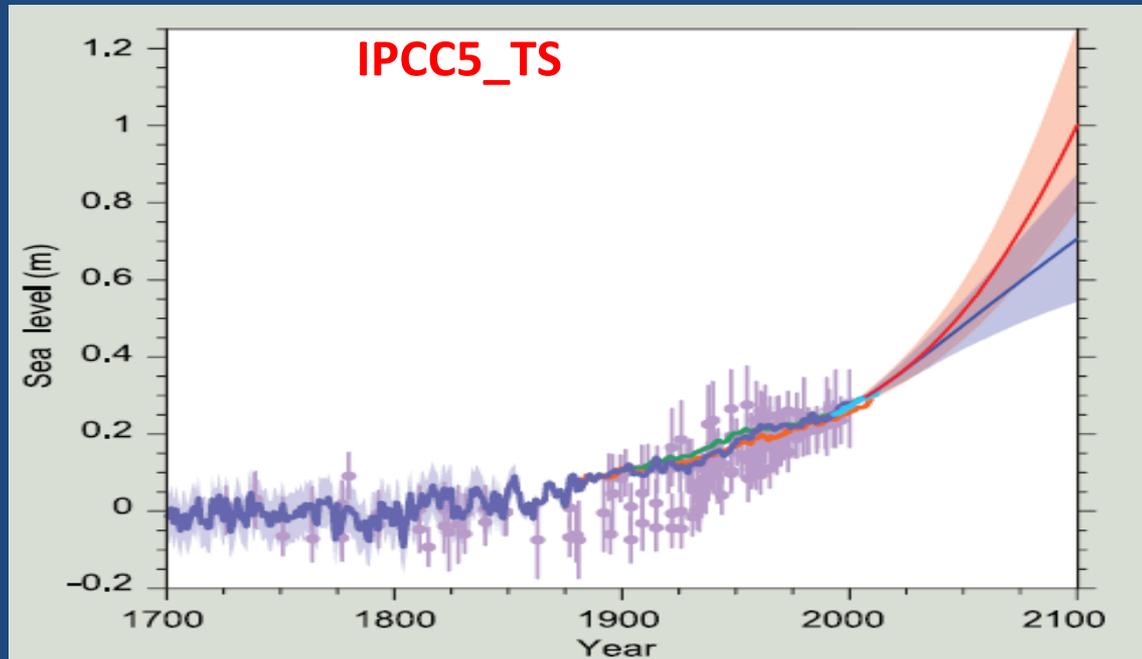
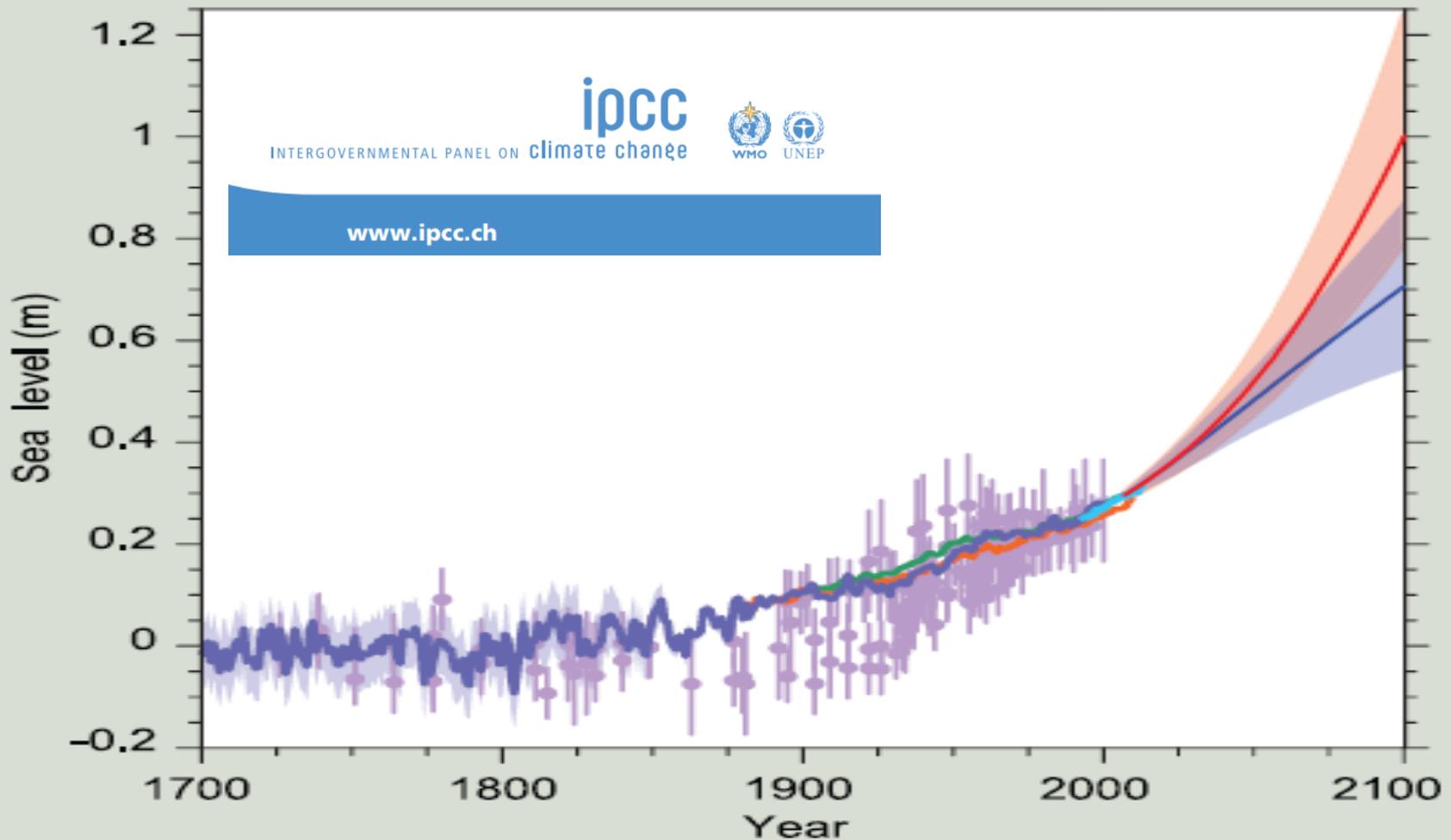


Le variazioni del livello del mare



*Marta Pappalardo
Dipartimento di Scienze della Terra*



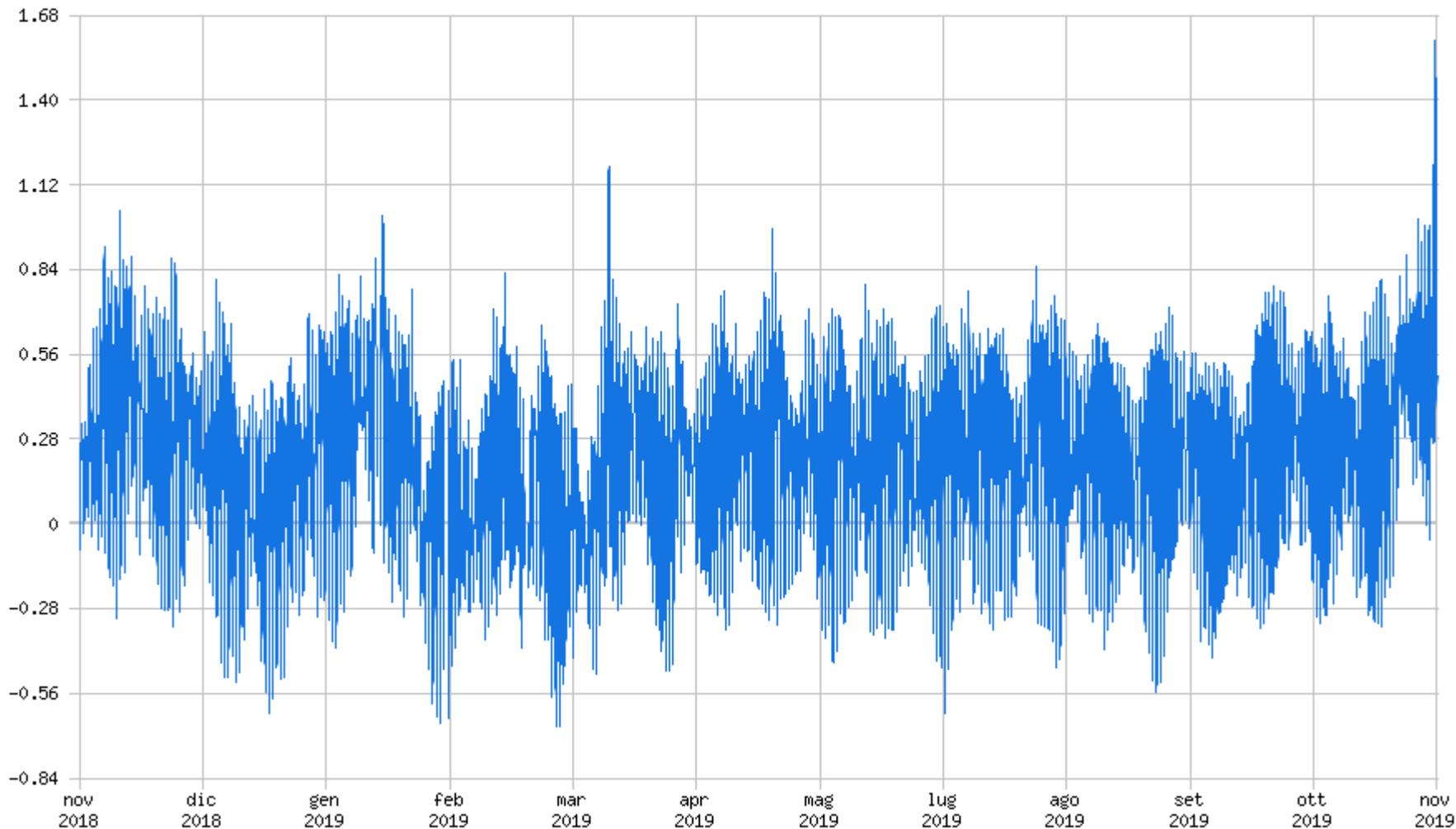
Compilation of **paleo sealevel data** (purple), **tide gauge** data (blue, red and green), **altimeter** data (light blue) and central estimates and likely ranges for projections of global mean sea level rise from the combination of CMIP5 and **process-based models** for RCP2.6 (blue) and RCP8.5 (red) scenarios, all relative to pre-industrial values.

Argomenti trattati:

- 1) Il concetto di “livello del mare”
- 2) Metodi di misura del livello del mare a valenza locale
- 3) Metodi di misura del livello del mare a valenza planetaria
- 4) Cause delle variazioni del livello del mare
- 5) Come si determinano le variazioni del livello del mare avvenute nel passato
- 6) Entità e ritmi delle variazioni del livello del mare alla scala dei tempi geologici e relazione con i cambiamenti climatici

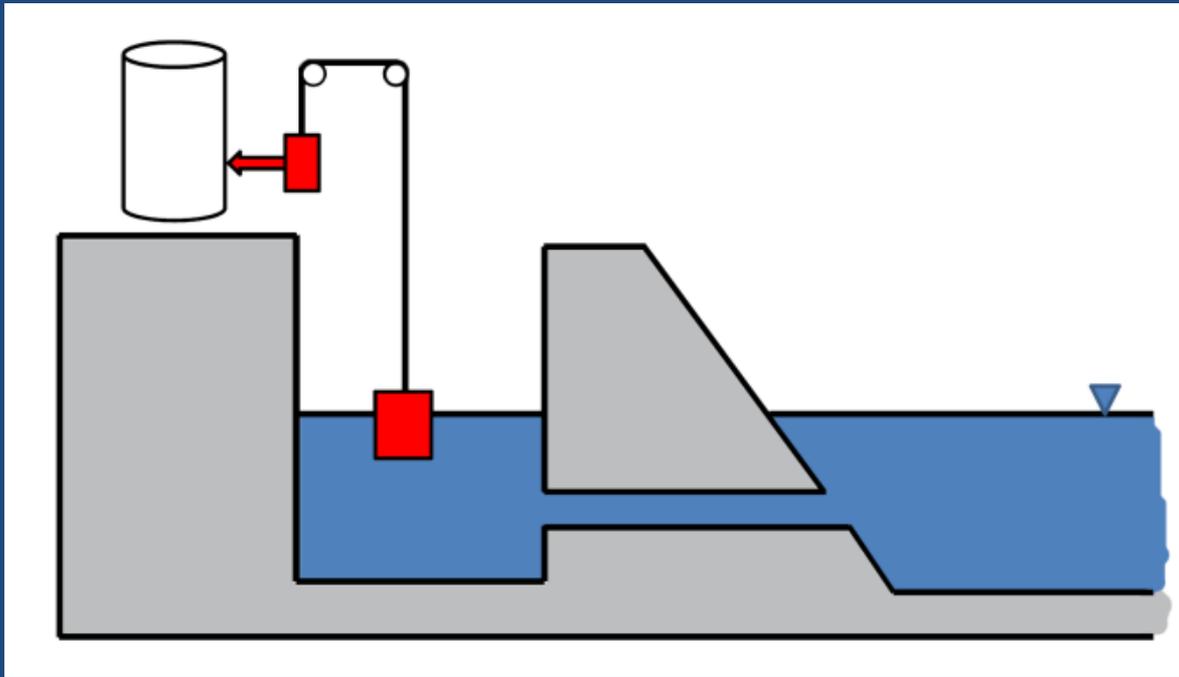
Cosa si intende per «livello del mare»?

RETE MAREOGRAFICA NAZIONALE
VENEZIA
LIVELLO IDROMETRICO (m)
13:00 13.11.2018 ÷ 13:00 13.11.2019 GMT



Livello del mare locale (*Local Sea Level*):

altezza del livello del mare misurata lungo le coste con riferimento a uno specifico punto sulla superficie terrestre



$$l.m.m. = \bar{z} = \frac{A}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T z(t) dt$$

A: area sottesa dalla curva del mareogramma nell'intervallo di tempo T ;

z: distanza tra ogni punto del mareogramma e un livello convenzionale

Per l'Italia il livello medio del mare di riferimento per la cartografia terrestre nazionale è rappresentato dal livello medio registrato dal Mareografo di Genova tra il 1937 e il 1946 (indicato come **Genova 1942**)



ISPRA

Istituto Superiore per la Protezione
e la Ricerca Ambientale



▼ Informazioni generali

▼ Reti di misura

Mareografica

Qualità dell'acqua

Onde anomale

▼ Livellazione

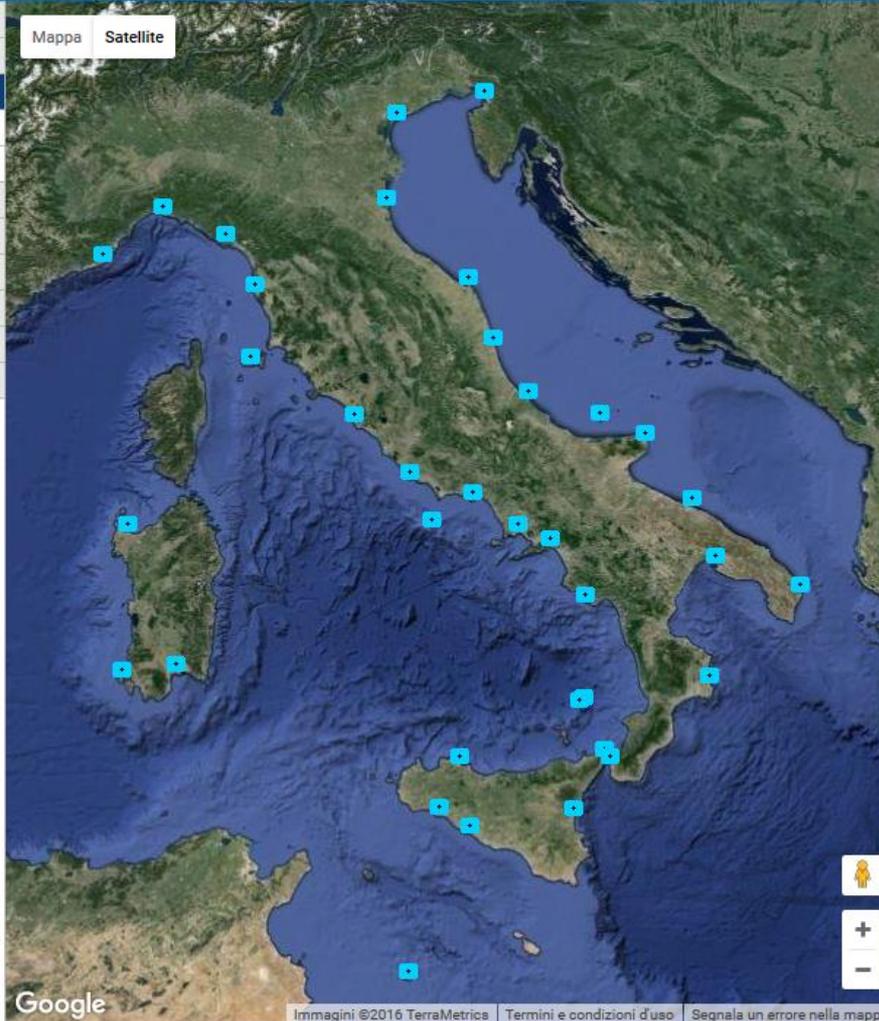
▼ Stazioni

▼ Confronto tra stazioni

▼ Sensori

▼ Previsioni marea 2015

▼ Archivio dati/elaborazioni



ultima rilevazione	
07:00 26.04.2016 GMT	
Venezia	
livello	0.05 m
temperatura H2O	15.1 °C
temperatura aria	13.1 °C
umidità	69 %
pressione	1008.1 hPa
direzione vento	-
velocità vento	0.0 m/s

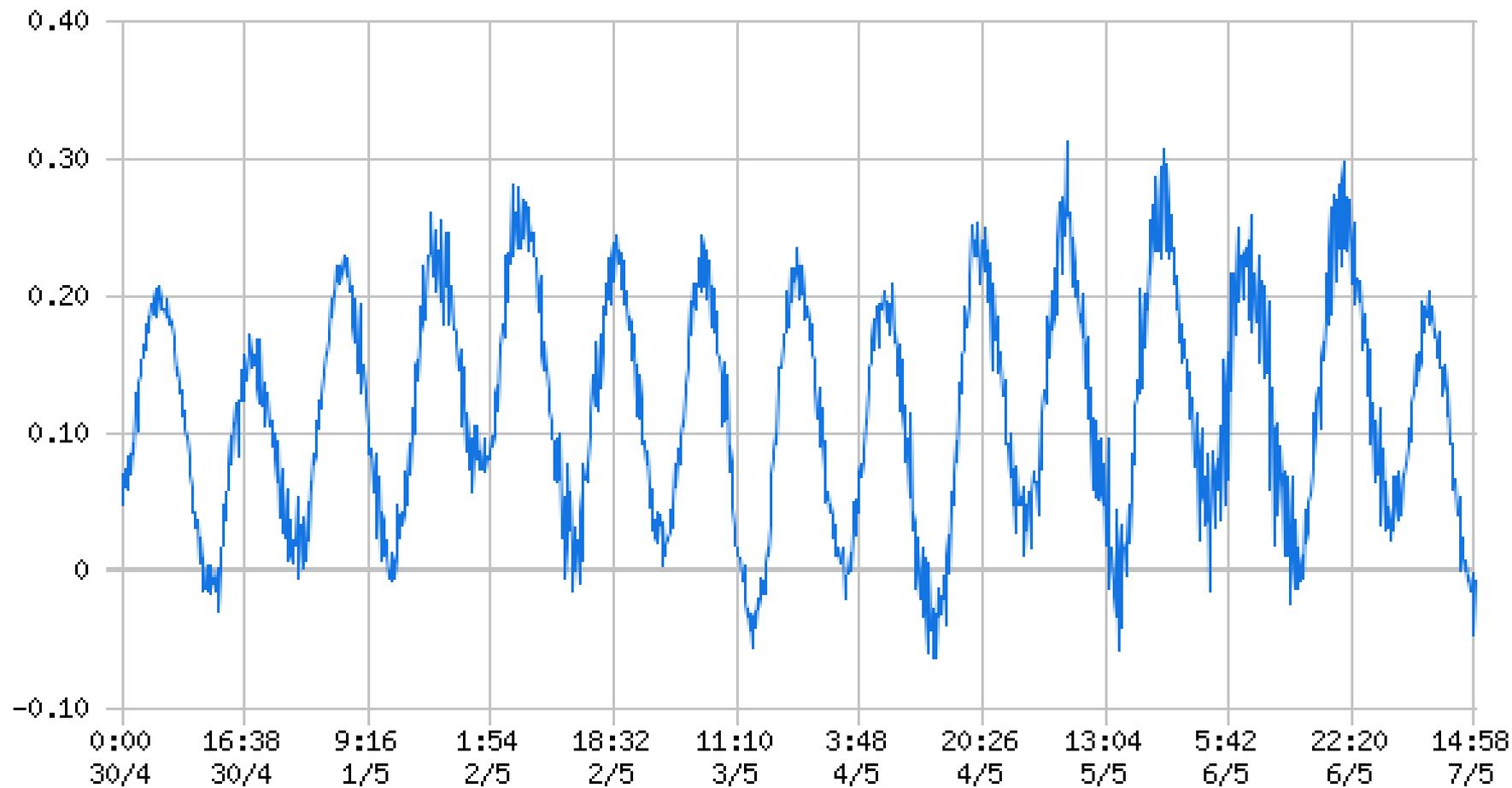
- Gaeta
- Genova
- Ginostra
- Imperia
- La Spezia
- Lampedusa
- Livorno
- Marina di Campo
- Messina
- Napoli
- Ortona
- Otranto
- Palermo
- Palinuro
- Ponza
- Porto Empedocle
- Porto Torres
- Ravenna
- Reggio Calabria
- Salerno
- San Benedetto del Tronto
- Sciaccia
- Strombolicchio
- Taranto
- Tremiti
- Trieste
- Venezia**

ISPRA Istituto
Superiore per
la Protezione e
la Ricerca
Ambientale

Servizio
Mareografico
Nazionale
(SMN)

Rete
mareografica
nazionale
(36 stazioni)
<http://www.mareografico.it/>

RETE MAREOGRAFICA NAZIONALE
GENOVA
LIVELLO IDROMETRICO (m)
00:00 30.04.2015 ÷ 15:00 07.05.2015 GMT



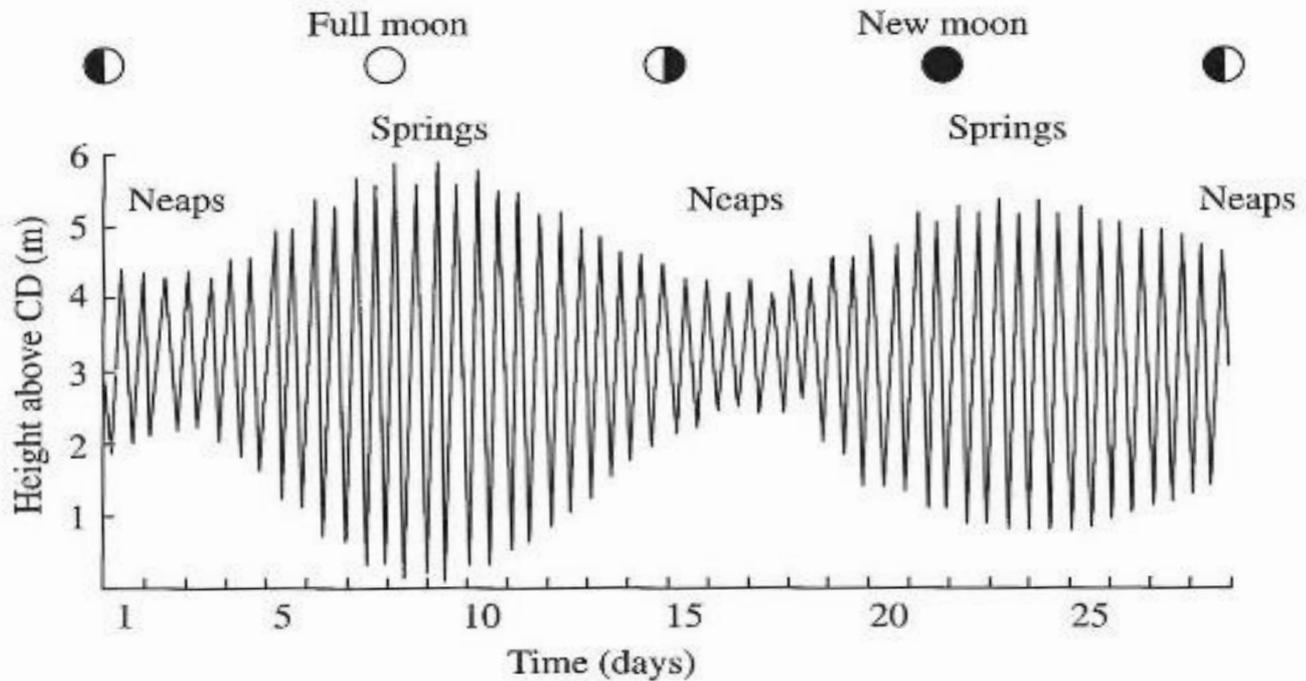


Fluttuazioni
del livello del
mare di breve
periodo
dovute alle
maree

Marea
semidiurna,
ampiezza
massima di
oltre 6 m

(fluttuazione
di 6 m in 6
ore 4 volte al
giorno)

Puerto Deseado, Argentina

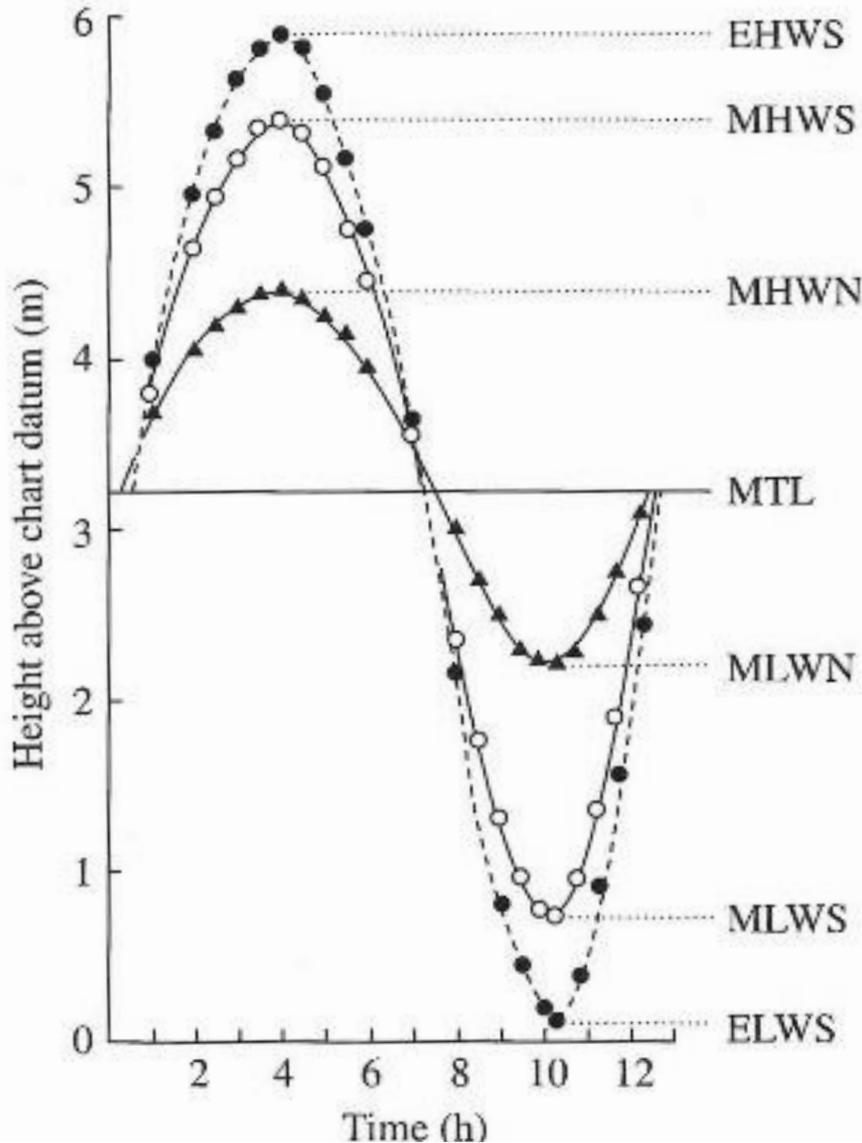


L'ampiezza della marea varia tra un ciclo mareale e l'altro, in funzione di una serie di fattori astronomici.

Si distinguono le maree astronomiche dalle cosiddette **maree meteorologiche**

Le maree meteorologiche dipendono dalle **variazioni della P atmosferica** e non sono prevedibili esattamente

Plymouth, UK, Admiralty tide tables



Extreme high water of spring
Mean high water of spring tides

Mean high water of neap tides

Mean tidal sea level = media delle altezze orarie

Mean tidal level

Mean low water of neap tides

Mean low water of spring tides

Extreme low water of spring tides

CD = *Chart datum*: livello del mare di riferimento per la cartografia nautica = ELWS

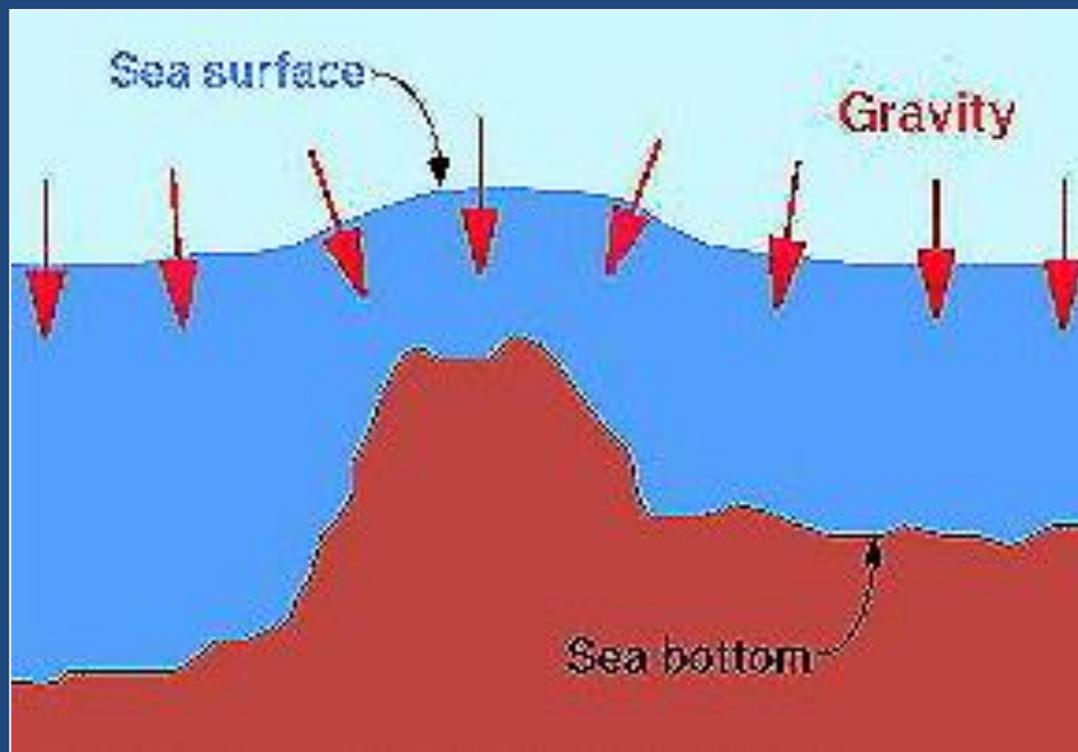
Livello del mare globale (**Global Sea Level**): altitudine media di tutti gli oceani terrestri; deve essere misurata rispetto a un riferimento (ellissoide)



Modello fisico di geoide (GeoforschungsZentrum, Potsdam) per INTERGEO 2006. Scostamenti dalla forma ellissoidica amplificati

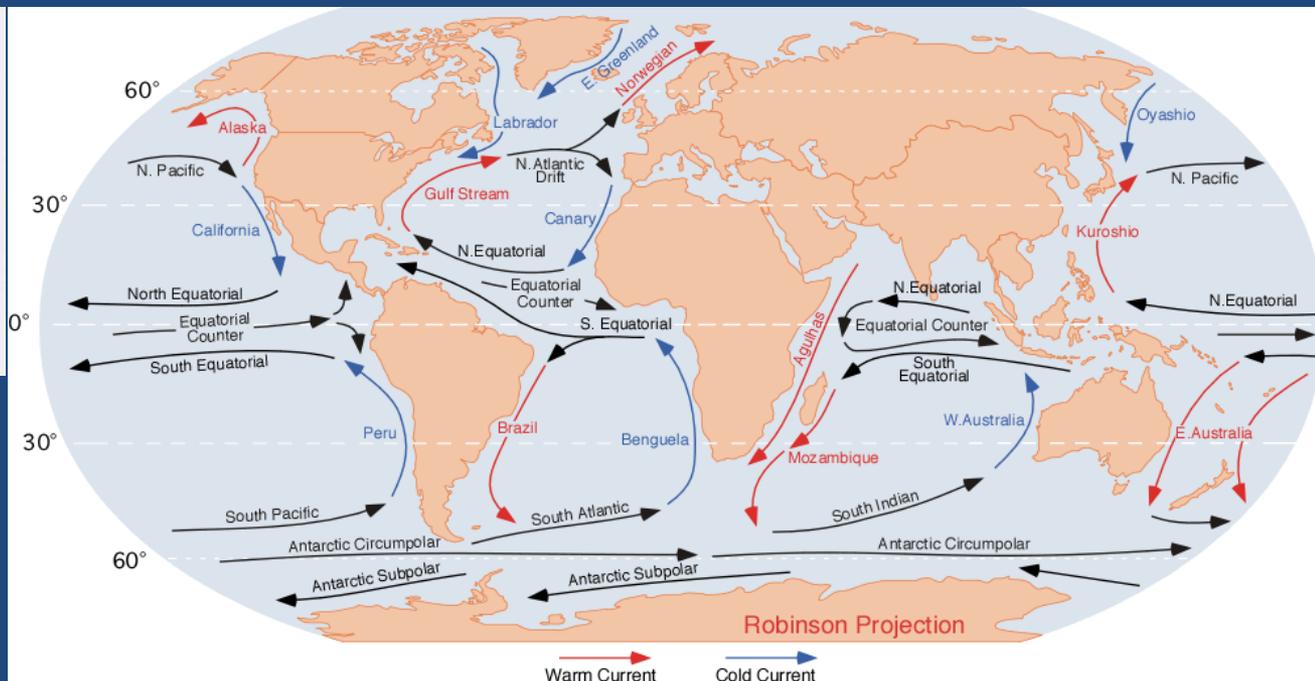
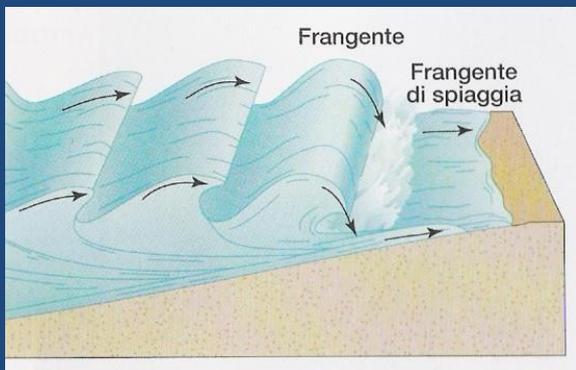
Il **geoide** è una particolare superficie equipotenziale del campo gravitazionale terrestre; tra le possibili superfici equipotenziali è stata scelta quella che meglio approssima il livello medio dei mari

Il livello del mare è influenzato **spazialmente** da anomalie del campo gravitazionale terrestre e dalla presenza di rilievi sottomarini

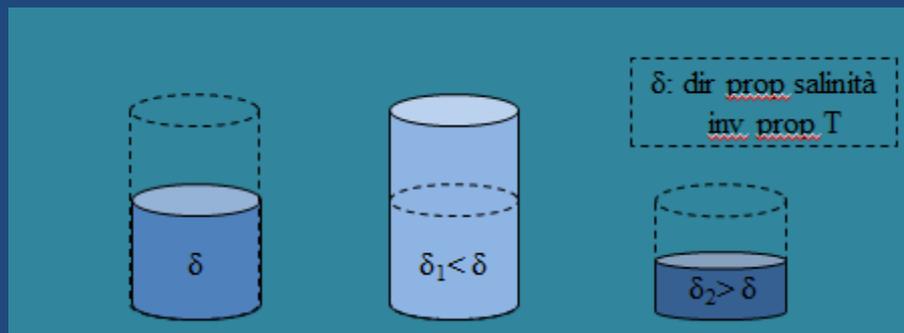


«quale geoid»?

Il livello del mare è influenzato temporalmente oltre che dalle maree, anche da onde, correnti e variazione dei parametri fisici delle acque

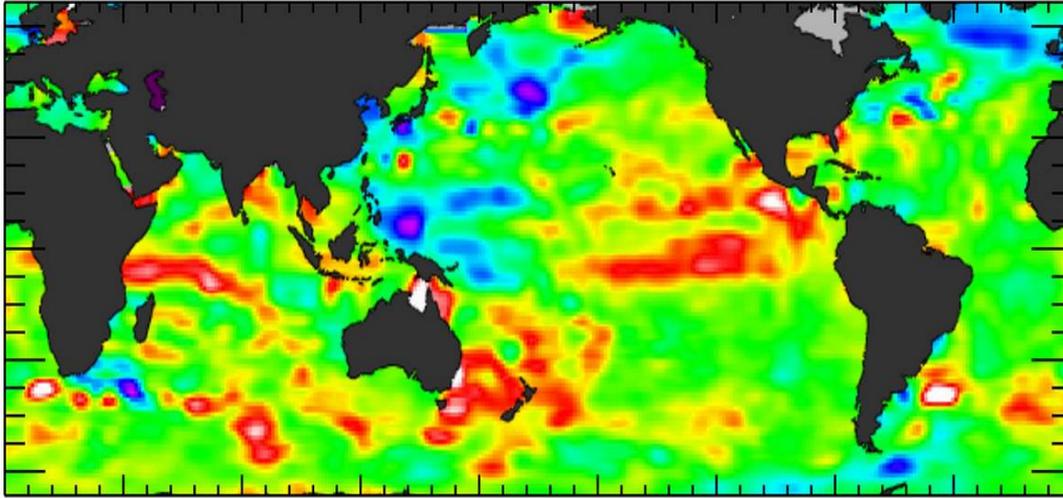


Il livello del mare subisce fluttuazioni spazio-temporali per variazioni di temperatura e salinità delle acque oceaniche

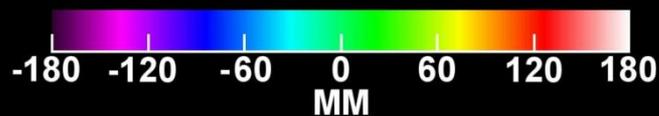


Come si determina la forma «vera» della terra?

Jason-3



16 Marzo 2016: prime immagini di Jason 3



Scala che esprime lo scostamento del livello del mare MISURATO rispetto al GEOIDE

Satelliti muniti di radar altimetro: SeaSat, Geosat, ERS-1/2, TOPEX/Poseidon (1992-2006), Jason-1 (Ocean Surface Topography Mission), Jason-2 (giugno 2008), Jason-3 (gennaio 2016)

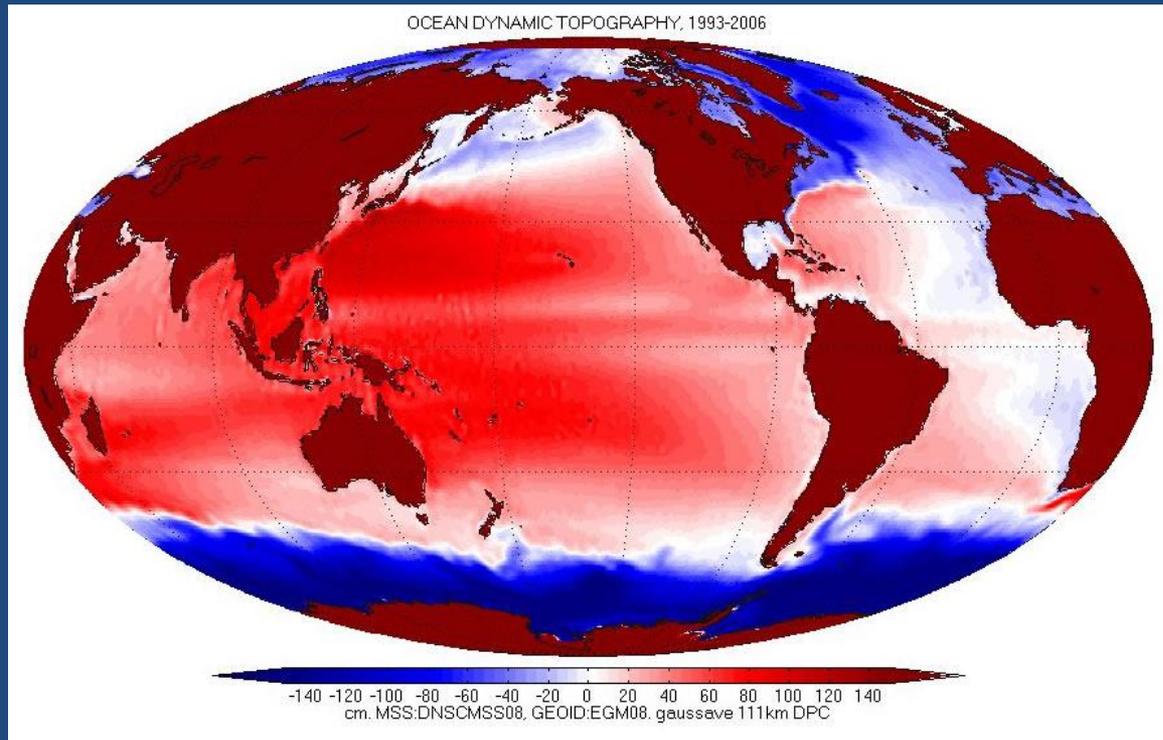
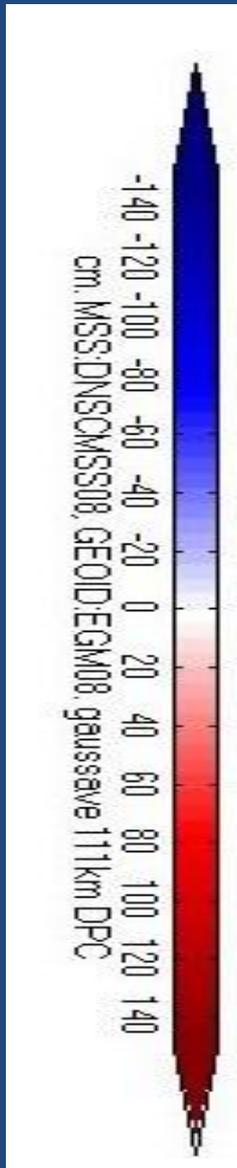
Altezza media dell'orbita 1336 km s.l.m.

Un radar-altimetro operante su di un satellite geostazionario è in grado di fornirci l'elevazione della superficie sorvolata (essendo nota la sua orbita)



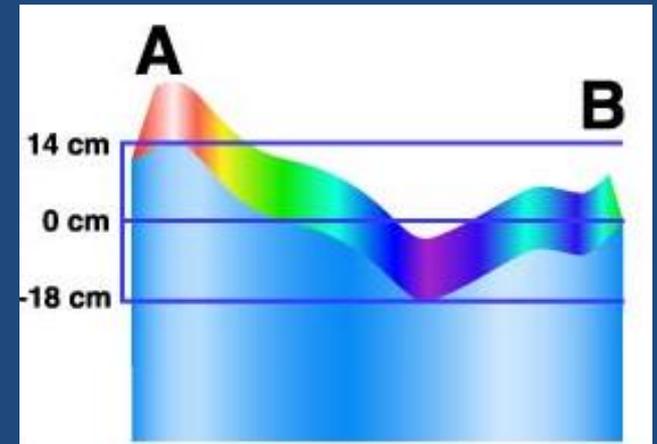
TOPEX/Poseidon Ground Track

Livello del mare globale: es: **CLS01** Mean Sea Surface
Topografia oceanica di riferimento
costruita usando tre set di dati satellitari

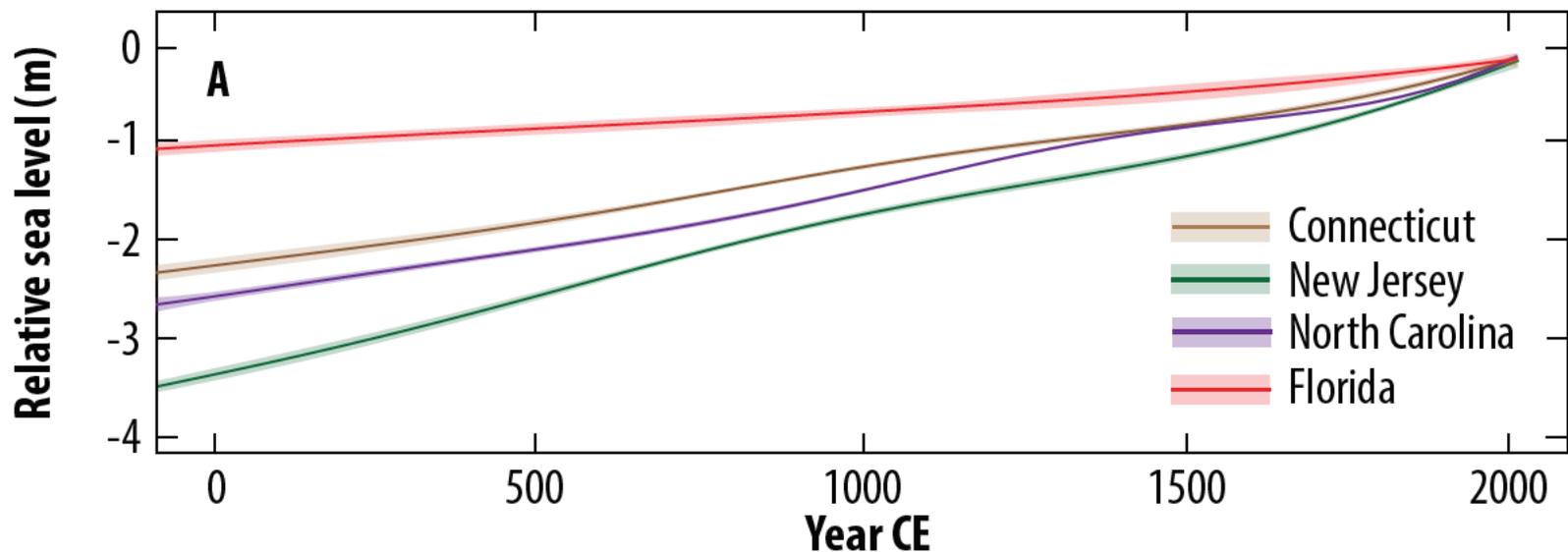


Il livello del mare:

- Varia in uno stesso luogo continuamente
- Varia spazialmente (da luogo a luogo)
- Varia temporalmente in luoghi diversi con tassi diversi



Nello Stretto di Panama il livello del mare sul Pacifico è mediamente 20 cm più alto che sull'Atlantico



Le fluttuazioni del livello del mare di lungo periodo sono dovute all'alternanza tra fasi glaciali e interglaciali



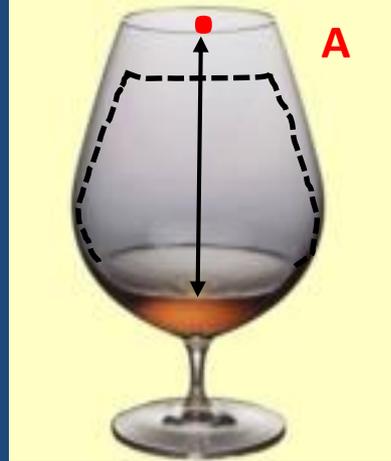
Depositi marini tipici della berma di tempesta datati a 125 ka BP

Oggi si trovano a 12 m slm

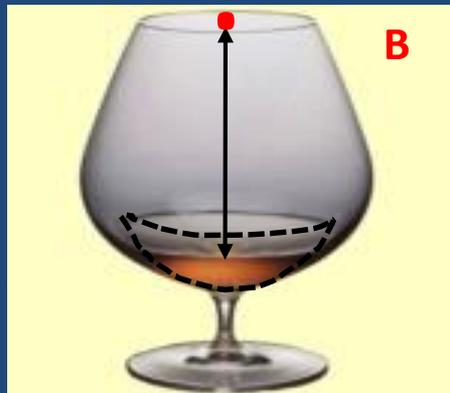
Cause delle variazioni del livello del mare

A movimenti verticali delle terre emerse (sollevamento tettonico, subsidenza, glacioisostasia)

● mareografo



C variazioni della massa d'acqua all'interno dei bacini oceanici (componente eustatica)



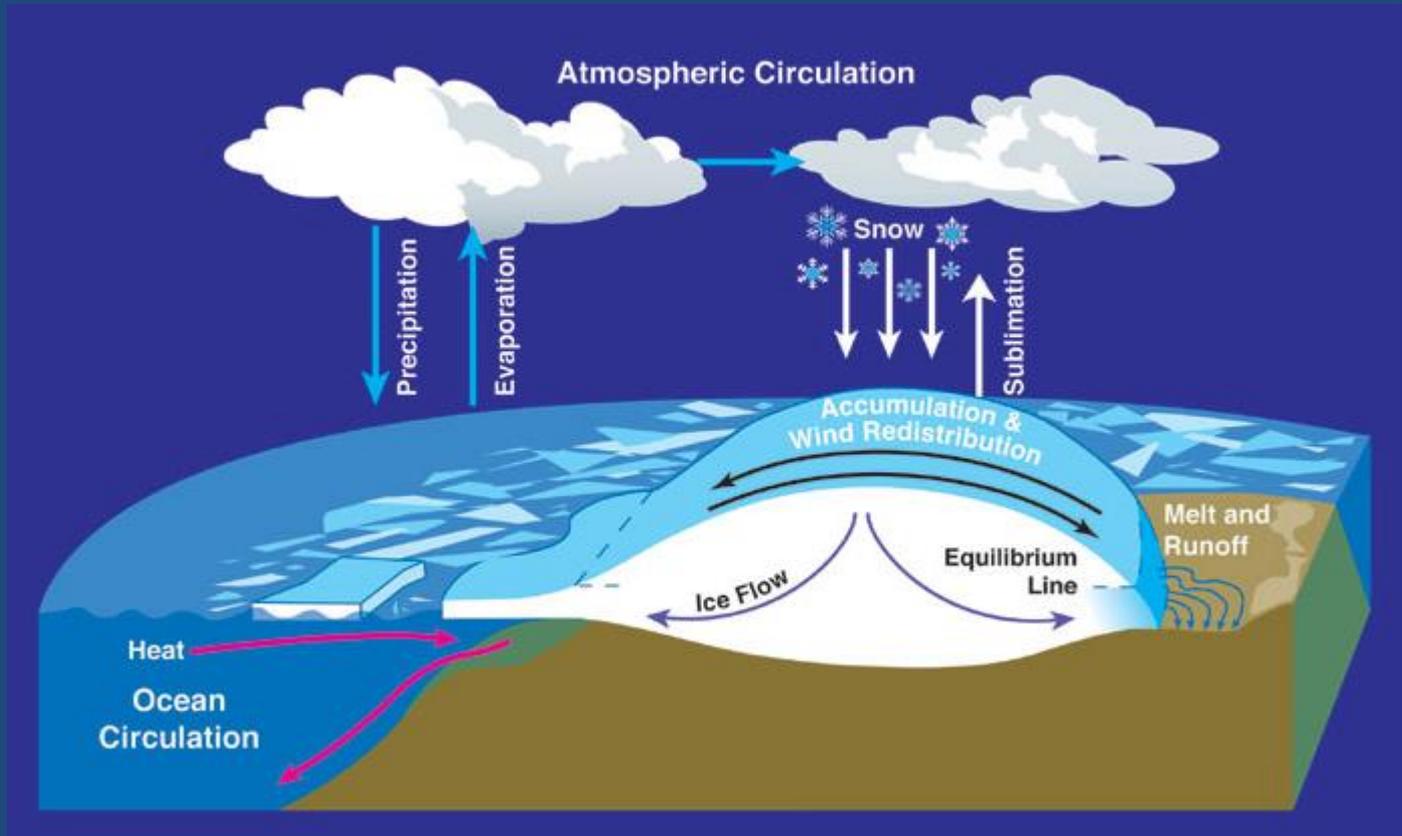
B variazioni del volume dei bacini oceanici (idroisostasia)



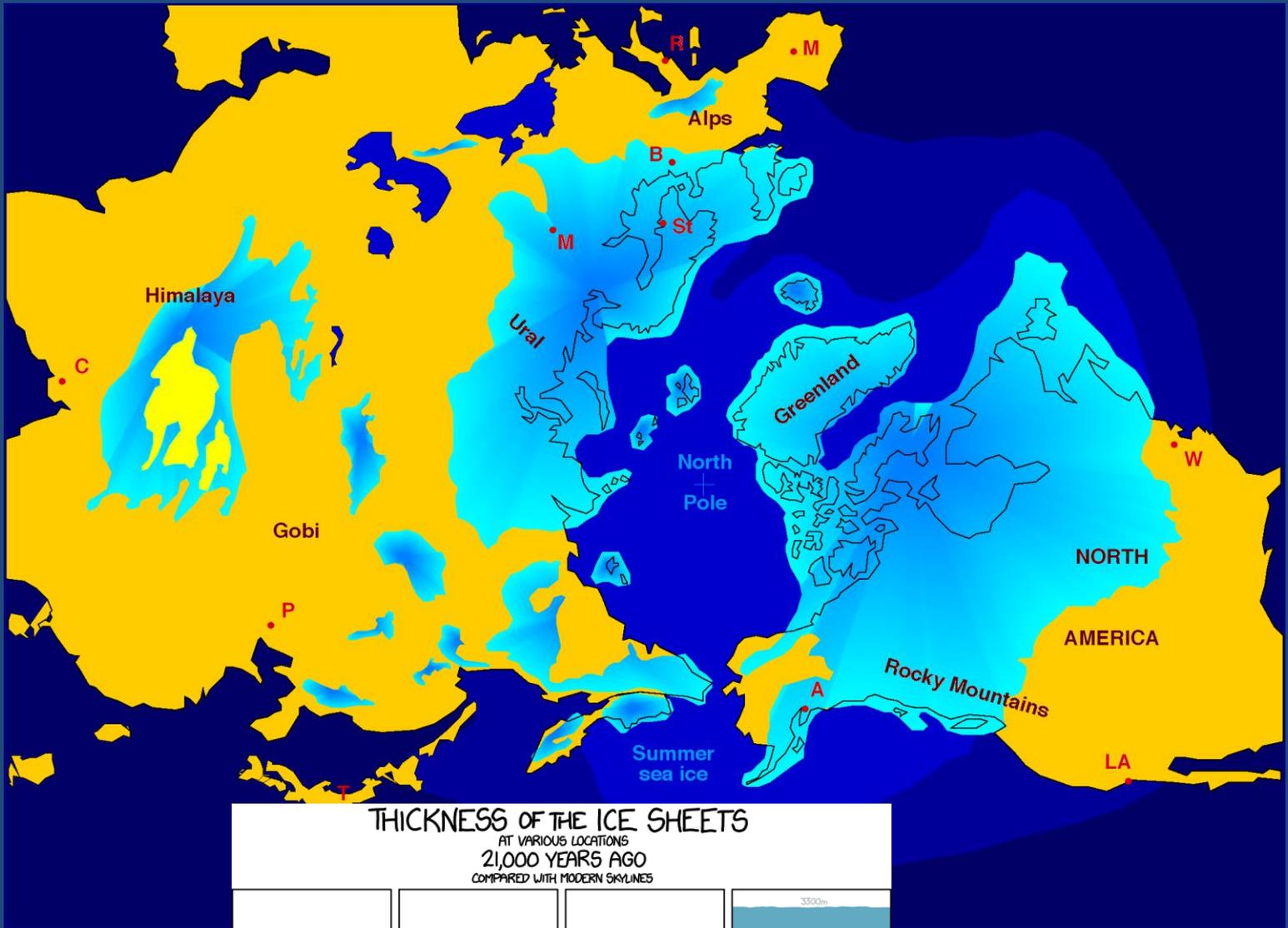
D variazioni di T e/o salinità della massa d'acqua (componente sterica)

Sul lungo periodo misuriamo variazioni **RELATIVE** del livello del mare

C) Variazioni volumetriche dei ghiacci terrestri

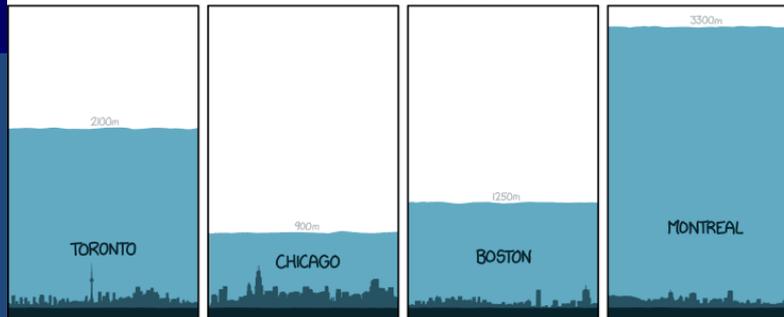


Aumento massa ghiacci t. —————> abbassamento del livello del mare
Scioglimento ghiacci t. —————> Innalzamento del livello del mare



THICKNESS OF THE ICE SHEETS

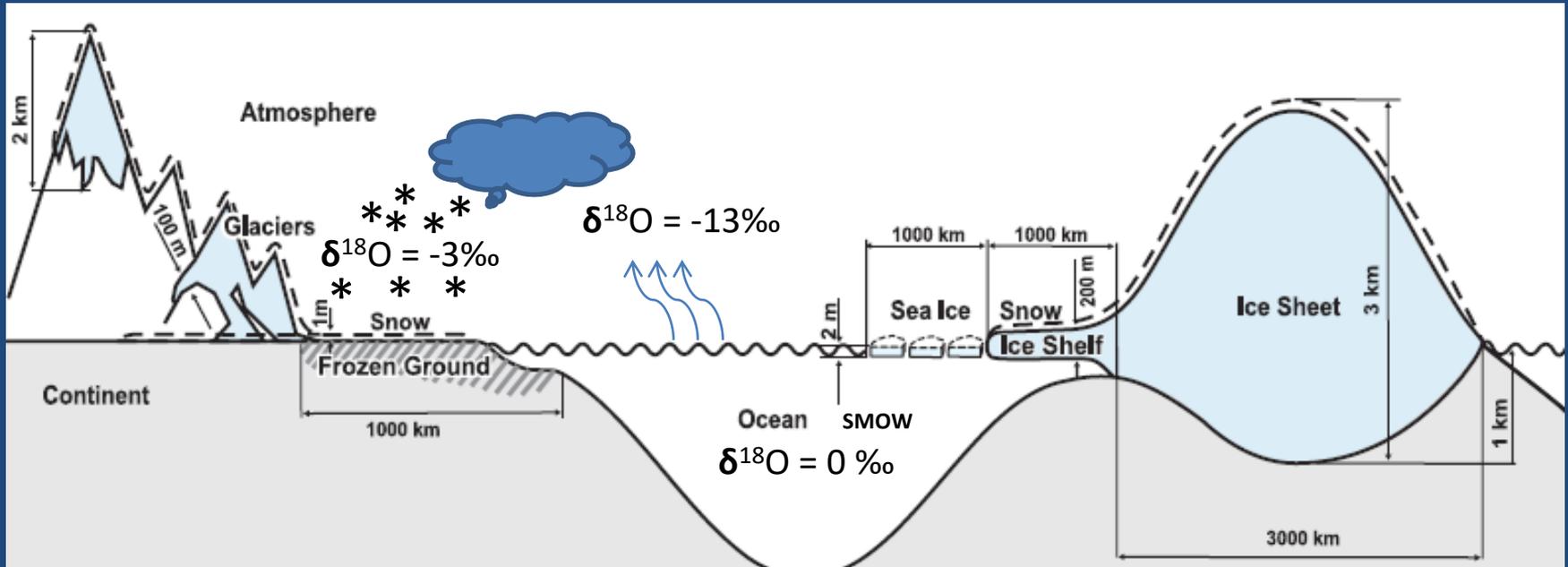
AT VARIOUS LOCATIONS
21,000 YEARS AGO
COMPARED WITH MODERN SKYLINES



Data adapted from 'The Laurentide and Innuitian ice sheets during the Last Glacial Maximum' by A.S. Dyke et. al.

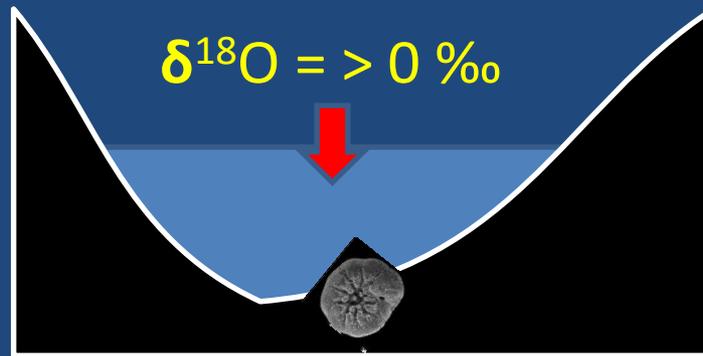


$$\delta^{18}\text{O} = \left(R_{\text{campione}} / R_{\text{standard}} - 1 \right) \times 1000$$



$\delta^{18}\text{O}$ nelle acque oceaniche decresce se aumenta l'isotopo leggero

$\delta^{18}\text{O}$ cresce se il livello del mare si abbassa



Proporzionalmente alla sua variazione nelle acque oceaniche varia il rapporto isotopico $\delta^{18}\text{O}$ nei gusci dei diversi organismi marini

Il rapporto isotopico nei gusci dei **Foraminiferi bentonici** presenti nei sedimenti dei **bacini oceanici profondi** è proporzionale ai **rapporti volumetrici tra acque oceaniche e ghiacci terrestri**

I record $\delta^{18}\text{O}$ derivati dall'analisi dei gusci dei foraminiferi bentonici consentono di costruire **curve eustatiche del livello del mare**

Analisi delle variazioni del rapporto isotopico nei foraminiferi dei bacini sedimentari marini (prof. > 3000 m) dove la variabilità termica è praticamente assente rivelano una **variazione del $\delta^{18}\text{O}$** , legata alla composizione dell'acqua di mare

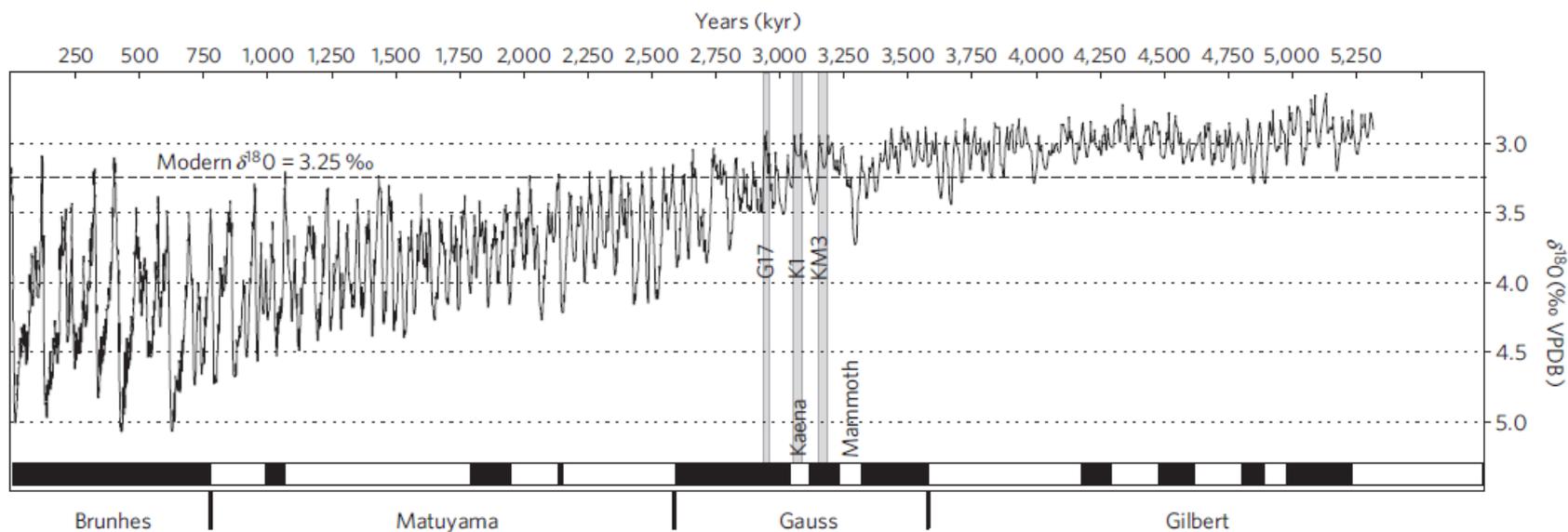


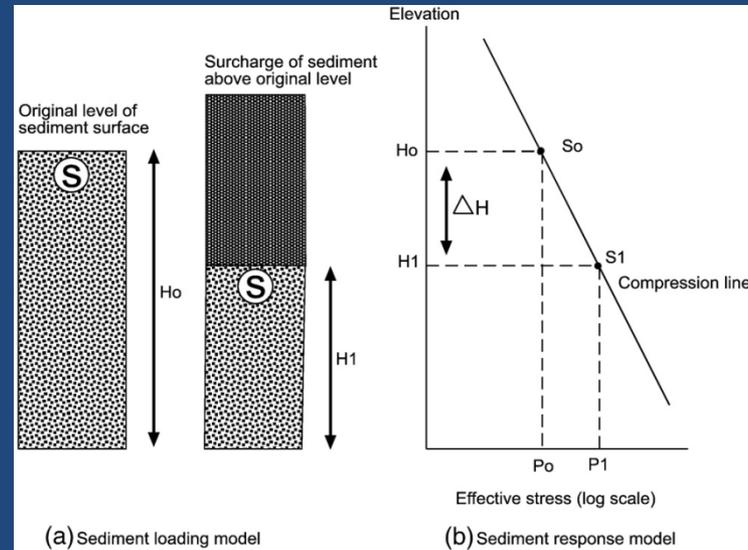
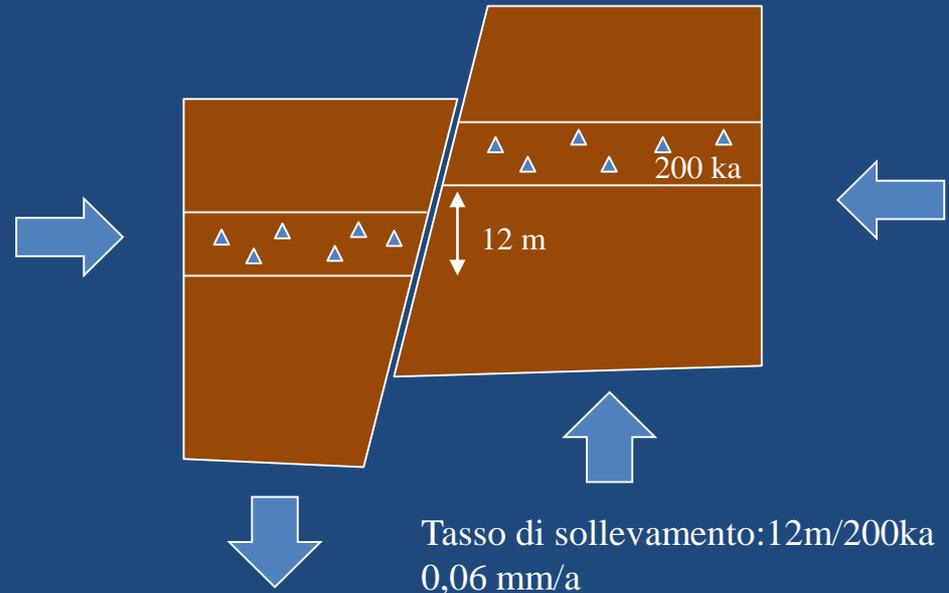
Figure 1 | Stack of globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records²¹ showing pattern of climate variability over past 5 Myr. The history of geomagnetic field reversals is shown on the lower x axis and labels G17, K1 and KM3 identify the three mid-Pliocene super-interglacials that fall within the MPWP.

Lisiecki, L. E. & Raymo, M. E. (2005) A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic ^{18}O records. *Paleoceanography* 20, PA1003

A1 componente tettonica

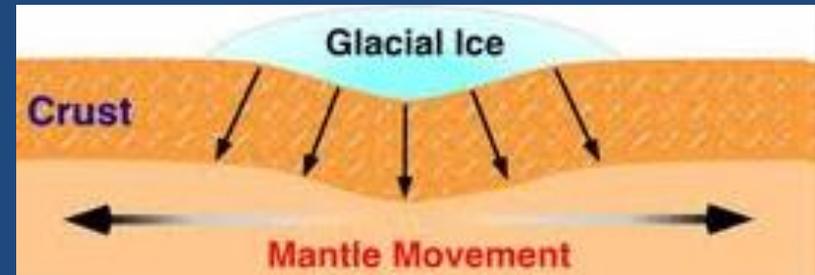
Sollevarimento o abbassamento della crosta (terre emerse) dovuta a **fenomeni tettonici**

Movimenti verticali delle terre emerse per **attività vulcanica, compattazione dei sedimenti, ecc**

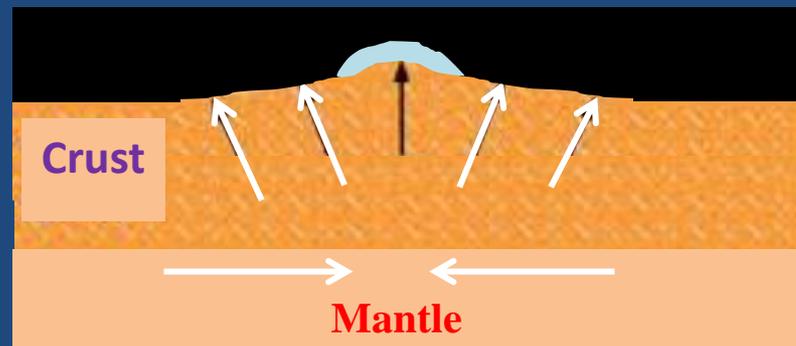


A2 componente glacio-isostatica

La calotta si espande e la crosta si deprime

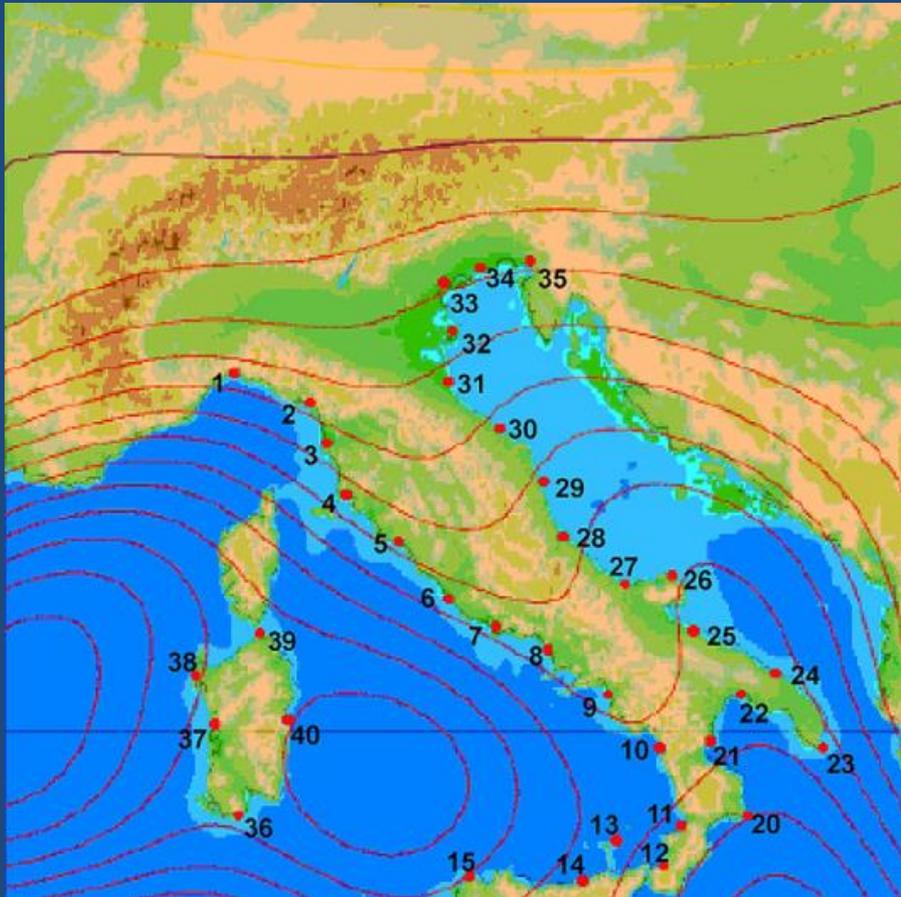


La calotta si riduce e la crosta si solleva



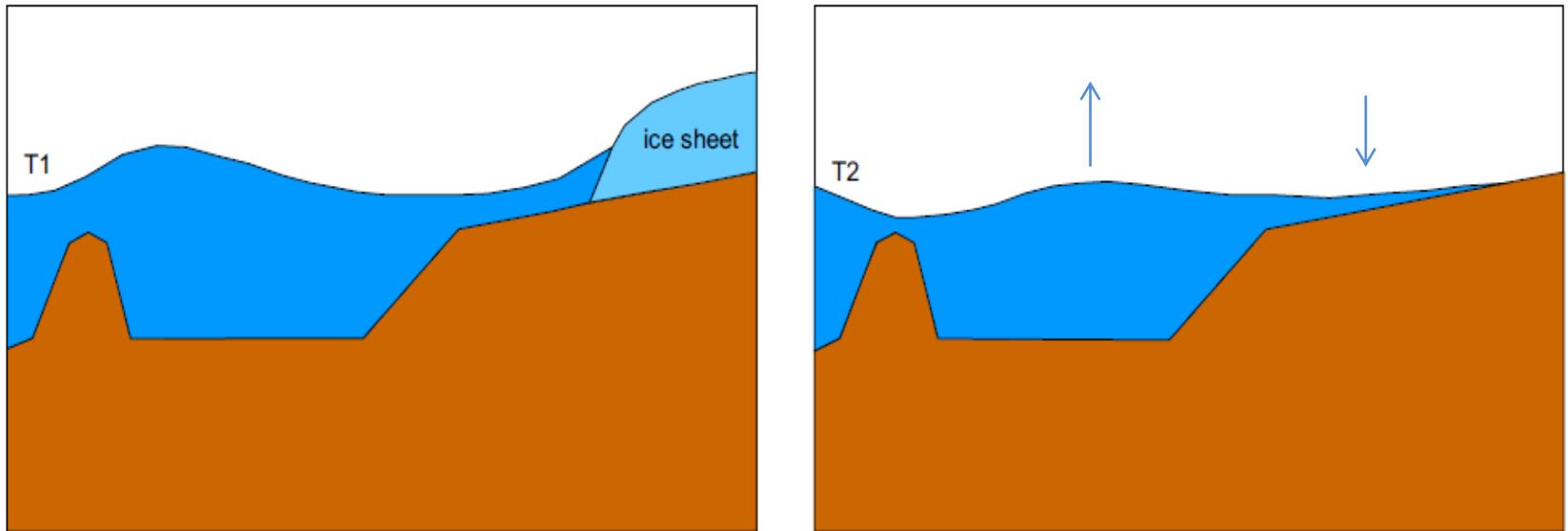
Effetto **rebound** (= rimbalzo)

B componente
idro-isostatica



L'aumento del peso
dell'acqua presente nei
bacini oceanici sui rispettivi
fondali provoca una
depressione proporzionale
della crosta oceanica

Eustasia geoidica



L'oceano è soggetto all'attrazione gravitazionale della calotta glaciale; quindi nei pressi della calotta glaciale il livello del mare subisce un innalzamento locale. Con la deglaciazione questo effetto cessa e il livello del mare si abbassa

Plate 10: SWEDEN IV (Northeast)

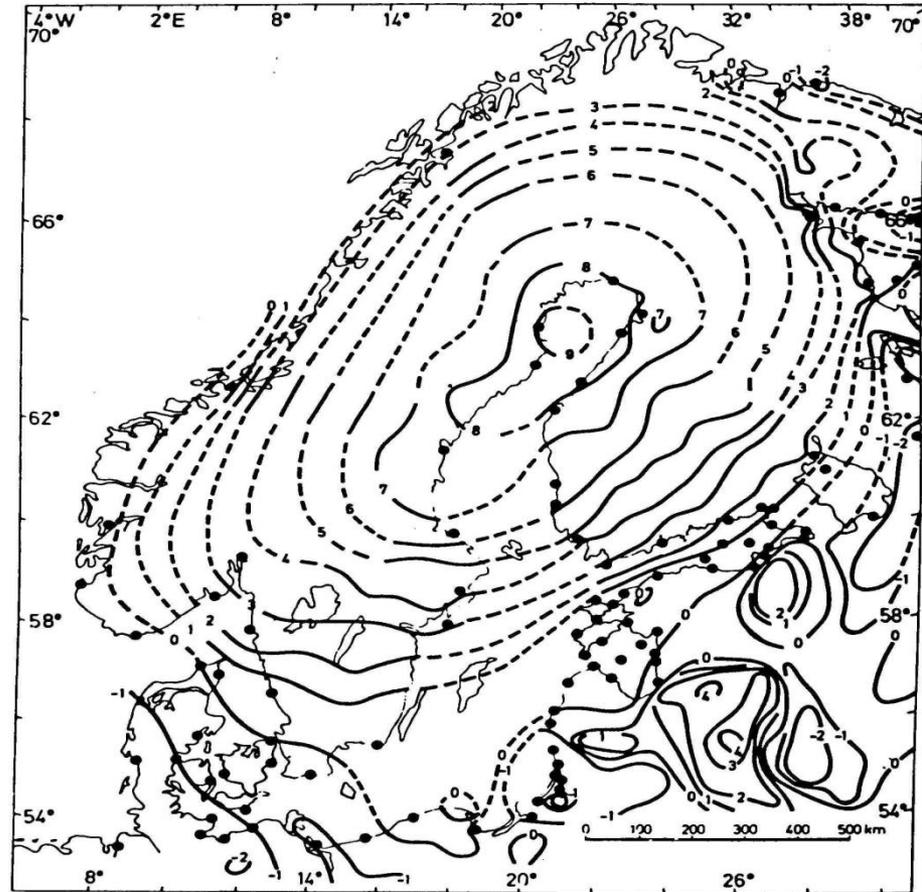
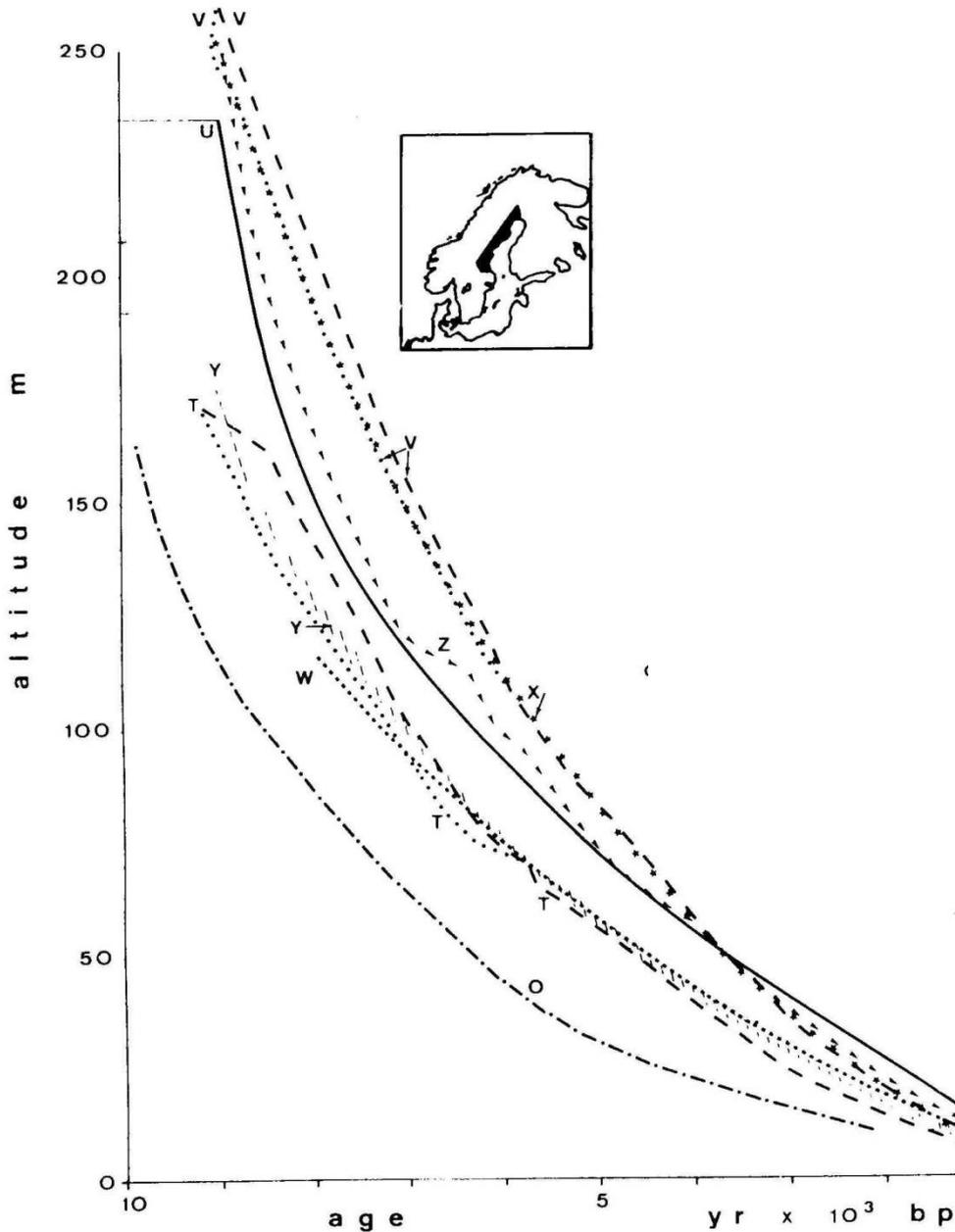
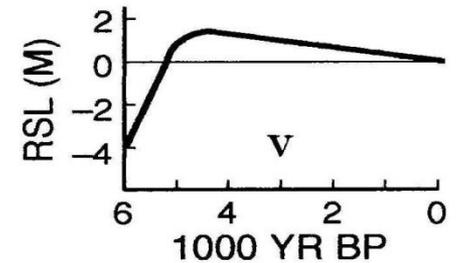
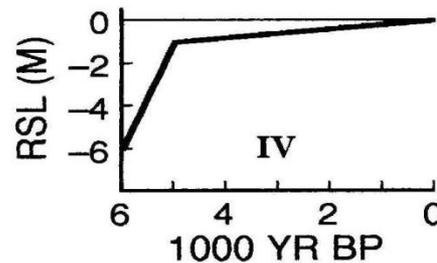
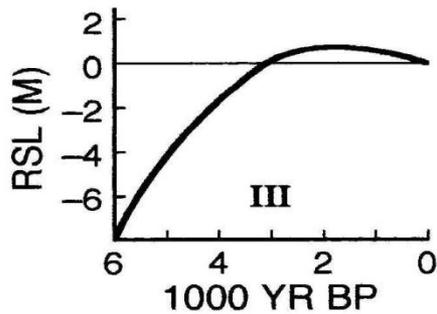
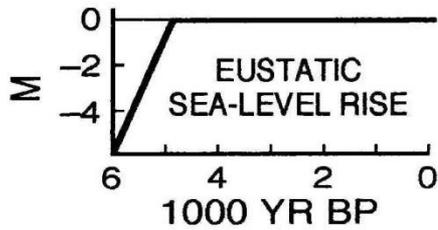
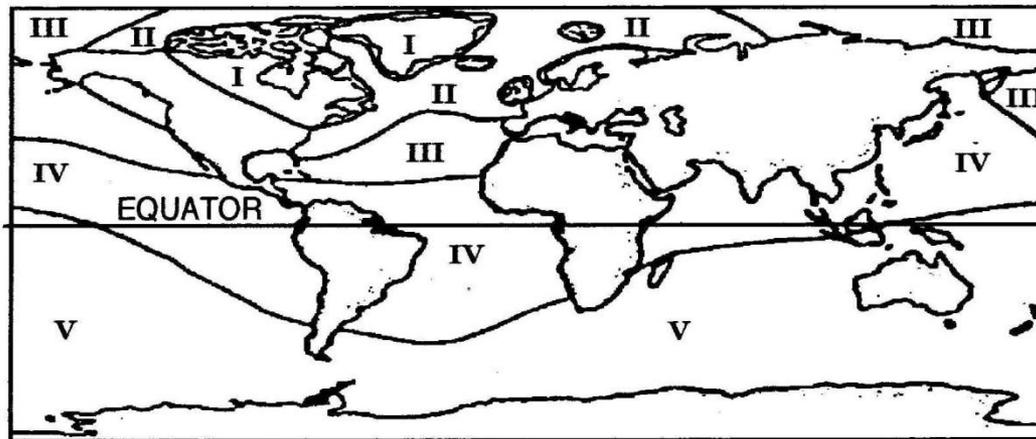
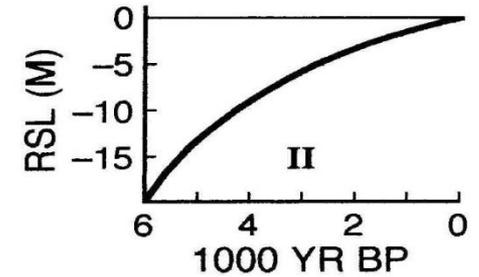
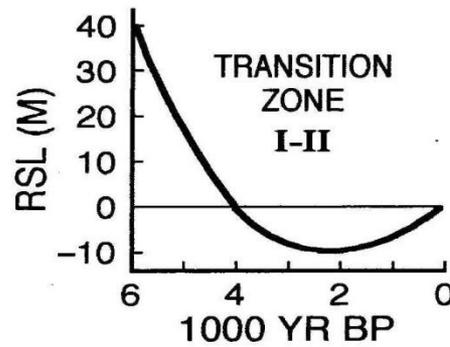
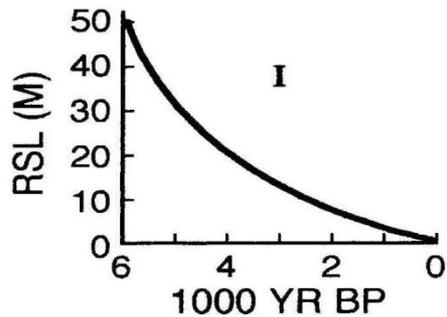


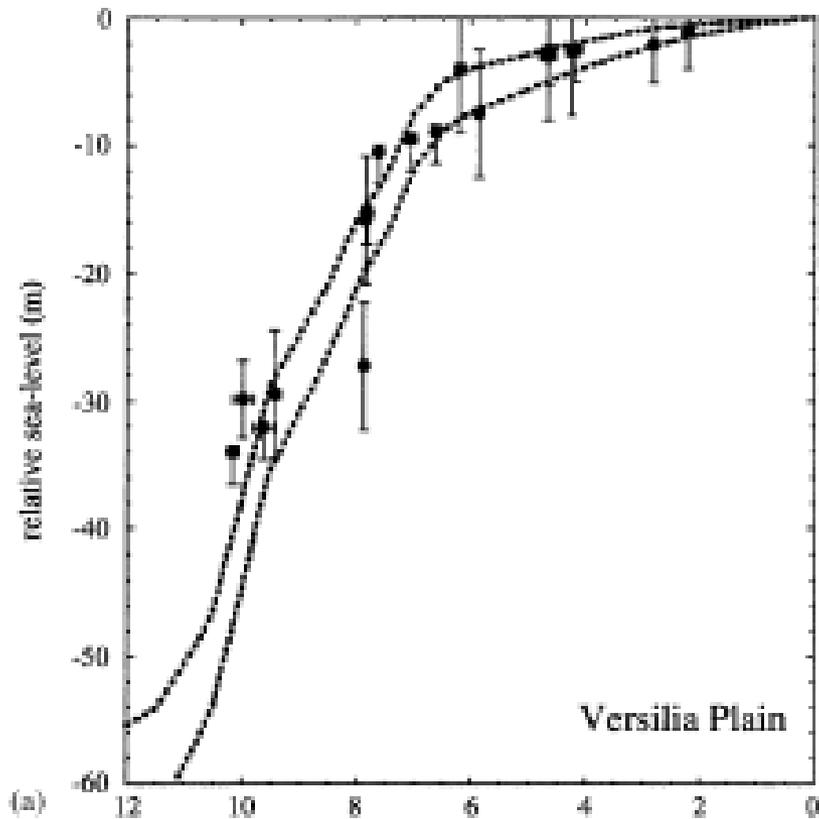
Fig. 2. Observed present rate of vertical crustal movement relative to mean sea level (mm/yr). The isolines are deduced from repeated precise levelling surveys and tide gauge data. The positions of tide gauge stations used are shown.

GIA
Glacial Isostatic
Adjustment

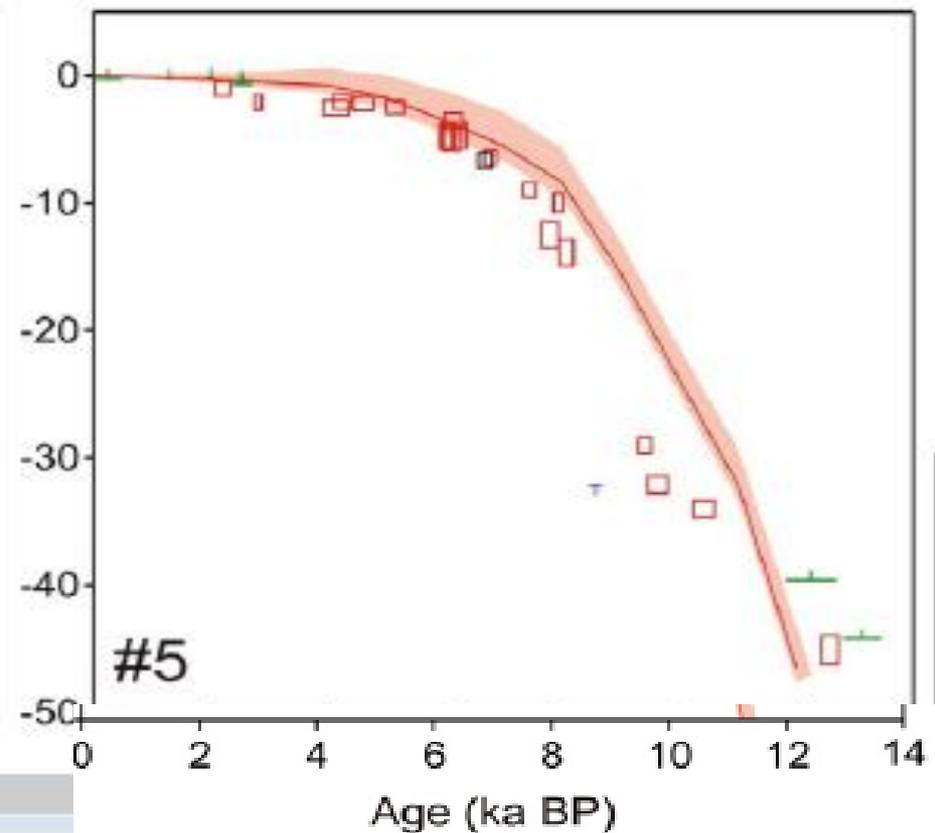


«Versilia» 8 ka BP

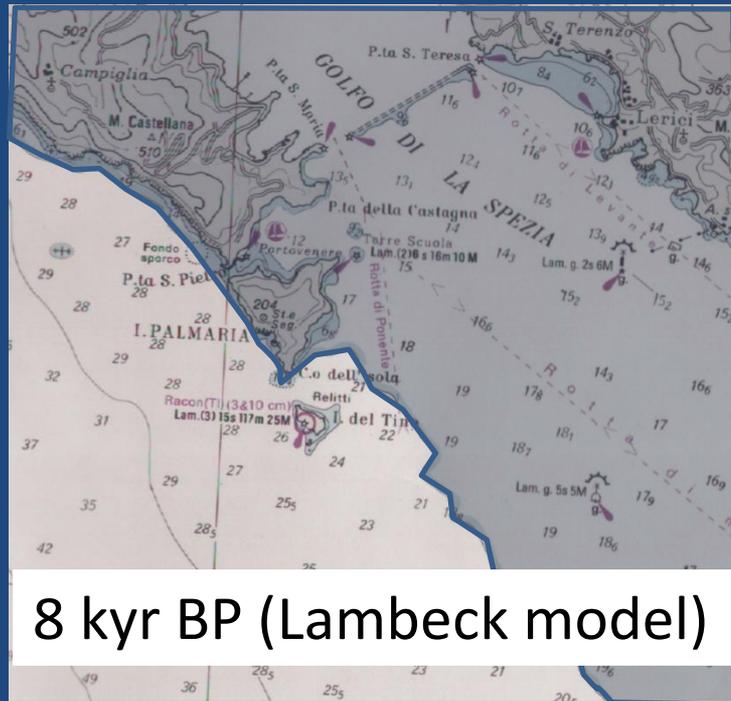
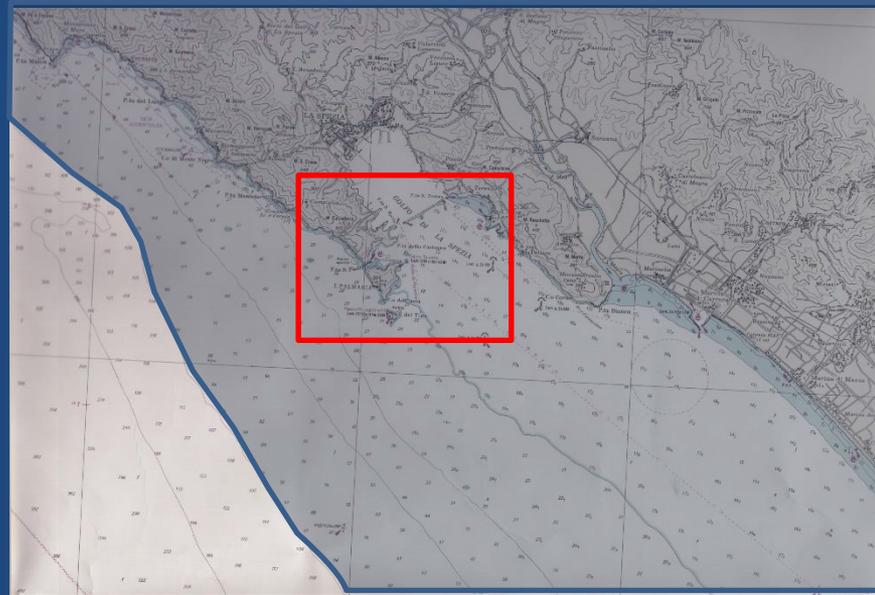
-18 m Lambeck, 2004



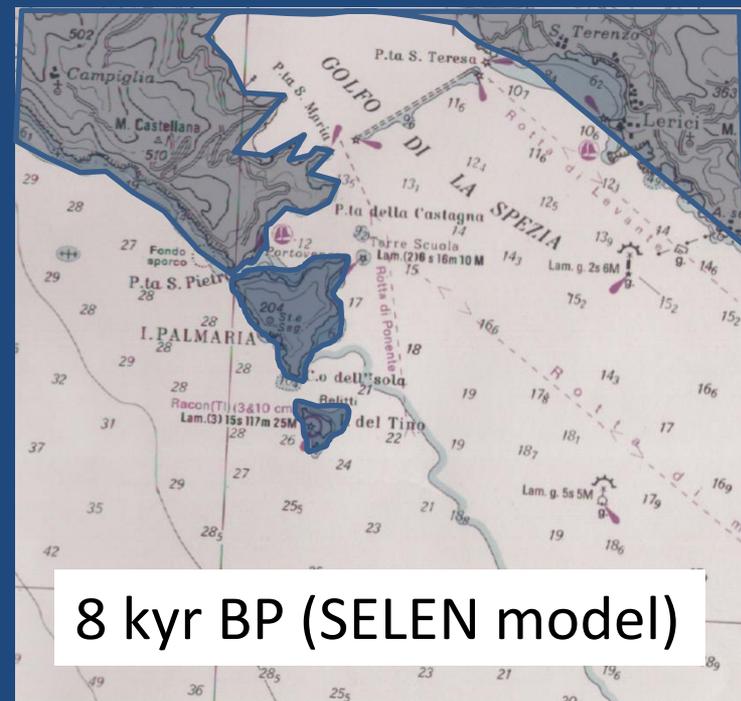
-8 m Vacchi et al., 2016



LGM 23 kyr BP ca.



8 kyr BP (Lambeck model)

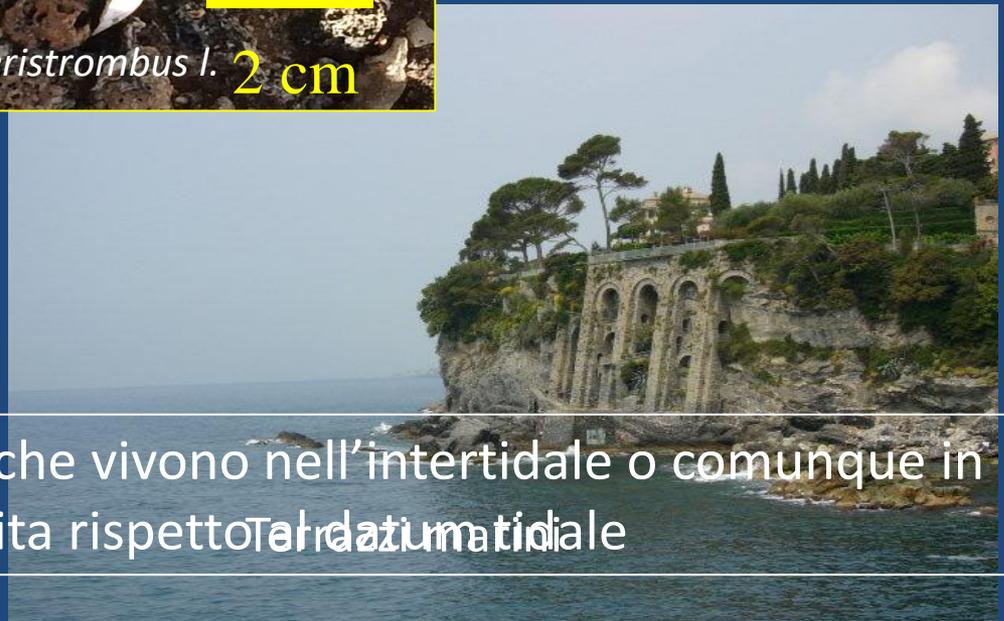
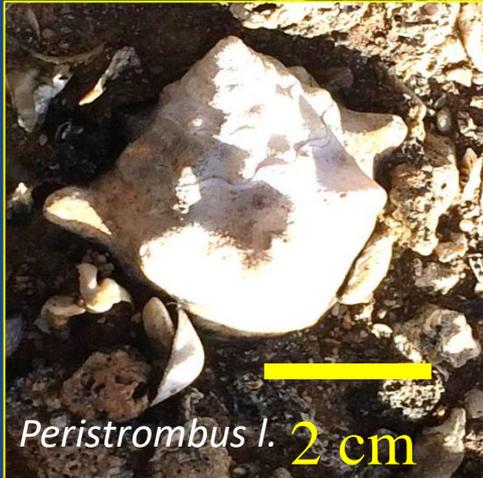


8 kyr BP (SELEN model)

Gli indicatori (*sea-level indicators/markers*)

Un indicatore del paleo-
livello del mare è un
qualsiasi **elemento**
(naturale o antropico)
che si è formato
(o è stato costruito) in
rapporto spaziale diretto

con il livello del mare
Sono indicatori accurati quelli che vivono nell'intertidale o comunque in
posizione definita rispetto al **datum** **marittimo**



Categorie di indicatori



archeologici



geomorfologici



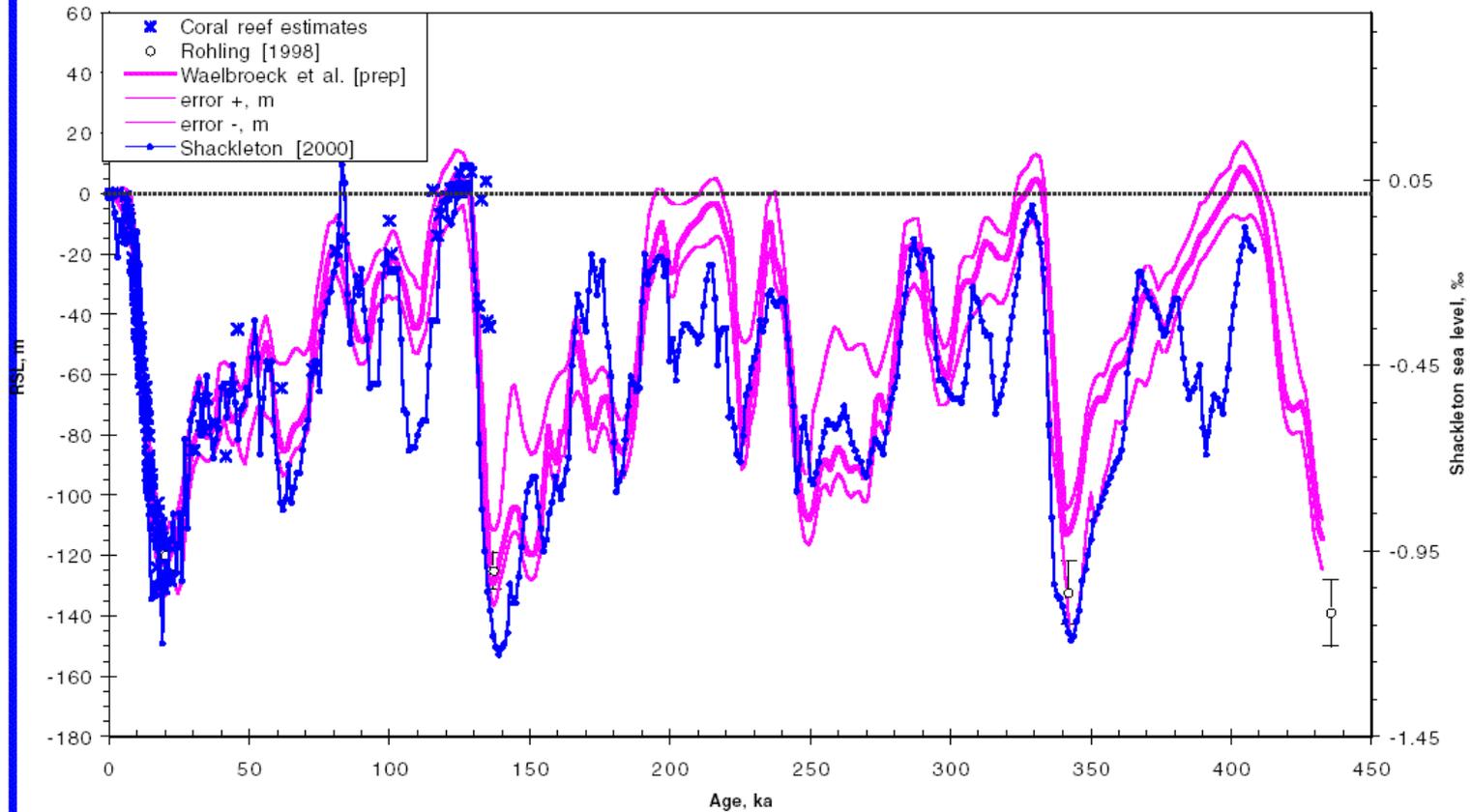
biologici



geologici

sedimentologici

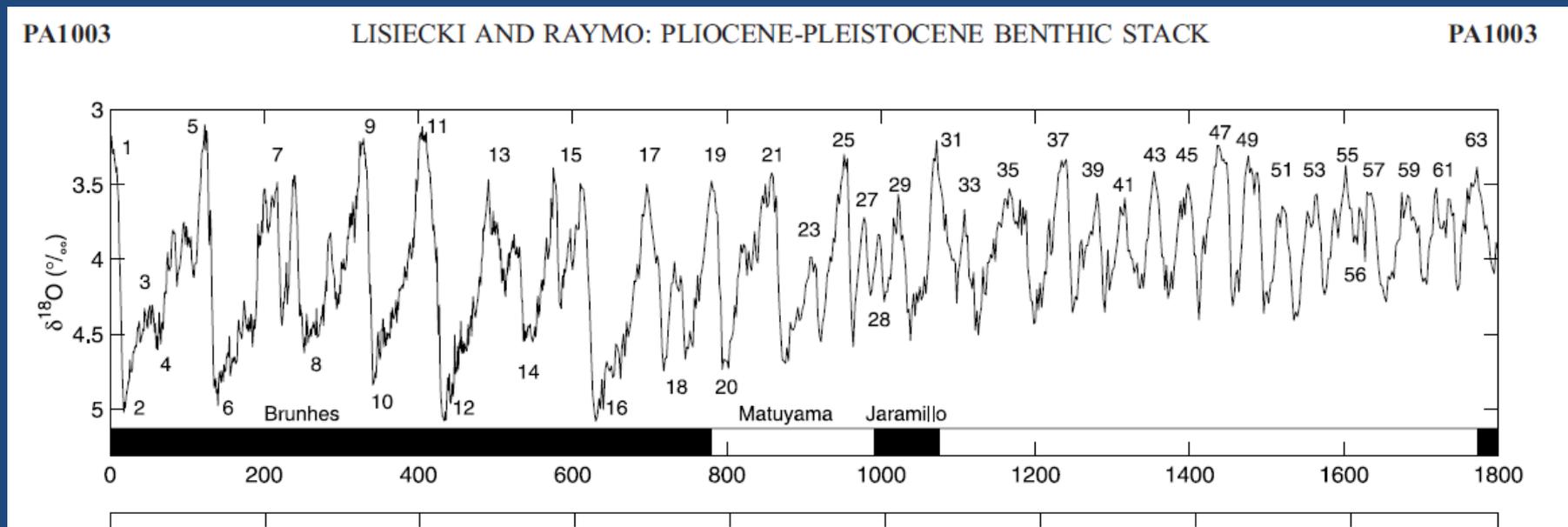
Sea Level Changes Over Four Glacial Cycles



Le variazioni del livello del mare sono solo grossolanamente in relazione con le fluttuazioni climatiche, per tempistica ed entità

Mid-Brunhes event (MBE, 430 ka): aumento di ampiezza dei cicli climatici

Mid-Pleistocene Revolution (MPR, 900 ka): variazione nella periodicità dei cicli climatici da 40 ka a 100 ka circa



Aquaterra Incognita, the lost land beneath the sea (Dobson, 2014)

