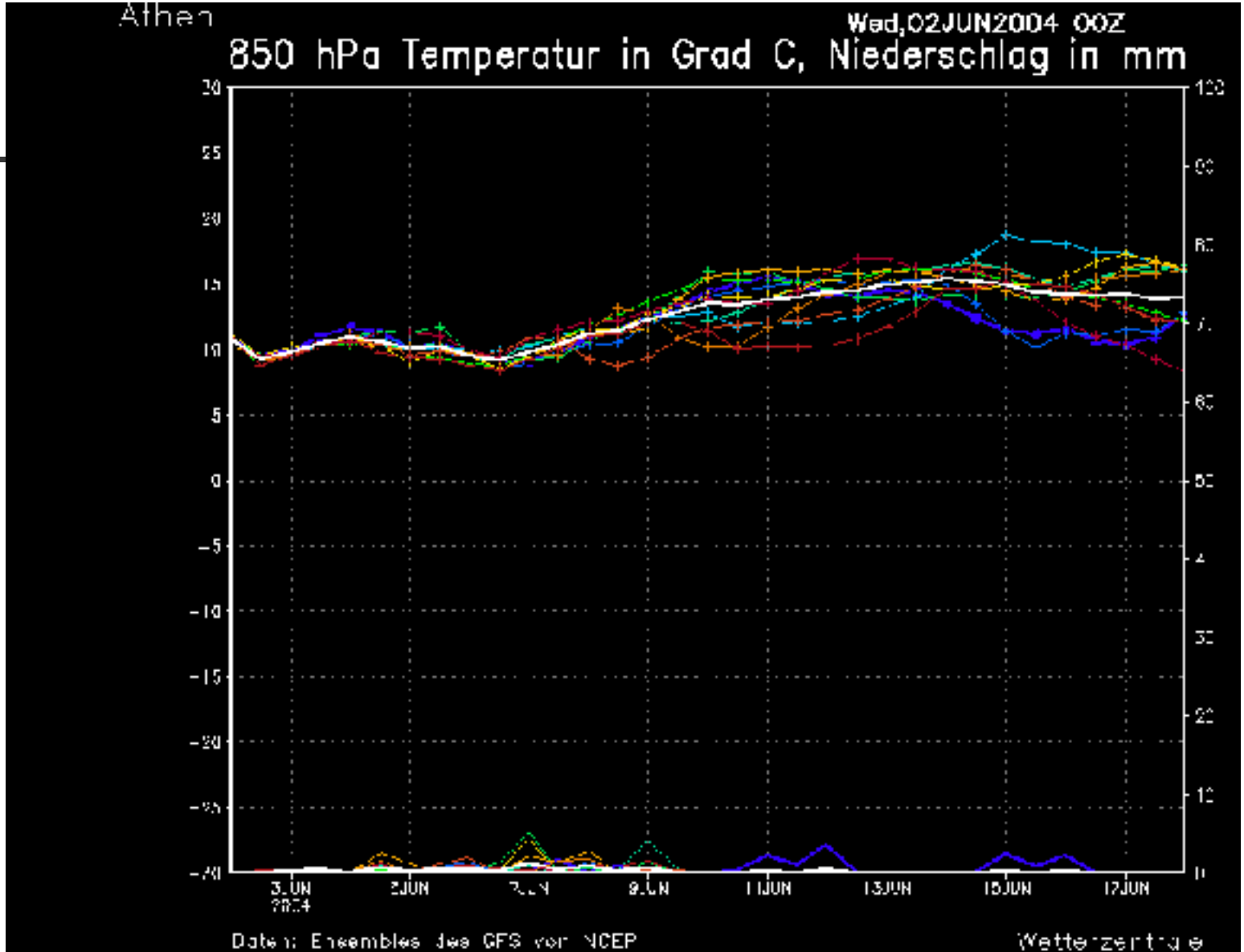


ΧΑΟΣ και ΠΡΟΓΝΩΣΙΜΟΤΗΤΑ

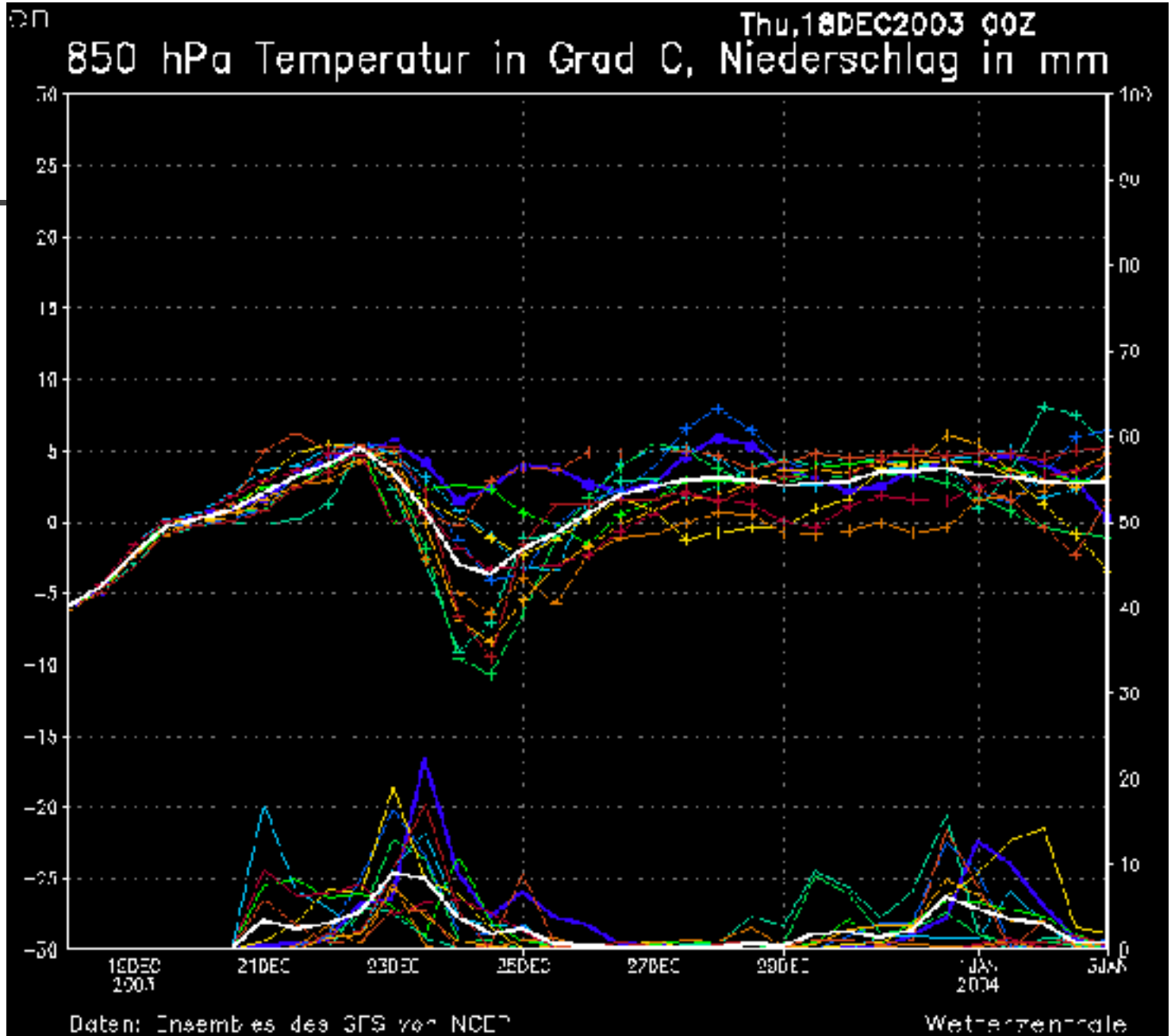
Lorenz (1963): «ακόμα και με τέλεια μοντέλα και τέλειες παρατηρήσεις η χαοτική φύση της ατμόσφαιρας θα επέβαλε ένα άνω χρονικό όριο περίπου δύο εβδομάδων στην προγνωσιμότητα του καιρού»

Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε η τεχνική του ensemble forecasting κατά την οποία πραγματοποιούνται πολλές προγνώσεις είτε διαταράσσοντας τις αρχικές συνθήκες ενός μοντέλου είτε χρησιμοποιώντας διαφορετικά μοντέλα.

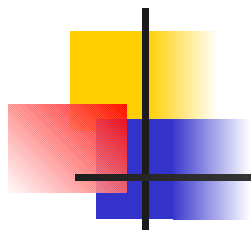
ENSEMBLE PREDICTION



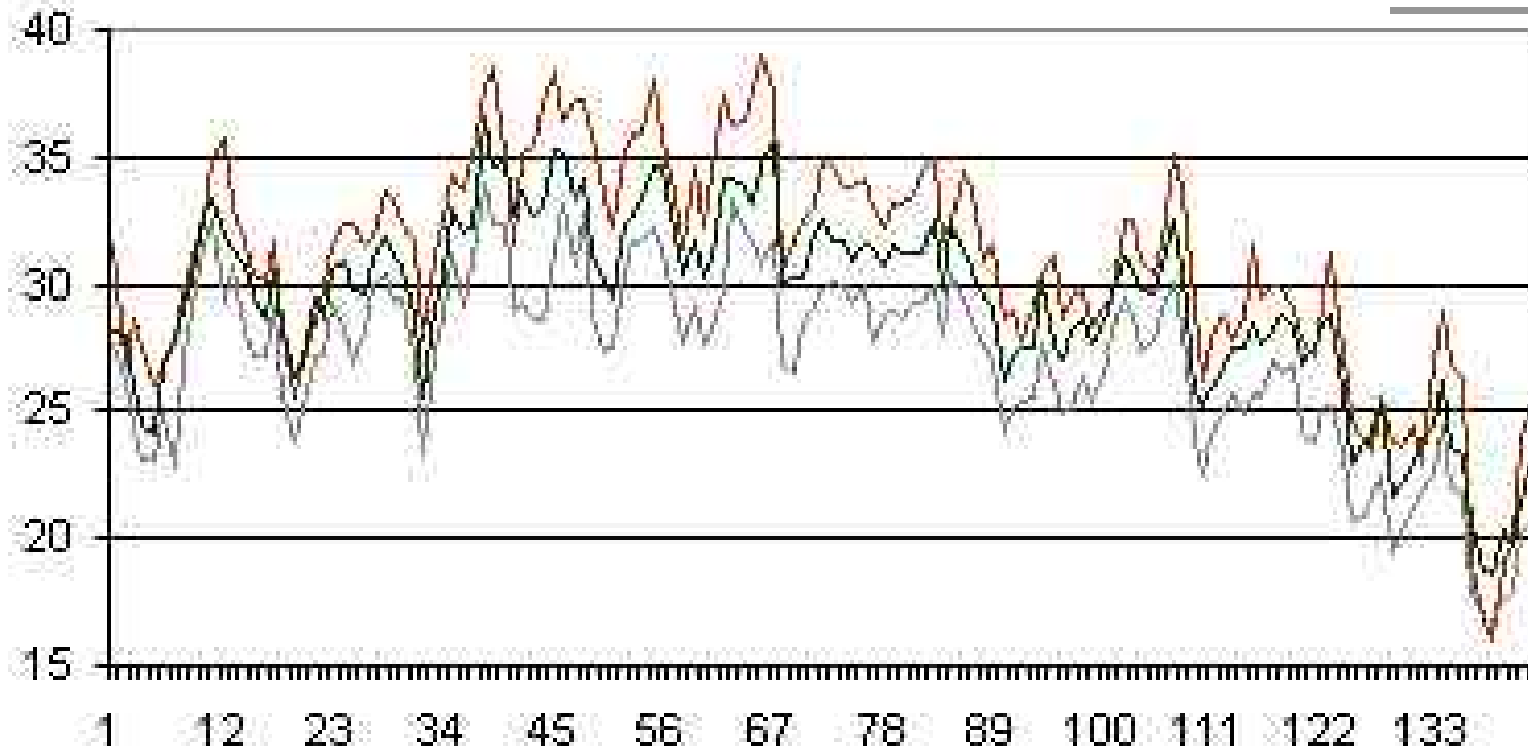
ENSEMBLE PREDICTION



Επαλήθευση προγνώσεων - Verification

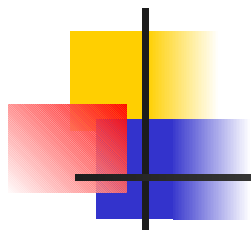


— observations
— 2 km forecast
— 8 km forecast

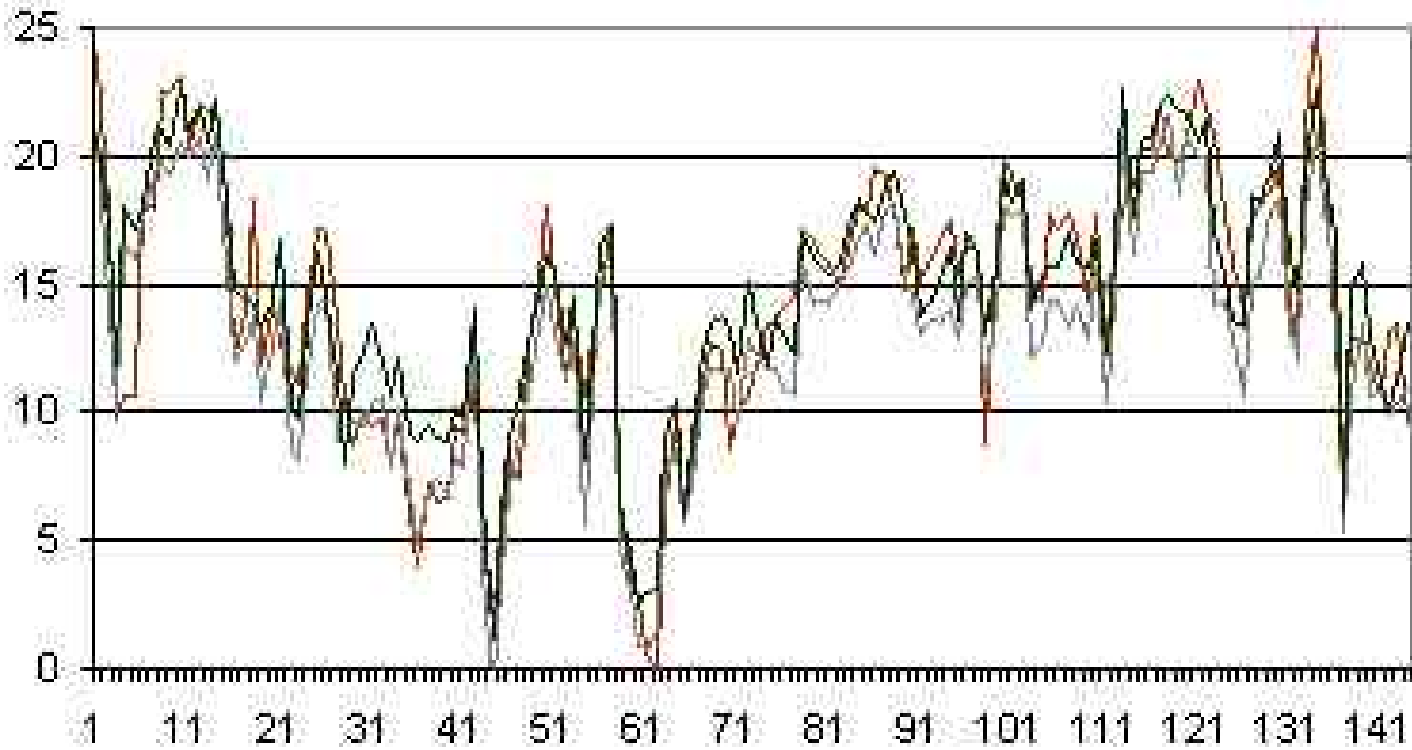


June-October 2001

Επαλήθευση προγνώσεων - Verification



— observations
— 2 km forecast
— 8 km forecast



November 2001-March 2002



Εφαρμογές

■ Τα αποτελέσματα ενός μετεωρολογικού μοντέλου αποτελούν τις τιμές εισόδου πλήθους άλλων μοντέλων για εξειδικευμένες εφαρμογές:

1. Μοντέλα κυματισμού και θαλάσσιας κυκλοφορίας
2. Υδρολογικά μοντέλα για την πρόβλεψη πλημμυρών
3. Μοντέλα πρόβλεψης εξέλιξης δασικών πυρκαγιών
4. Μοντέλα πρόβλεψης διασποράς και διάχυσης αερίων ρύπων



Προγνώσεις καιρού

Μπορείτε να βρείτε προγνώσεις καιρού για την Ελλάδα και την Ευρώπη,
στις παρακάτω ιστοσελίδες:

Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών

<http://www.noa.gr/forecast>

<http://www.forecasts.gr>

<http://www.eurometeo.gr>