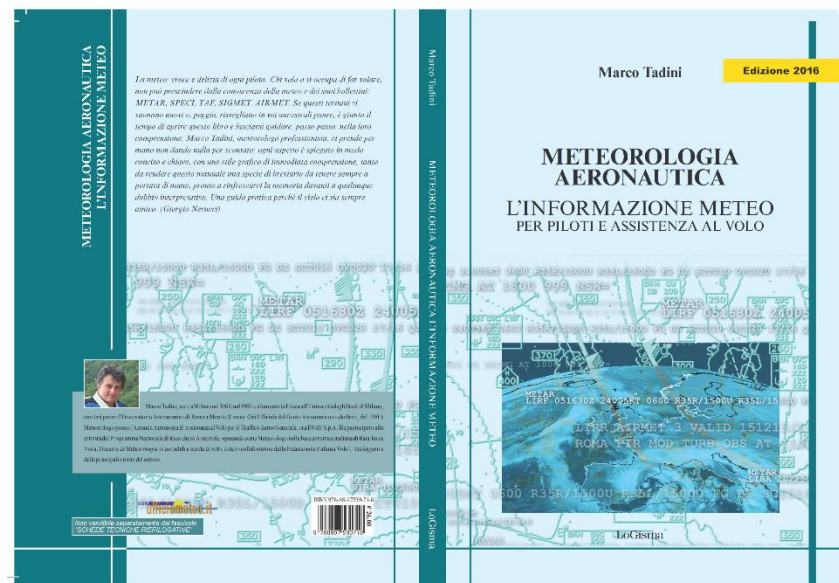




# Corso di Meteorologia per piloti VDS e VFR

Marco Tadini  
[www.ufficiometeo.it](http://www.ufficiometeo.it)

**PARTE 1**



Marco Tadini, nato a Milano nel 1963, nel 1989 si è laureato in Fisica presso l'Università degli Studi di Milano.

Dal 1991 è Meteorologo presso ENAV S.p.A.

È autore del libro *Meteorologia Aeronautica* e del sito web [www.ufficiometeo.it](http://www.ufficiometeo.it).



## IL NOSTRO PERCORSO

- **IL PROGRAMMA DELLA PRIMA PARTE:**
  - proprietà dell'atmosfera
  - altimetria
  - cenni di circolazione generale atmosferica
  - circolazione extratropicale: i fronti
- **IL PROGRAMMA DELLA SECONDA PARTE:**
  - origine e classificazione delle nubi
  - stabilità e instabilità atmosferica
  - fenomeni pericolosi per il volo
- **IL PROGRAMMA DELLA TERZA PARTE:**
  - Il briefing meteo VDS

## PRIMA DI INIZARE... COS'È LA METEOROLOGIA AERONAUTICA?

- La **meteorologia aeronautica** studia come l'atmosfera influisce sulla sicurezza, economia e regolarità del traffico aereo. Il suo cuore è l'analisi dei ***weather hazards***: ***turbolenza, formazione di ghiaccio (icing), riduzioni di visibilità, wind shear e temporali***
- È regolamentata dalla cooperazione tra due agenzie ONU: **WMO** (*World Meteorological Organization*) e **ICAO** (*International Civil Aviation Organization*).
- In Europa, la normativa ICAO/WMO viene recepita da **EASA** (*European Aviation Safety Agency*), che dispone verso gli enti regolatori nazionali (in Italia **ENAC**, *Ente Nazionale Aviazione Civile*)



World Meteorological  
Organisation





PROPRIETÀ DELL'ATMOSFERA

- involucro di gas che circonda il pianeta
- subisce l'influenza della forza di gravità terrestre
  - se gravità insufficiente: atmosfera dispersa nello spazio
- partecipa al moto planetario di rotazione terrestre
  - la rotazione influenza le correnti atmosferiche
- subisce l'influenza della morfologia planetaria
  - l'orografia influenza le correnti atmosferiche

- tra 0 e 100 km, l'atmosfera si compone di:
  - gas presenti ovunque in percentuali fisse
    - azoto, ossigeno, gas nobili
  - gas con variazioni percentuali in tempi lunghi
    - anidride carbonica
  - gas in quantità variabili a quote preferenziali
    - ozono, vapore acqueo, pulviscolo atmosferico





## COMPOSIZIONE DELL'ATMOSFERA TERRESTRE

- azoto e ossigeno
  - costituiscono oltre il 99% dell'atmosfera
  - non hanno alcun ruolo nei fenomeni meteorologici
- hanno importanza meteo due componenti variabili:
  - vapore acqueo
  - pulviscolo atmosferico

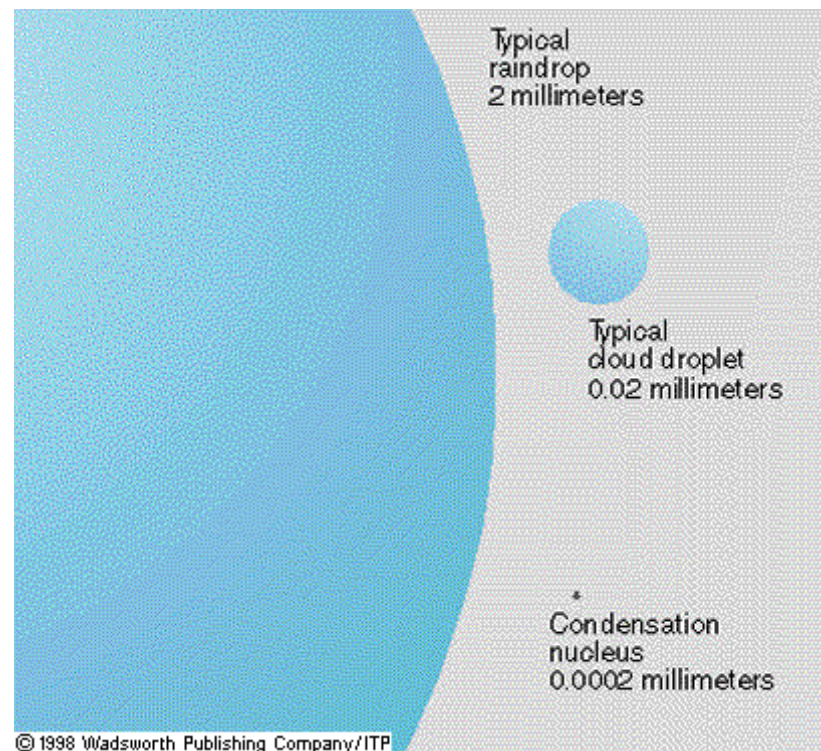


- concentrato nei primi km di altezza (fino a 12-18 km)
- presente per evaporazione da superfici liquide
- presente in percentuali variabili (pochi gr/kg di aria)
- la sua importanza meteorologica è dovuta a:
  - scambi energetici
    - scambiate 600 calorie per grammo di acqua durante i processi di condensazione e evaporazione (*calore latente*)
  - limite alla dispersione del calore irradiato dalla Terra sotto forma di radiazione infrarossa (*effetto serra*)

- composto di particelle sospese nei bassi strati
- le particelle hanno origine:
  - *naturale* (sale marino, ceneri vulcaniche)
  - *artificiale* (residui processi di combustione  $\Rightarrow$  smog)
- la sua importanza meteorologica è dovuta a:
  - proprietà igroscopiche (**nuclei di condensazione**)
  - $\Rightarrow$  formazione delle nubi

## IL PULVISCOLO ATMOSFERICO

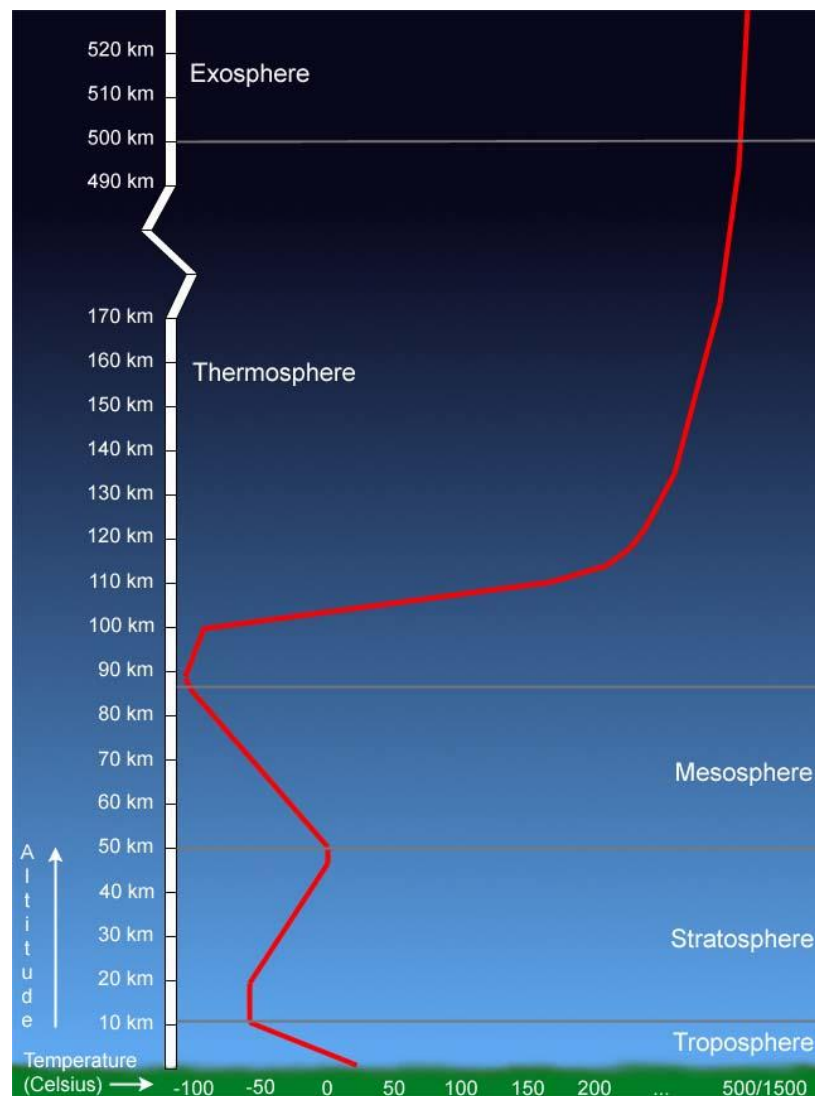
- dimensioni tipiche:
  - pulviscolo 0,0002 mm
  - goccia nube 0,02 mm
  - goccia pioggia 2 mm
- ma senza pulviscolo non vi sarebbero nubi e pioggia!
- le gocce di pioggia si formano per **collisione** e **coalescenza** delle gocce di nube, che si *urtano* e si *fondono* mentre cadono per gravità all'interno della nube



- pressione e densità
  - diminuiscono con l'altezza
- temperatura
  - evidenza variabilità di comportamento
  - presenta un'alternanza di massimi e minimi
  - successione di strati a *profilo termico uniforme*  
(cioè sempre crescente o decrescente al loro interno)
  - intervallati da strati di transizione a *temperatura costante*

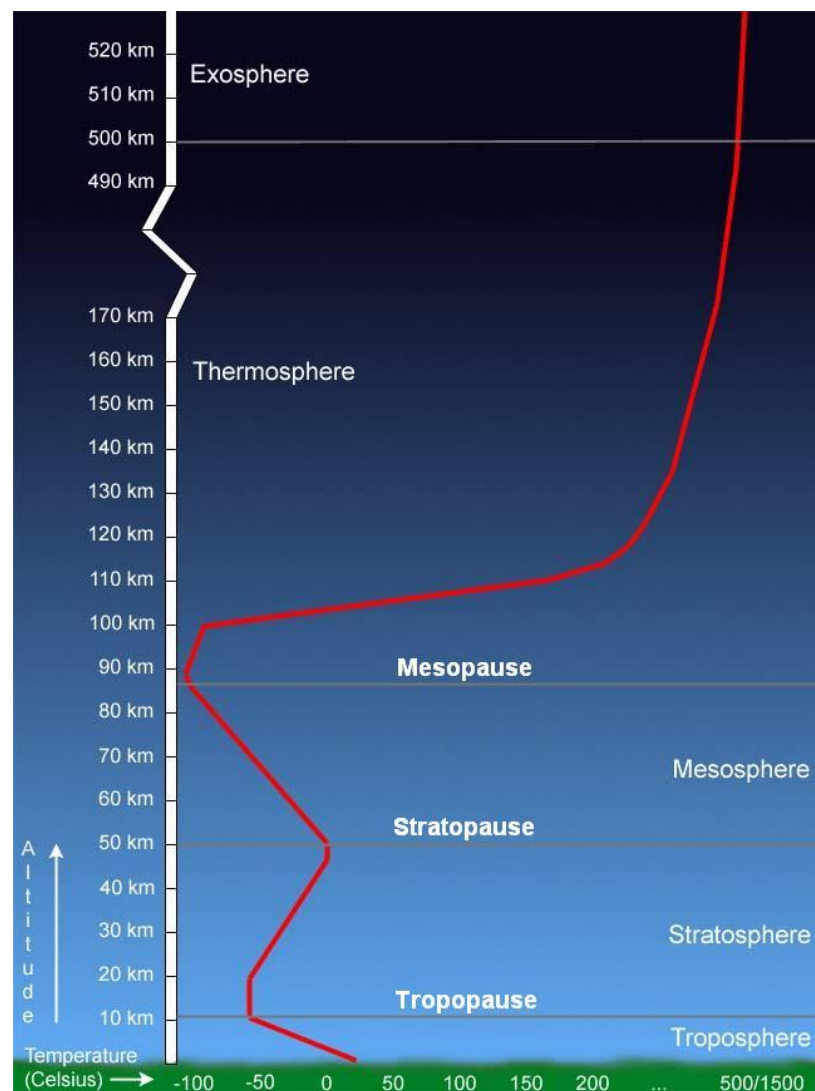
## PROFILO TERMICO ATMOSFERICO: STRATI A PROFILO TERMICO UNIFORME

- **troposfera**
  - temperatura decrescente
- **stratosfera**
  - temperatura crescente
- **mesosfera**
  - temperatura decrescente
- **termosfera**
  - primo degli strati esterni
  - temperature crescenti
    - atm come gas perfetto



## PROFILO TERMICO ATMOSFERICO: STRATI DI TRANSIZIONE A T COSTANTE

- **tropopausa**
  - tra troposfera e stratosfera
- **stratopausa**
  - tra stratosfera e mesosfera
- **mesopausa**
  - tra mesosfera e strati esterni





## TROPOSFERA

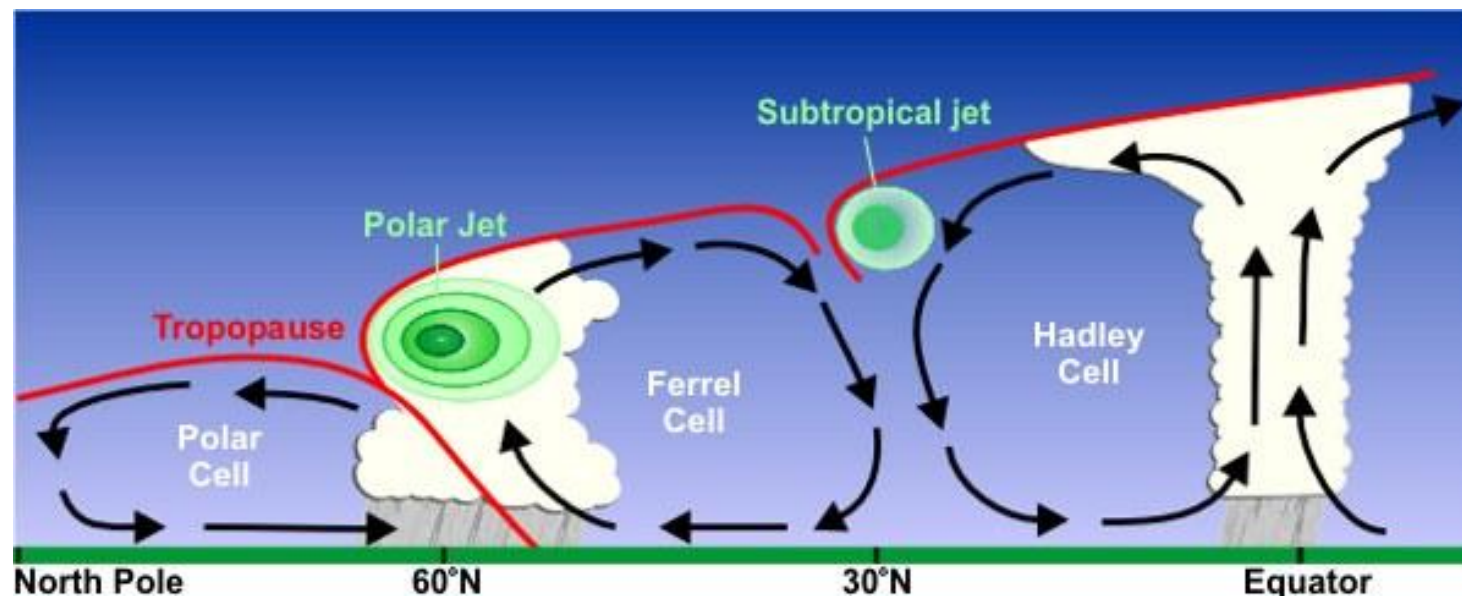
- altezza variabile per rotazione terrestre
  - circa 8 km ai poli
  - circa 12 km latitudini intermedie
  - circa 18 km all'equatore
- temperatura diminuisce con la quota
  - valore medio s.l.m. :  $+15^{\circ}\text{C}$
  - valore medio a quota massima:  $-55^{\circ}\text{C}$
  - gradiente verticale  $\approx 0.5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$
- sede di tutti i fenomeni meteorologici
  - presenza di vapore acqueo e pulviscolo





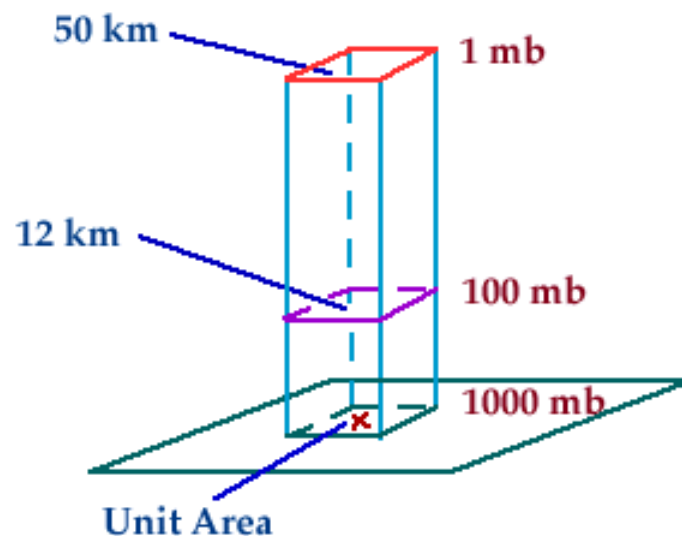
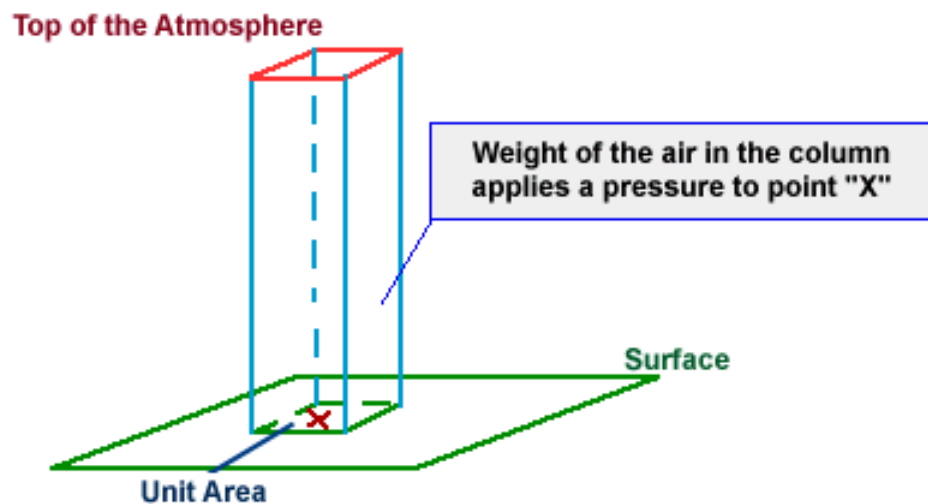
## TROPOPAUSA

- spessore dell'ordine di una decina di km
- temperatura costante - 55°C
- presenza delle **correnti a getto**



## PRESSIONE ATMOSFERICA

- è il peso dell'atmosfera per unità di superficie
- andamento decrescente con la quota



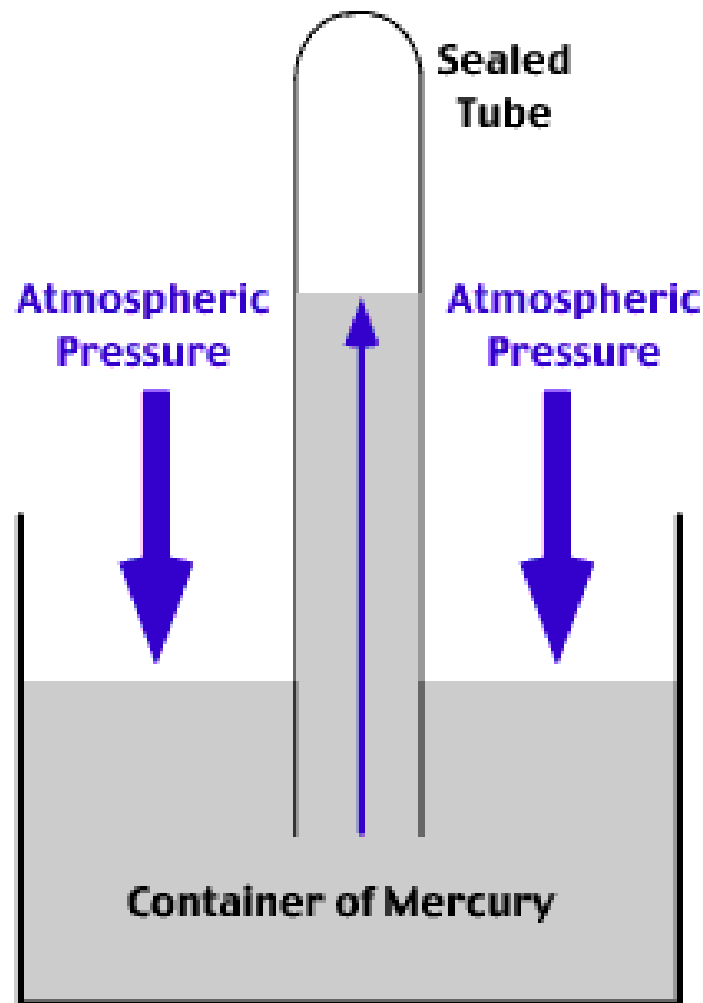


## UNITA' DI MISURA DELLA PRESSIONE ATMOSFERICA

- unità corrente: **ectoPascal (hPa)**
  - **millibar (mb)**:  $1 \text{ hPa} = 1 \text{ mb}$
  - **millimetri di mercurio (mm<sub>Hg</sub>)**
  - **pollici di mercurio (in<sub>Hg</sub>)**:  $1 \text{ in}_{\text{Hg}} = 25,4 \text{ mm}_{\text{Hg}}$
- valore medio pressione MSL a 0°C e 45° lat. è pari a:  
 $1013,27 \text{ hPa} = 1013,27 \text{ mb} = 760 \text{ mm}_{\text{Hg}} = 29,92 \text{ in}_{\text{Hg}}$

## IL BAROMETRO A MERCURIO

- barometro di Torricelli (1643)
- è il più accurato
  - non richiede taratura
- necessita di correzioni per:
  - altitudine
    - riportare la lettura al MSL
  - temperatura
    - compensare dilatazione termica del mercurio
- controindicazioni:
  - molto fragile
  - il mercurio è un veleno

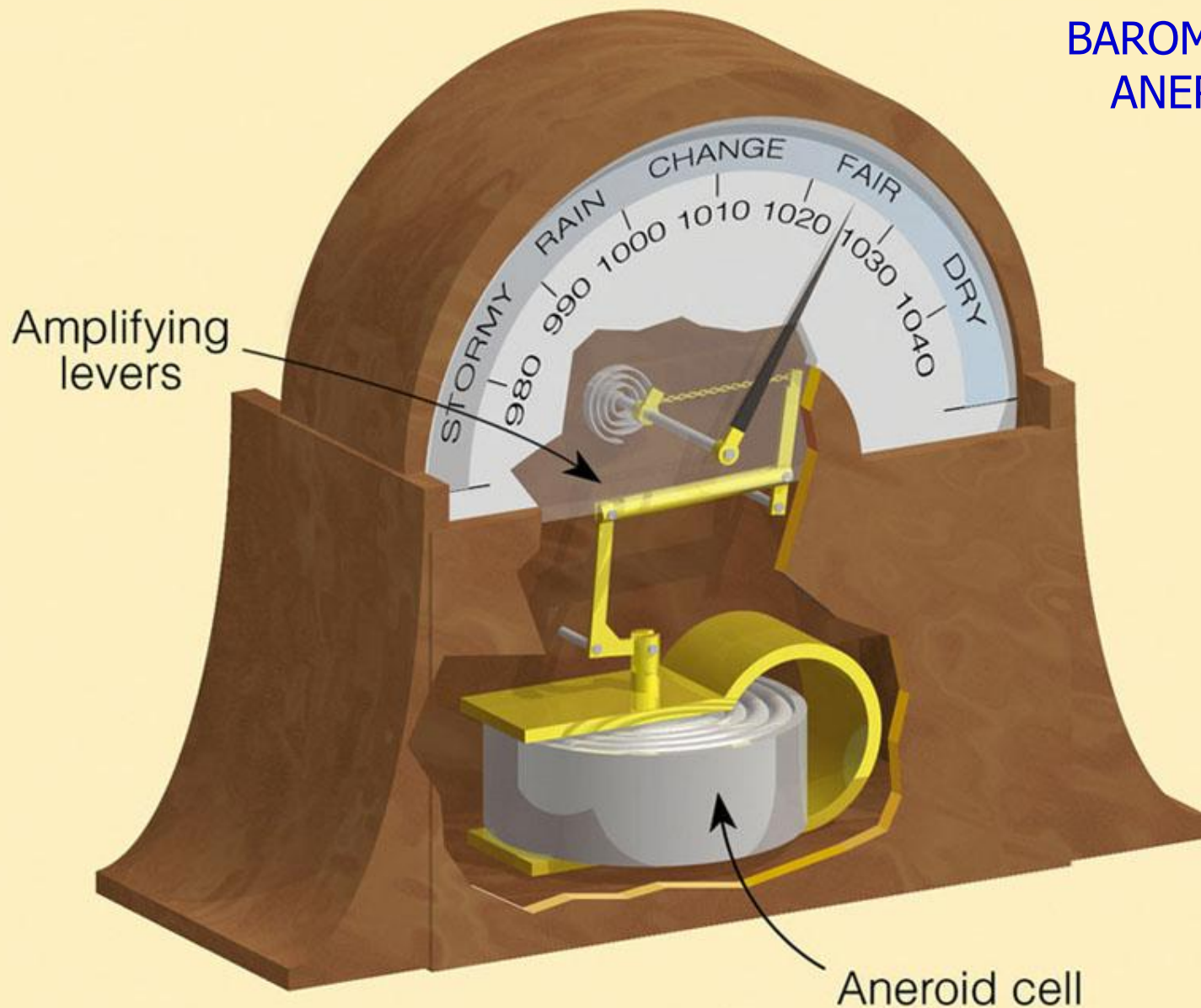


## IL BAROMETRO ANEROIDE

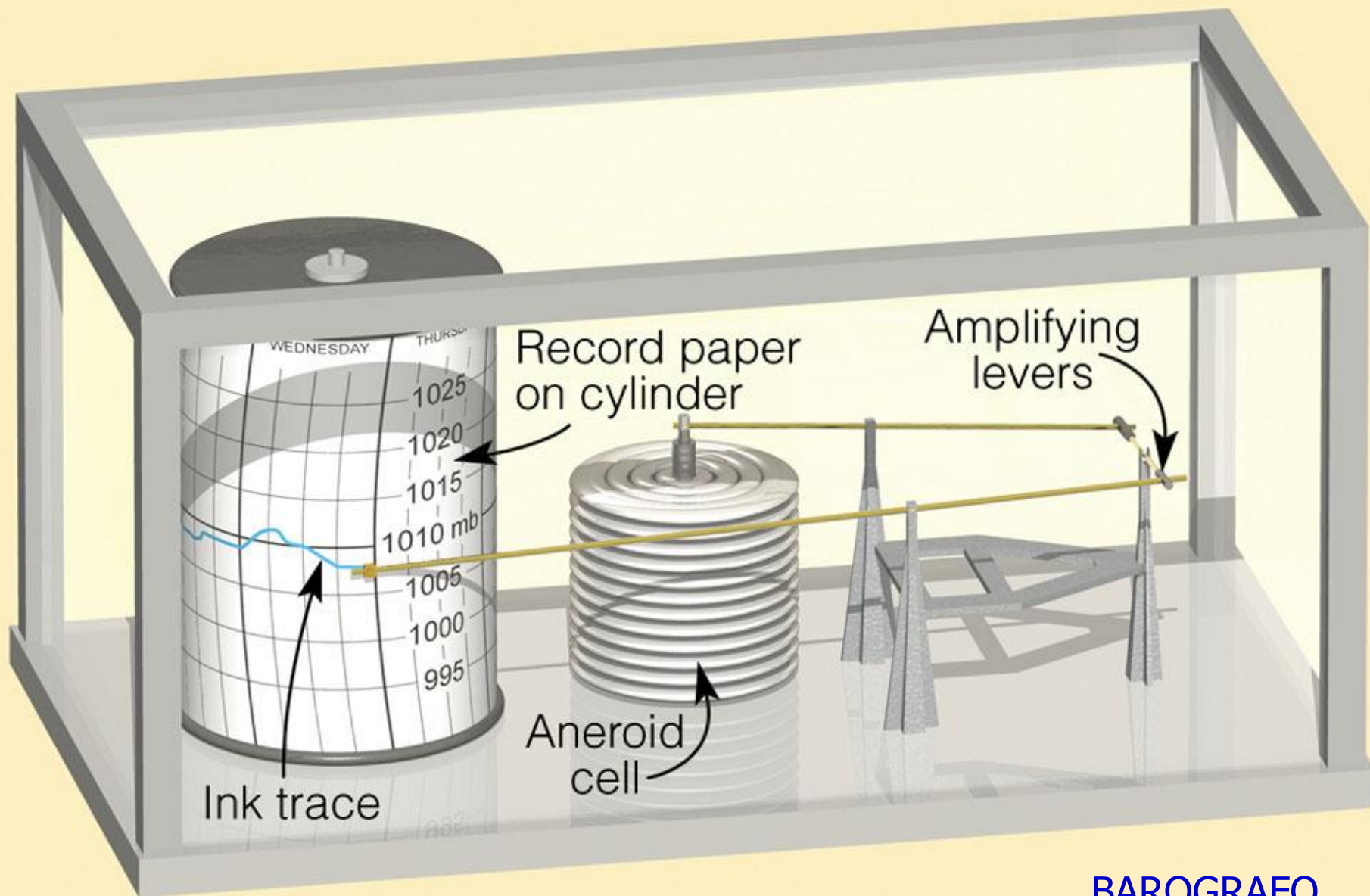
- sistema meccanico
  - impreciso (calibrazione)
  - facile trasporto
- capsula con vuoto interno solidale ad un ago
  - capsula si espande o contrae per variazioni di pressione
  - ago si muove su scala graduata
  - lettura dei valori senza necessità di alcuna correzione
- principio degli **altimetri**



## BAROMETRO ANEROIDE







## BAROGRAFO



- è la massa di atmosfera contenuta in un volume unitario
- al MSL, la densità dell'aria secca è  $1,225 \text{ kg/m}^3$
- andamento decrescente con la quota
  - 50% atm compreso nei primi 5,5 km
  - 99,7% atm compreso nei primi 40 km
  - a 40 km  $p = 0,27 p_{\text{s.l.m.}}$
- possibile definizione di una quota limite?
  - altezza oltre la quale non rintracciabile gas atmosferico

- 80 km: diffusione della luce solare
- 100 - 300 km: incandescenza meteoriti per attrito
- 400 - 600 km: particelle hanno velocità  $\approx v_{\text{fuga}} = 13600 \text{ km/h}$ 
  - allontanamento di particelle legate alla sola gravità (neutre)
- 1000 km: interazione particelle cariche e campo magnetico
  - fenomeni luminosi nell'alta atmosfera (aurore)
- non esiste limite superiore
  - atmosfera diviene sempre estremamente rarefatta
  - si confonde progressivamente con il plasma solare

## RELAZIONE TRA PRESSIONE E QUOTA

- l'aria è un fluido comprimibile
- gli strati più bassi sono più compressi e più densi
- gli strati superiori sono meno compressi e meno densi
- ne consegue che all'aumentare della quota di riferimento: per variare pressione di 1 hPa si devono considerare variazioni di quota sempre più ampie
- per una variazione di 1 hPa a  $t = 0^{\circ}\text{C}$ , occorre salire di 8 m al MSL, di 16 m a 5500 m di quota

- riduzione al livello medio del mare (Mean Sea Level)
  - confrontare pressioni misurate in diverse località
  - determinare la variazione orizzontale della pressione
  - riferita a superficie di altezza costante (MSL)
  - tabelle trasformano pressione da misurata in MSL
- riduzione a 0°C
  - necessaria con barometri a mercurio
  - mercurio caldo è meno denso del mercurio freddo
    - ⇒ colonna Hg più alta per equilibrare stessa pressione atm
  - tabelle riducono a 0°C le letture del barometro

- riportiamo su carta geografica:
  - posizione stazioni di misura pressione
  - pressione ridotta al livello del mare
- tracciamo le **isobare**
  - collegare località con uguale pressione MSL
  - le isobare si tracciano ad intervalli di 4 hPa
  - può essere necessario interpolare
- evidenziamo le zone dove la pressione:
  - aumenta progressivamente (**alta pressione - anticicloni**)
  - diminuisce progressivamente (**bassa pressione - cicloni**)

# RIASSUMENDO...

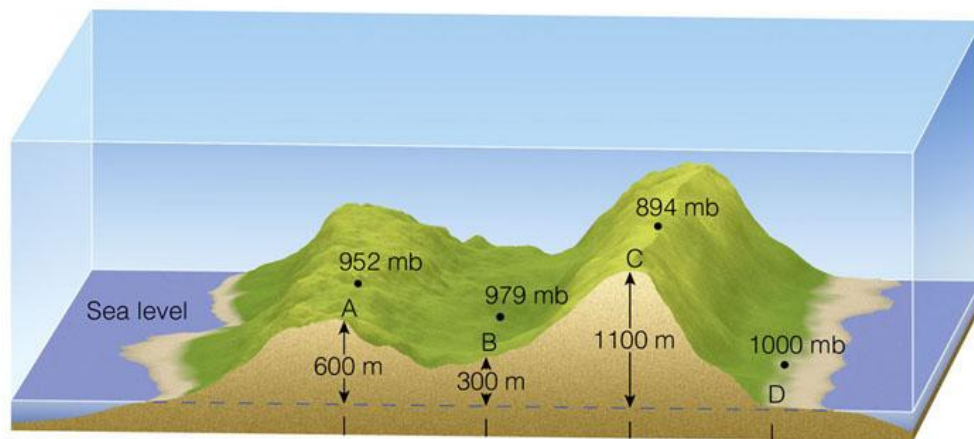


Diagram (a)

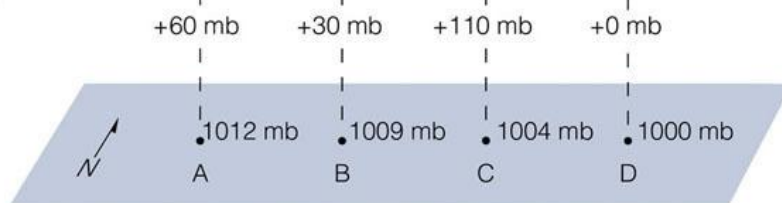


Diagram (b)

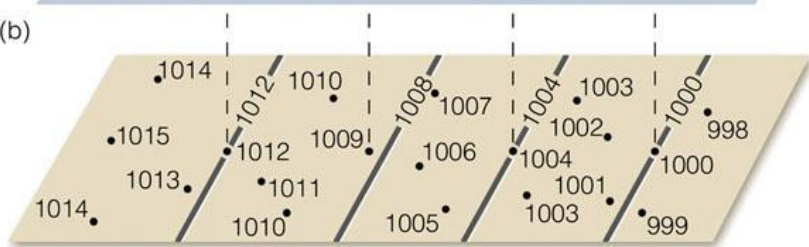
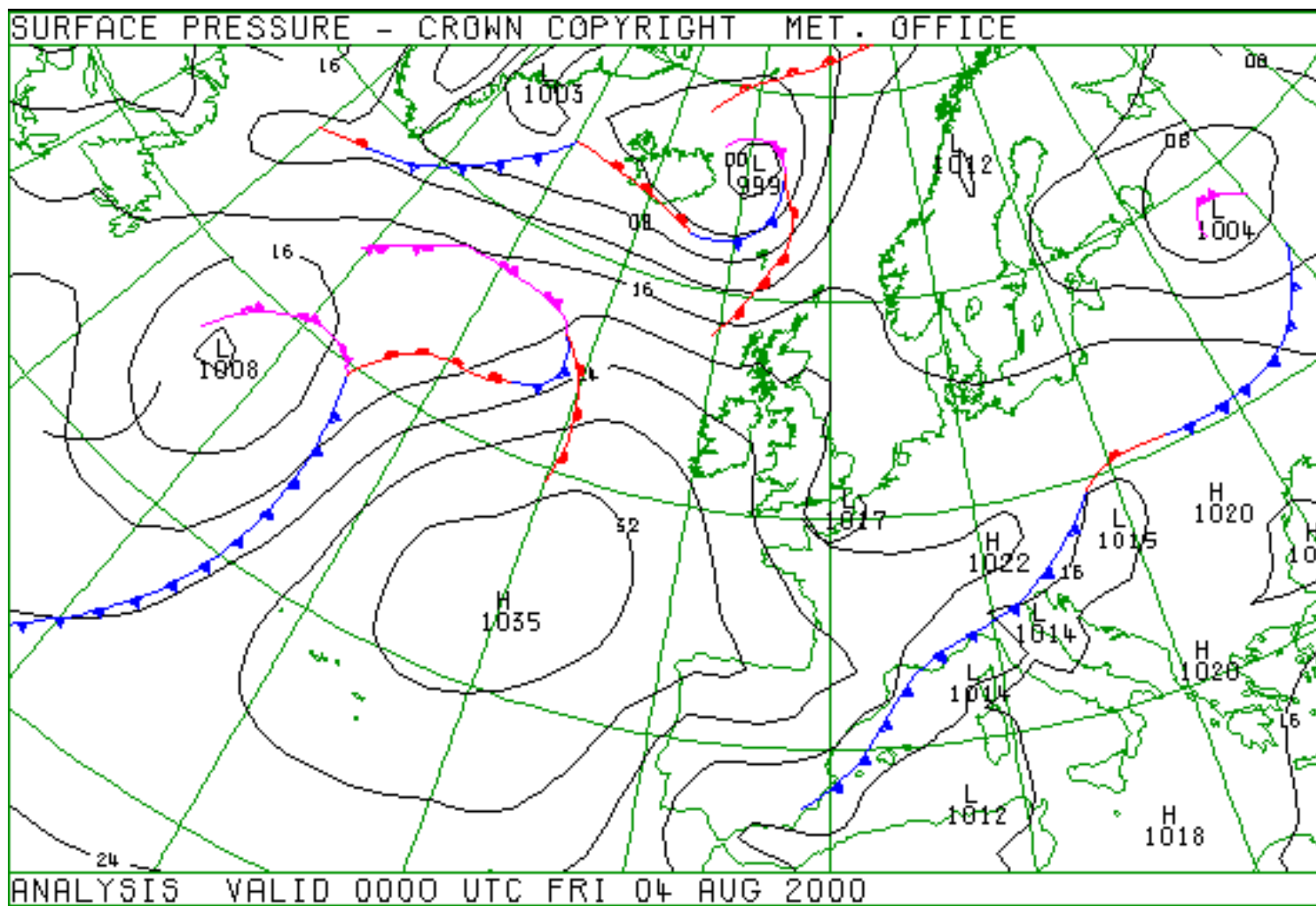


Diagram (c)

SEA-LEVEL PRESSURE CHART

Isobars

RIASSUMENDO...

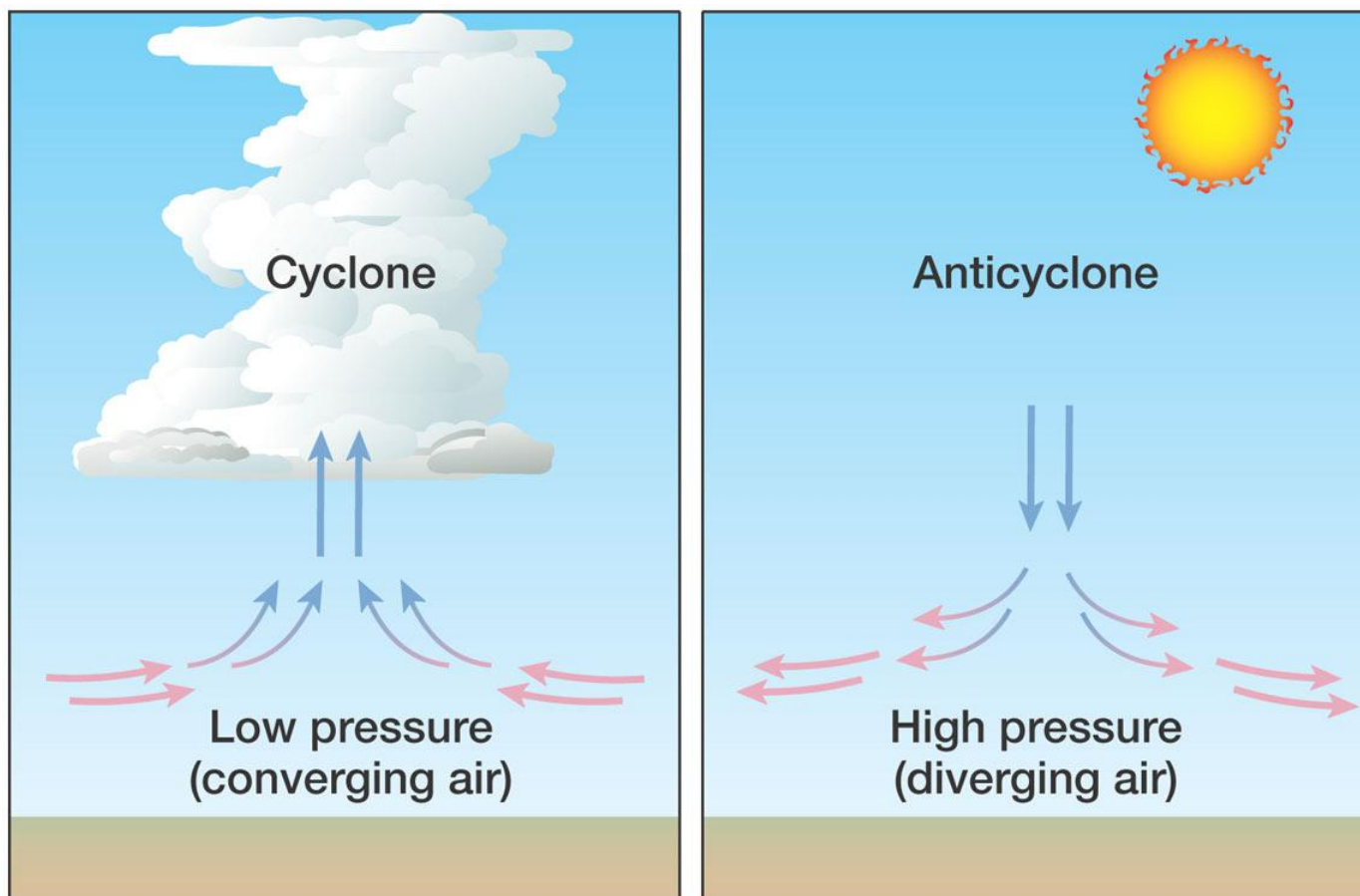




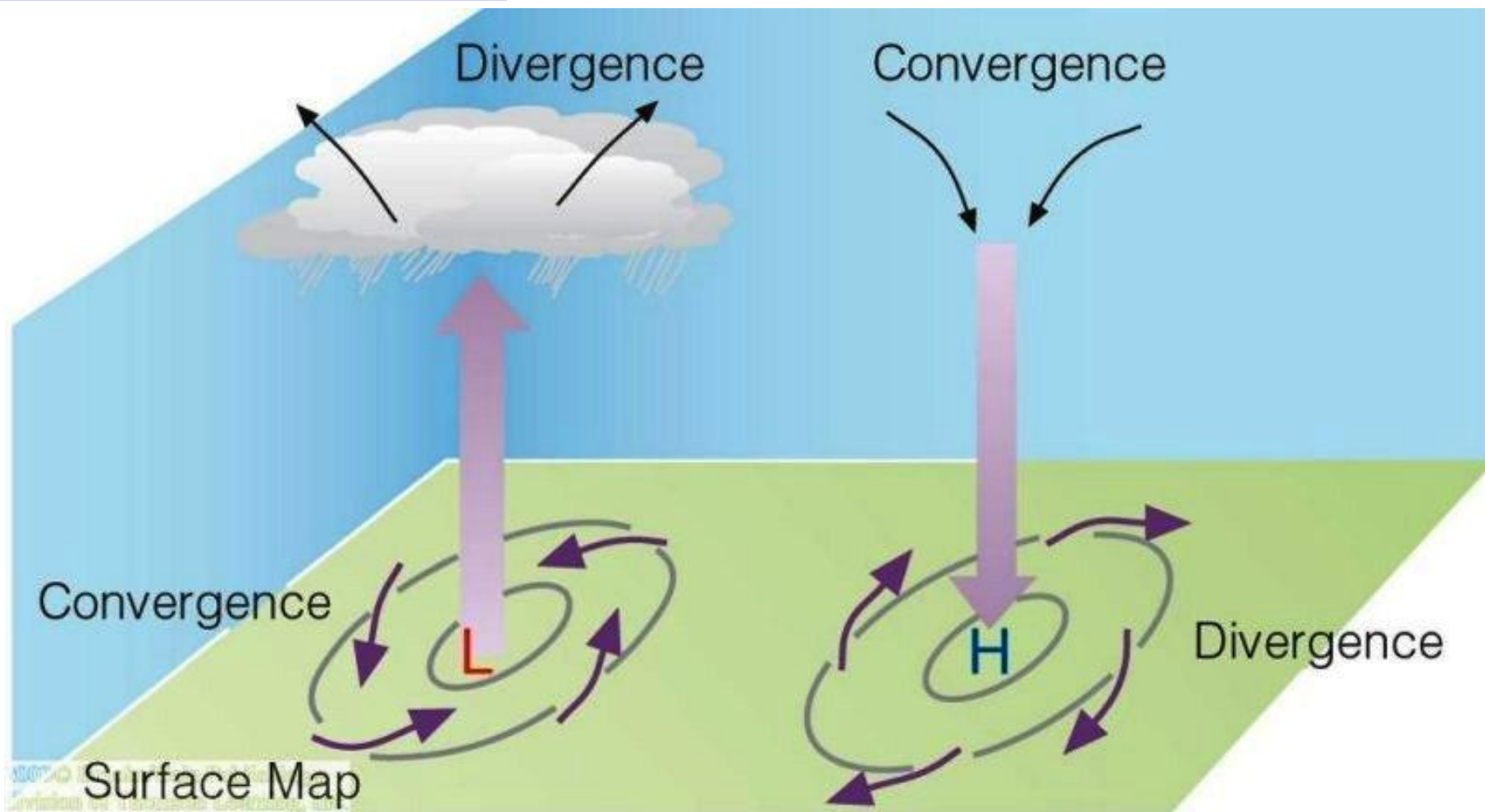
- zone di pressione crescente verso l'interno
  - pressione alta relativamente ai valori circostanti
- indicati con la lettera **H** sulle mappe meteo
- valore medio centrale  $\approx 1024$  hPa
  - registrati anche valori oltre i 1050 – 1060 hPa
- in un anticlone, l'aria:
  - al suolo viene espulsa verso l'esterno (**divergenza**)
  - nell'emisfero nord, esce assumendo rotazione oraria
  - in quota viene richiamata verso il suolo (**convergenza**)
  - la discesa (**subsidenza**) si oppone alla formazione di nubi

- zone di pressione decrescente verso l'interno
  - pressione bassa relativamente ai valori circostanti
- indicati con la lettera **L** sulle mappe meteo
- valore centrale raramente sotto 980 hPa
- in un ciclone, l'aria:
  - al suolo viene richiamata verso l'interno (**convergenza**)
  - nell'emisfero nord, entra assumendo rotazione antioraria
  - nel centro viene innalzata in quota
    - processo favorevole alla formazione di nubi
  - in quota viene espulsa verso l'esterno (**divergenza**)

la **convergenza** dell'aria favorisce lo sviluppo di nubi



RIASSUMENDO...

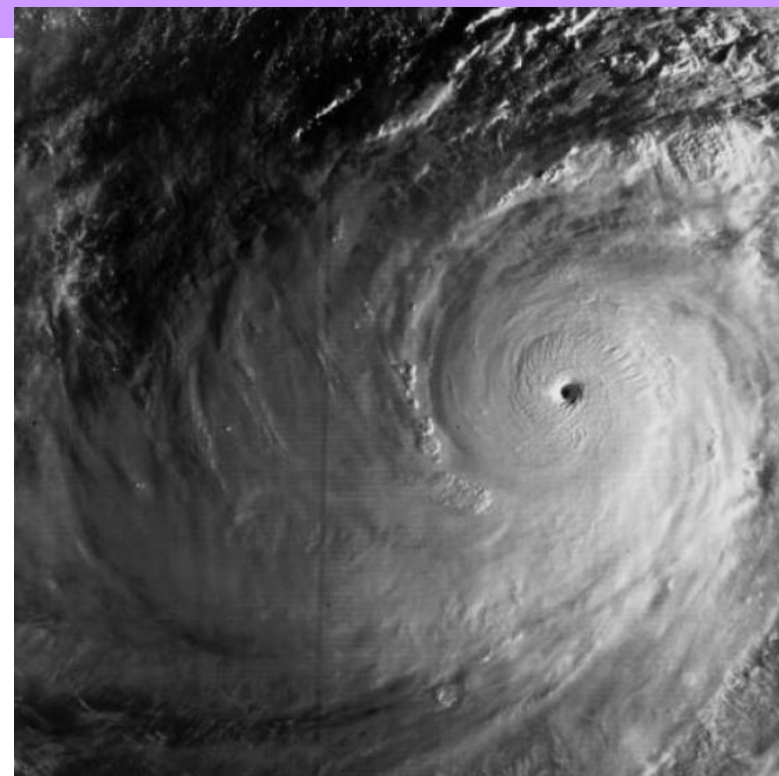
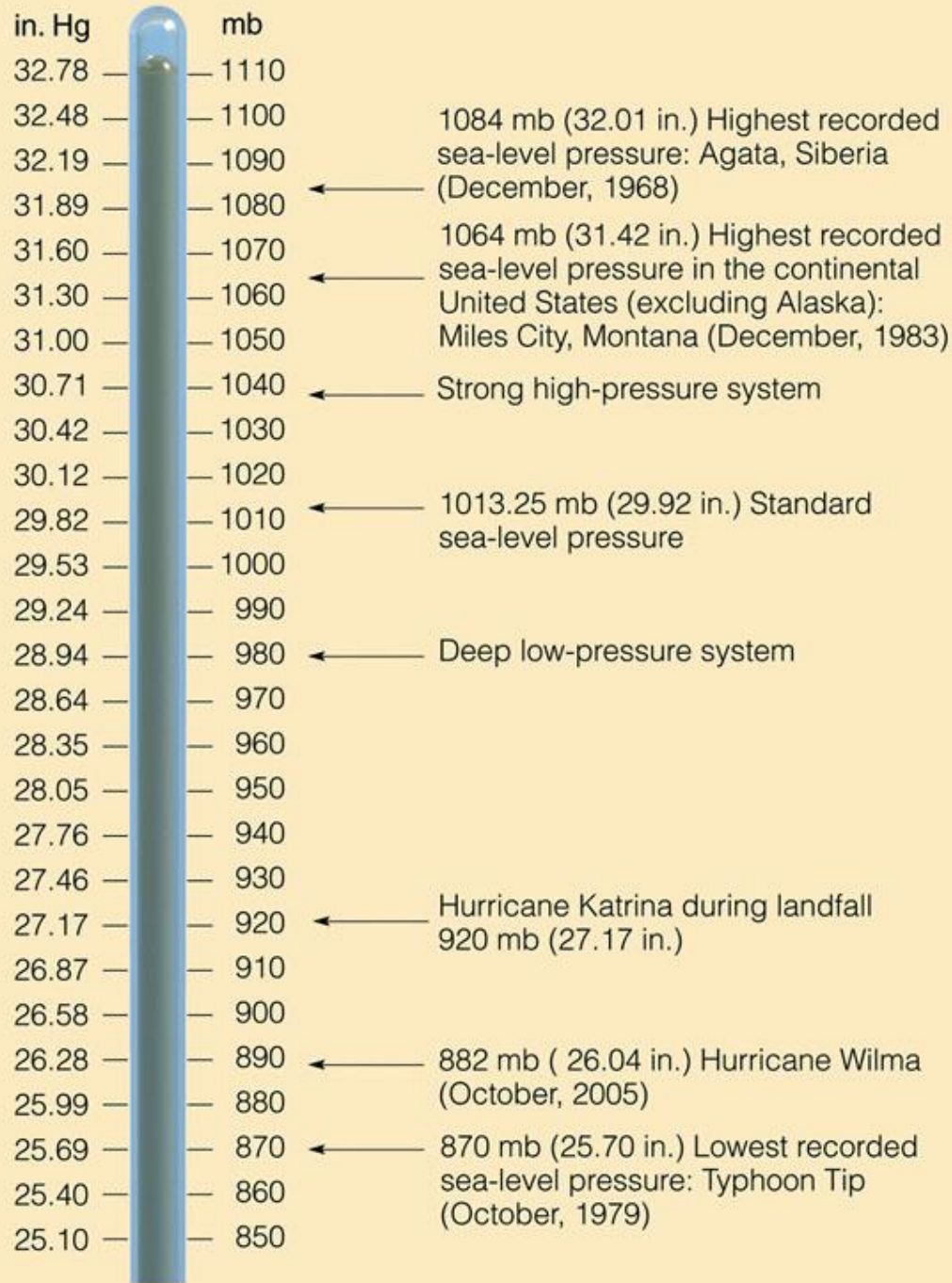


- anticicloni **dinamici**
  - originati dalla circolazione generale atmosferica
  - aria calda a tutte le quote, estesi sino a limite troposfera
  - permanenti a circa 30° - 35° di latitudine (Atlantico)
- anticicloni **termici**
  - originati da diverso riscaldamento superficie terrestre
  - scarsa mobilità, alti valori centrali, ampia estensione
  - aria fredda sino a 2-3 km, poi circolazione ciclonica
  - permanenti (Poli), stagionali (russo-siberiano), diurni (brezze)
- anticicloni **mobili**
  - Separano due famiglie di perturbazioni (medie latitudini) <sup>34</sup>

- cicloni **dinamici**
  - originati dalla circolazione generale atmosferica
  - aria fredda a tutte le quote, estesi sino a limite troposfera
  - permanenti lungo la linea del circolo polare (Islanda)
- cicloni **mobili** o **extra-tropicali**
  - associati ai sistemi frontali medie latitudini (perturbazioni)
  - aria fredda a tutte le quote, estesi sino a limite troposfera

- cicloni termici
  - originati da diverso riscaldamento superficie terrestre
  - aria calda sino a 2-4 km, poi circolazione anticiclonica
  - permanenti (Equatore), stagionali (estivi continentali o oceanici invernali), diurni (brezze)
- cicloni orografici
  - originati sottovento a catene montuose investite da intense correnti in quota (Pianura Padana, Golfo Ligure)



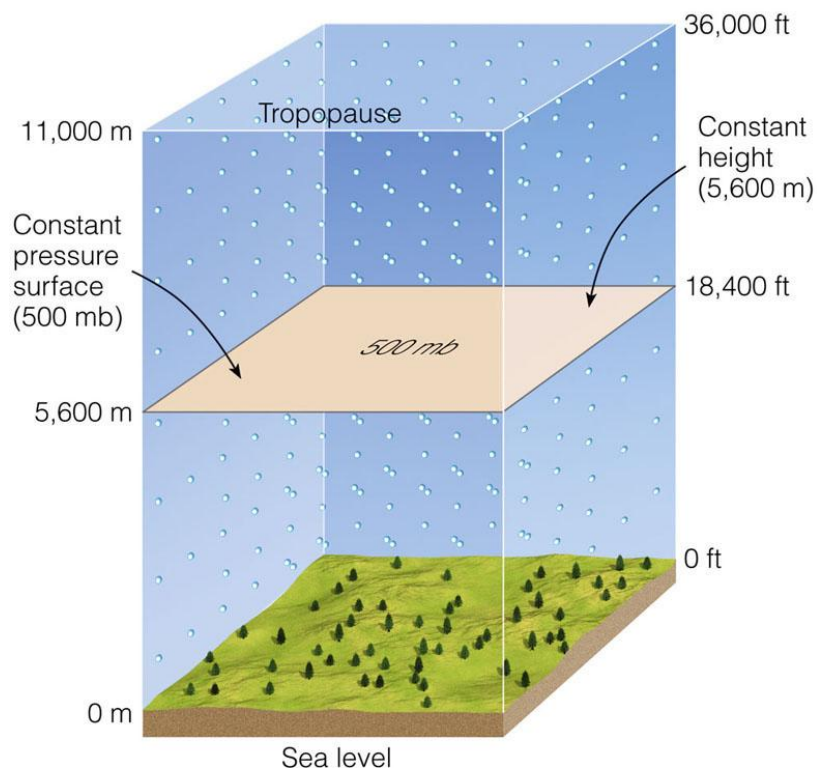


Con un diametro di 2200 km, Tip (Ottobre 1979, Oceano Pacifico) fu anche il più vasto ciclone tropicale della storia moderna

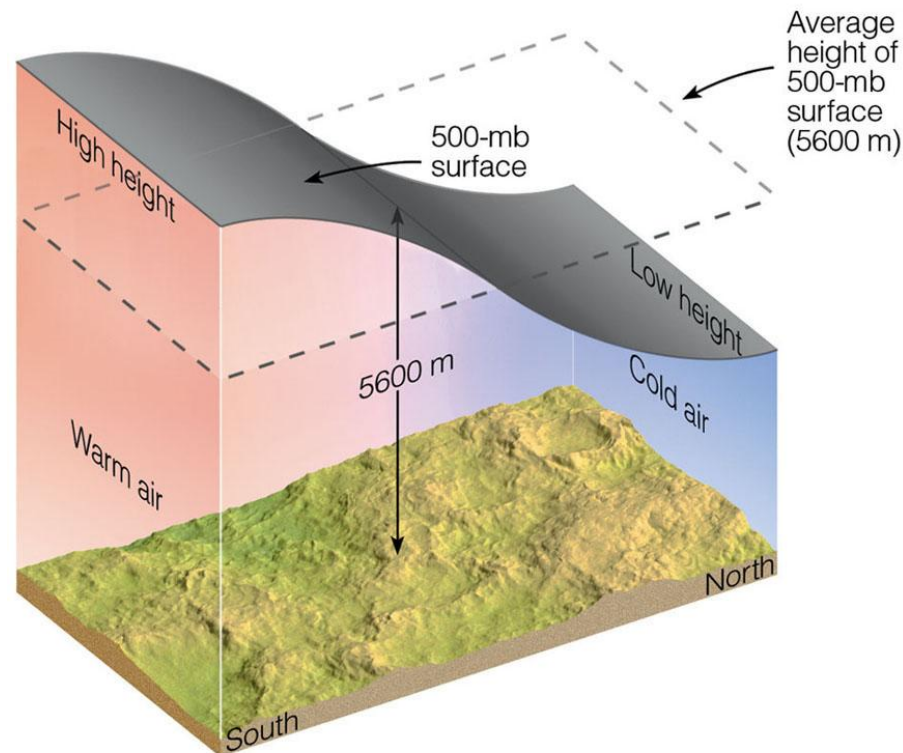
- costruire superficie 3D di punti uguale pressione
- rilevare quota punti con determinati valori pressione
  - sondaggio atmosferico
- l'altezza di punti aventi uguale pressione:
  - varia da località a località
  - dipende condizioni aria al suolo
  - influisce sui movimenti masse d'aria in quota e suolo
- costruzione di **superfici isobariche**:
  - unione punti di uguale pressione a quote diverse

- su una superficie isobarica:
  - tutti i punti hanno uguale pressione ma quote diverse
  - **isoipse** uniscono punti stessa quota
- distanza tra superfici dipende da temperatura aria interna
  - temperatura alta, aria dilata, distanza cresce
  - temperatura bassa, aria comprime, distanza diminuisce
- **massime o minime altezza di superfici isobariche corrispondono max o min pressioni in quota**
- superfici isobariche **standard** (uso aeronautico):
  - 850 700 500 400 300 200 hPa

## LE SUPERFICI ISOBARICHE



© Brooks/Cole, Cengage Learning



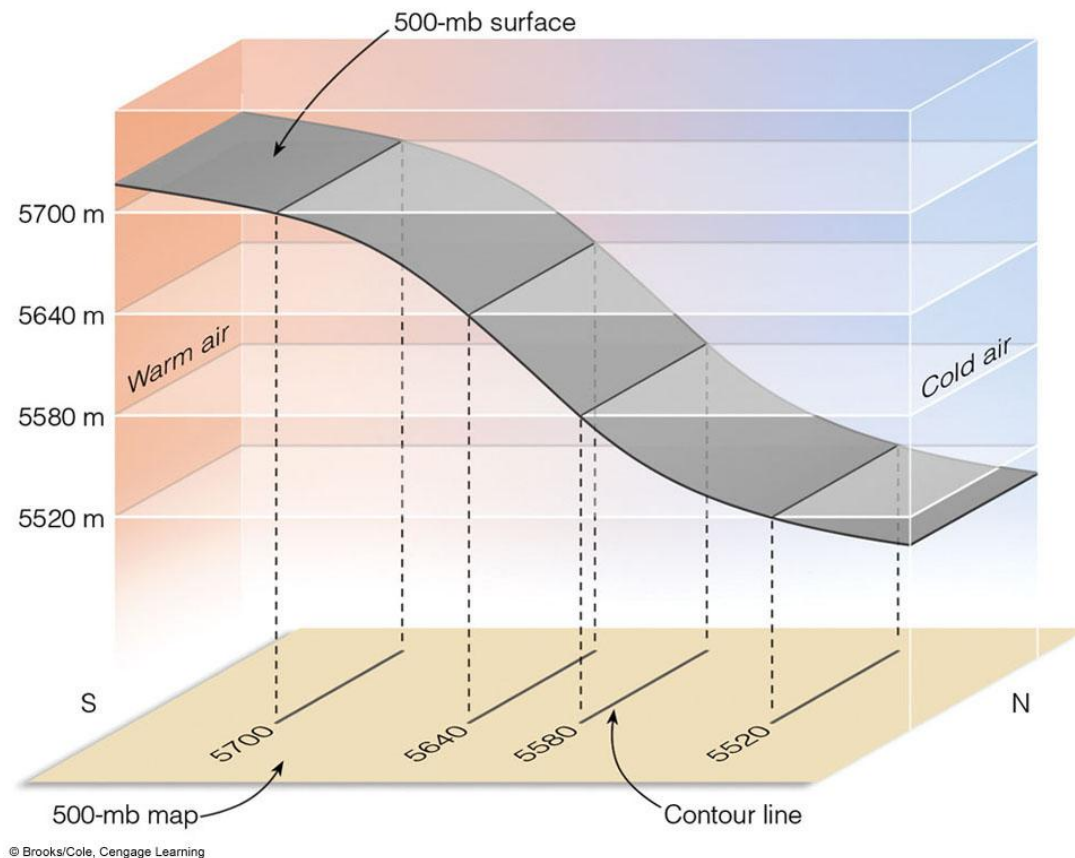
© Brooks/Cole, Cengage Learning

all'equilibrio (termico e barico), le superfici isobariche sono parallele e ad altezza costante; una variazione di temperatura comporta l'innalzamento della superficie isobarica nell'aria calda (meno densa) e l'abbassamento in quella fredda (più densa)

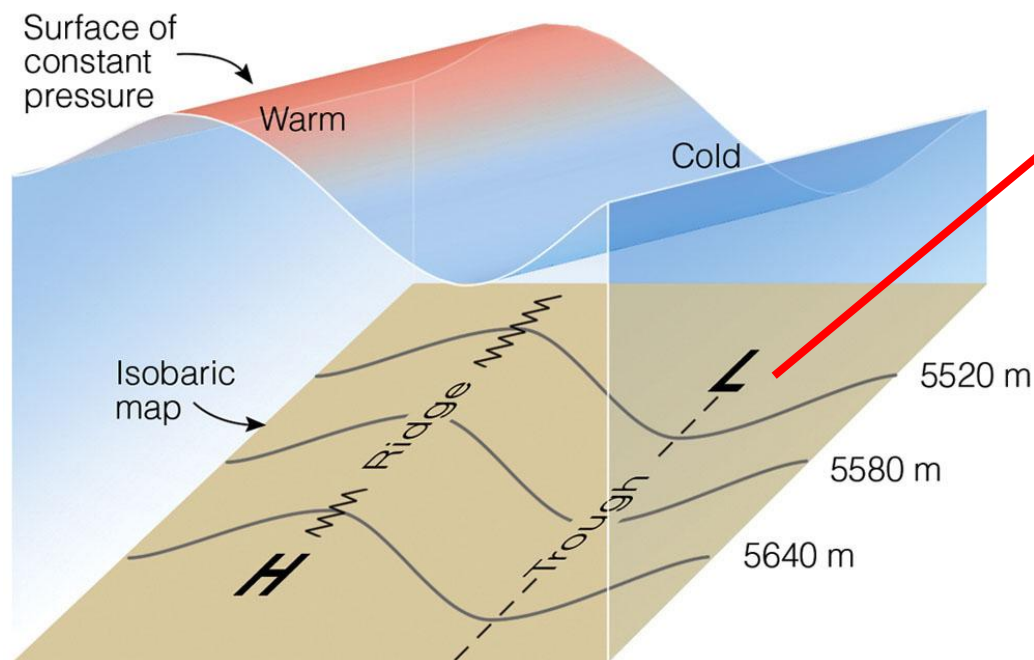


## LE SUPERFICI ISOBARICHE

- dove la temperatura orizzontale presenta rapide variazioni, la superficie isobarica cambia elevazione altrettanto rapidamente
- le variazioni di altezza sono riportate come **isoipse**, che risultano più ravvicinate dove la superficie è più ripida

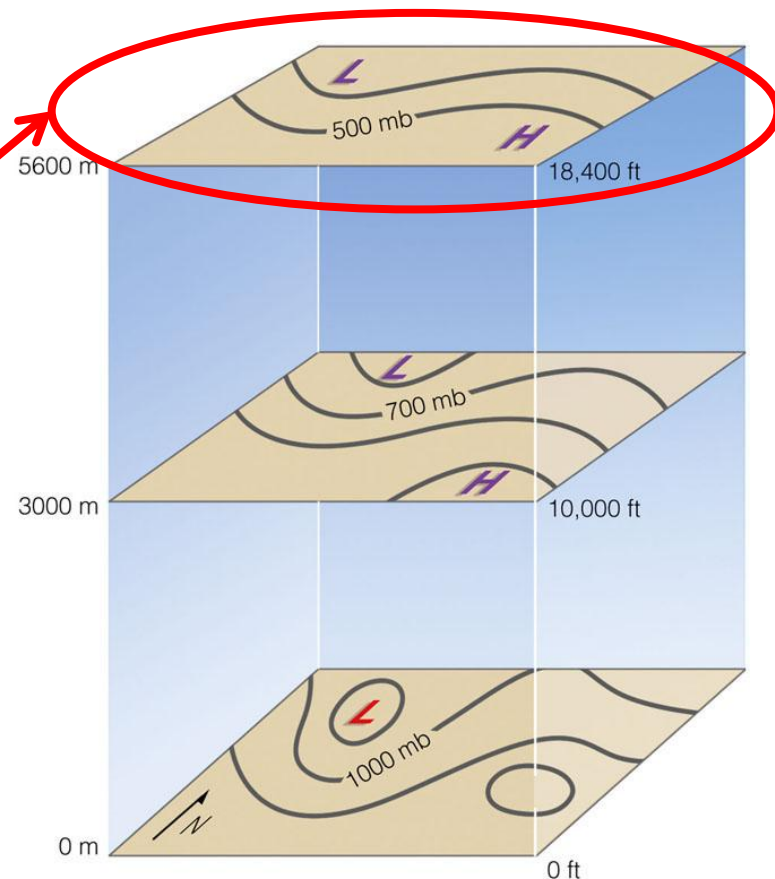


## LE SUPERFICI ISOBARICHE E LE CARTE IN QUOTA



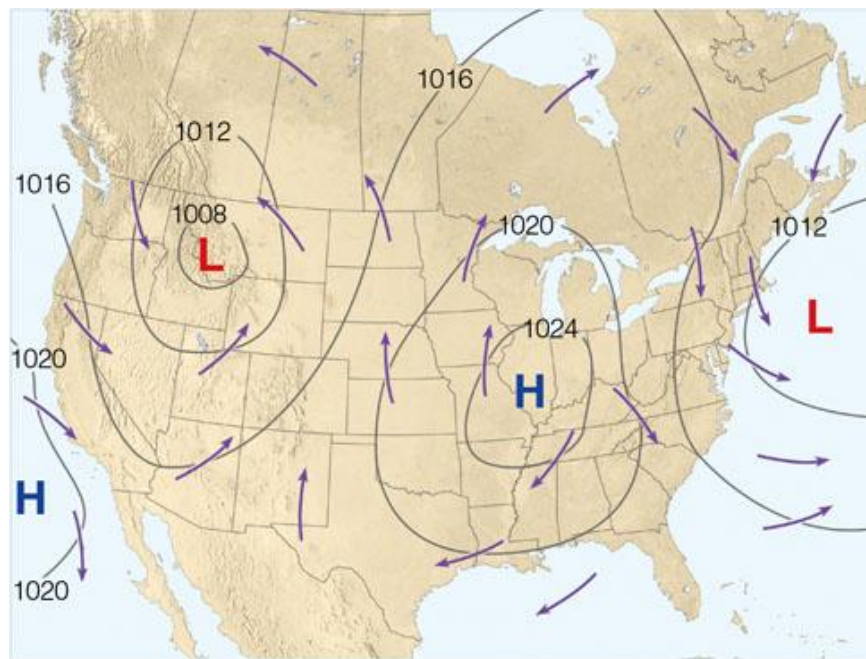
© Brooks/Cole, Cengage Learning

le isoipse identificano i **promontori** di alta pressione (aria calda verso nord) e le **saccature** di bassa pressione (aria fredda verso sud)



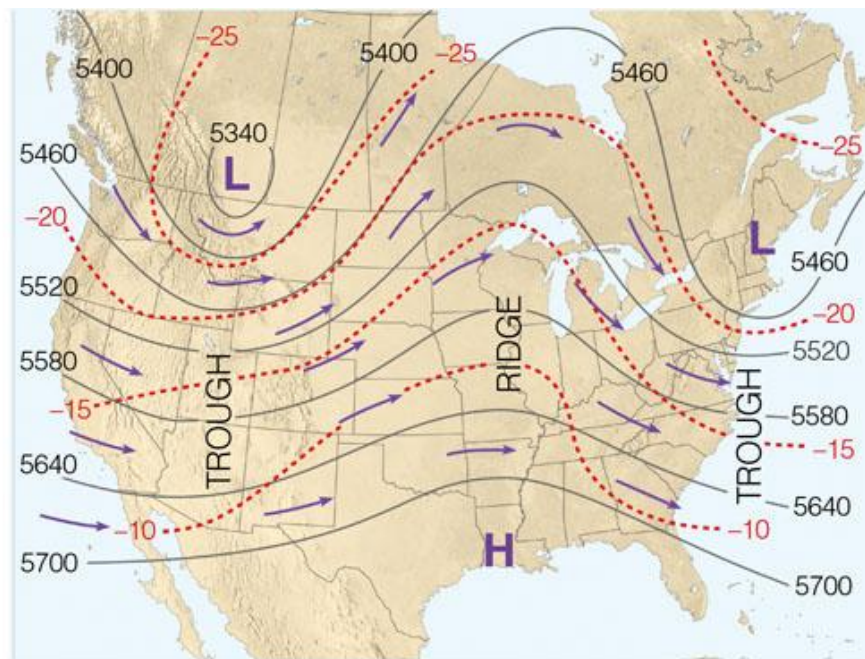
© Brooks/Cole, Cengage Learning

## LE SUPERFICI ISOBARICHE E LE CARTE IN QUOTA



(a) Surface map

© Brooks/Cole, Cengage Learning



(b) Upper-air map (500 mb)

I campi di temperatura seguono abbastanza fedelmente la geografia dei promontori e delle saccature: regioni di **aria calda** in quota appaiono sulla mappa come **promontori** di alta pressione, regioni di **aria fredda** come **saccature** di bassa pressione.

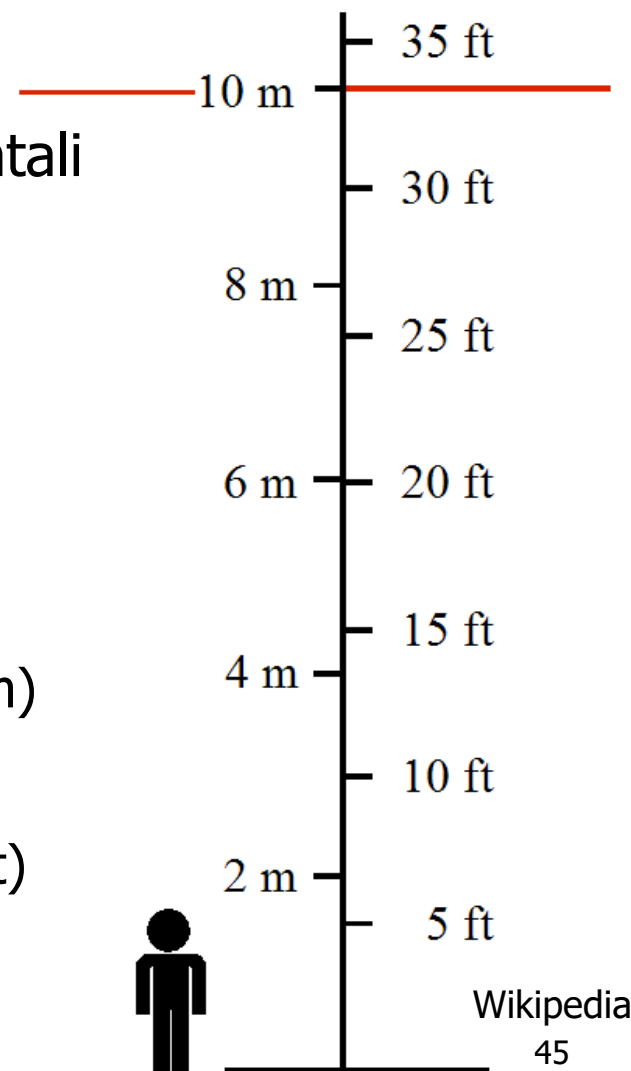




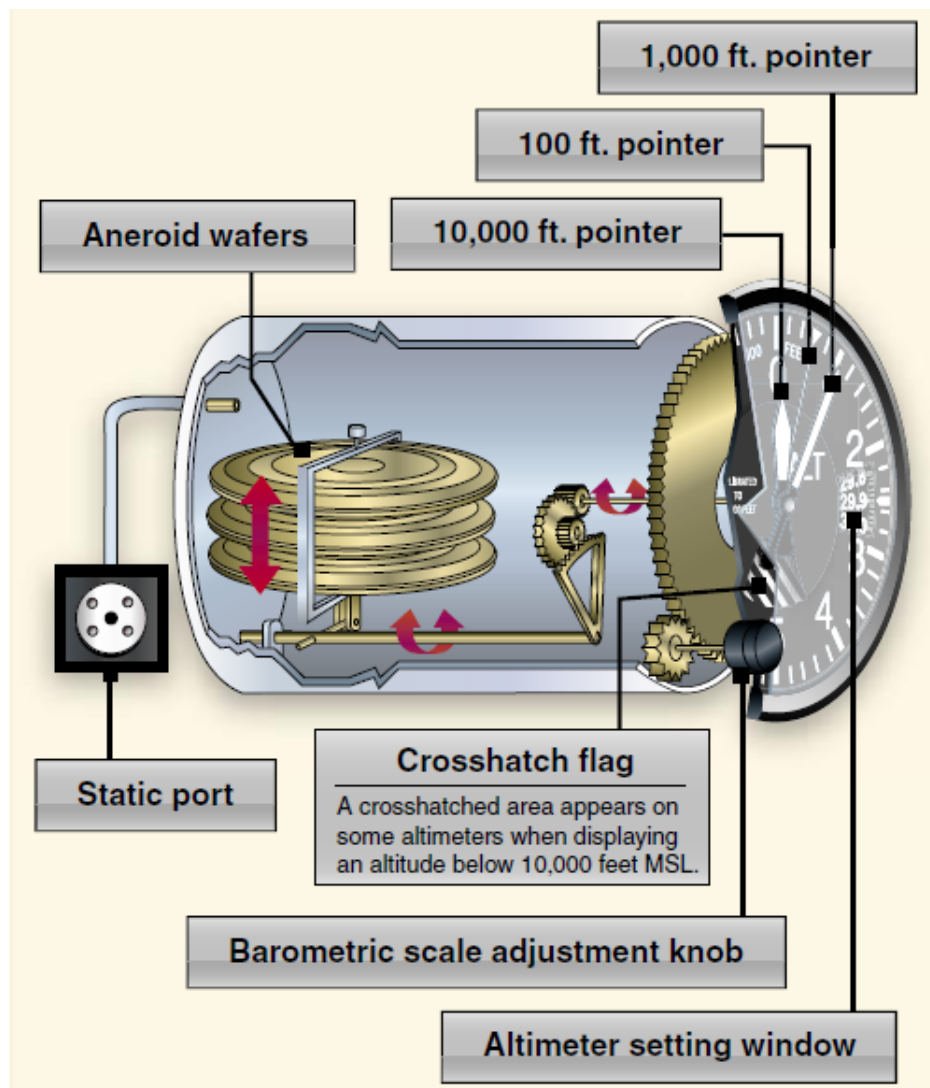
# ALTIMETRIA

## A PROPOSITO DI ALTEZZE: TRA PIEDI E METRI

- In meteorologia aeronautica:
  - metri (m) per le dimensioni orizzontali
  - piedi (ft) per le dimensioni verticali
  - $1 \text{ ft} \approx 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m}$
  - $1 \text{ m} \approx 3,3 \text{ ft}$
- Mnemonicamente:
  - da ft a m dividendo per 3
    - 6000 ft sono circa 2000 m (1829 m)
  - da m a ft moltiplicando per 3
    - 2000 m sono circa 6000 ft (6562 ft)
- 1 miglio nautico (nm) = 1852 m
- 1 nodo (kt) = 1 nm/h  $\approx$  1,8 km/h



## ALTIMETRO E ALTIMETRIA



- cuore dell'**altimetro** è un **barometro aneroide**
- la capsula barometrica reagisce a variazioni della *pressione statica esterna*, agente su un aereo in volo e indipendente dal moto dell'aereo attraverso l'aria
- lo strumento è graduato per trasformare variazioni bariche in variazioni di quota

- proprietà a MSL (*Mean Sea Level*), latitudine 45°
  - temperatura  $\Rightarrow 15^{\circ}\text{C}$
  - pressione  $\Rightarrow 760 \text{ mm}_{\text{Hg}} = 1013,25 \text{ hPa}$
  - densità  $\Rightarrow 1,226 \text{ kg/m}^3$
  - umidità rel.  $\Rightarrow 15\%$
- temperatura
  - $15^{\circ}\text{C}$  al MSL
  - spessore della troposfera: da MSL a 11 km
  - nella troposfera la temperatura decresce di  $0,65^{\circ}\text{C} / 100\text{m}$
  - temperatura limite superiore troposfera:  $-56,5^{\circ}\text{C}$
  - spessore della tropopausa: da 11 a 20 km
  - temperatura della tropopausa:  $-56,5^{\circ}\text{C}$  (costante)

# ICAO STANDARD ATMOSPHERE (I.S.A.) LIVELLI ISOBARICI STANDARD

Pressione	Altitudine			T
hPa	m	ft	FL	°C
1000	111	364		+ 14,3
850	1457	4781	050	+ 5,5
700	3012	9882	100	- 4,6
500	5574	18289	180	- 21,2
400	7185	23574		- 31,7

## SETTAGGIO ALTIMETRICO



- inserimento nell'altimetro della pressione di riferimento
- lo "zero" della scala con cui l'altimetro calcola la posizione verticale di un aereo
- in base al riferimento usato, si hanno misure di **altezza**, **altitudine** o **livello di volo**



- voce di **codice Q**
  - raccolta standardizzata di messaggi di tre lettere (prima Q)
  - da QAA e QNZ per ambito aeronautico, non solo meteo
- QFE indica pressione misurata all'altezza di un aeroporto
- riferimento altimetrico per la misura di **altezza**
  - posizione verticale di un aereo *al di sopra della superficie*, in *ft AGL (Above Ground Level)* o *ft ASFC (Above Surface)*.
  - su QFE locale: l'altimetro al suolo indica zero
- usato raramente, nessuna utilità nel volo in rotta



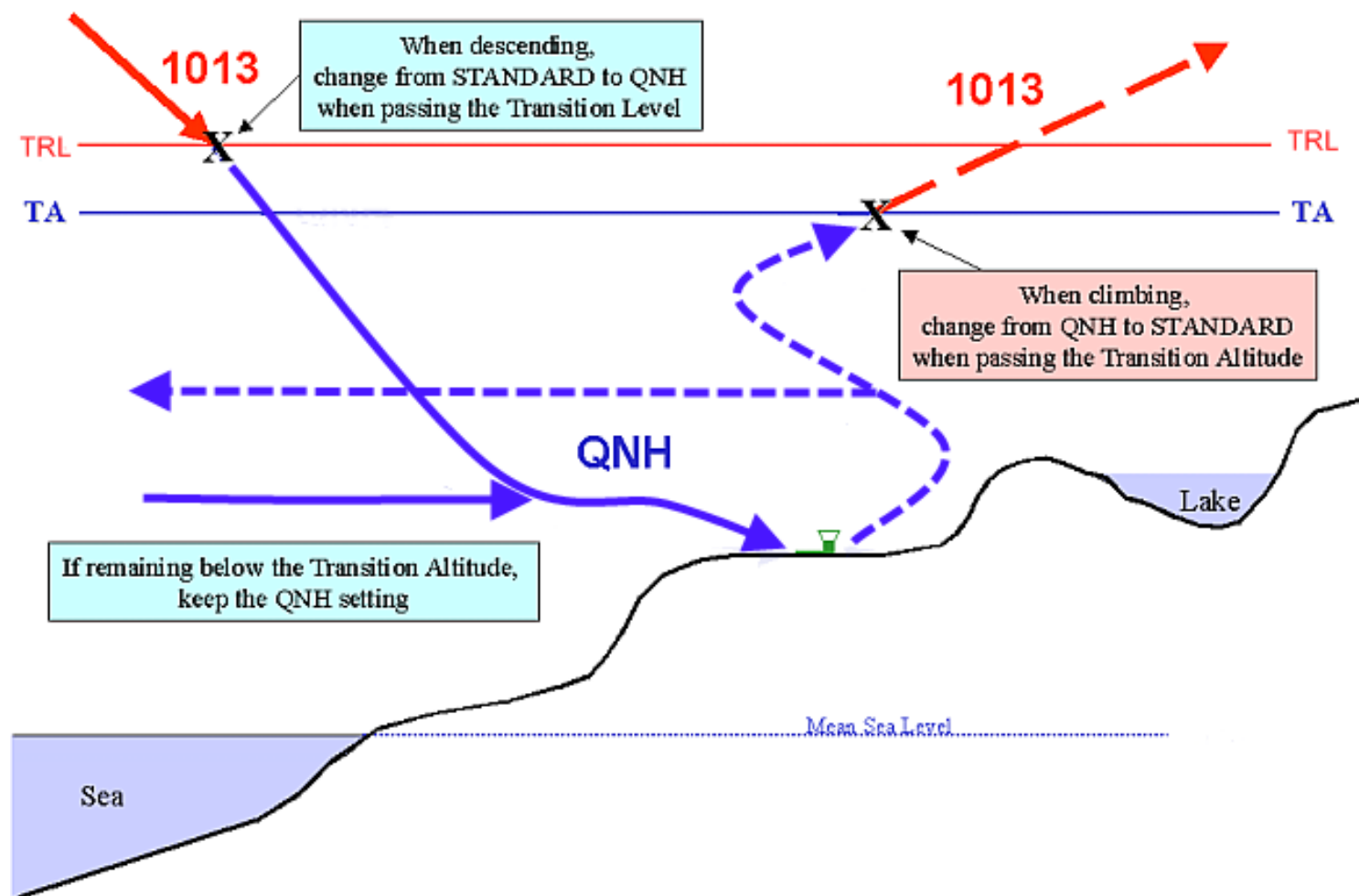
- riduzione QFE a MSL in atmosfera standard
  - aggiunge al QFE la pressione equivalente all'altezza luogo
  - gradiente termico verticale  $\gamma = 0,65^{\circ}\text{C} / 100 \text{ metri}$
- riferimento altimetrico per la misura di **altitudine**
  - posizione verticale di un aereo *sul livello medio del mare in condizioni standard*, in *ft AMSL (Above Mean Sea Level)*
  - su QNH locale: altimetro al suolo indica altitudine aeroporto
- su carte aeronautiche, ostacoli riportati in altitudini AMSL
  - il pilota deve poter disporre del valore del QNH locale per mantenere adeguata separazione verticale con gli stessi

- riduzione QFE a MSL in atmosfera reale
- aggiunge al QFE la pressione equivalente all'altezza luogo
- la correzione è funzione della temperatura media della colonna di atm compresa tra MSL e altezza luogo
- ma il **dato è incognito!**
- con tabelle locali compilate secondo proprietà medie atm
- nessuna valenza aeronautica

- riferimento altimetrico per la misura di **livelli di volo**
  - posizione verticale di un aereo *sulla superficie isobarica 1013,25 hPa (29,92 in<sub>Hg</sub>)* in **FL** (*flight level*)
  - FL è riportato in centinaia di piedi sulla superficie isobarica: FL330 indica 33000 piedi sulla superficie isobarica 1013,25
- il sistema dei livelli di volo è basato in aria ICAO, in aria reale occorre garantire corretta separazione da ostacoli
  - usato oltre una data quota definita per ogni aeroporto
- QNE usato per assicurare adeguata separazione verticale tra aerei quando non è essenziale quella con il terreno

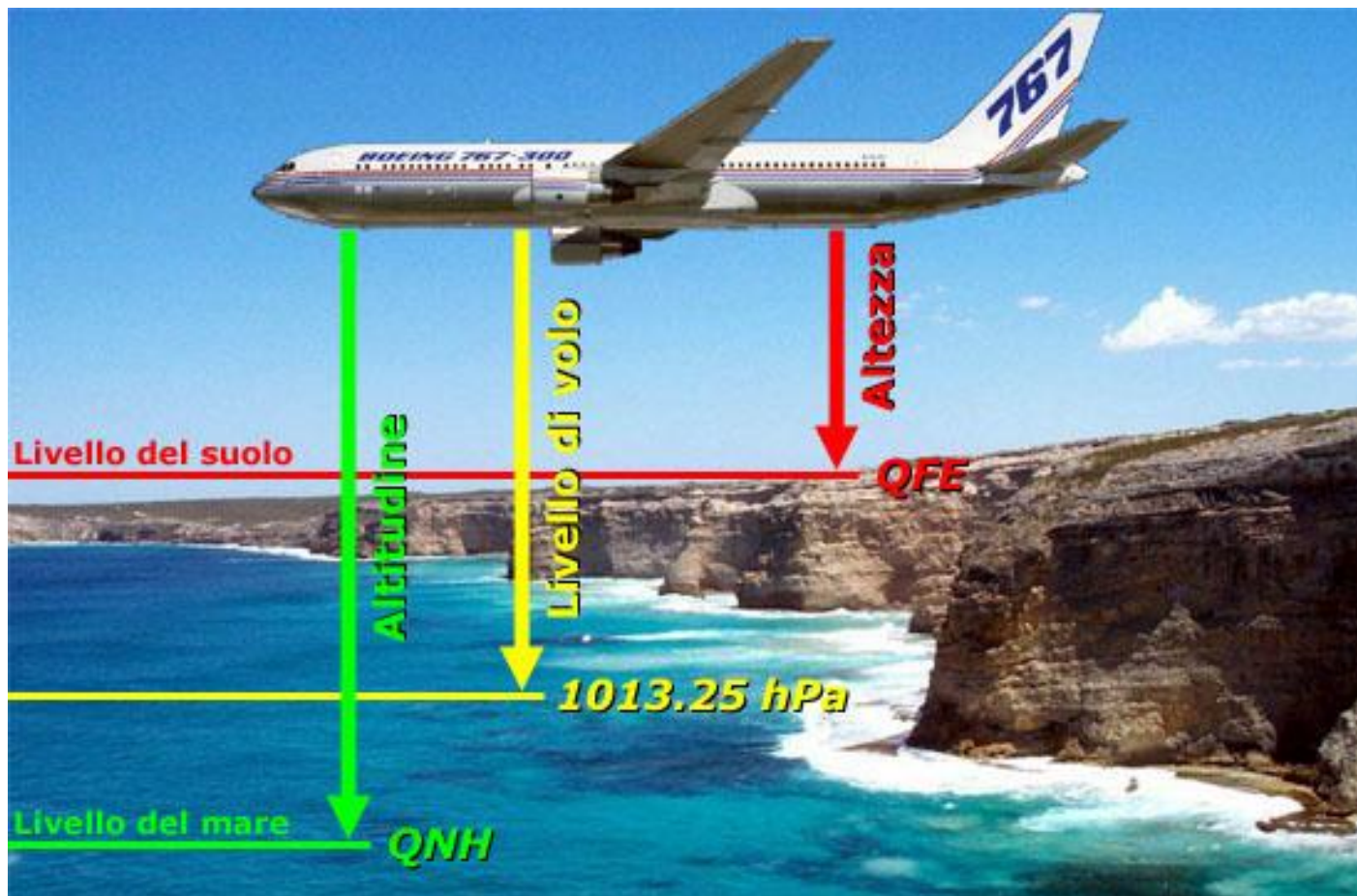
- **altitudine di transizione TA** (*Transition Altitude*)
  - altitudine alla quale e al di sotto della quale si vola per altitudini (QNH) e al di sopra della quale si vola per FL (QNE)
  - fissa per ciascun aeroporto e pubblicata in AIP
- **livello di transizione TRL** (*Transition Level*)
  - il più basso livello disponibile, al di sotto del quale si vola per altitudini (QNH)
  - varia in funzione del QNH locale
- **strato di transizione** (*Transition Layer*)
  - mai inferiore a 1000 ft, è lo spazio compreso tra TA e TRL
  - non per volo livellato, solo in salita (inserire QFE passando la TA) o discesa (inserire QNH passando il TRL)

## IL SISTEMA DEI LIVELLI DI VOLO



- in rotta, la posizione verticale espressa in termini di:
  - livelli di volo (QNE), a o sopra livello di transizione TRL
  - altitudini (QNH), sotto il livello di transizione TRL
- aeroporti e zone terminali:
  - altitudini (QNH), a e sotto altitudine transizione TA
  - livelli di volo (QNE), a e sopra livello transizione TRL
- ove non esista altitudine di transizione:
  - altitudini (QNH), a e sotto 3000 ft AGL
  - livelli di volo (QNE), al di sopra di 3000 ft AGL
- obbligo regolare altimetri su QNE su oceani o zone indicate come **Standard Pressure Regions**

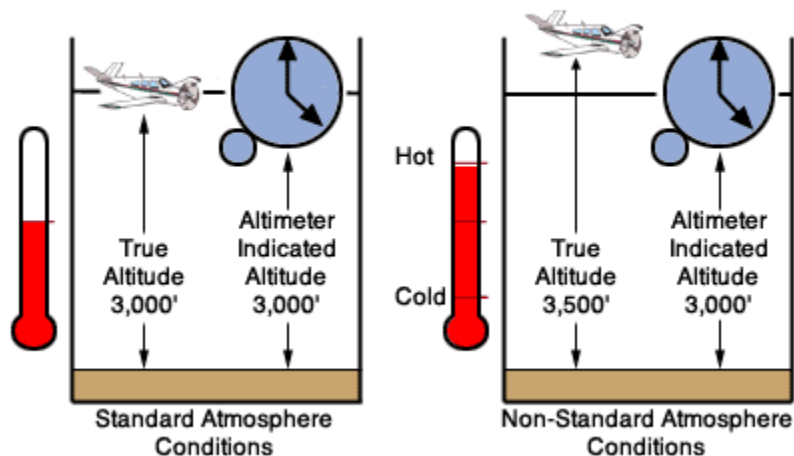
RIASSUMENDO...



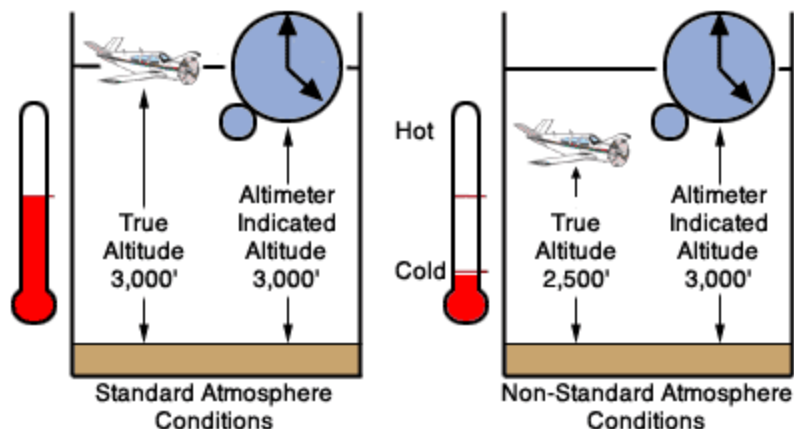


## EFFETTI DELLA TEMPERATURA SULL' ALTITUDINE

How temperature Affects Altitude

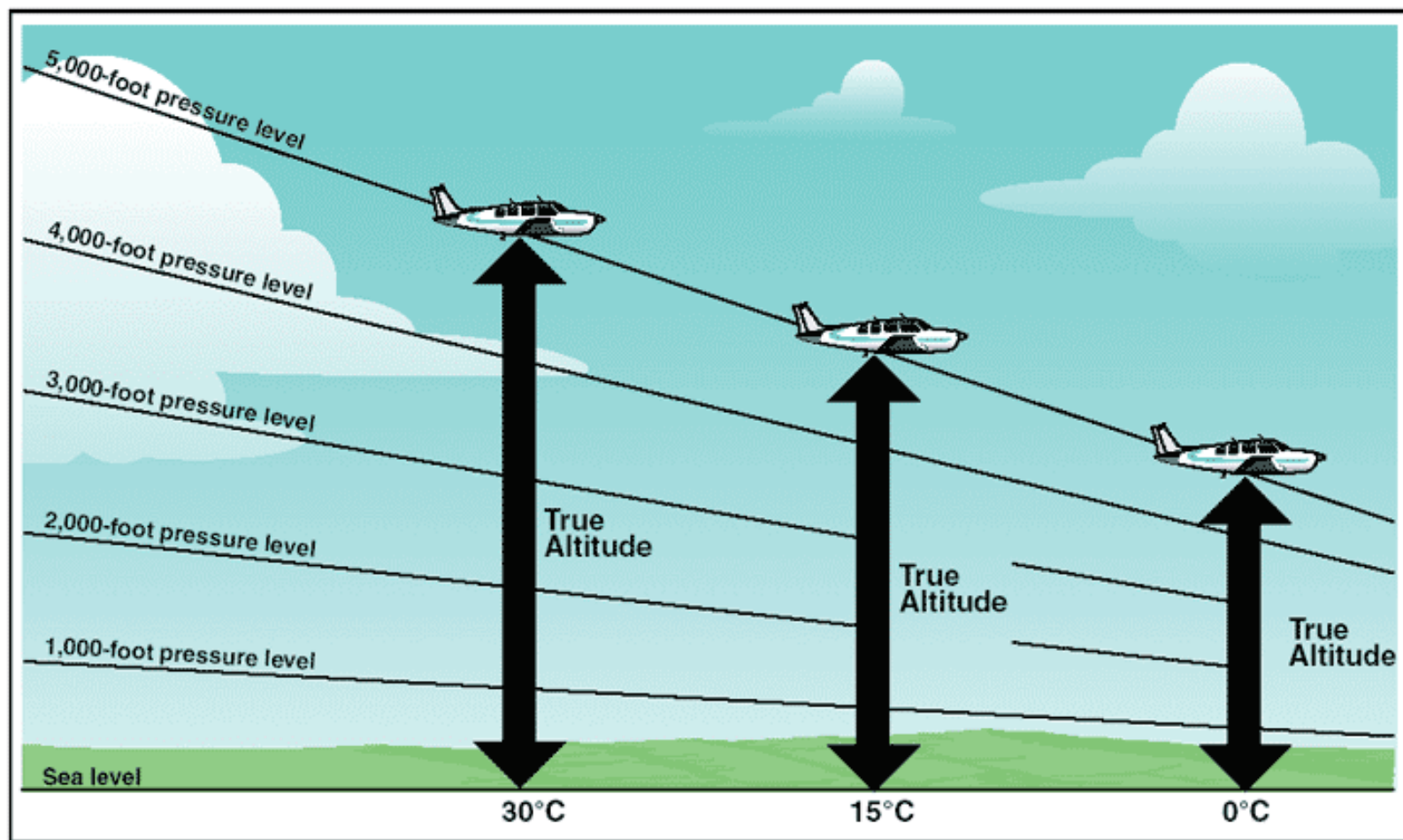


How temperature Affects Altitude

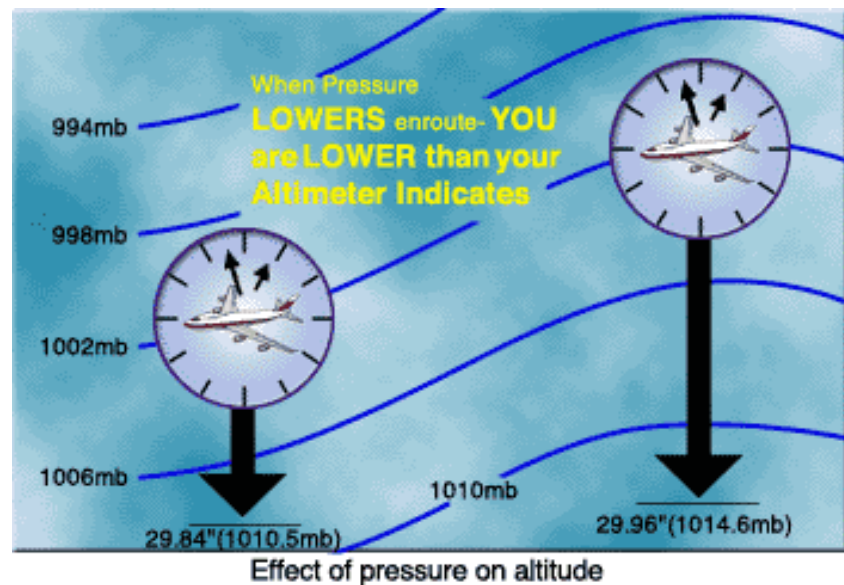


- una temperatura superiore a quella standard comporta la lettura di quote inferiori a quella reale (aereo trasportato verso l'alto dal gonfiarsi delle superfici isobariche)
- una temperatura inferiore a quella standard comporta la lettura di quote superiori a quella reale (aereo trasportato verso il basso dal contrarsi delle superfici isobariche)

## EFFETTI DELLA TEMPERATURA SULL' ALTITUDINE



## EFFETTI DELLA PRESSIONE SULL' ALTITUDINE

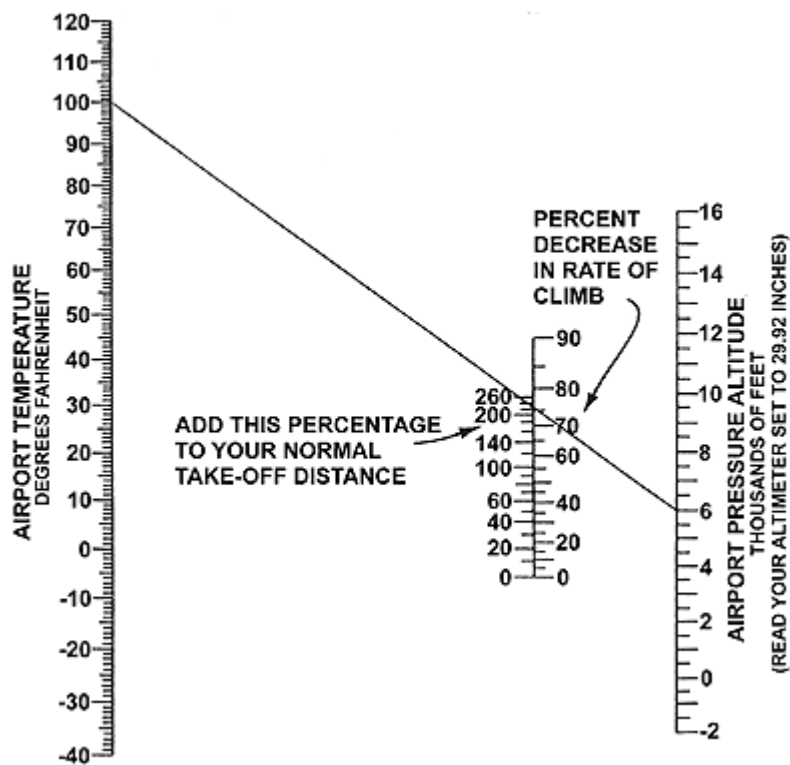


- volo da alta a bassa pressione mantenendo costante la quota indicata, produce in realtà la diminuzione dell'altitudine vera dell'aeromobile
- all'opposto, da bassa a alta pressione, si ottiene l'aumento dell'altitudine vera
- le correzioni altimetriche vengono eseguite variando il riferimento al suolo (**settaggio** o **regolazione altimetrica**)

- **TA** (*True Altitude*): quota vera MSL
- **AA** (*Absolute Altitude*): quota vera AGL
- **IA** (*Indicated Altitude*): lettura altimetrica diretta, riferita alle condizioni ISA, a seguito di relativo settaggio strumentale
- **PA** (*Pressure Altitude*): lettura altimetrica diretta, riferita alle condizioni ISA, con settaggio su 1013,25 hPa.
- **DA** (*Density Altitude*): valore di PA corretto per le deviazioni della temperatura reale rispetto al gradiente termico standard

- alta temperatura: volo **HDA** (*High Density Altitude*)
  - la quota riportata da altimetro è minore di quella reale
  - l'atmosfera reale possiede minor densità: quella che in ISA corrisponde a una quota maggiore rispetto a quella reale
  - ridotte prestazioni aeromobile: meno aria per combustione, minore portanza, maggior corsa di decollo e *clearance area* (rateo di salita ridotto, quindi più area libera da ostacoli)
- bassa temperatura: volo **LDA** (*Low Density Altitude*)
  - la quota riportata da altimetro è maggiore di quella reale
  - l'atmosfera reale possiede maggiore densità: quella che in ISA corrisponde a una quota minore rispetto a quella reale
  - miglioramento delle prestazioni dell'aeromobile

## NOMOGRAMMA DI KOCH



- una prima stima dell'influenza delle condizioni atmosferiche sulle prestazioni di un aeromobile, in termini di corsa di decollo e rateo di salita
- la linea che unisce temperatura e PA, intercetta i valori percentuali dell'aumento di corsa di decollo e di riduzione del rateo di salita
- *don't land anywhere you can't depart!*



RIASSUMENDO...

## Density Altitude

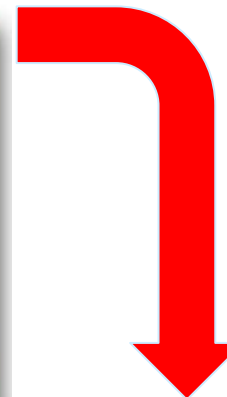
The pressure altitude corrected for non-standard temperature variations



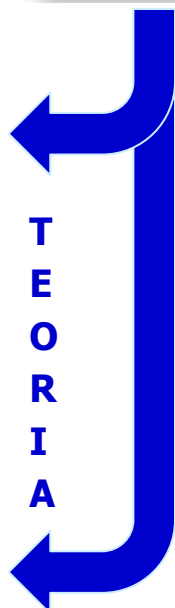
## DENSITY ALTITUDE

- ▶ Temperature
- ▶ Pressure Systems
- ▶ Humidity

P  
R  
A  
T  
I  
C  
A



T  
E  
O  
R  
I  
A



## A different definition for Density Altitude

The Altitude the Airplane Thinks it is at and Performs in Accordance With







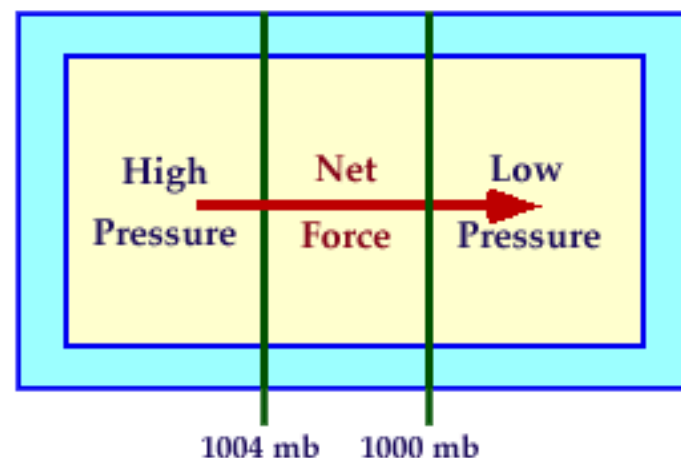
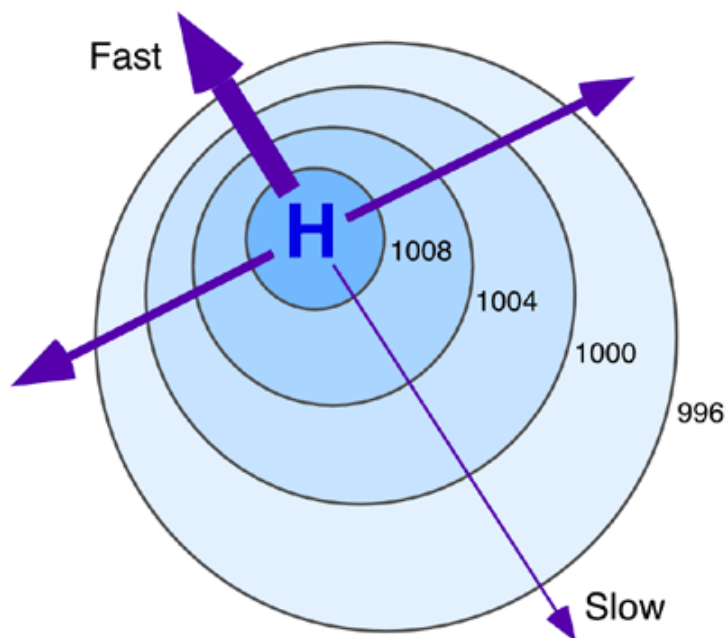
## CENNI DI CIRCOLAZIONE GENERALE ATMOSFERICA

## I MOTI ATMOSFERICI ORIZZONTALI: IL VENTO E LE FORZE FONDAMENTALI

- un moto orizzontale di aria è ciò che chiamiamo **vento**
- quattro sono le forze coinvolte in questi spostamenti:
  - **forza di gradiente  $G$**  e la **forza deviante  $D$** 
    - moto in quota su isobare rettilinee
    - all'equilibrio  $G+D=0$  originano il **vento geostrofico**
  - **forza centrifuga  $C$** 
    - moto su isobare curvilinee
    - all'equilibrio  $G+D+C=0$  originano il **vento di gradiente**
    - all'equilibrio  $G+C=0$  originano il **vento ciclostrofico**
  - **forza d'attrito  $A$** 
    - con  $G$ ,  $D$  e  $C$  nel **vento al suolo**

## LA FORZA DI GRADIENTE

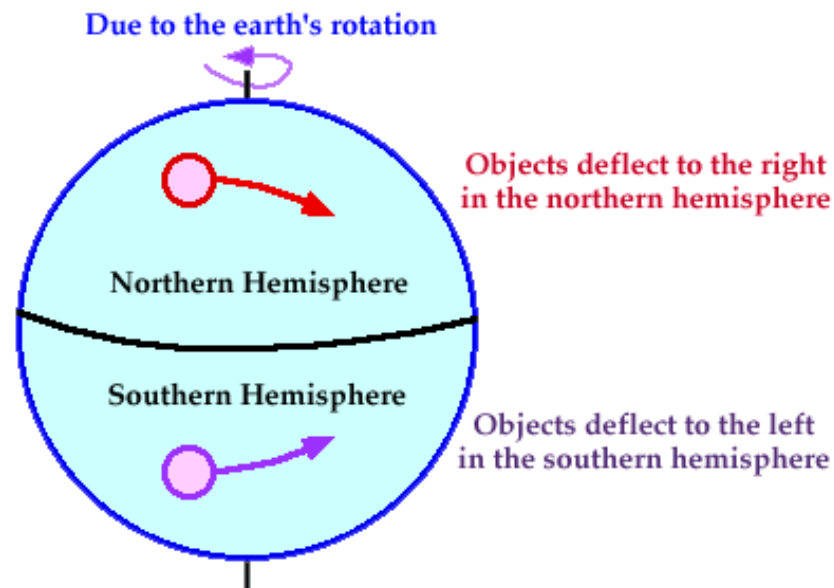
- origina il movimento delle masse d'aria
- moto dalle regioni di H a quelle di L pressione



- moto perpendicolare alle isobare
- intensità proporzionale al dislivello barico

## FORZA DEVIANTE O DEVIAZIONE DI CORIOLIS

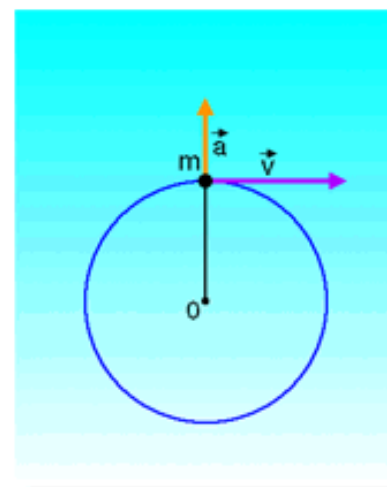
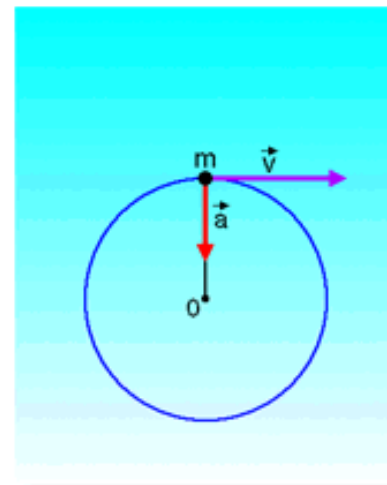
- nell'emisfero N, rispetto ad un osservatore al suolo, un corpo in moto viene deviato verso la propria destra
- nell'emisfero S, la deviazione è verso la propria sinistra
- la deviazione dipende da:
  - velocità del corpo
  - funzione trigonometrica della latitudine, che assume valore nullo all'Equatore e massimo (pari a 1) al Polo Nord



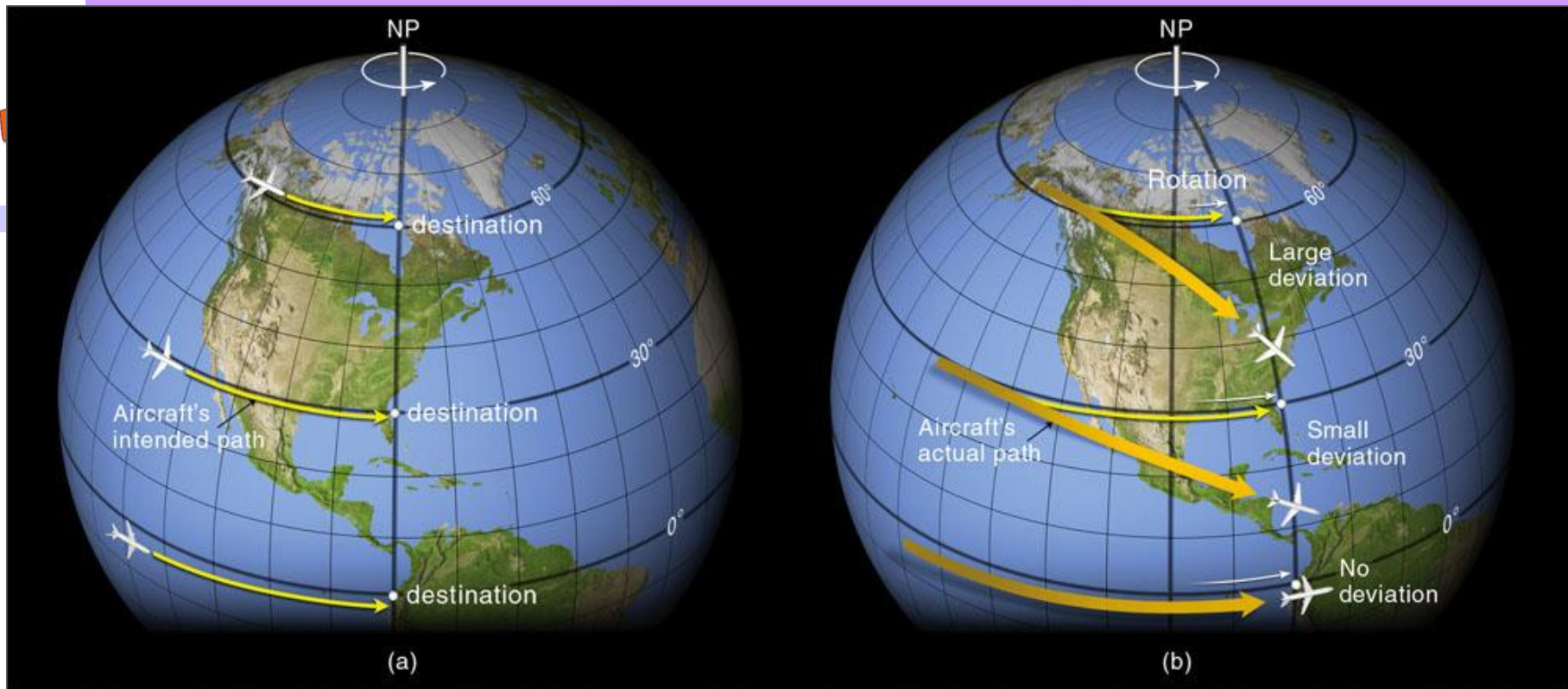
- La forza di Coriolis: **forza apparente** introdotta in un sistema di riferimento non inerziale per descrivere un fenomeno che in un sistema inerziale è descritto dalle Leggi di Newton (Principi della Dinamica)
  - **Sistema inerziale**: verificata la Prima Legge di Newton
  - **Sistema non inerziale**: non verificata Terza Legge di Newton
- Il fenomeno fisico è visibile in entrambi i sistemi
  - Nel primo viene descritto con le leggi di Newton, nel secondo occorre introdurre alcune **forze fittizie** (come la forza di Coriolis) per poterlo descrivere

## FORZA DEVIANTE O DEVIAZIONE DI CORIOLIS

- Per un osservatore inerziale,  $F_{cp} = ma = mv^2/r$  (2°PD) e  $F_{cf}$  esiste come reazione a  $F_{cp}$  (3°PD). Rimosso il vincolo,  $m$  non è soggetta ad alcuna forza: si muove di moto rettilineo uniforme, assumendo direzione tangente alla circonferenza (1°PD).
- Un osservatore non inerziale (solidale a  $m$ ) sente una forza  $F_{cf}$  che tende ad allontanarlo. La forza centrifuga  $F_{cf}$  è una forza **apparente**, dovuta al moto relativo dell'osservatore.



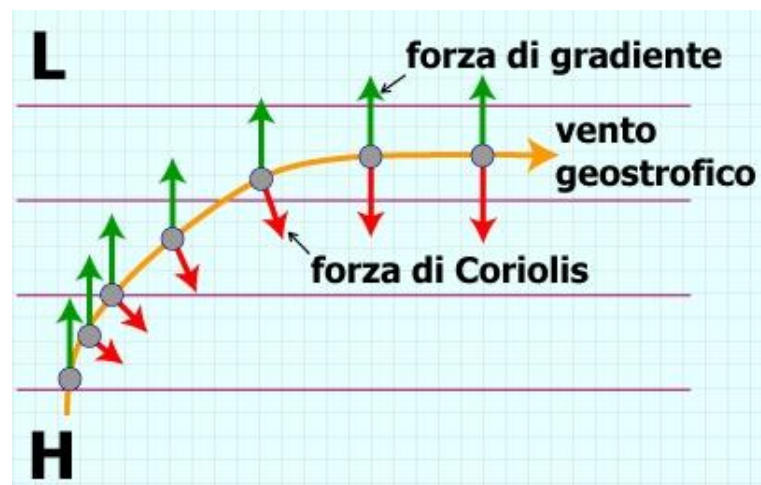




© Brooks/Cole, Cengage Learning

In un sistema inerziale, la conservazione della velocità tangenziale  $\omega r$  ( $\omega$  velocità angolare,  $r$  distanza da asse Terra) dei corpi giustifica la deviazione osservata. Se il corpo si muove da N verso l'Equatore, ha velocità inferiore rispetto ai corpi delle altre latitudini e appare spinto indietro verso ovest (*approssimazione di Hadley*).

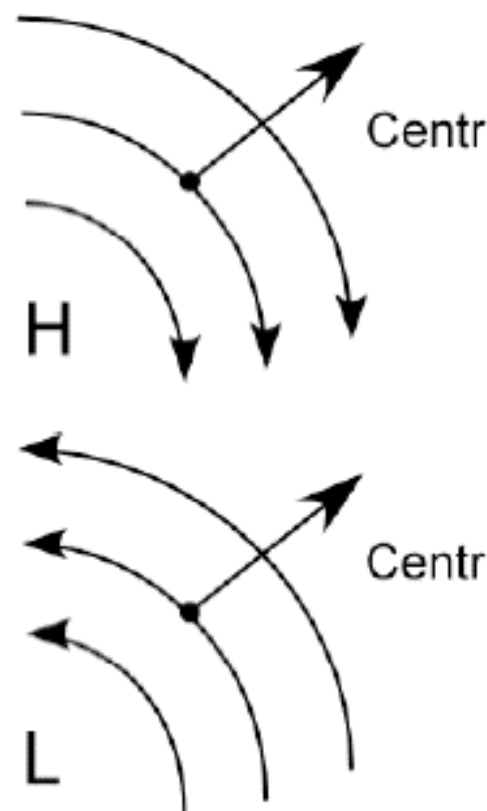
## IL VENTO GEOSTROFICO



- particella di aria a riposo inizia a muoversi per effetto della sola forza di gradiente  $G$
- non appena la velocità del vento è diversa da zero, la particella risente anche della forza deviante di Coriolis  $D$
- $D$  aumenta con la velocità, producendo la rotazione della direzione del vento verso destra (che lascia L a sx, H a dx)
- all'equilibrio  $D = G$  il vento è parallelo alle isobare
- se  $D > G$ , il vento spirerebbe contrario a  $G$  (*impossibile*)<sup>72</sup>

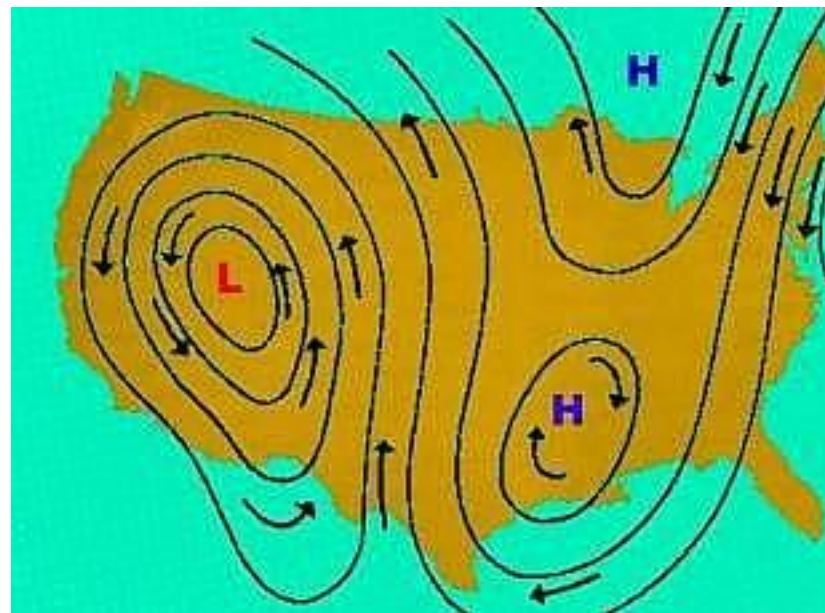
## VENTO DI GRADIENTE E VENTO CICLOSTROFICO

- su traiettoria curvilinea, l'aria risente di una forza centrifuga  $C$ , diretta perpendicolare alle isobare, con verso esterno e pari a  $v^2/r$ 
  - anticicloni: stesso verso di  $G$ , opposto a  $D$
  - cicloni: verso opposto a  $G$ , stesso verso di  $D$
- equilibrio  $G+D+C=0$  : **vento di gradiente**
- medie e alte latitudini:  $C$  trascurabile (alti  $r$ ) e il vento è di fatto *geostrofico* ( $G+D=0$ )
  - solo nelle trombe d'aria occorre considerare  $C$
- latitudini equatoriali:  $D$  trascurabile (nulla all'Equatore) e il vento di gradiente assume carattere **ciclostrofico** ( $G+C=0$ )



## IL VENTO GEOSTROFICO: CARATTERISTICHE

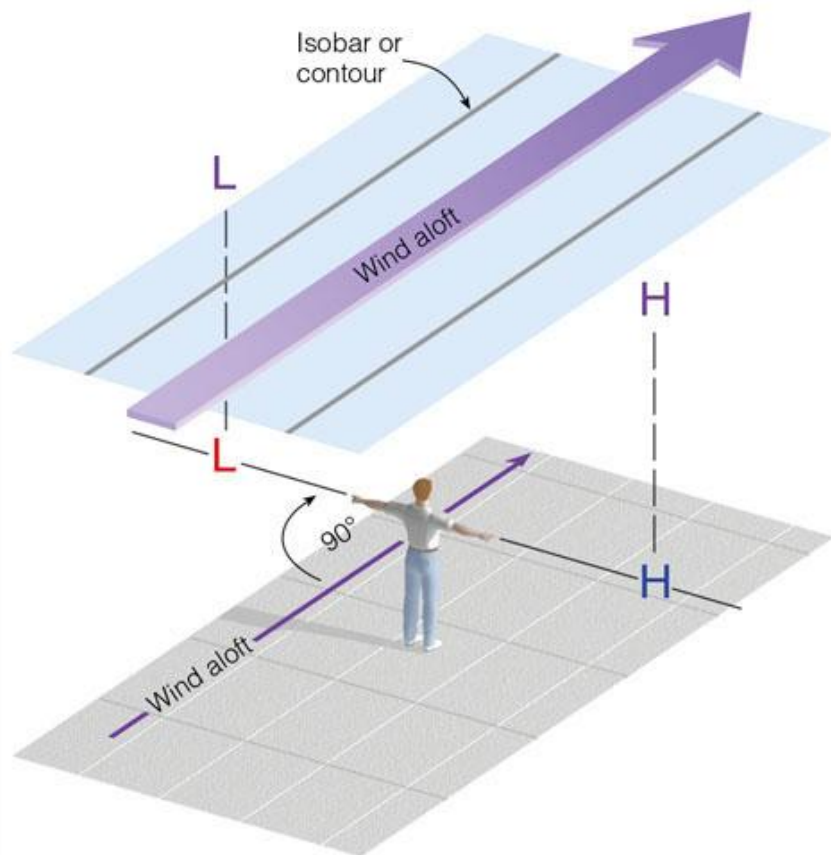
- è un vento teorico in quota
  - approssima il vento reale
  - ha velocità proporzionale alla differenza di pressione (velocità è maggiore dove le isobare sono più strette)
- per un osservatore spalle al vento, scorre parallelo alle isobare, con le basse pressioni a sx e le alte pressioni a dx (regola di Buys Ballot per vento geostrofico emisfero nord)
  - rotazione antioraria attorno a L, oraria attorno a H



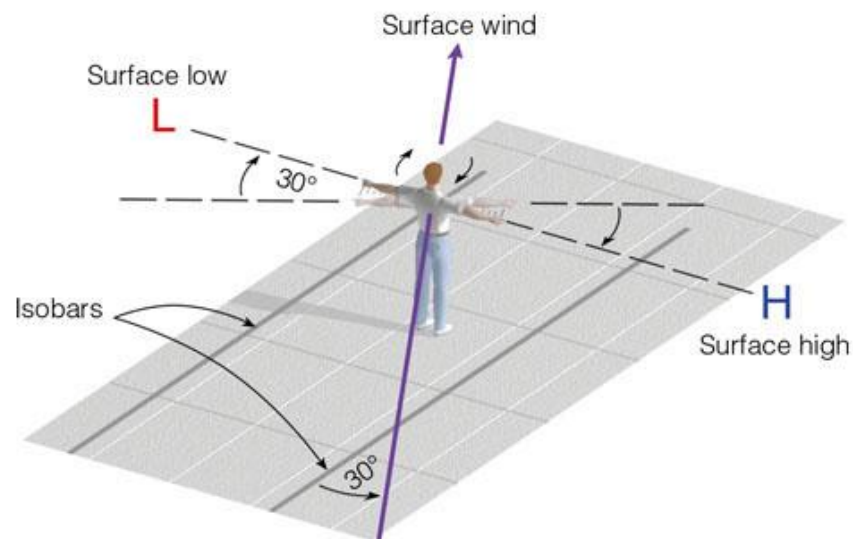
- azione dell'ambiente sui bassi strati atmosfera
  - fino a  $\approx 1000-1500$  m, poi si annulla progressivamente
- si oppone al moto e ne rallenta la velocità
  - riduce  $D$  (dipende da  $v$ ) in favore di  $G$  (non dipende da  $v$ )
- squilibrio in favore di  $G$  devia vento geostrofico verso bassa pressione di un angolo medio di  $\approx 30^\circ$ 
  - oceani: velocità  $\approx 70\%$  e deviazione  $\approx 10^\circ-20^\circ$
  - continenti: velocità  $\approx 40\%$  e deviazione  $\approx 40^\circ-50^\circ$
- **regola di Buys Ballot per vento al suolo nell'emisfero nord:**  
con le spalle al vento, ruotare di  $\approx 30^\circ$  in senso orario per indicare l'alta pressione (a dx) e la bassa pressione (a sx)



## REGOLE DI BUYS BALLOT PER EMISFERO NORD



(a) Wind aloft



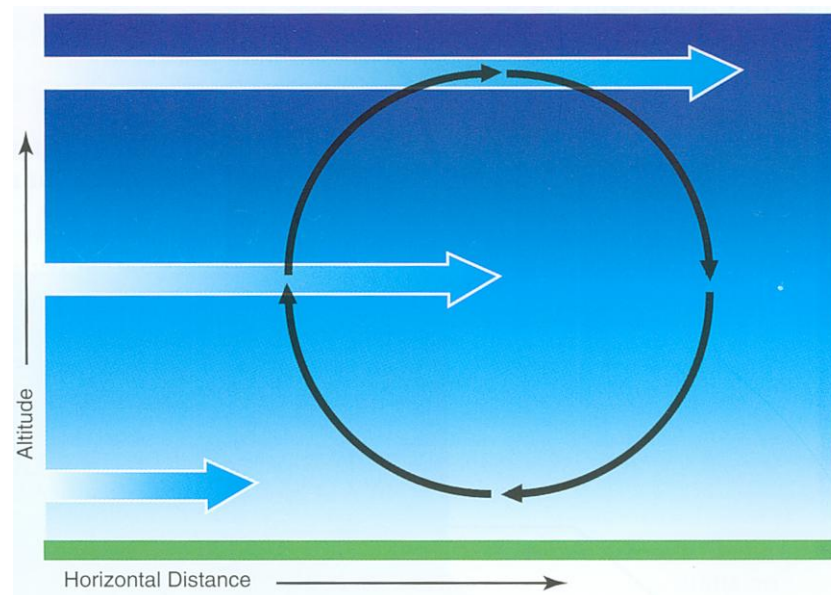
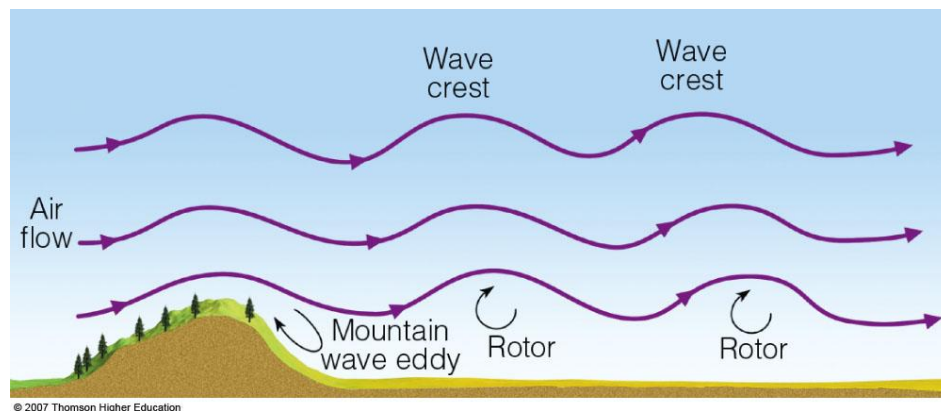
(b) Surface wind

Northern Hemisphere



## TURBOLENZA E GRADIENTE VERTICALE DEL VENTO

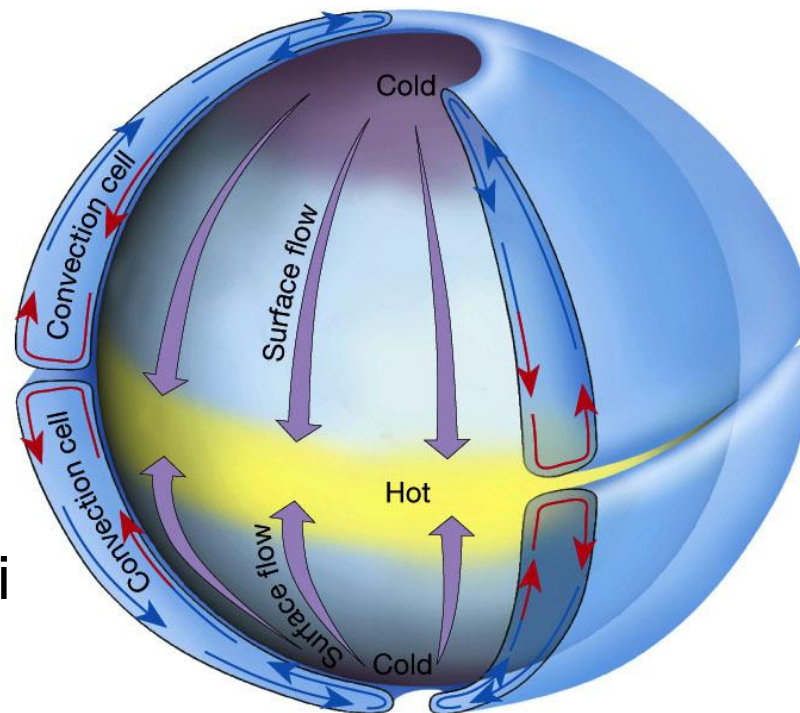
- con vento forte, l'attrito del suolo rallenta il vento nei bassi strati
- **gradiente verticale del vento**: il vento cresce con la quota
- strati di vento di velocità diverse generano **turbolenza** e vortici
- i vortici provocano raffiche e venti verticali, ascendenti o discendenti



- differente riscaldamento nelle diverse regioni del globo
  - maggiore nelle zone tropicali, minore nelle polari
- necessità di trasferire calore da equatore verso poli
- fine ultimo della circolazione generale atmosferica:
  - ridistribuire il calore solare
  - ridurre il divario termico tra equatore e polo

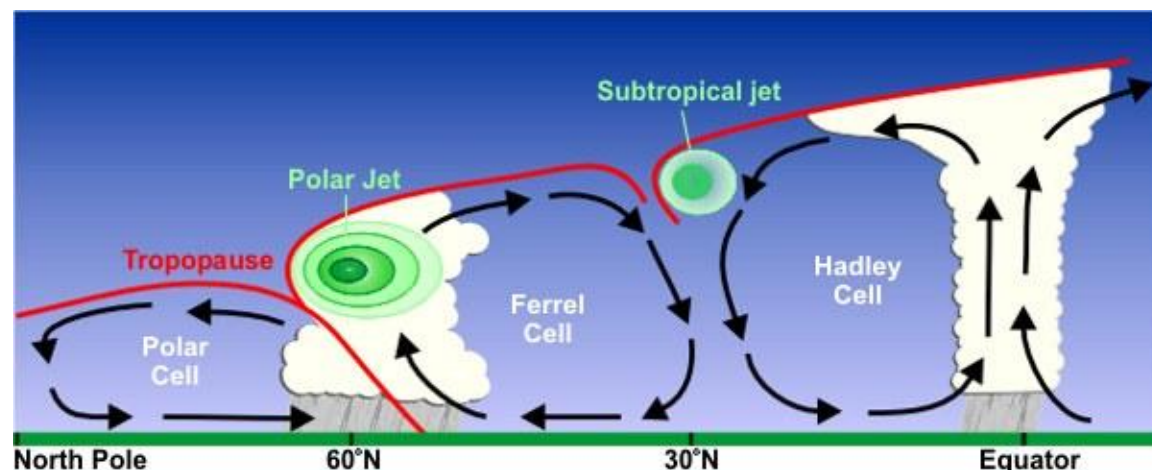
## CIRCOLAZIONE GENERALE ATMOSFERICA: CASO IPOTETICO

- Terra non in rotazione e superficialmente omogenea
- unica circolazione convettiva meridiana emisferica
  - aria sale in quota all'equatore
  - aria fluisce in quota verso i poli
  - aria discende al suolo ai poli
  - aria fluisce al suolo all'equatore



## CIRCOLAZIONE GENERALE ATMOSFERICA: CASO REALE

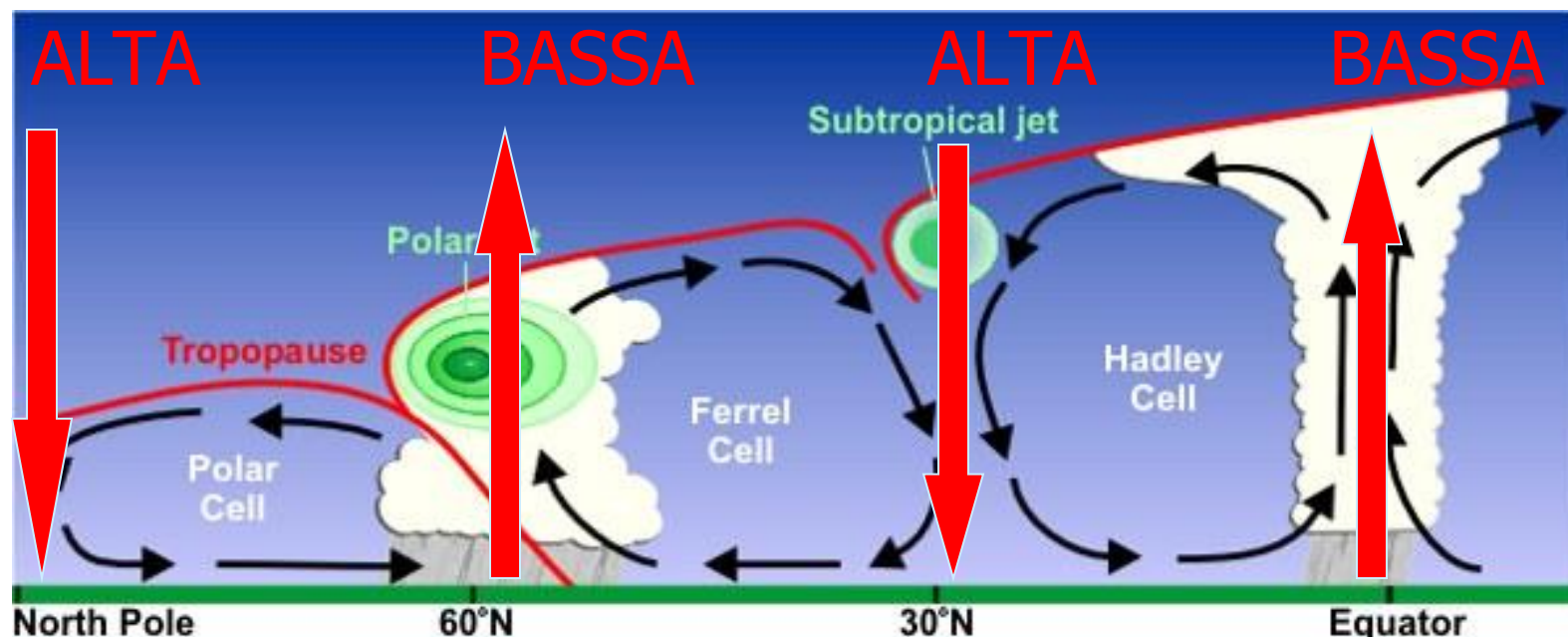
- la rotazione terrestre modifica la singola circolazione meridiana in un sistema di tre sottocircolazioni:
  - cella polare tra  $60^{\circ}\text{N/S}$  -  $90^{\circ}\text{N/S}$
  - extratropicale (cella di Ferrel) tra  $30^{\circ}\text{N/S}$  -  $60^{\circ}\text{N/S}$
  - intertropicale (cella di Hadley) tra  $0^{\circ}$  e  $30^{\circ}\text{N/S}$



- circolazione come insieme di moti a diversa scala
- moti verticali
  - massima estensione: intero spessore troposfera
- moti orizzontali meridiani
  - forte componente in direzione meridiana
  - massima estensione: fascia latitudinale di  $\sim 30^\circ$
- moti orizzontali cosiddetti *zonali* o *westerlies*
  - forte componente in direzione paralleli
  - massima estensione: intera circonferenza terrestre



## I MOTI ATMOSFERICI VERTICALI: CENTRI BARICI PERMANENTI



- in Europa:
  - l'alta tropicale si rinforza sulle Azzorre
  - la bassa polare si approfondisce sull'Islanda



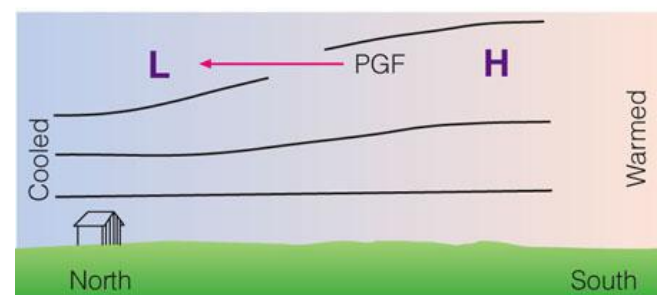
- le masse d'aria vengono mosse da gradienti barici
- l'origine del gradiente barico classifica i tipi di vento
- **venti permanenti**
  - gradiente nasce dalla dinamica circolatoria atmosferica
  - nordorientali intertropicali (**alisei** emisfero nord)
  - venti occidentali medie latitudini (**westerlies**)
- **venti termici** periodici
  - gradiente nasce da locali differenze di temperatura
  - inversione periodica della circolazione
  - **brezze di mare/terra** e **di monte/valle** (12 ore);  
**monsoni** (6 mesi)

## LE CIRCOLAZIONI TERMICHE

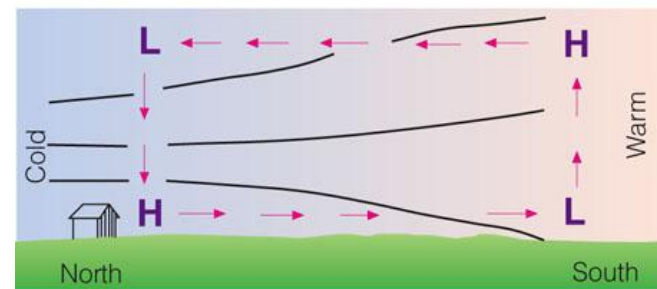
- diverso riscaldamento del suolo in presenza di equilibrio barico
- aria calda si espande e inclina le superfici isobariche
  - in quota si forma H sopra aria calda e L sopra aria fredda con aria che fluisce da H a L (da caldo a freddo)
- la divergenza in quota origina convergenza al suolo e viceversa
  - al suolo campi barici opposti con aria che fluisce da freddo a caldo



(a)



(b)

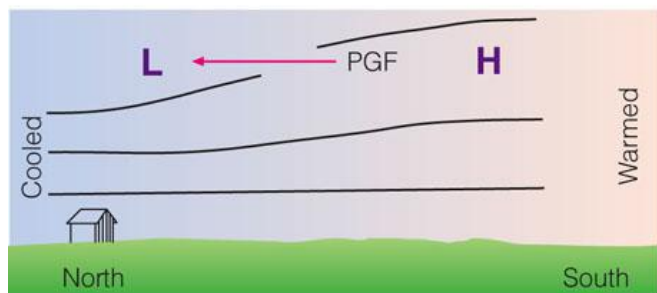


(c)

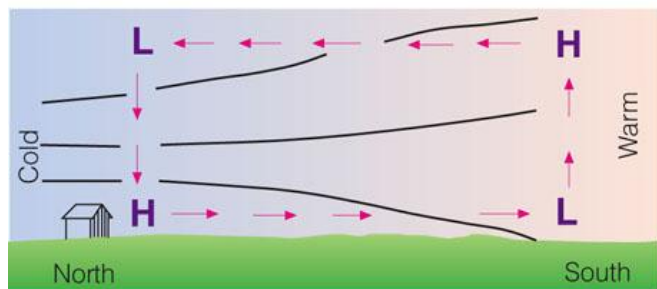
## LE CIRCOLAZIONI TERMICHE: BREZZE DI MARE E DI TERRA



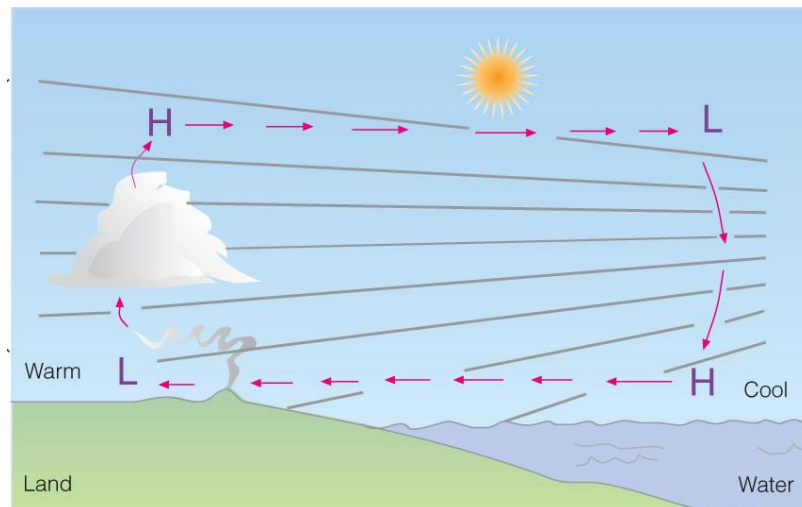
(a)



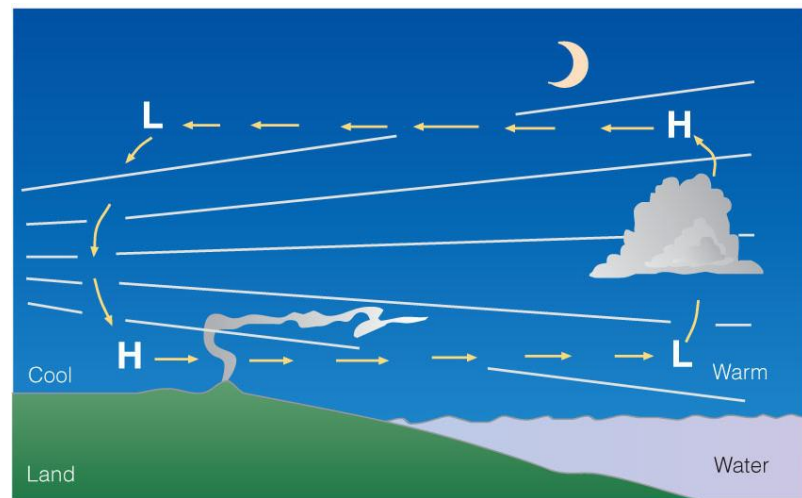
(b)



(c)



(a) Sea breeze

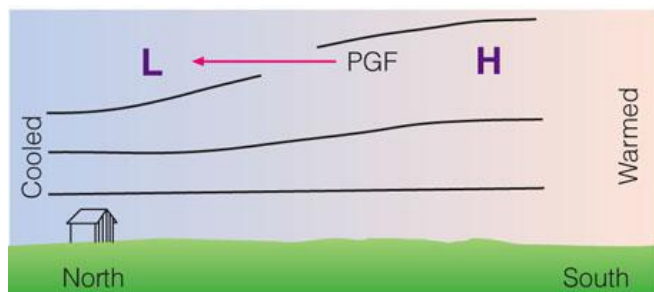


(b) Land breeze

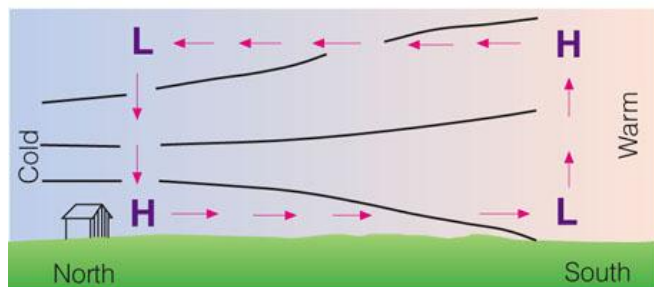
## LE CIRCOLAZIONI TERMICHE: BREZZE DI MONTE E DI VALLE



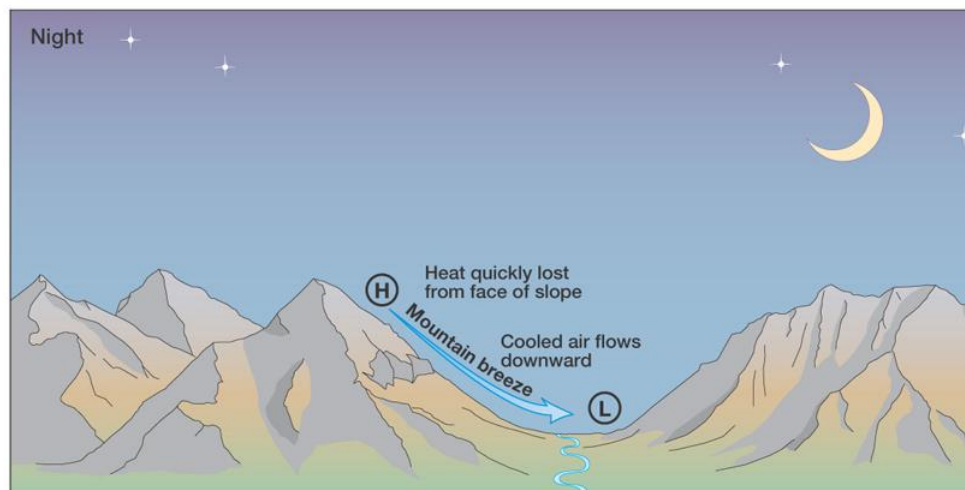
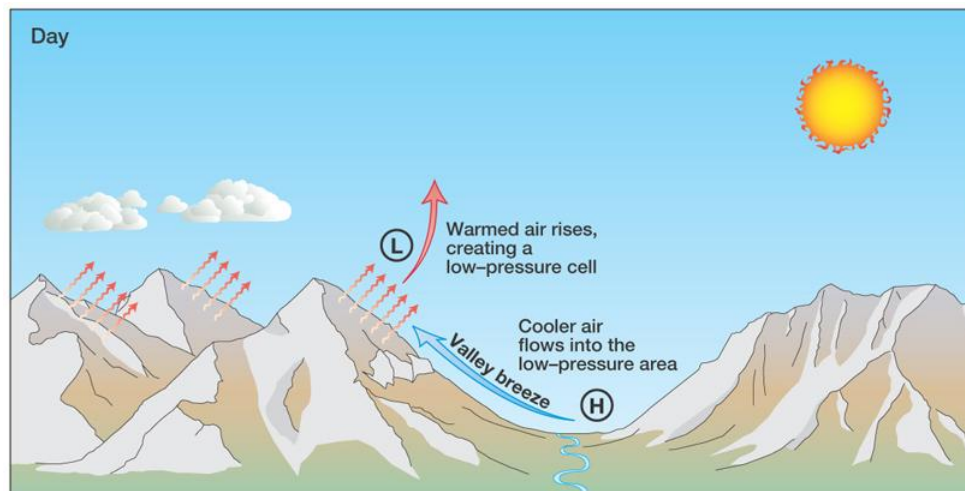
(a)



(b)



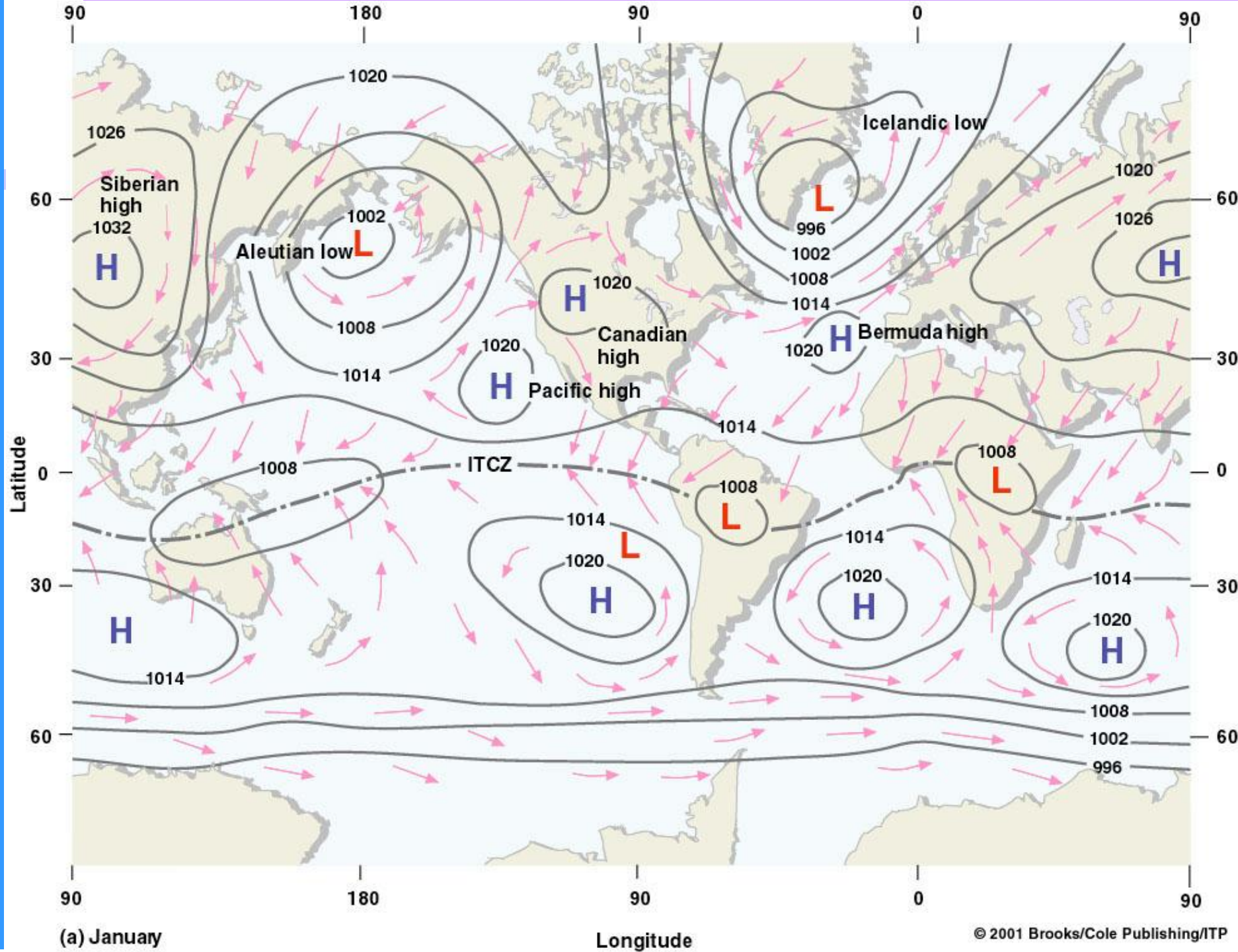
(c)



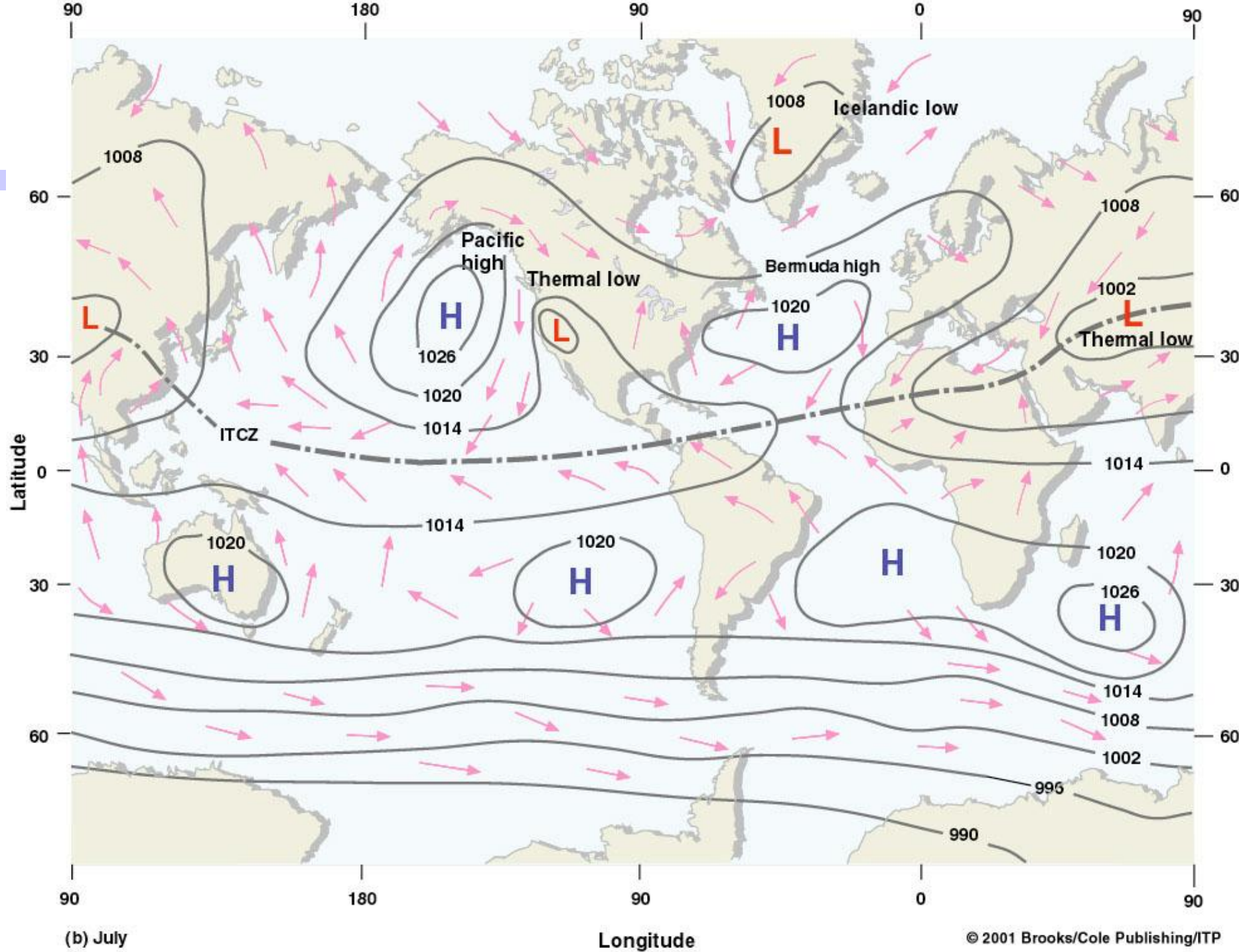
Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

- venti che scorrono sottovento ai rilievi montuosi
- a carattere freddo (*Bora, Mistral, Blizzard*) o caldo (*Foehn*)
- i venti freddi originano da forte raffreddamento su pendii ghiacciati: l'aria fredda e densa rimane intrappolata lungo il pendio e cade accelerando per gravità
- i venti caldi originano quando sopravvento aria umida in ascesa si raffredda ( $-0,6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ) rilasciando umidità; l'aria secca si riscaldandosi ( $+1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ) nella discesa sottovento
  - sopravvento precipitazioni persistenti (**stau** - **foehn wall**)
  - **effetto stau**- effetto tipico di molte catene montuose: **Foehn** nel Nord Italia, **chinook** sulle Montagne Rocciose, **ghibli** in Libia







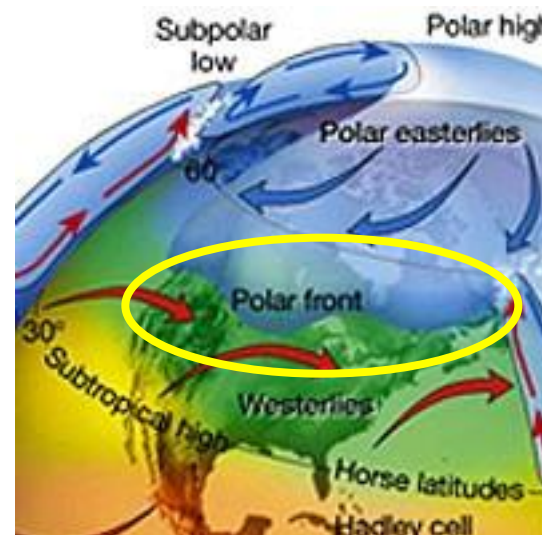




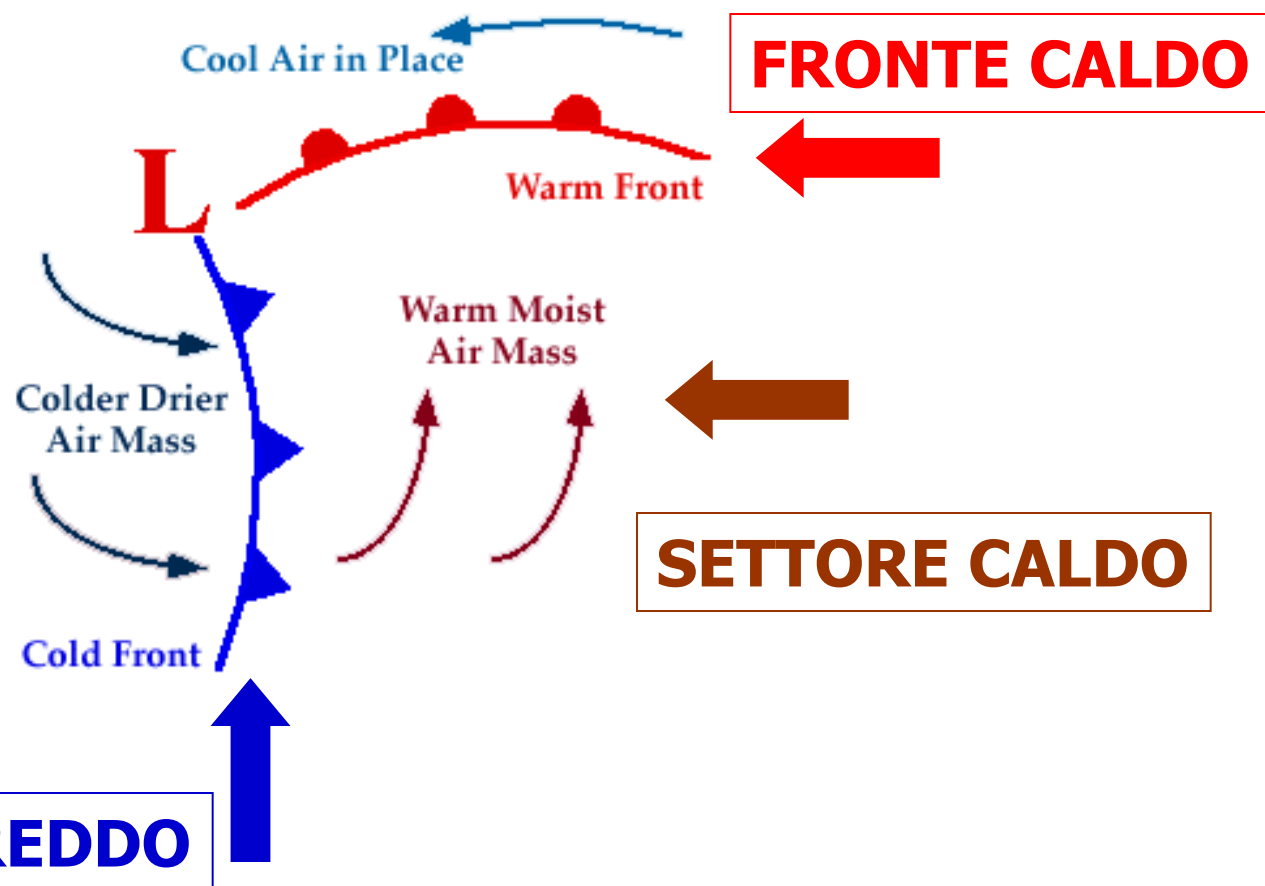
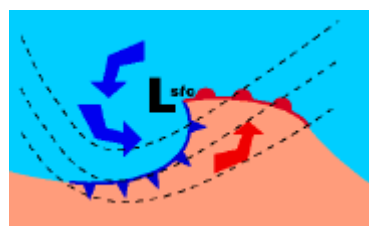
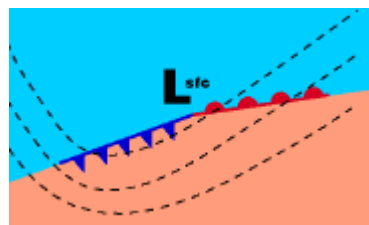
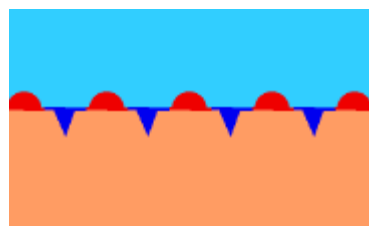
## CIRCOLAZIONE EXTRATROPICALE: I FRONTI

## CIRCOLAZIONE EXTRATROPICALE (CIRCOLAZIONE DELLE MEDIE LATITUDINI)

- il **fronte polare** rappresenta la linea di convergenza dei venti orientali polari con i venti occidentali delle medie latitudini
- può deformarsi per la spinta convergente delle **masse** d'aria fredda polare e calda tropicale
- si formano locali vortici a circolazione ciclonica (**perturbazioni** o **cicloni extratropicali**)
- lo scambio termico avviene all'interno del singolo vortice



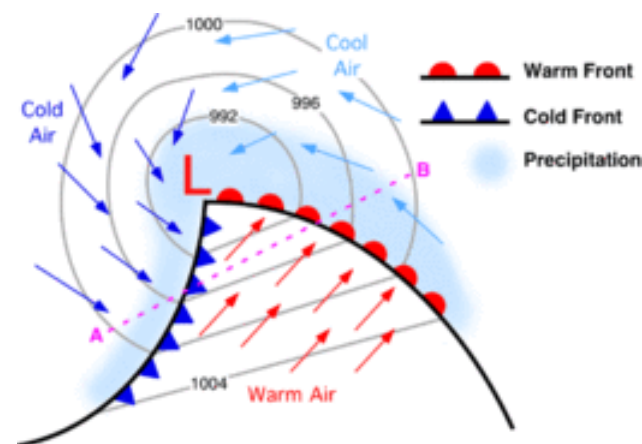
## SCHEMA DI UNA PERTURBAZIONE: I FRONTI CALDO E FREDDO





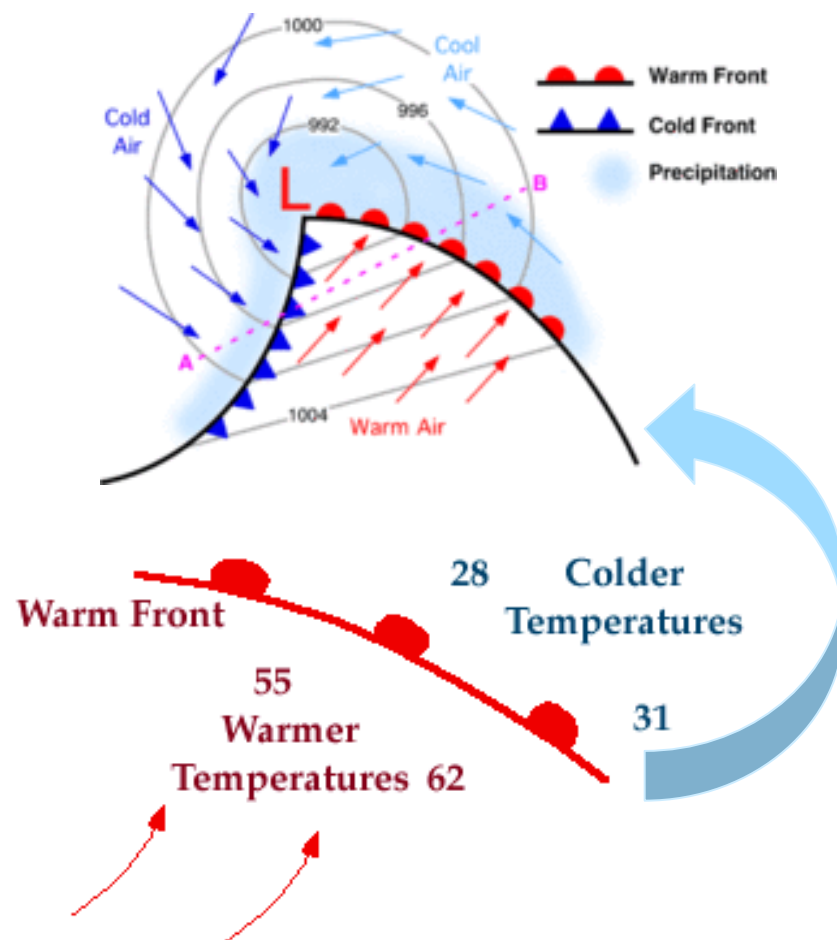
## I FRONTI

- non sono linee o superfici sottili
  - spessori dal km al centinaio di km, inferiore al suolo, aumenta con quota
- discontinuità tra masse d'aria diverse
  - isobare ad angolo verso l'esterno
  - brusca rotazione provenienza vento
- sono sede di fenomeni pericolosi per il volo
  - forte turbolenza e *wind shear*
- i fronti sono riportati solo sulle carte al suolo
  - la superficie frontale ha estensione tridimensionale
  - fronte in quota sempre dal lato freddo rispetto al suolo



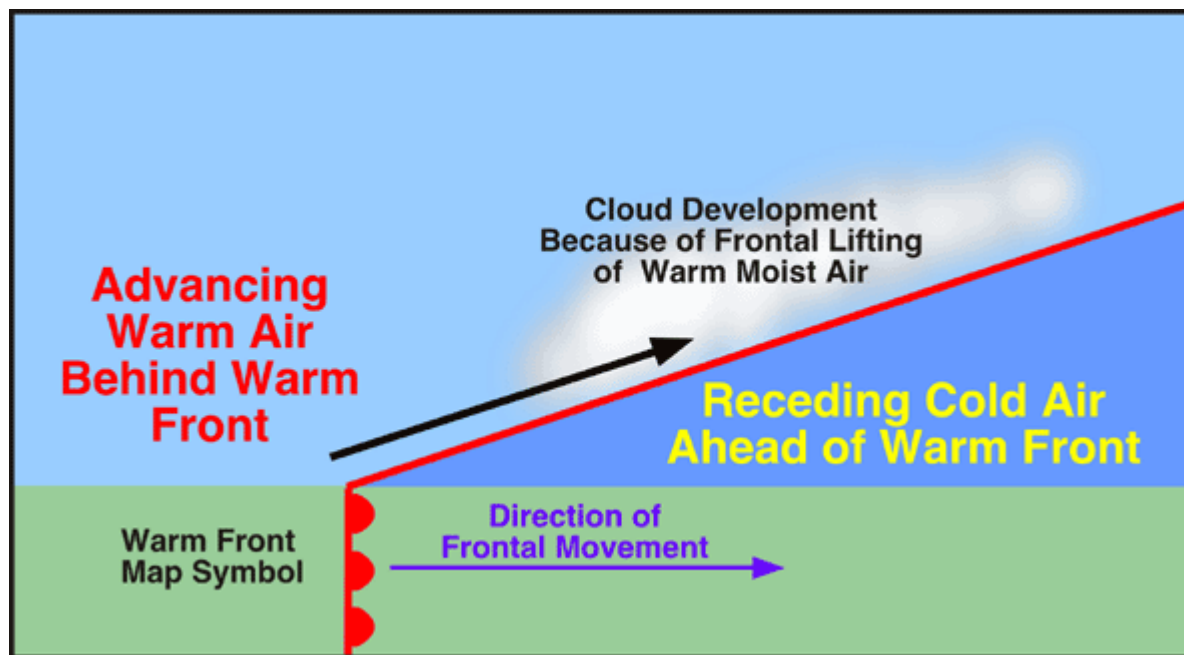
## IL FRONTE CALDO

- a est del minimo barico, dove aria calda e umida è spinta verso aria fredda
- traslazione da SW a NE
- rappresentato da linea rossa con semicerchi verso aria fredda, in direzione del moto
- seguito dal **settore caldo**: zona di aria calda e umida compresa tra fronte caldo (est) e fronte freddo (ovest)





## IL FRONTE CALDO



- l'aria calda è meno densa e pesante di quella fredda
- l'aria calda risale lenta il cuneo di aria fredda
- innalzandosi, l'aria calda raffredda e condensa

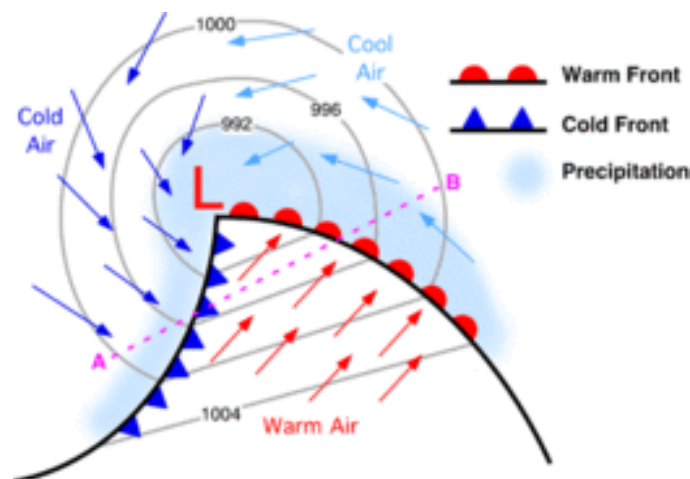


## IL FRONTE CALDO: NUBI E PRECIPITAZIONI

- lenta risalita produce **nubi stratiformi**
  - nubi con dimensione orizzontale preponderante
- nubi di altezza decrescente all'avvicinarsi del fronte:
  - **nubi alte** (oltre 20000 ft): **cirri, cirrostrati, cirrocumuli**
  - **nubi medie** (tra 6000 e 20000 ft): **altocumuli, altostrati**
  - **nubi basse** (meno di 6000 ft): **strati, nembostrati**
- con altostrati appaiono le precipitazioni
  - deboli ma di lunga durata (pioggia, pioviggine, neve)
  - all'inizio possono evaporare prima del suolo (**virga**)
  - proseguono sino all'arrivo del fronte
- temporali "affogati" pre-fontali se aria calda instabile

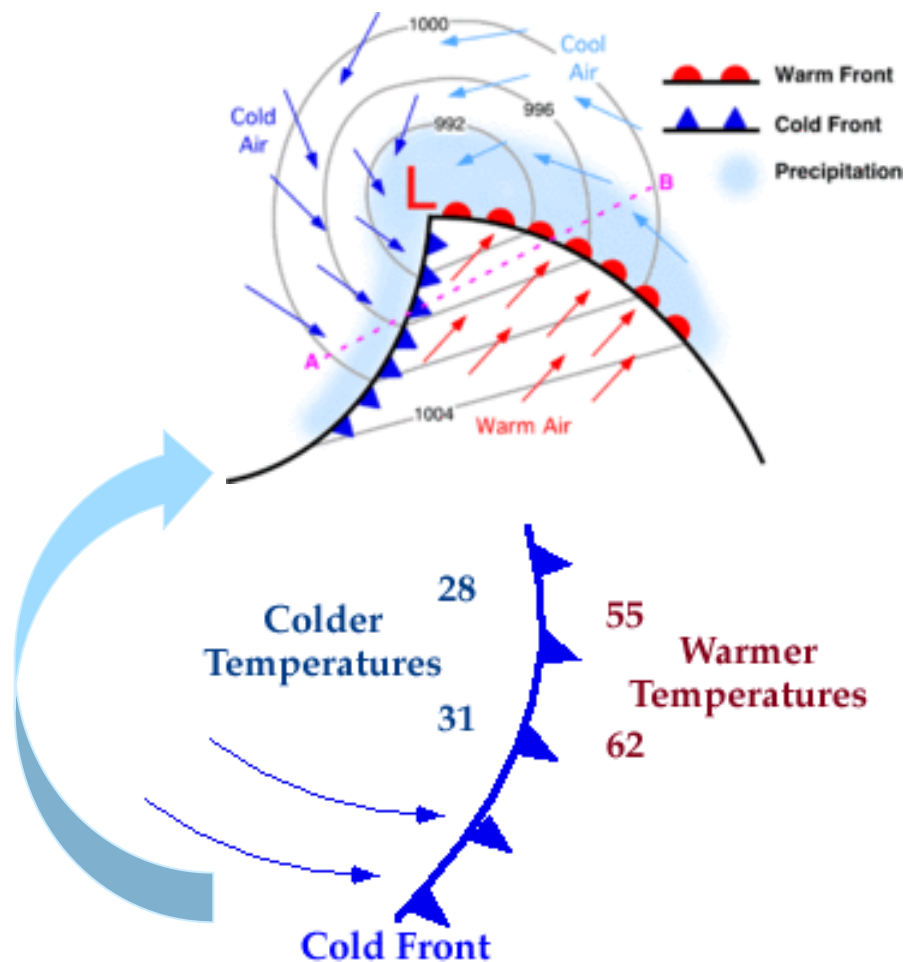
## FRONTE CALDO E SETTORE CALDO: VARIAZIONI DEI PARAMETRI METEO

- vento: rotazione oraria
  - da SSE a SSW
- temperatura: in lento aumento
  - flessione se presenza di *virga*
  - più deciso nel settore caldo
- pressione: rapida diminuzione
  - meno rapida nel settore caldo
- umidità relativa: in lento aumento
  - più rapido nelle precipitazioni
- visibilità: peggioramento
  - possibile nebbie nel settore caldo

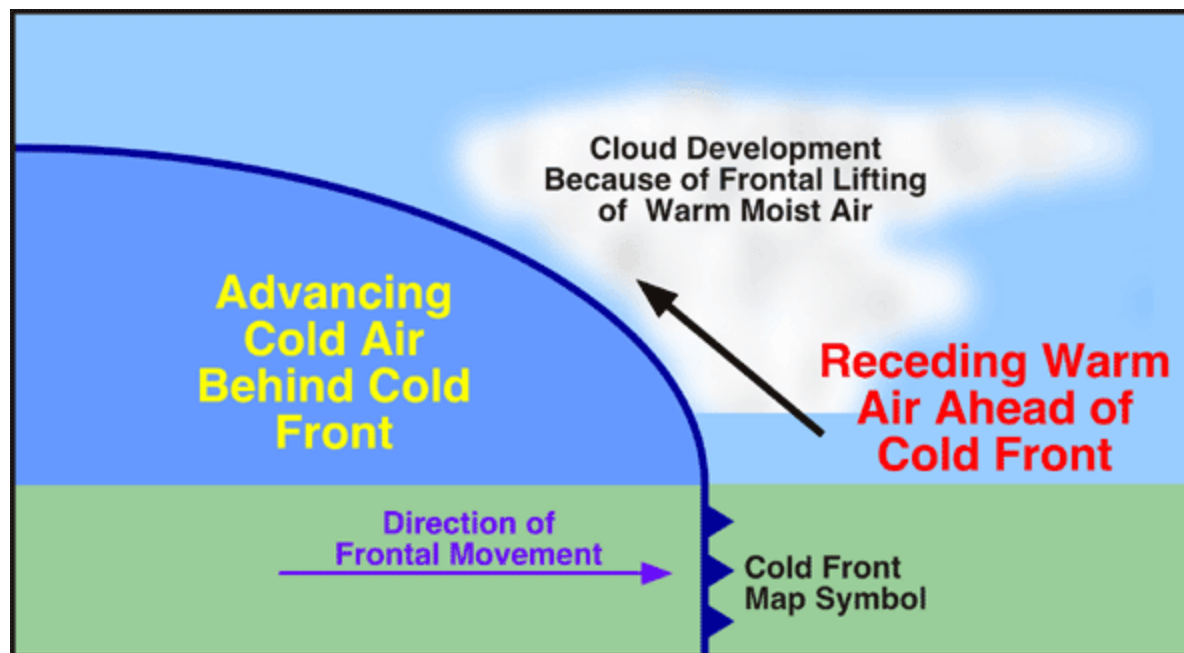


## IL FRONTE FREDDO

- a ovest del minimo barico, dove aria fredda sostituisce aria calda
- traslazione da NW a SE
- dietro fronte aria più fredda e secca
- rappresentato da linea blu con triangoli diretti verso aria calda, in direzione del moto



## IL FRONTE FREDDO



- l'aria fredda è più densa e pesante di quella calda
- l'aria fredda si incunea sotto quella calda
- l'aria calda viene sbalzata lungo la linea frontale



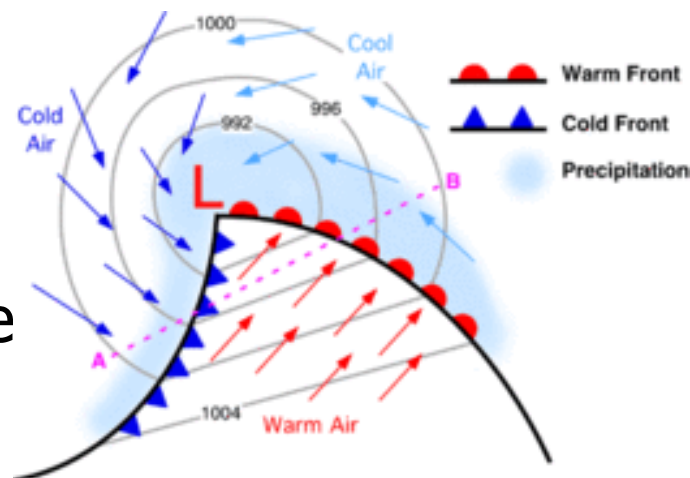
## IL FRONTE FREDDO: NUBI E PRECIPITAZIONI

- innalzandosi, aria calda raffredda e condensa
- violento innalzamento produce **nubi cumuliformi**
  - nubi con dimensione verticale preponderante
  - **cumuli torreggianti** (detti anche **congesti**), **cumulonembi**
- le nubi appaiono disporsi lungo la linea frontale
- precipitazioni:
  - rovesci di pioggia, temporali
  - forte intensità, breve durata



## IL FRONTE FREDDO: VARIAZIONI DEI PARAMETRI METEO

- vento: rotazione oraria
  - da SSW a WNW
  - presenza di raffiche
- temperatura: rapida diminuzione
- pressione: rapido aumento
- umidità relativa: diminuzione
- visibilità: generalmente buona
  - scarsa nelle precipitazioni

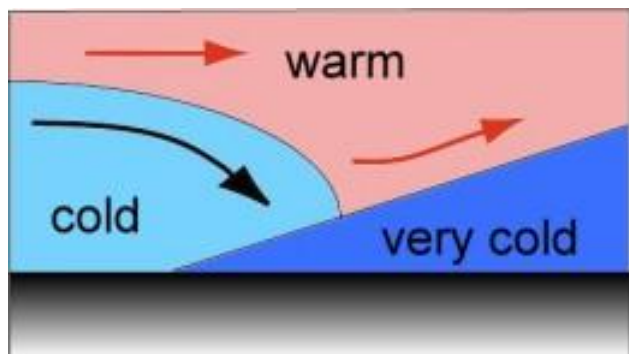




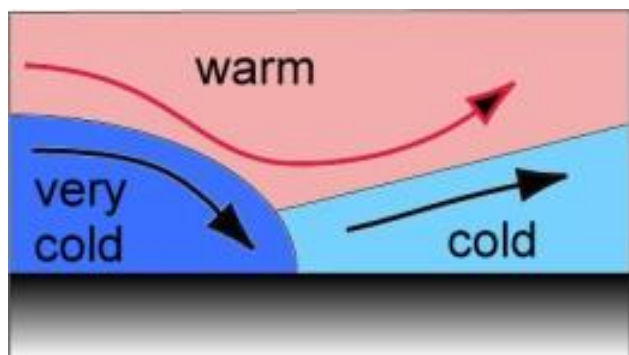
## IL FRONTE OCCLUSO: ESAURIMENTO DI UNA PERTURBAZIONE

- il divario termico tra masse d'aria origina fenomeni meteo
  - attraverso i fenomeni meteo viene scambiato calore
  - il sistema si evolve verso una nuova condizione di equilibrio
  - a meno della presenza di nuovi fattori di squilibrio
- il fronte freddo raggiunge e si sovrappone al fronte caldo
- si forma l'**occlusione** o **fronte occluso semplice**
  - inizialmente caratterizzato da mescolanza di nubi e precipitazioni caratteristiche dei due fronti sovrapposti
  - assume poi natura **calda** o **fredda**, secondo le temperature dei cunei d'aria fredda avanzante e retrocedente

## IL FRONTE OCCLUSO: ESAURIMENTO DI UNA PERTURBAZIONE



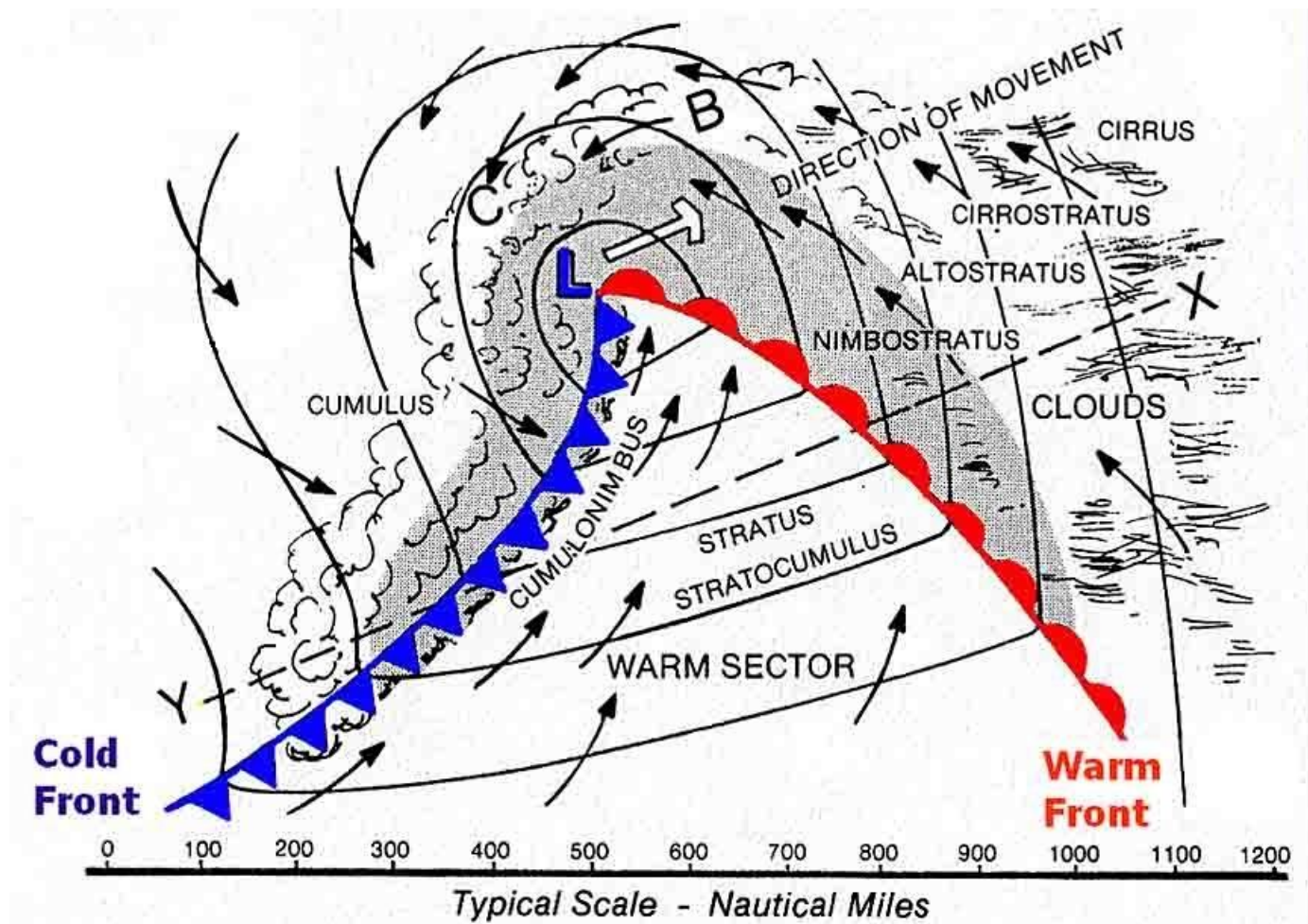
- **fronte occluso caldo**
  - l'aria fredda del cuneo avanzante è meno fredda di quella del cuneo retrocedente
  - si genera una situazione meteorologica simile al fronte caldo (**occlusione calda**)



- **fronte occluso freddo**
  - l'aria fredda del cuneo avanzante è più fredda di quella del cuneo retrocedente
  - si genera una situazione meteorologica simile al fronte freddo (**occlusione fredda**)

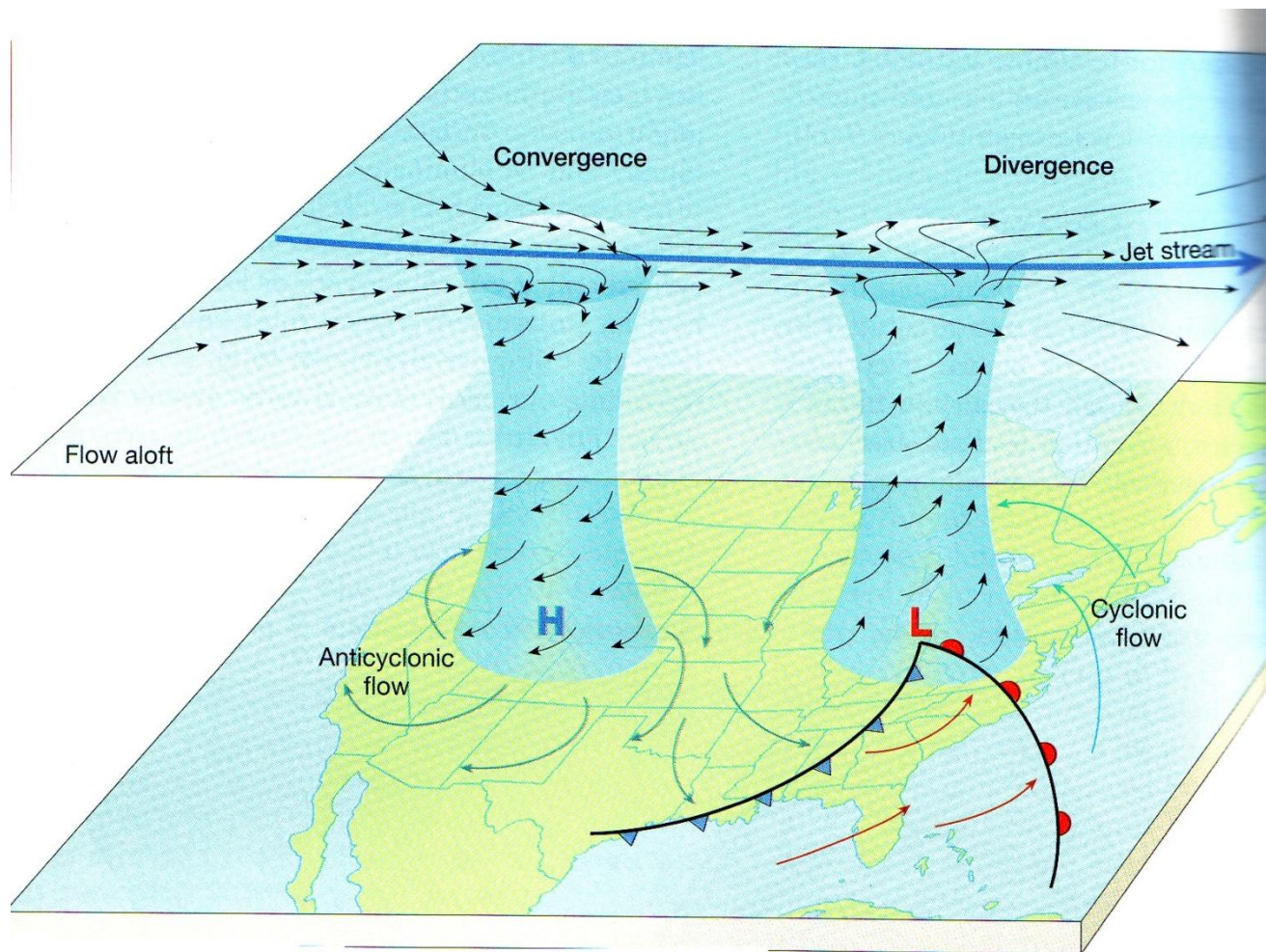
- con l'occlusione, inizia il progressivo indebolimento del ciclone: la pressione centrale aumenta e il vortice si colma, fino al ripristino della linea del fronte polare



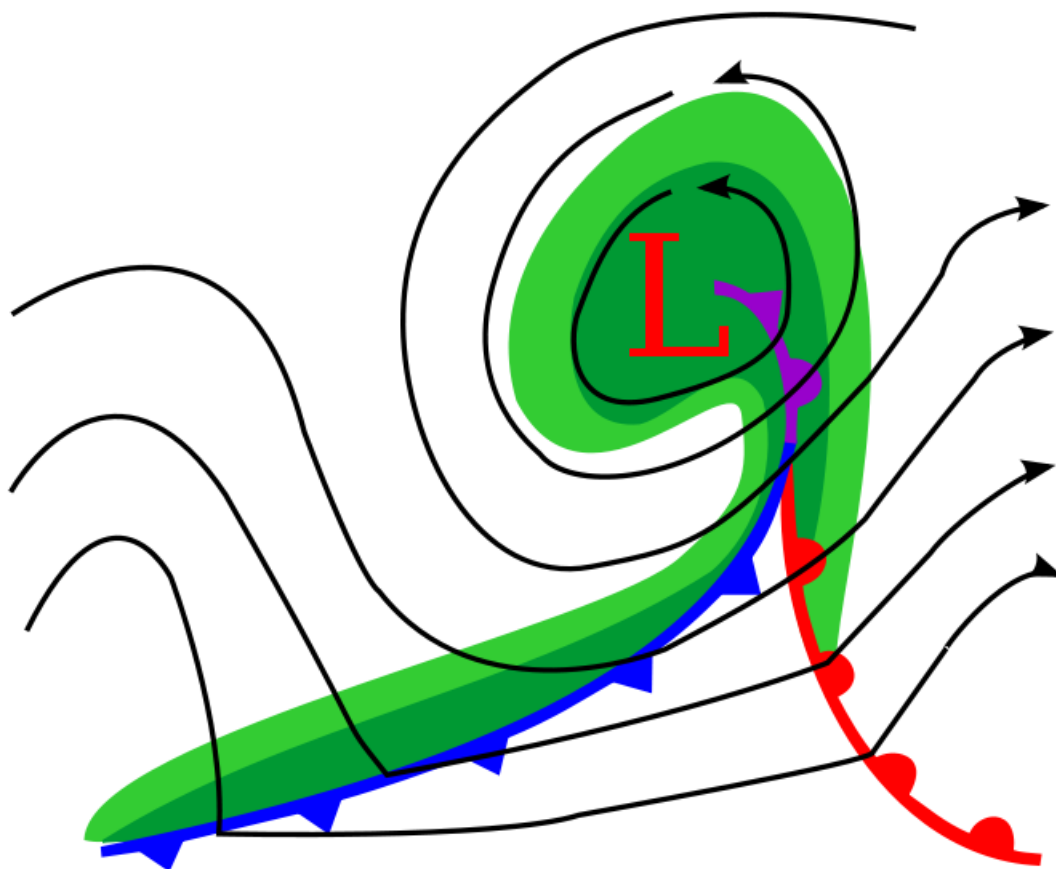




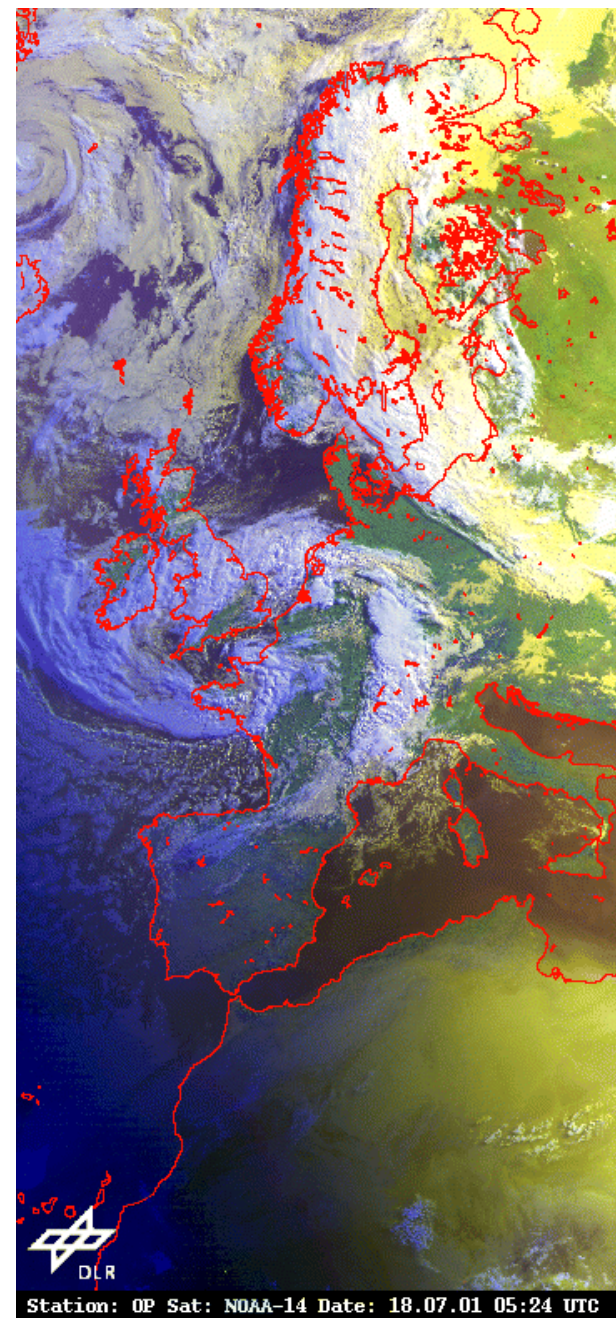
RIASSUMENDO...







Un ciclone extratropicale, ripreso dal satellite polare NOAA il giorno 18 Luglio 2001 alle ore 5.24 UTC.





## IL NOSTRO PERCORSO

- **IN QUESTA PRIMA PARTE ABBIAMO PARLATO DI:**
  - proprietà dell'atmosfera
  - altimetria
  - cenni di circolazione generale atmosferica
  - circolazione extratropicale: i fronti
- **NELLA SECONDA PARTE PARLEREMO DI:**
  - origine e classificazione delle nubi
  - stabilità e instabilità atmosferica
  - fenomeni pericolosi per il volo
- **NELLA TERZA PARTE PARLEREMO DI:**
  - Il briefing meteo VDS



*...SE NON CI SONO DOMANDE...*



*...GRAZIE PER L'ATTENZIONE!*

FINE PARTE 1

