

# Dinamica e protezione dei litorali

Prof. Giorgio Fontolan

Dipartimento di Matematica & Geoscienze  
Università degli Studi di Trieste

# Dinamica e protezione dei litorali

---

(Corso di 6 CFU – totale ore: ca. 40 + escursione didattica):

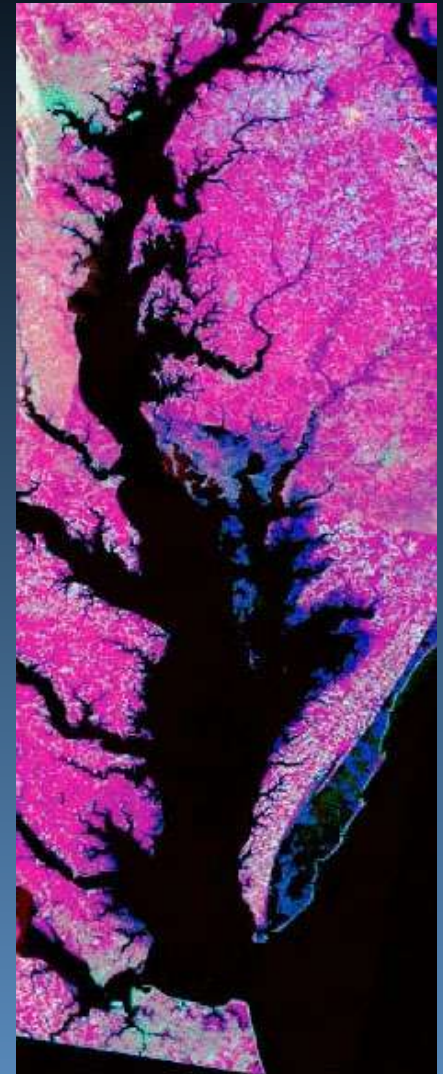
- Introduzione
- Classificazione delle coste, terminologia
- Moto ondoso, processi di trasporto dei sedimenti
- Sedimentologia di base, interpretazione di dati granulometrici
- Il sistema spiaggia: morfologia e processi evolutivi
- Dune costiere
- Le spiagge dominate dalle onde
- Le spiagge dominate dalla marea
- Sistemi di isole barriera, lagune e bocche tidali
- Spiagge e baie a controllo strutturale (coste crenulate)
- Criteri di difesa delle coste

Escursione didattica lungo le coste del Veneto orientale

Spiagge naturali, sistemi difensivi rigidi, ripascimento artificiale, dune, bocche tidali...



# Classificazione delle coste



Come tutte le classificazioni non esiste ancora una distinzione esauriente che sia universalmente accettata. La maggiore difficoltà è data dai diversi approcci impiegati, che tengono in considerazione fattori diversi quali:

- 1) la forma (morfologia) della superficie terrestre (sopra o sotto il livello medio del mare)
- 2) il movimento relativo del mare rispetto alla costa e viceversa
- 3) gli effetti dei processi marini sulla modificazione della costa
- 4) l'influenza climatica sui processi e sulle forme
- 5) l'età e la durata dei materiali costieri

Ovviamente anche la scala del fenomeno può essere diversa, includendo osservazioni a carattere: **globale, continentale, regionale, locale**

Le categorie di fenomeni studiati nelle classificazioni costiere possono essere distinte in termini di:

- 1) processi
- 2) materiali
- 3) forme
- 4) età o stadio di sviluppo
- 5) ambiente (es. regioni ecologiche, sistemi terrestri o zone morfodinamiche)

## Esempi di classificazione legate ai processi

- Province geotettoniche costiere
  - Coste di tipo “Atlantico” e “Pacifico” (Suess, 1888)
  - Coste di regioni stabili e mobili (Cotton, 1918)
  - Province geotettoniche (Fairbridge, 1992)
- Variazioni del livello del mare
  - Coste di emersione e sommersione (Gulliver, 1889)
  - Coste di emersione, sommersione e neutre (Johnson, 1919)
- Genesi terrestre e marina
  - Coste primarie e secondarie (Shepard, 1937, 1948, 1973)

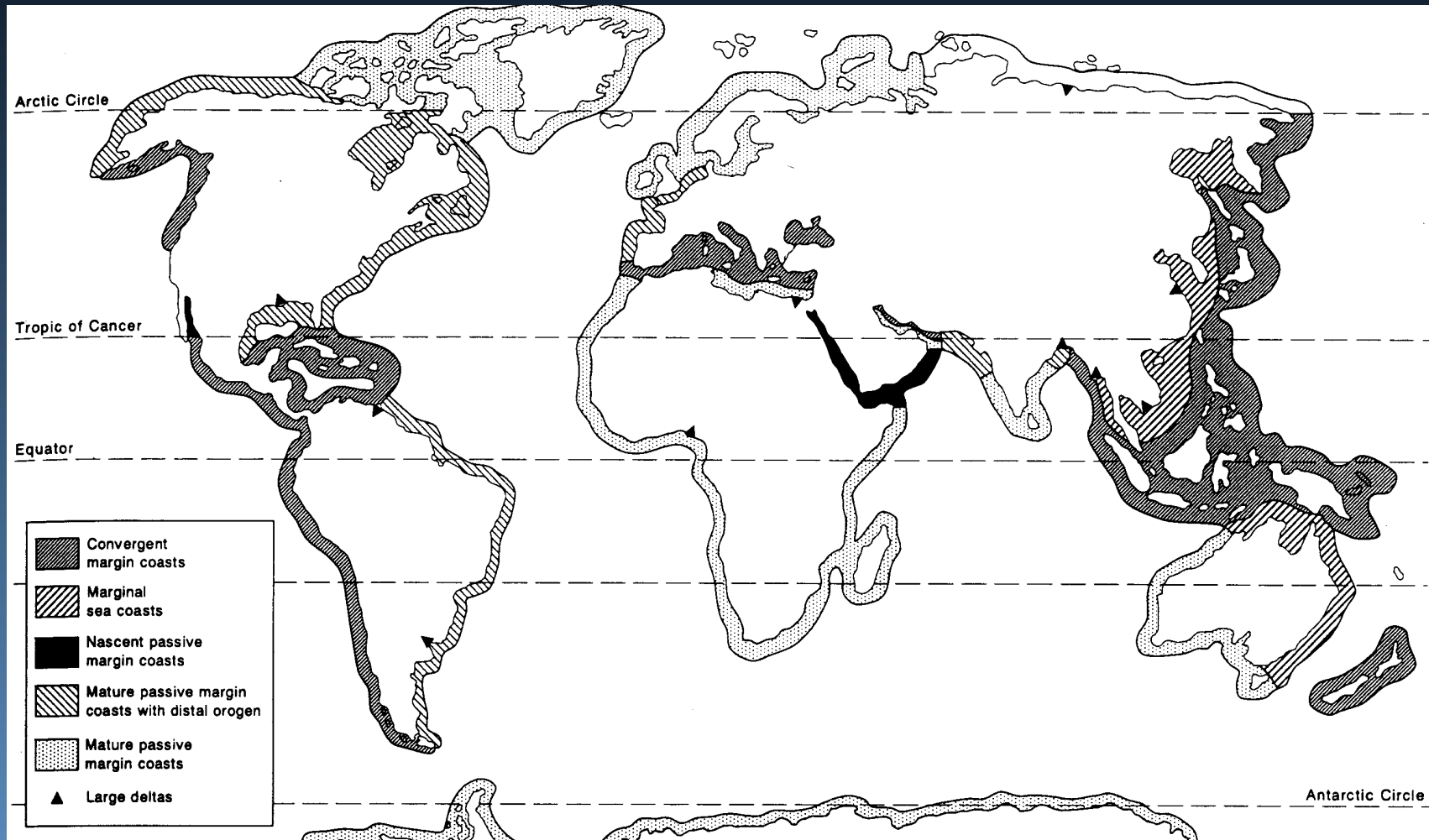
## Esempi di Classificazioni legate ai materiali

- Materiali e configurazione costiera (Owens, 1994)
- Materiali, esposizione, configurazione (South Florida Regional Planning Council, 1984)  
Classificazioni specializzate con finalità legate alla sensibilità allo sversamento da idrocarburi

# Fattori che influenzano le coste

| Fattore                 | Grande scala                   | Media scala                           | Piccola scala              |
|-------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| <i>Geologia</i>         | Tettonica delle placche        | Rilievo e struttura                   | Materiali                  |
| <i>Livello del mare</i> | Cambiamenti a lungo termine    | Cambiamenti secolari-decennali        | Cicli tidali e stagionali  |
| <i>Oceanografia</i>     | Contesto oceanografico globale | Eventi di tempesta                    | Onde e maree               |
| <i>Ecologia</i>         | Contesti biogeografici globali | Sviluppo e successione delle comunità | Funzionamento ecosistemico |

# Il contesto tettonico globale e le coste



## Caratteristiche delle coste lungo margini convergenti e passivi

|                   | Convergente                                | Passivo                            |
|-------------------|--|------------------------------------|
| Età               | giovane (1 – 10s Ma)                       | vecchio (100s Ma)                  |
| Rilievo           | ripido, montagnoso                         | basso gradiente, piane costiere    |
| Continental shelf | stretto                                    | ampio, basso angolo                |
| Tettonica         | attiva                                     | stabile                            |
| Sedimenti         | da fini a grossi,<br>scarsi apporti solidi | fini,<br>abbondanti apporti solidi |
| Forme costiere    | rocciose,<br>poche spiagge                 | molte barriere e delta             |



# Il contesto oceanografico

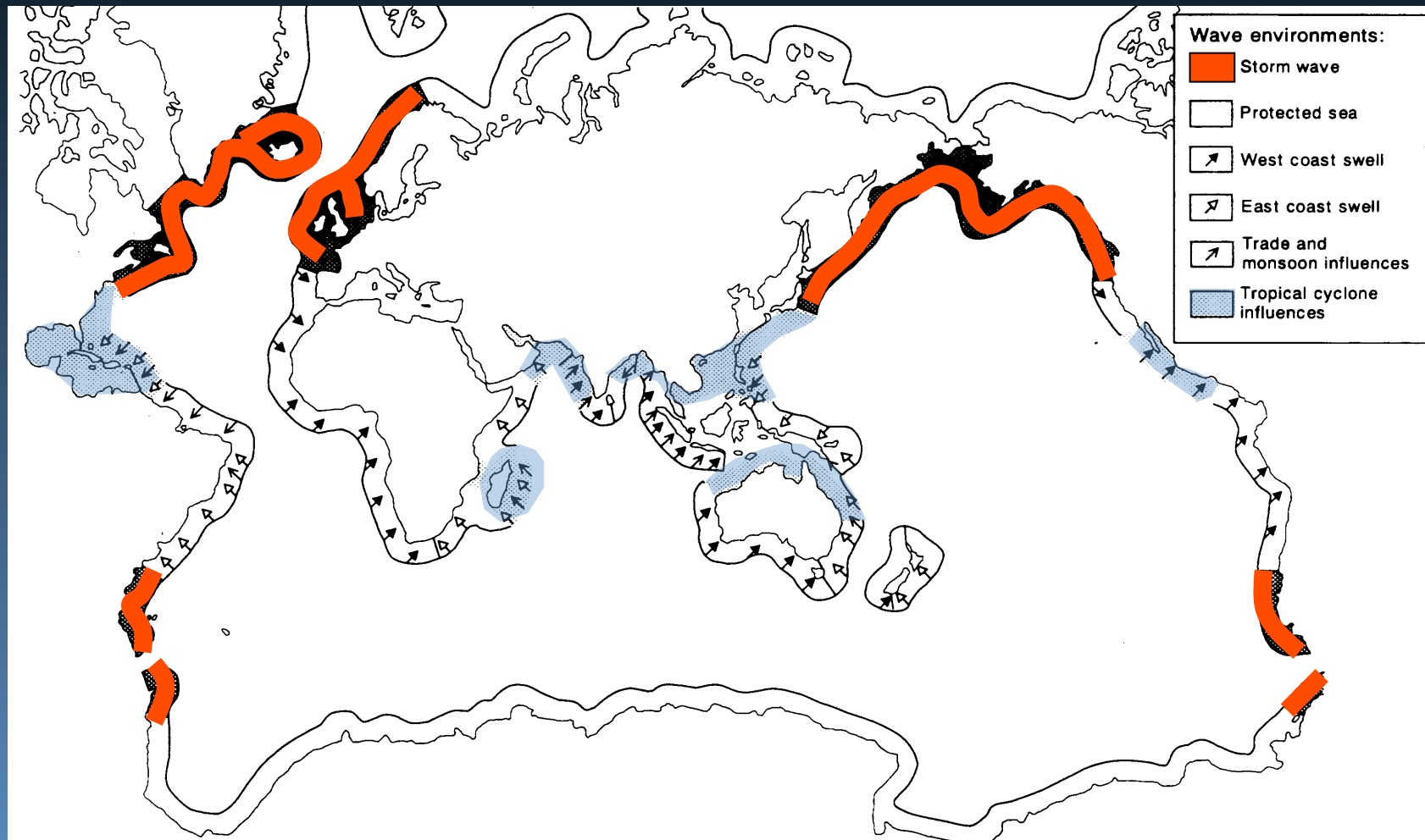
La geomorfologia costiera è influenzata dall'ubicazione in relazione a:

- Circolazione atmosferica globale
- Circolazione oceanografica globale

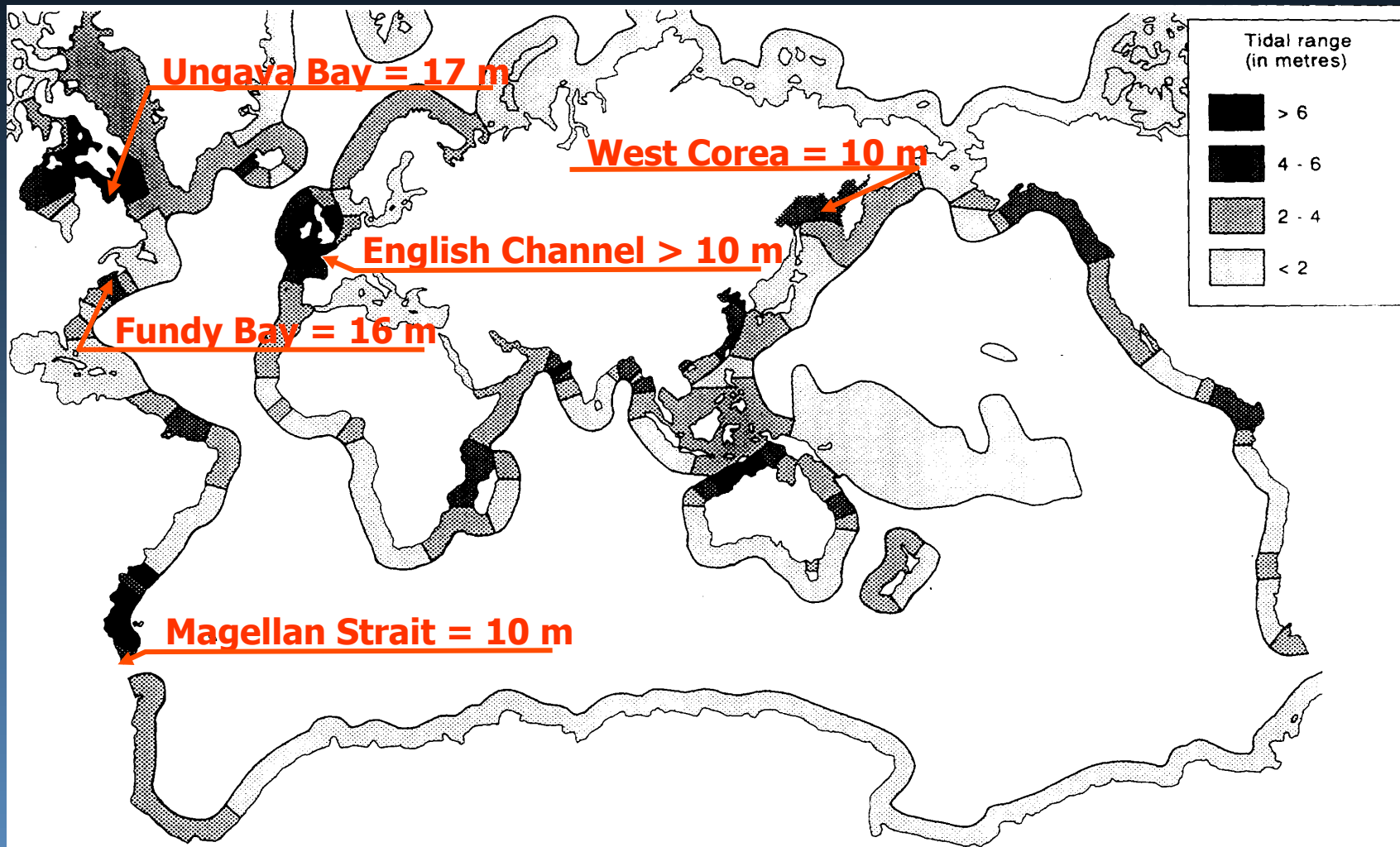
A loro volta, quest'ultimi influenzano:

- correnti
- clima del moto ondoso
- regime di marea
- ecologia costiera e marina

# Clima di moto ondoso a scala globale



# Regimi tidali a scala globale (maree sizigiali)



**Proposte di classificazione risalgono sin dal 1888.**

**Le prime sono classificazioni semplici, prevalentemente di tipo morfologico (*forme*), basate ad esempio sulla elementare distinzione in:**

- **Coste alte**
- **Coste basse**

**(Martonne, 1909)**

**che ancor oggi è una distinzione piuttosto diffusa nel linguaggio comune**



Un approccio “genetico” caratterizza le distinzioni proposte da Gulliver (1899), poi riprese da Johnson (1919), rappresentative delle nuove idee che stavano maturando sulle variazioni climatiche del Quaternario:

- **COSTE DI SOMMERSIONE**
- **COSTE DI EMERSIONE**

|  |                                 |
|--|---------------------------------|
| <b>Coste di sommersione</b>                              | Rias                            |
|  | Fiordi                          |
| <b>Coste di emersione</b>                                | (con isole barriera)            |
| <b>Coste neutre</b>                                      | Delta                           |
|  | Coste delle pianure alluvionali |
|  | Coste delle pianure proglaciali |
|  | Coste vulcaniche                |
|  | Coste delle barriere coralline  |
|  | Coste di faglia                 |
| <b>Coste composite:</b> combinazione dei tipi precedenti |                                 |

Alcune di queste categorie sono ancora di largo uso, soprattutto nell’ identificare ben definiti paesaggi costieri.

L’ uso rigoroso di questa classificazione porterebbe tuttavia un largo impiego del termine “coste composite”, poiché molti casi non trovano corrispondenza nelle categorie elementari



Questi concetti si ritrovano anche nelle diverse classificazioni proposte da Shepard, messe a punto tra il 1937 ed il 1976, nelle quali viene abbandonata la dicotomia emersione-sommersione, sostituita dalla distinzione tra:

- Coste primarie
- Coste secondarie

## **I. Coste Primarie**

Dominanza di forme evolutesi in ambiente non costiero o, comunque, per la prevalenza di agenti morfogenetici diversi da quelli marini

## **II. Coste Secondarie**

Dominanza di agenti morfogenetici marini e di modellamento operato dal moto ondoso



**Coste primarie – agenti non marini**



**Coste secondarie – agenti marini**



# Classificazione delle coste (Shepard, 1976)

## I. Coste Primarie

### I A – Coste di erosione terrestre

1. Rias (valli fluviali sommerse)
2. Dendritiche (c.s., es. Chesapeake)
3. Trellis (fiordi e solchi glaciali sommersi)
4. Topografia carsica sommersa

### I B – Coste di deposizione subaerea

1. Coste di deposizione fluviale
2. Coste deltaiche
3. Coste deltaiche composite
4. C.s. rettificata dal moto ondoso
5. Coste di deposizione glaciale
6. Coste di deposizione eolica
7. Coste da frana

### I C – Coste vulcaniche

1. Lava-flow
2. Tephra
3. Collasso o esplosione vulcanica

### I D – Coste tettoniche

1. Scarpate di faglia
2. Coste a pieghe
3. Estrusioni sedimentarie (domi)

### I E – Coste ghiacciate

## II. Coste Secondarie

### II A – Coste di erosione marina

1. Falesie rettificata dal moto ondoso
2. Rese irregolari dall'erosione delle onde

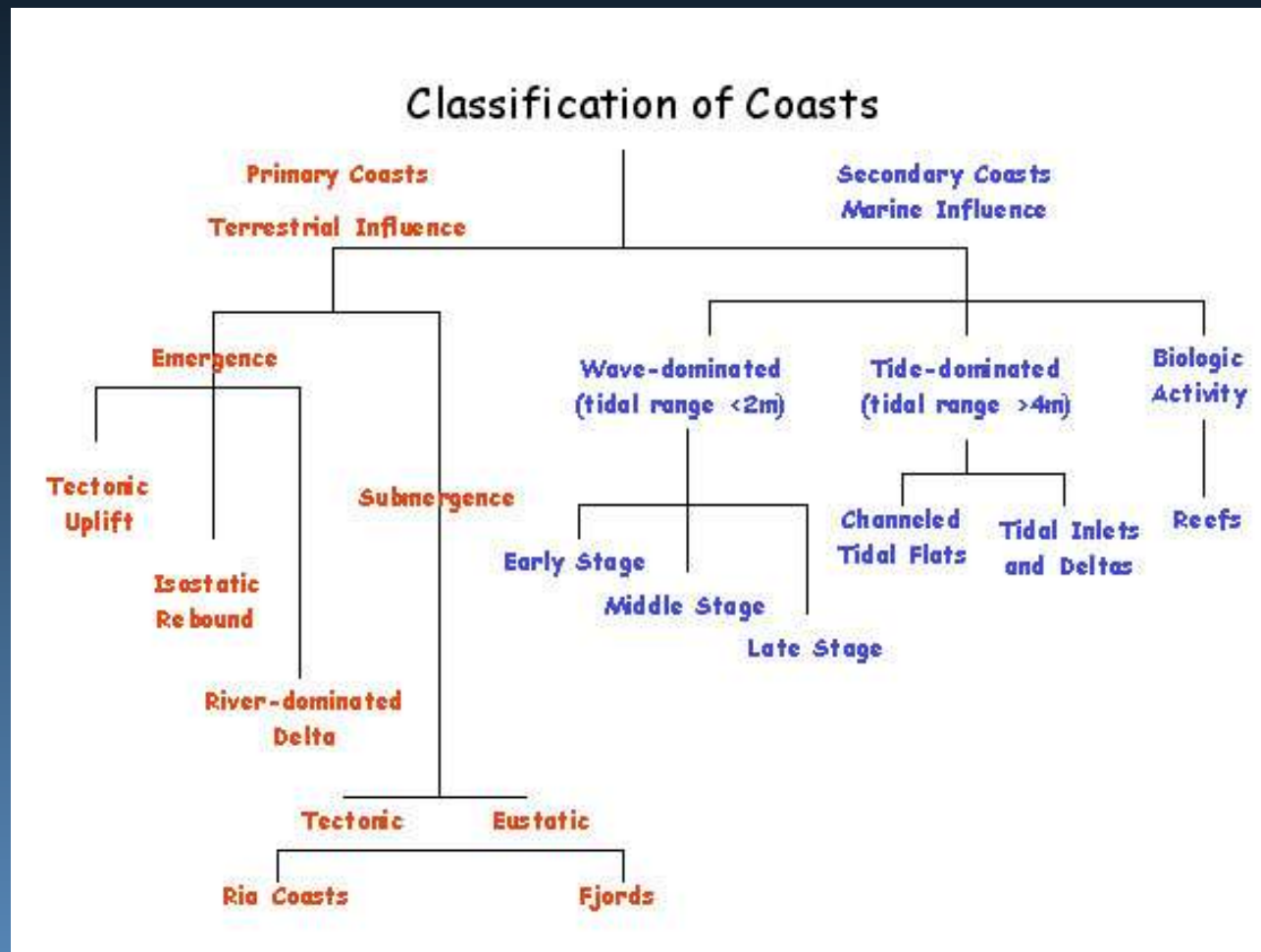
### II B – Coste di deposizione marina

1. Coste a barriera
2. Promontori cuspidati
3. Spiagge
4. Piane di fango e barene

### II C – Coste biocostruite

1. Barriere coralline
2. Barriere a serpulidi
3. Barriere ad ostriche
4. Coste a mangrovie
5. Coste ad alofite

# Classificazione composita (modificata da Shepard)



**Coste Primarie (Influenza terrestre)**

**Coste di emersione**

**Sollevamento tettonico**





Coste di emersione (sollevamento tettonico): piattaforma di abrasione modellata dal moto ondoso e innalzata dal sollevamento tettonico (North Island, Nuova Zelanda)



Coste di emersione: piattaforma di abrasione sollevata (raised wave-cut platforms) e falesia rocciosa calcarea Pleistocenica (Australia)



The Flats Fe-dolomite at Broad Bench, Kimmeridge, 2 Jan 05. *Ian West (c) 2005.*  
(view towards SE)





Coste in sollevamento: terrazzi marini rialzati tettonicamente (Pleistocene). (South Island, New Zealand)





Coste in sollevamento: terrazzo marino sollevato tettonicamente (Pleistocene-Attuale). Sono evidenti almeno due ordini di terrazzi. La valle centrale è impostata su una faglia (Wellington, New Zealand)





Coste in sollevamento: terrazzo marino emerso (piattaforma di abrasione - "wave-cut platform") a sinistra, lungo un tratto costiero tettonicamente attivo. (San Simeon, California)



Caratteristica costa a scarpata di faglia vicino a Point Reyes, California.

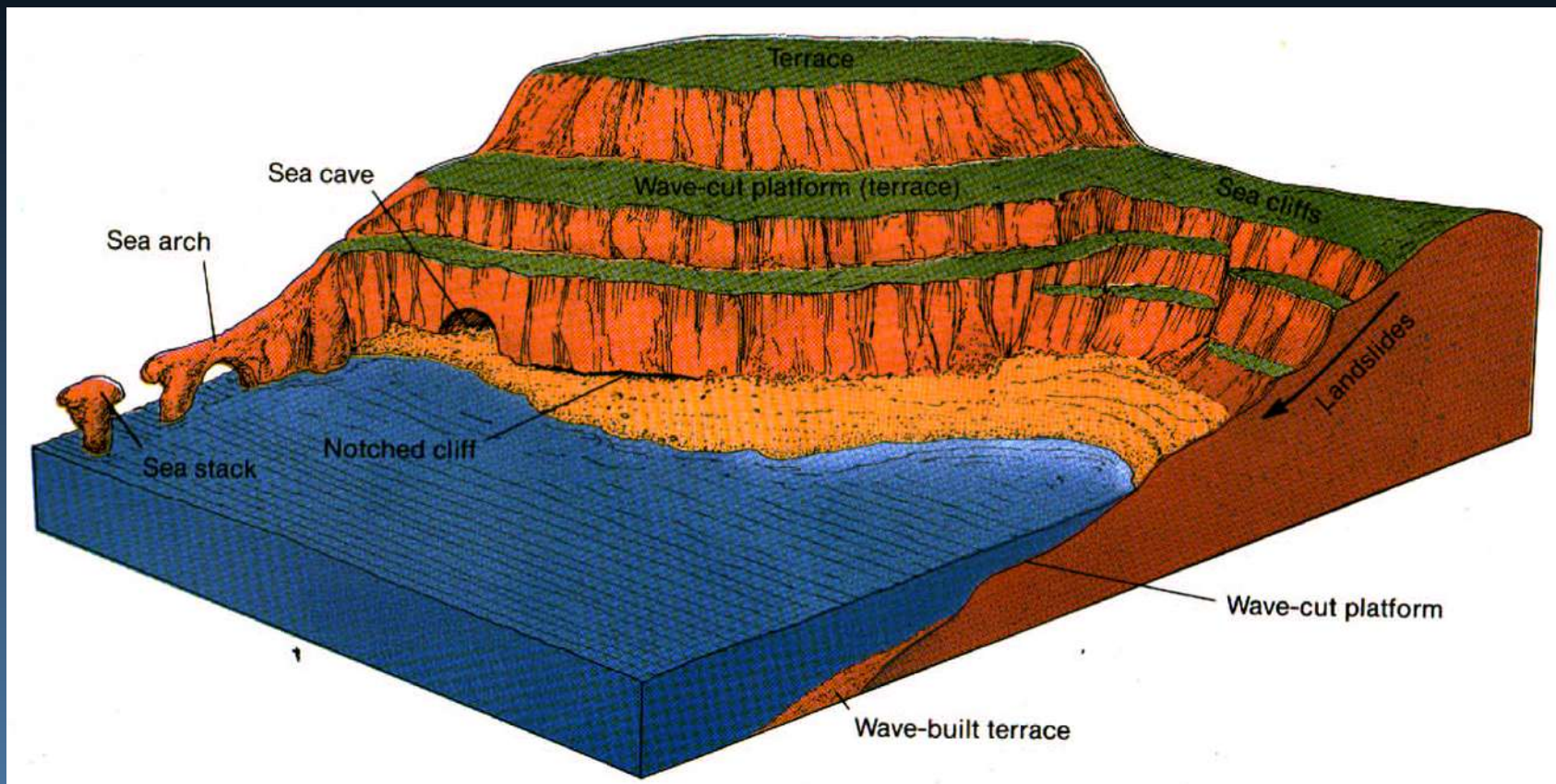


Figure 16 – 7. Characteristic coastal erosional landforms.



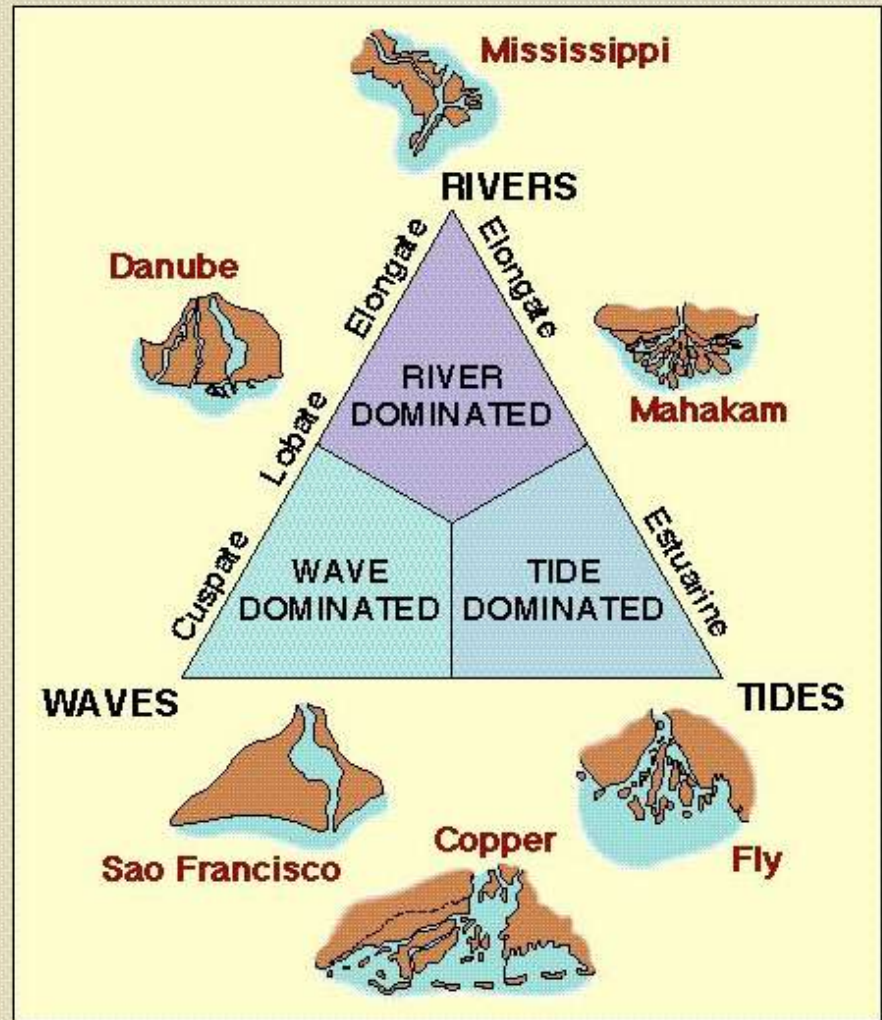


**Coste primarie  
emersione**

**River-dominated Delta**



## Classification of River Deltas

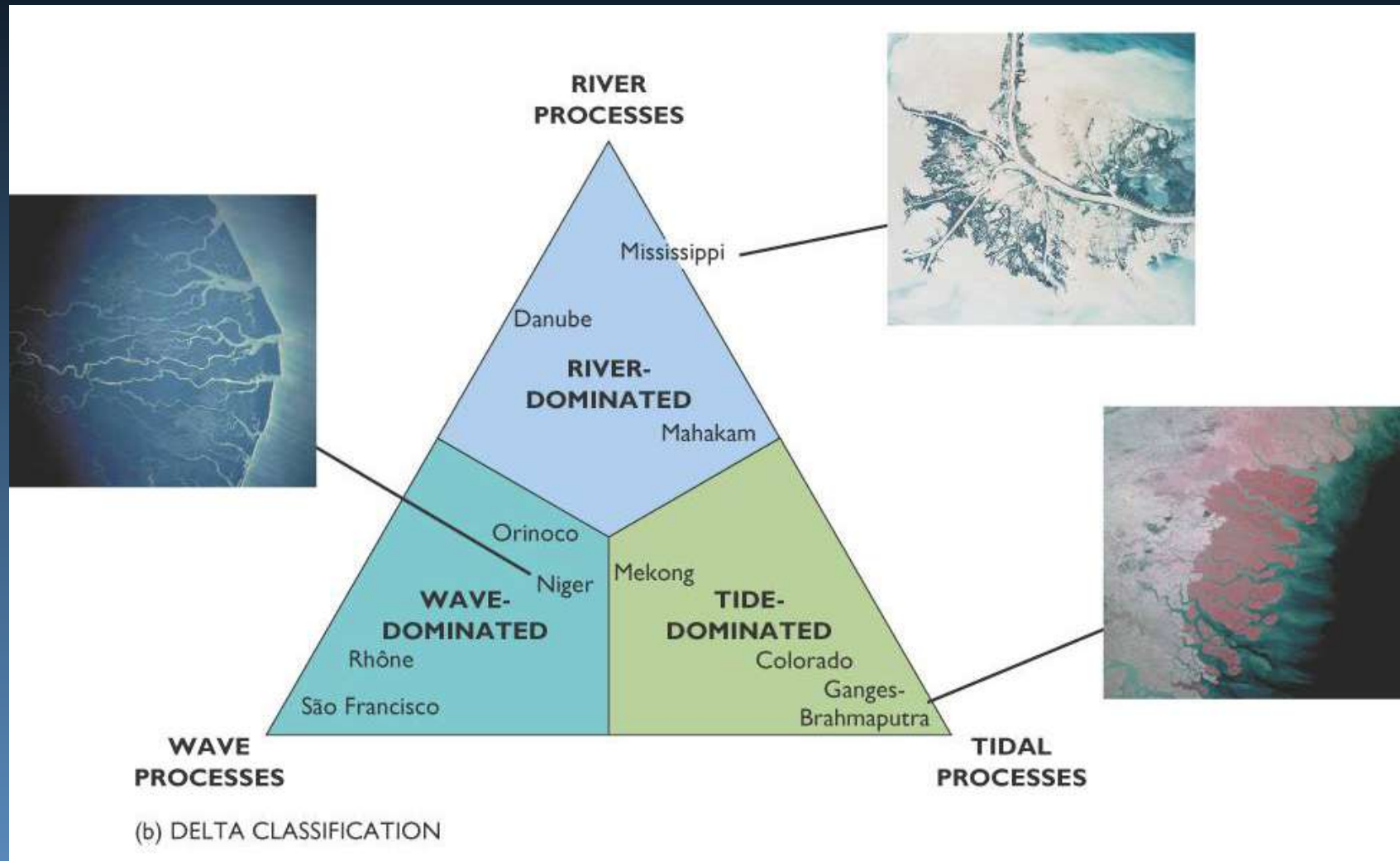


Il diagramma triangolare di Galloway classifica i delta fluviali sulla base dell'influenza dei tre maggiori fattori di controllo: il fiume, le onde e la marea.

Ogni delta riflette il bilancio tra tasso di accumulo sedimentario alla foce e i meccanismi di dispersione.

# DELTA

Input sedimentari > tasso d'erosione





Il delta a "zampa d'uccello" del Mississippi in regime di magra autunnale. Si noti la grande quantità di aree piatte di overbanks esposte nella zona delle bocche del delta e le ristrette e ben definite plumes di acque fangose che si espandono nel Golfo del Messico. Questo è il classico esempio di un **river-dominated delta** in una regione con elevati input sedimentari, regime microtidale e scarsa influenza del moto ondoso.

**Coste primarie**

**Sommersione**

**Eustatismo**

**Coste a Rias (estuari)**

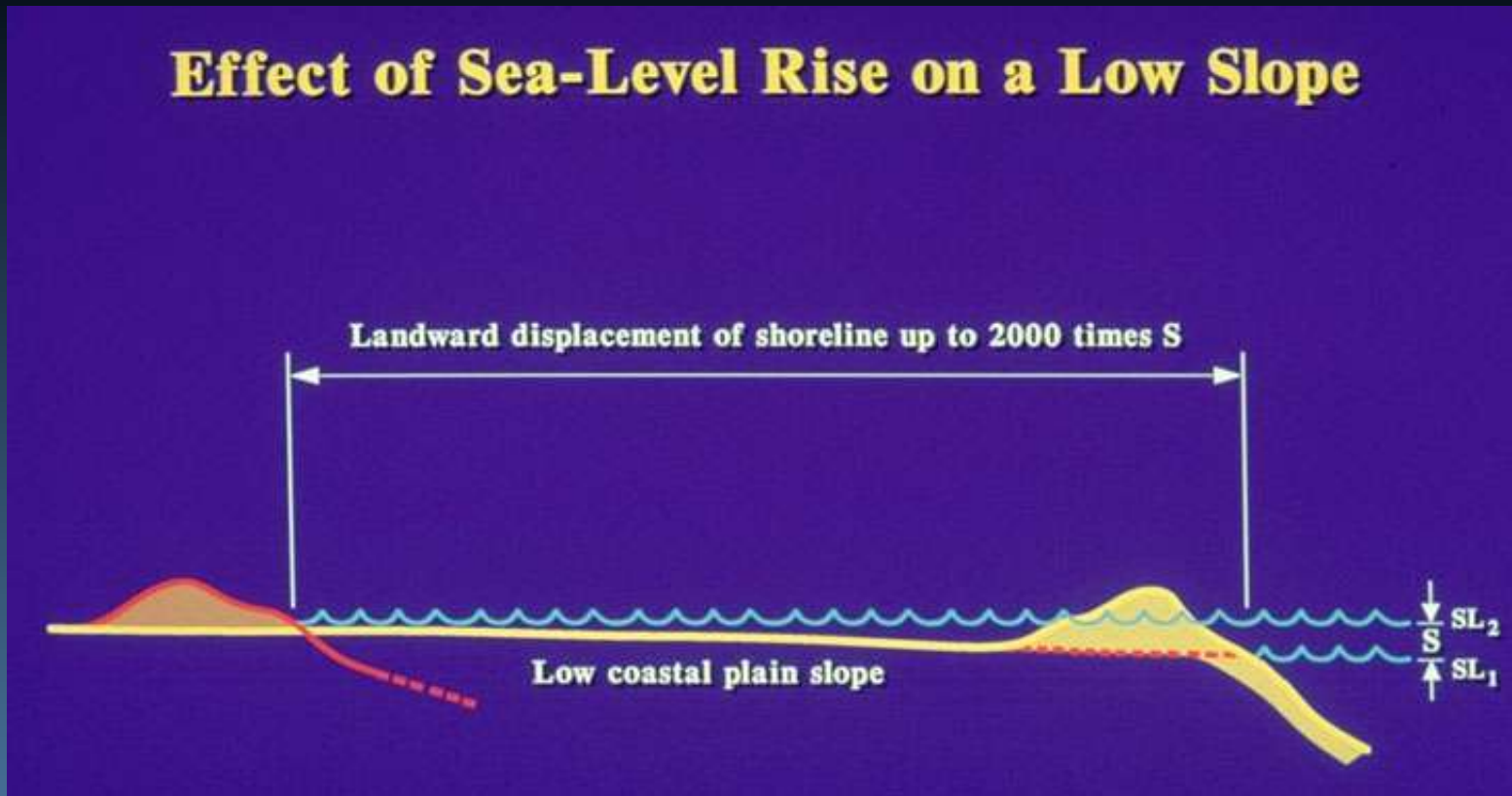


## Changing Sea Levels and Coastlines

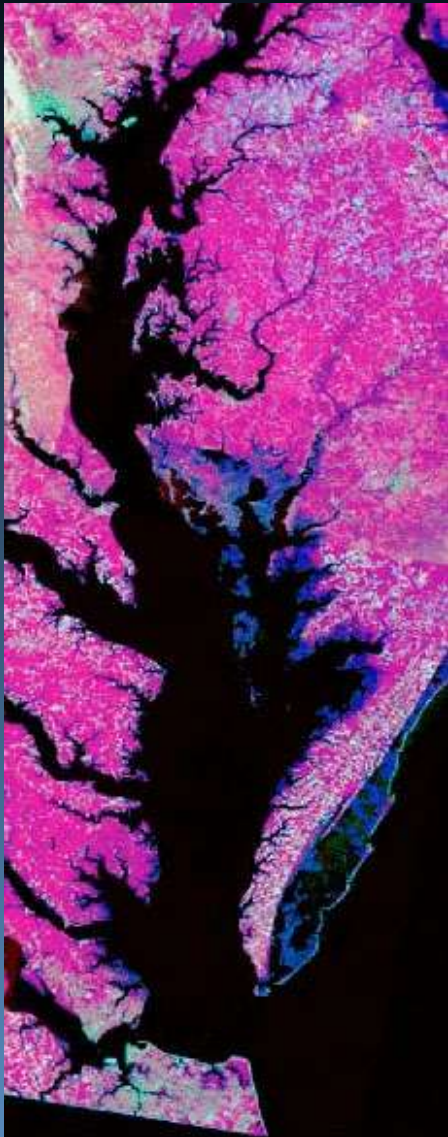


A causa dei cambiamenti di livello del mare degli ultimi 18.000 anni, la linea di costa del settore orientale degli USA ha migrato progressivamente a partire da una posizione 200 km più verso mare, lasciando esposta gran parte della piattaforma continentale.

## Effect of Sea-Level Rise on a Low Slope



The effect of sea-level rise on shoreline retreat is also dependent on the slope of the surface over which the rise will occur. The lower Coastal Plain slope of North Carolina averages 1:2000, theoretically providing the potential for a kilometer of shoreline retreat from a 0.5 m sea-level rise. Coastal Plain slopes as low as 1: 10,000 are found in northeastern North Carolina and south Florida, which makes these areas particularly susceptible to sea-level rise.



**Esempio di vecchia valle fluviale sommersa:**

## **Chesapeake Bay**

**il più grande estuario degli USA**

Immagine Landsat TM nel campo visibile-infrarosso:

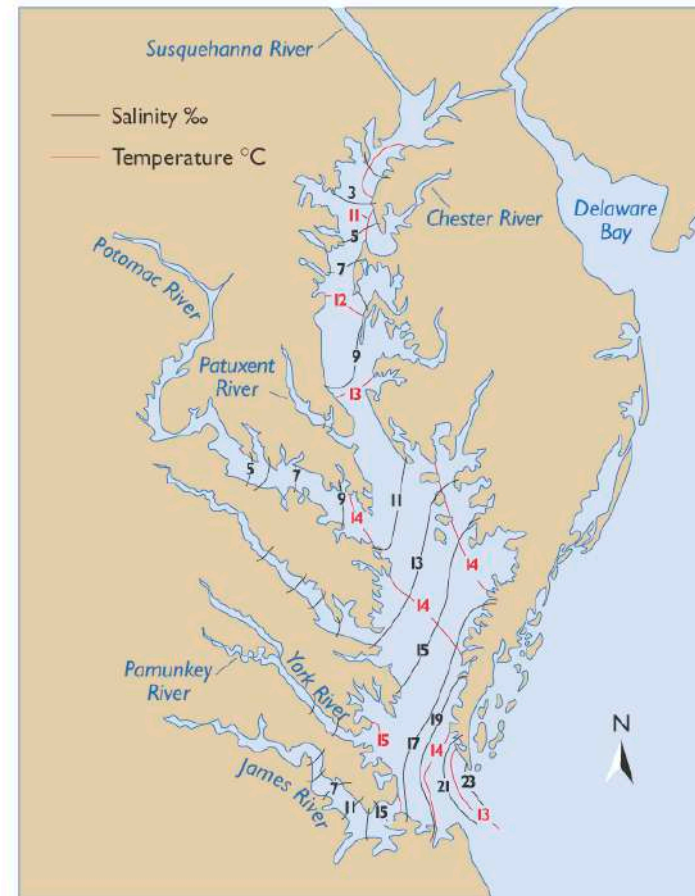
Le aree rosse evidenziano le porzioni altamente vegetate; il verde grigio le aree urbane; le zone dall'azzurro al bianco indicano un suolo riflettente, in prevalenza campi coltivati; le zone di marsh (barene) sono blu; in nero le superfici marine.



L'ingressione marina  
entro le valli fluviali può  
creare ambienti paralici,  
in cui persiste una forte  
influenza delle acque di  
origine continentale →  
ESTUARI



Salinity and Temperature of Chesapeake Bay.



(b) SALINITY AND TEMPERATURE OF CHESAPEAKE BAY





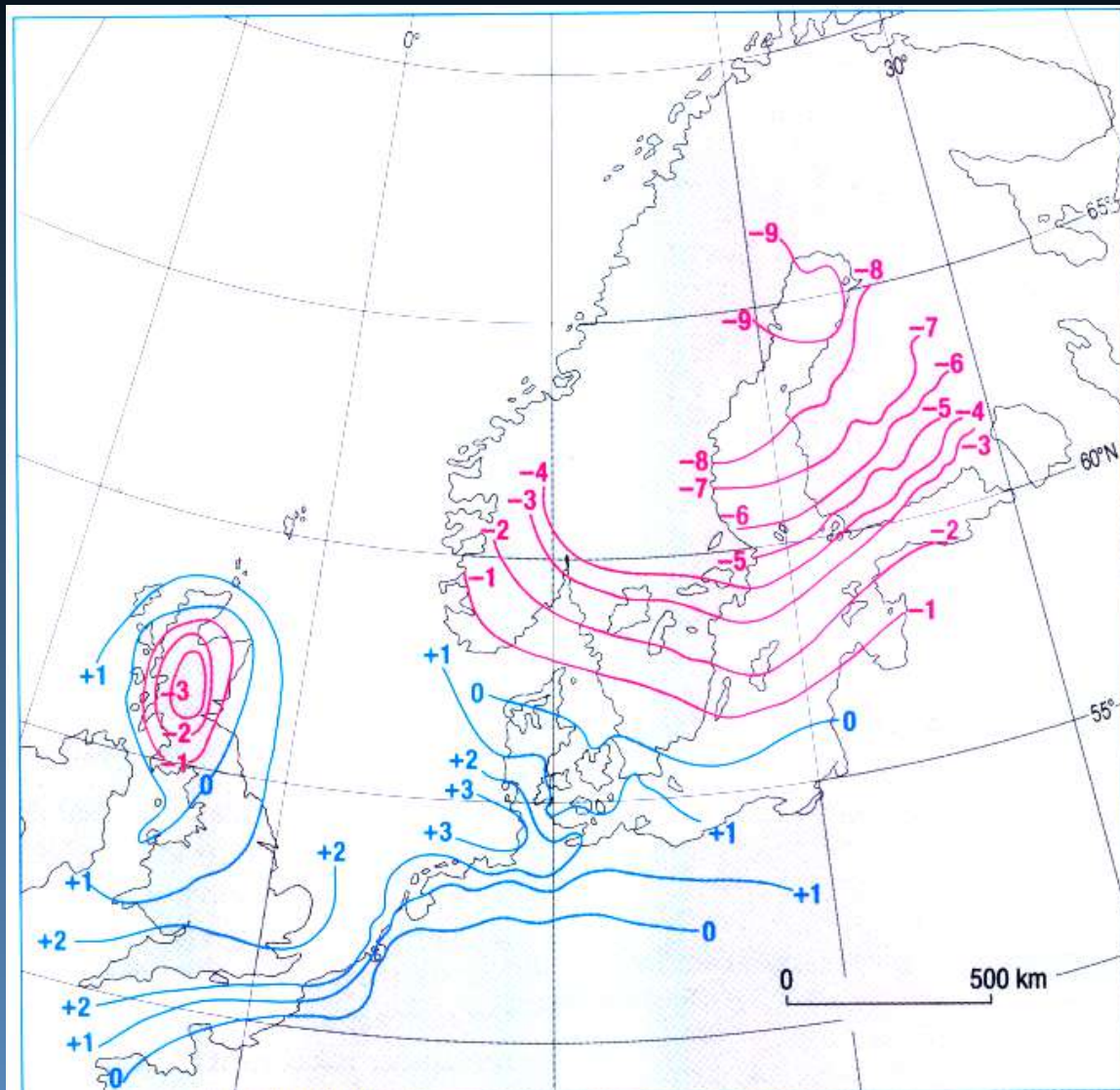
Space Shuttle (Dic 1988). A classic example of estuaries formed along a drowned shoreline. Rising sea levels have inundated old river and stream valleys in this area producing complex estuaries with a branching pattern inherited from the rivers. The high biological fertility of these environments in which tidal currents mix marine and ocean waters makes their protection imperative. Unfortunately these buffer zones between land and sea, and especially this example, are also the ones most immediately affected by input of sediment and pollutants from human activities.

**Coste primarie**

**Sommersione**

**Eustatismo**

**Fiordi (valli glaciali sommerse)**



La penisola scandinava presenta una estrema variazione del livello del mare (in mm/anno).

I valori in rosso (negativi) si riferiscono alla porzione in cui è massima la componente di rebound isostatico, per perdita del carico dell' antica calotta glaciale. **Lungo la costa prevalgono le morfologie di emersione.**

I valori in blu (positivi) indicano una forte componente eustatica (innalzamento assoluto del mare). **Lungo la costa prevalgono le morfologie di sommersione.**

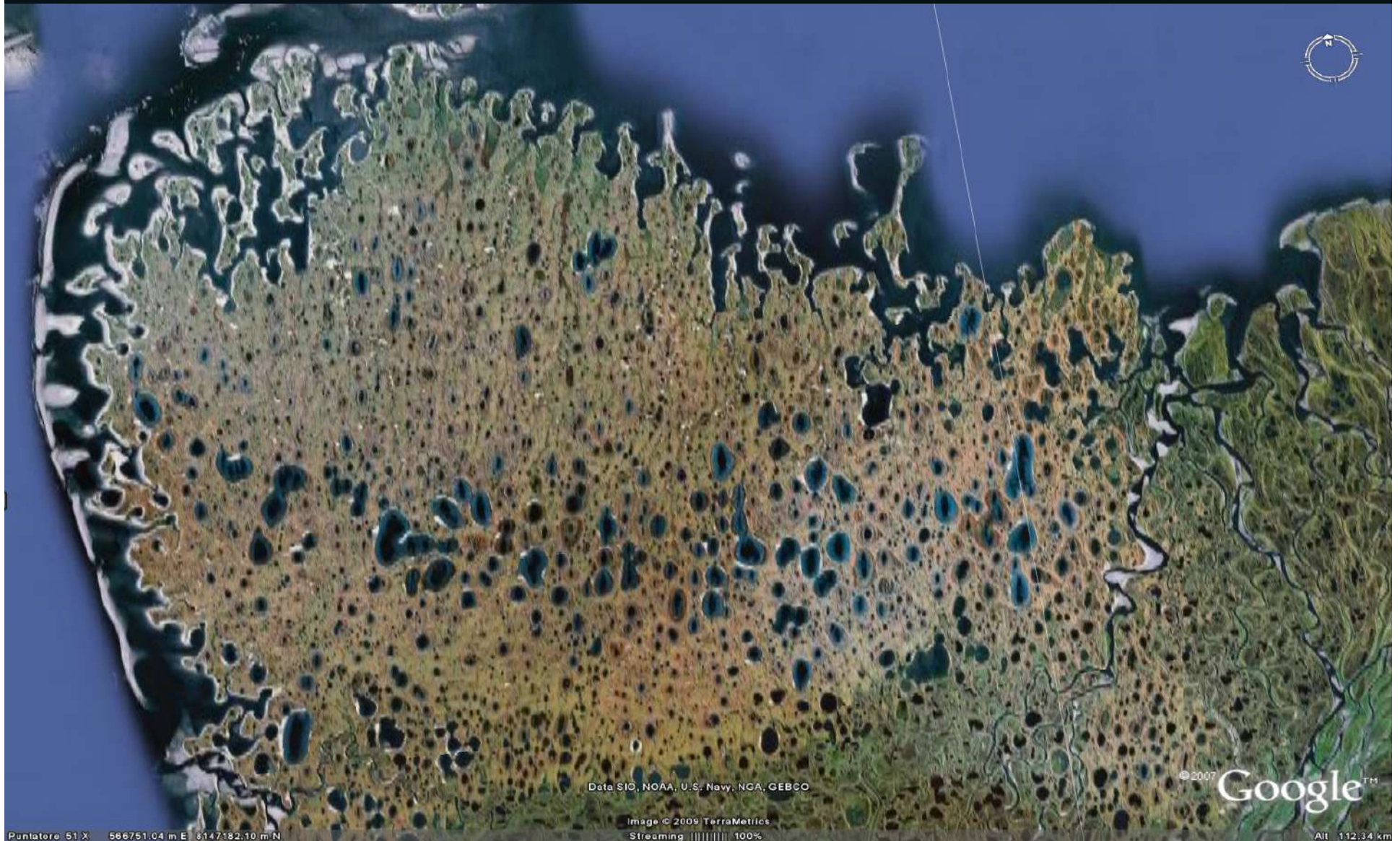




**(South Island, New Zealand)**



# Coste primarie: coste glaciare



Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO

© 2007 Google™

Image © 2009 TerraMetrics  
Streaming ||||| 100%

Puntatore 51 X 566751.04 m E 8147182.10 m N

Alt 112.34 m

**Siberia**



## Coste primarie: coste glciate CANADA



**Coste secondarie**

**(Influenza Marina)**

**Wave-dominated**

## Evoluzione di una costa



1984



1987



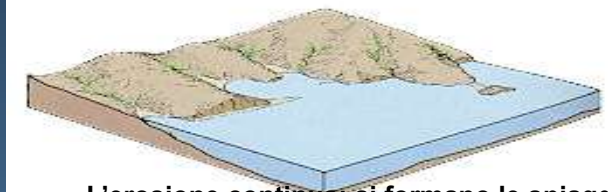
1992



trasgressione



Erosione delle onde su scogli e penisole



L'erosione continua: si formano le spiagge



Le isole si erodono, le spiagge si allargano, si formano le baie



Una costa rettificata

Le onde tendono ad appiattare le forme ....



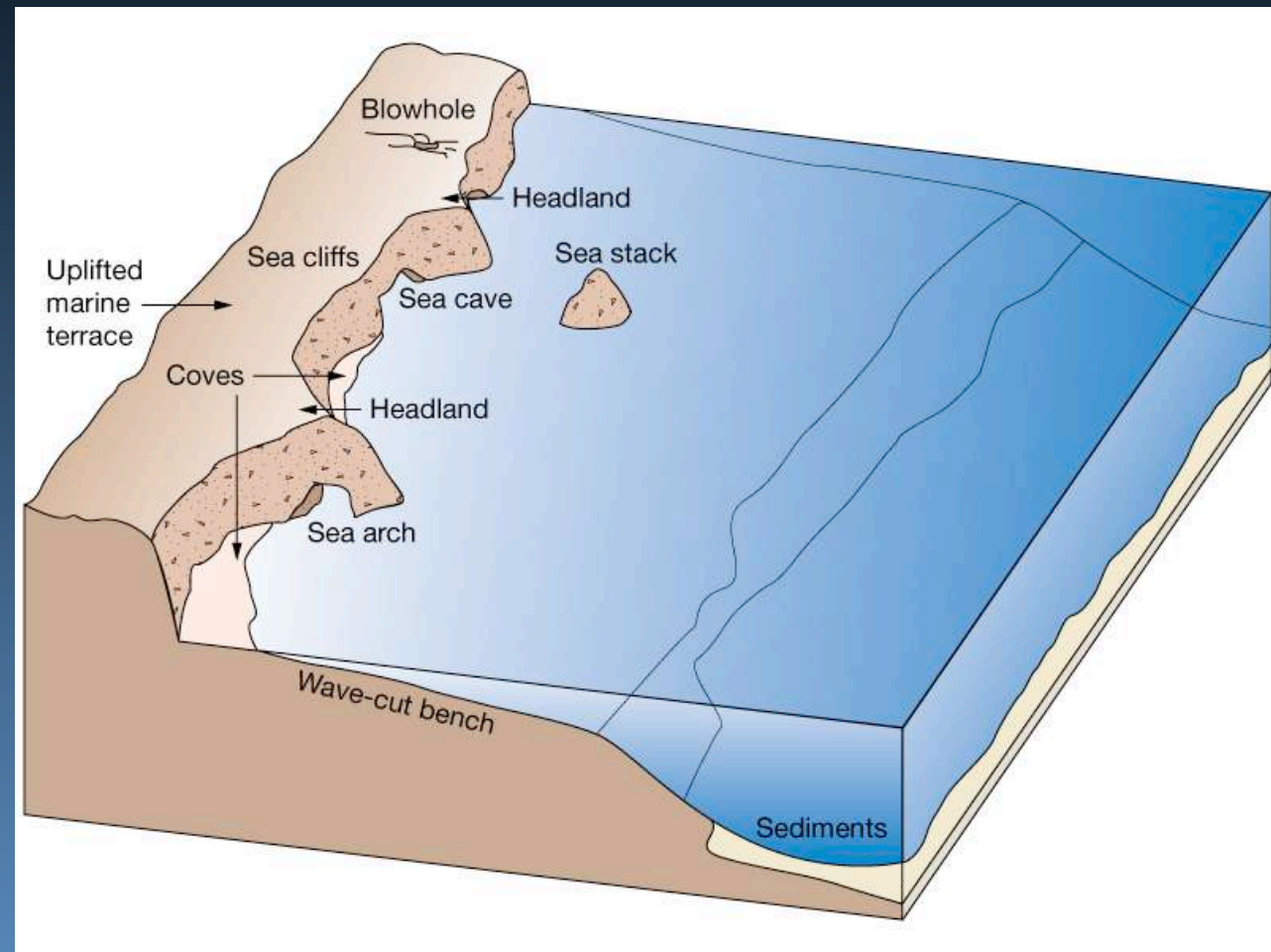
**Coste secondarie (Influenza Marina)**

**Wave-dominated**

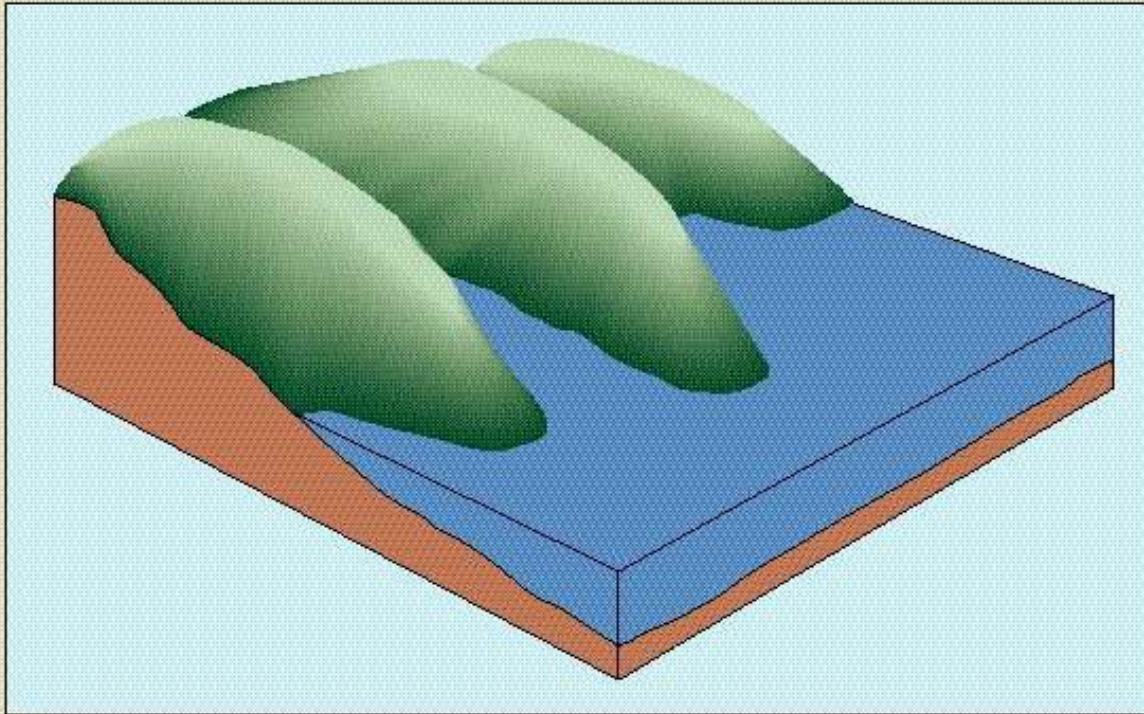
**Stadio iniziale ("giovanile")**

## Nello stadio giovanile prevalgono le forme di erosione.....

- Promontori
- Falesie con solchi
- Grotte marine
- Archi
- Scogli
- Piattaforme di abrasione



## Coastal Evolution – Stage I "Youth"



Block diagram showing the initial ("youthful") stage of evolution of a wave-erosion (secondary) coastline. Hilly terrain has been flooded by a relative sea-level rise and little or no modification of the complexly embayed coastline has yet occurred. The lack of modification may result from extreme hardness of the underlying rocks or because little time has passed since the flooding.



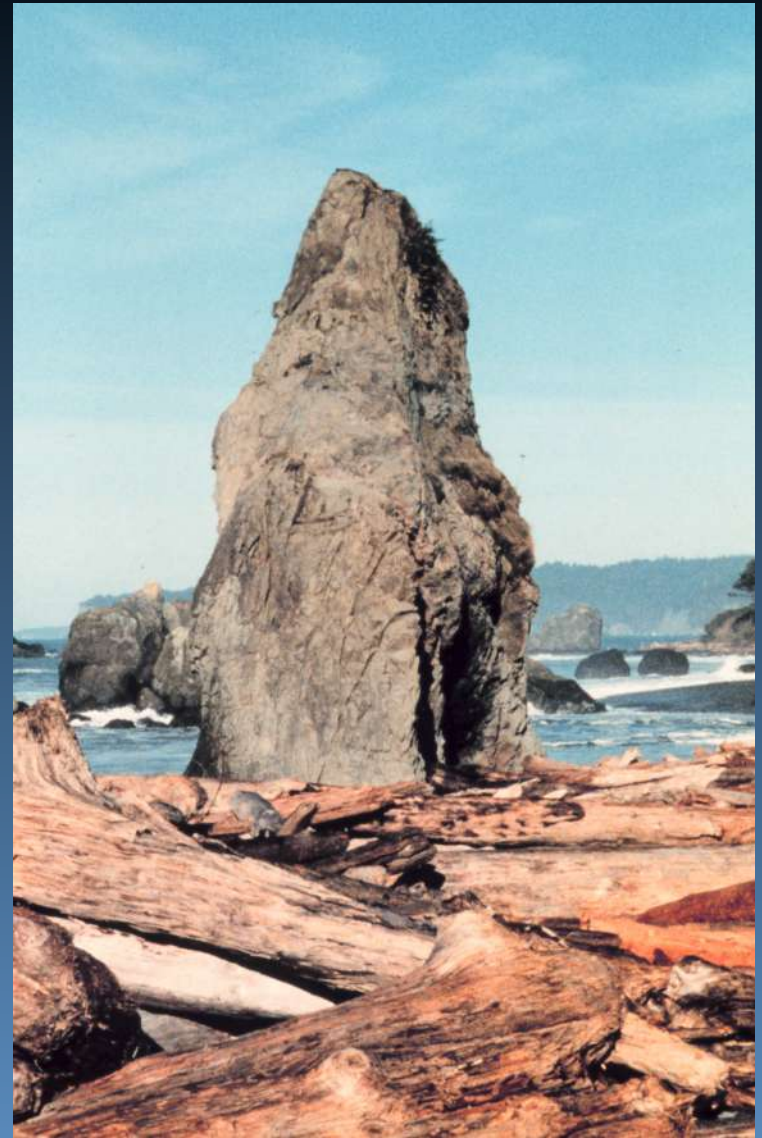


Youthful coastlines: rocky coastline on an active continental margin. These folded rocks form high cliffs with only small pocket beaches. The extensive offshore rocks (stacks) and irregular underwater topography greatly retard formation of longshore currents. (Point Reyes, CA)





Ground view of numerous isolated sea stacks along a cliffed, rocky coastline. Large waves from the Southern Ocean have eroded fractured sandstones into a series of headlands and isolated stacks (remnants of headlands). Although clearly vulnerable to wave erosion, such stacks can survive for tens to hundreds of years. (Victoria, South Australia)









Youthful to intermediate coastlines: a cliffed coastline in very soft sediments. The high ridges are Pleistocene glacial moraines composed of unconsolidated sand and gravel. Coastal erosion rates in such soft materials can be very high. (northern Cape Cod, MA)



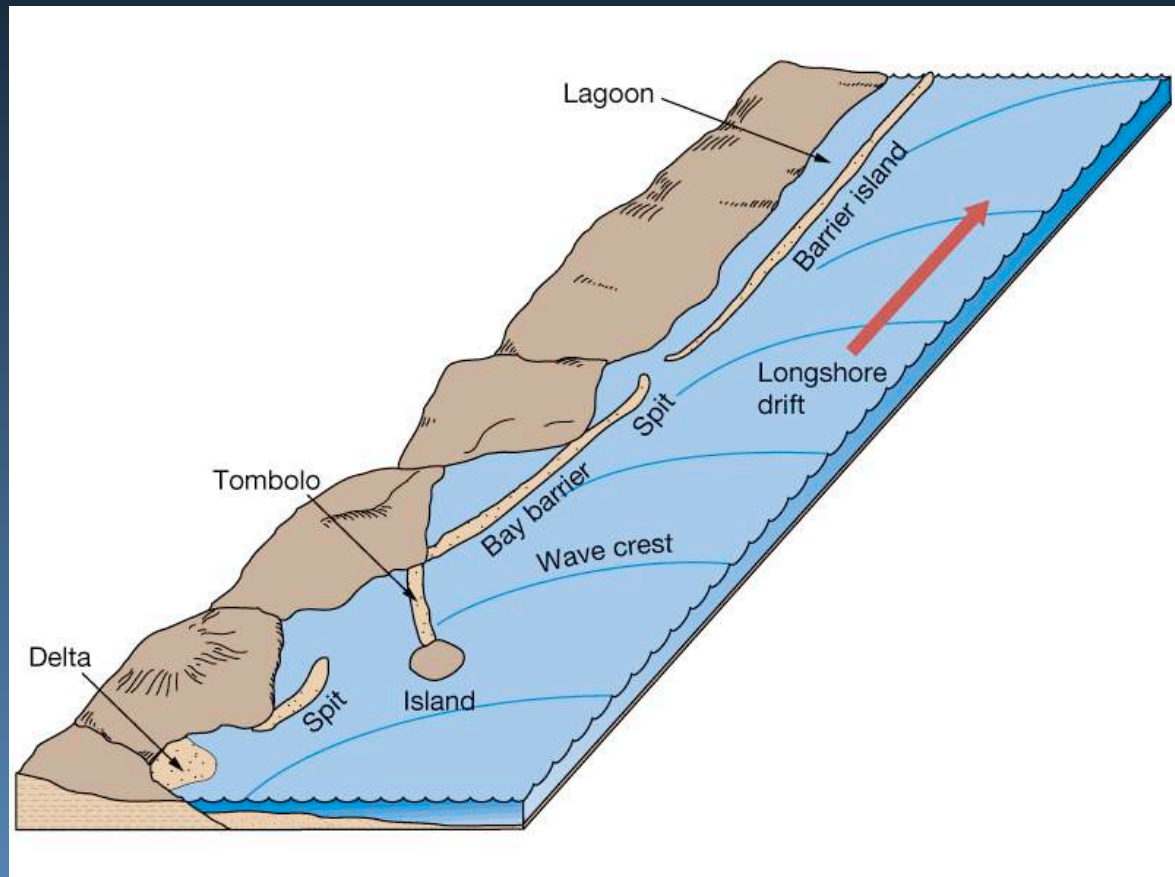
**Coste secondarie**

**Wave-dominated**

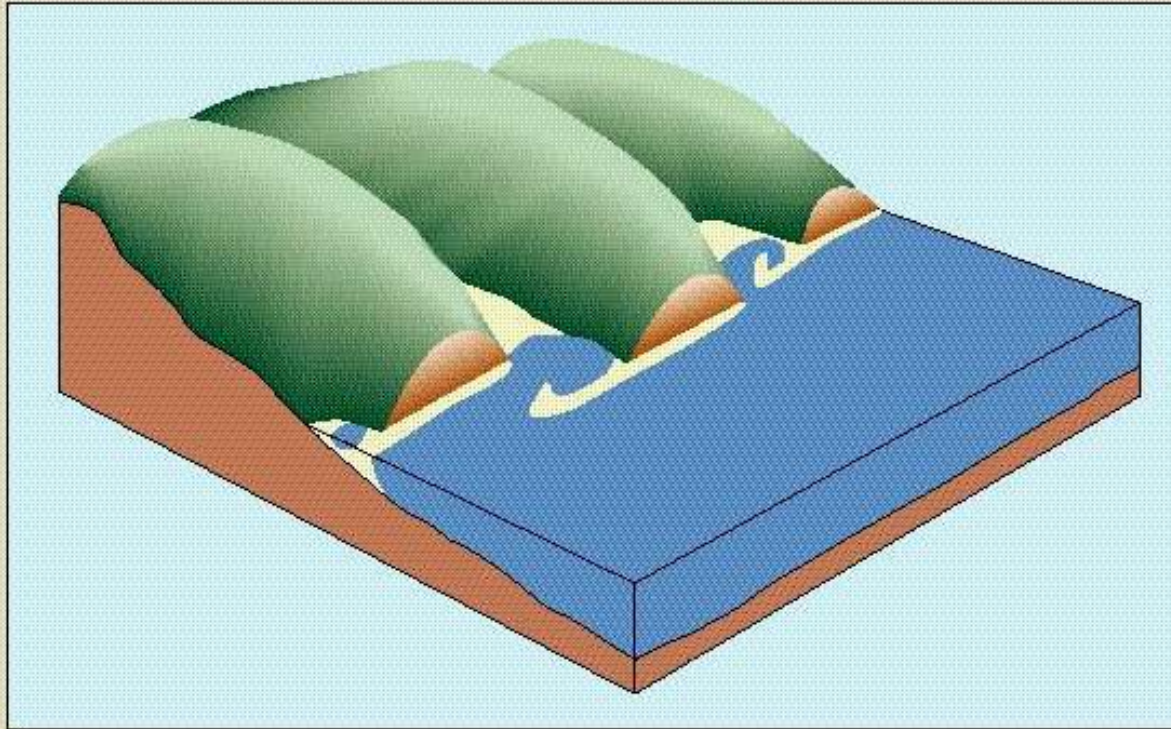
**Stadio intermedio ("Maturo")**

## Nello stadio intermedio prevalgono le forme di deposizione.....

- Freccce litorali (spit)
- Barriere-baia
- Tomboli
- Isole-barriera
- Delta
- Promontori cuspidati



## Coastal Evolution — Stage II "Maturity"



Block diagram showing an intermediate ("mature") stage of evolution of a wave-erosion (secondary) coastline. Hilly terrain has been flooded by a relative sea-level rise and the complexly embayed coastline has undergone considerable alteration by waves and currents. Headlands have been truncated, bays have been partially filled with pocket beaches and spits and bars have straightened coastline segments and produces sheltered lagoons and bays.





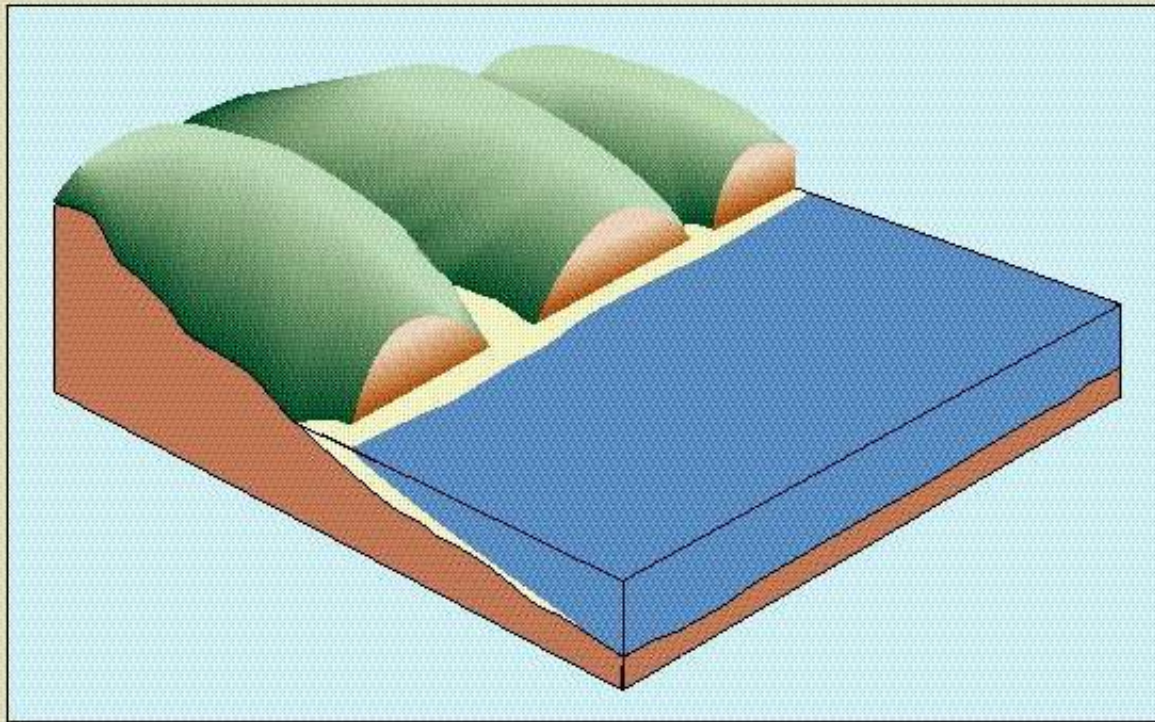
Cliffed coastline undergoing extensive wave modification which has produced a rhythmic alternation of small, rocky headlands and fairly broad sandy beaches. This coast has reached the middle stage of evolution (New South Wales, Australia)

**Coste secondarie**

**Wave-dominated**

**Stadio terminale ("Senile")**

### Coastal Evolution — Stage III "Old Age"

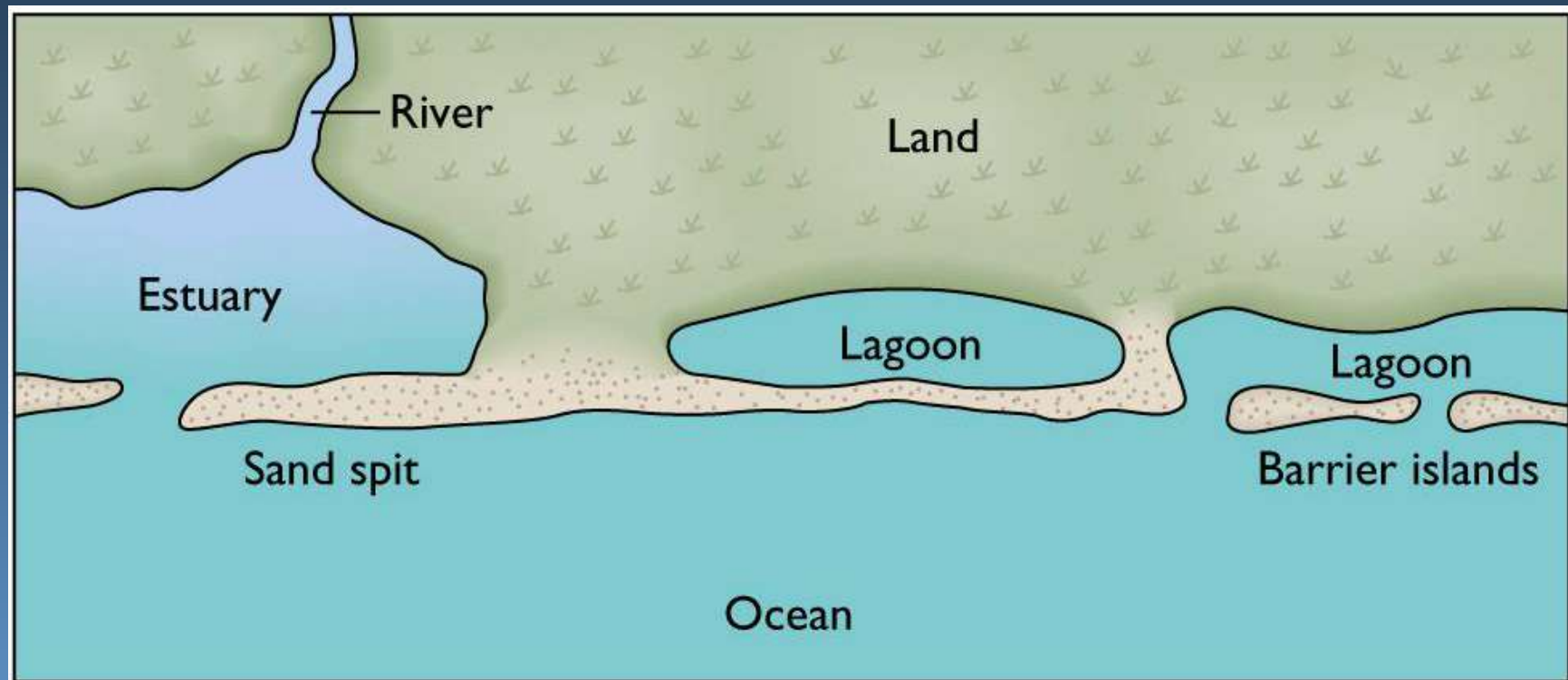


Block diagram showing a late ("old age") stage of evolution of a wave-erosion (secondary) coastline. In this example, the originally complexly embayed coastline has undergone very extensive alteration by waves and currents. Headlands have been truncated and bays have been filled to produce a continuous (straight) coastline). It is difficult to assign time value to such coastal development, however, since many factors control the rate of evolution -hardness of the geological materials involved (soft sediments or hard rocks), long-term subsidence or sea-level change patterns, strength and directions of wave input, and others.

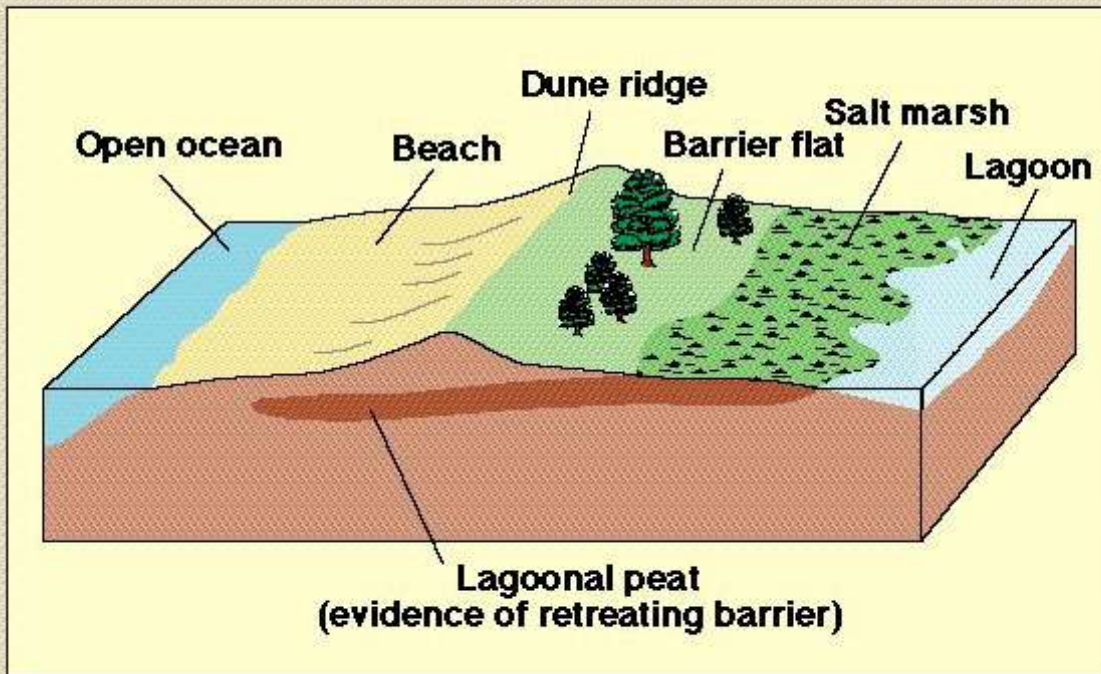


L'evoluzione delle pianure alluvionali al variare del livello del mare porta soprattutto alla migrazione dei sedimenti verso terra, segregando parte delle rientranze naturali della costa. In ambienti a dominio misto (onde-maree) si possono formare → lagune, estuari più o meno chiusi, spit ed isole barriera.

L'applicazione del concetto degli "stadi" evolutivi è in questo caso meno confacente.



## Structure of a Typical Barrier Island



Features of a barrier island. The presence of lagoonal peat under the island implies shoreward retreat of the island over older lagoonal deposits, probably as a consequence of rising relative sea level. Note the fact that the dune ridge contains most of the volume of material that lies above sea level and thus provides the main protection against storm inundation of back-dune environments. Protection of dune ridges thus should be a prime concern for coastal residents.



A satellite photograph of the barrier islands off the Texas Gulf Coast. This coastline has been straightened by deposition of sand in barrier islands and is late stage.



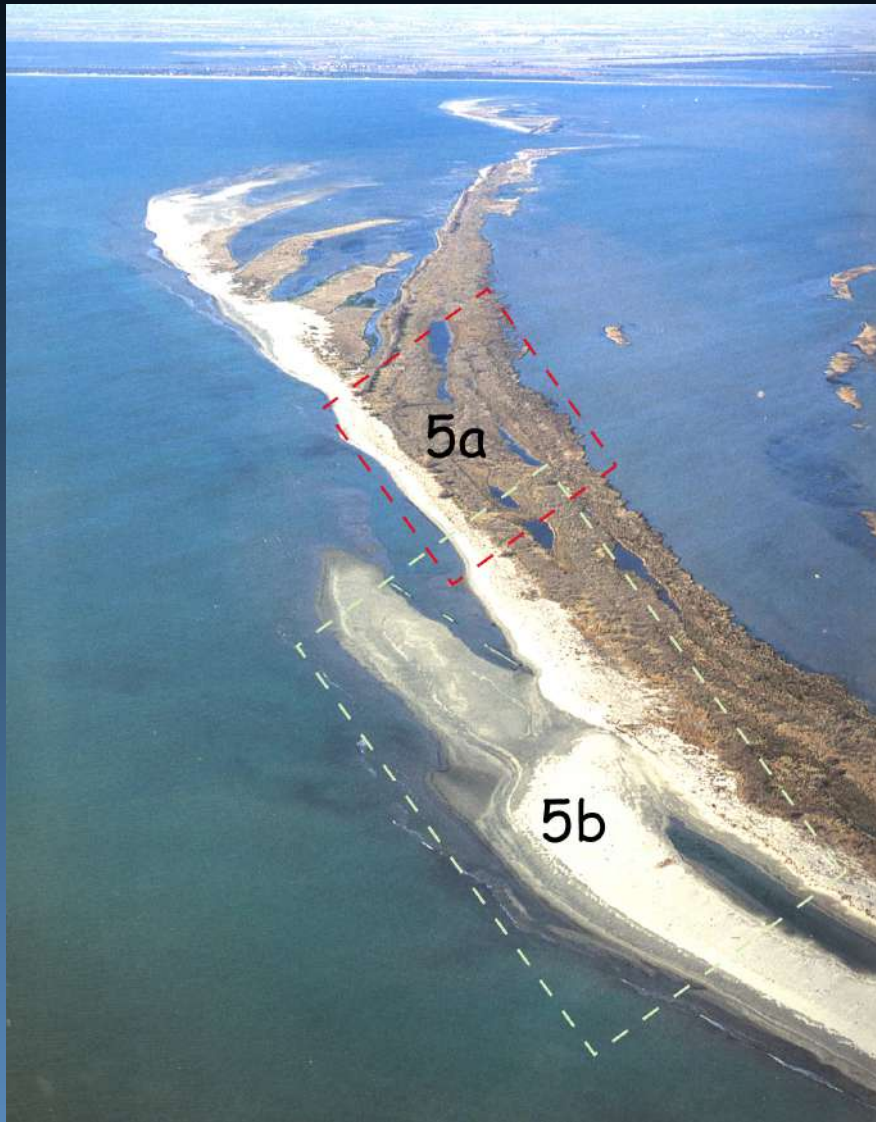
Maryland coast at Ocean City. This barrier-island coast is late stage. The barrier is heavily developed and is host to 8 million visitors a year. This city (and others similarly situated) has no effective protection against flooding and damage from severe storms. Protective structures for such islands are discussed in a separate presentation.



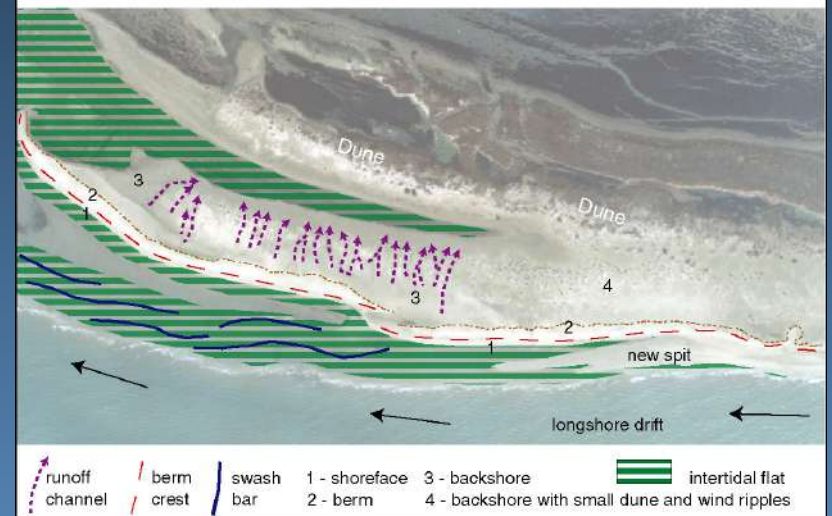
## Spit e banchi sottocostieri







250 m



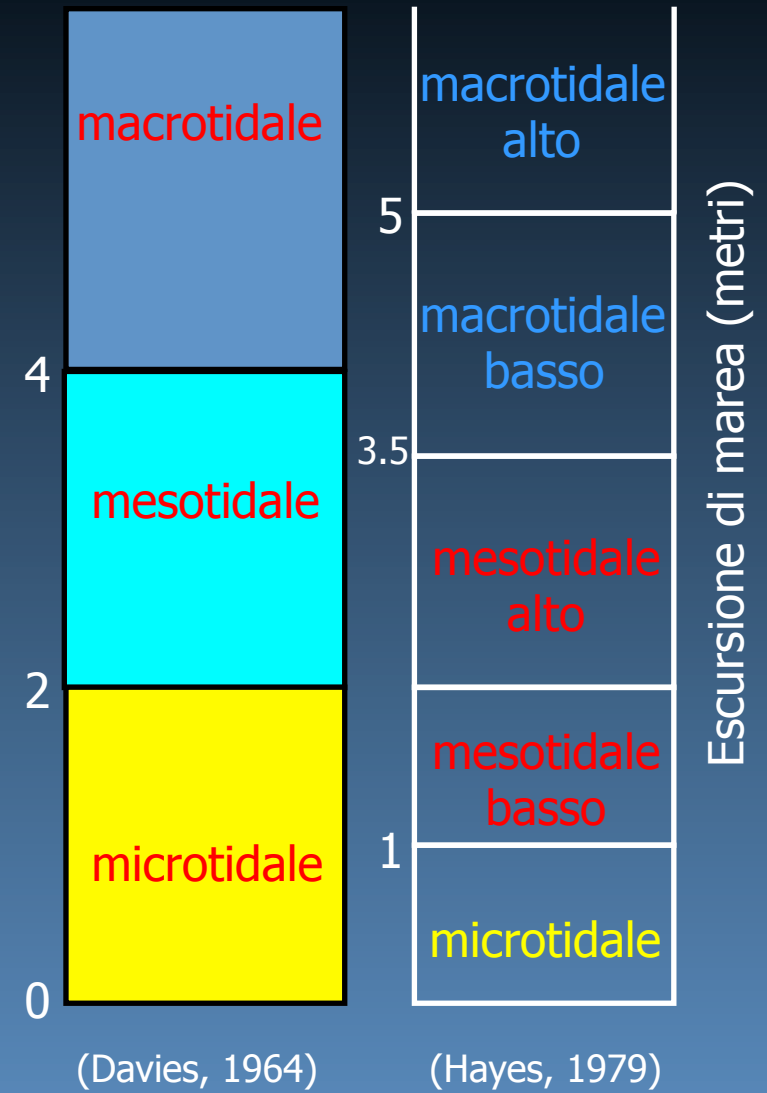
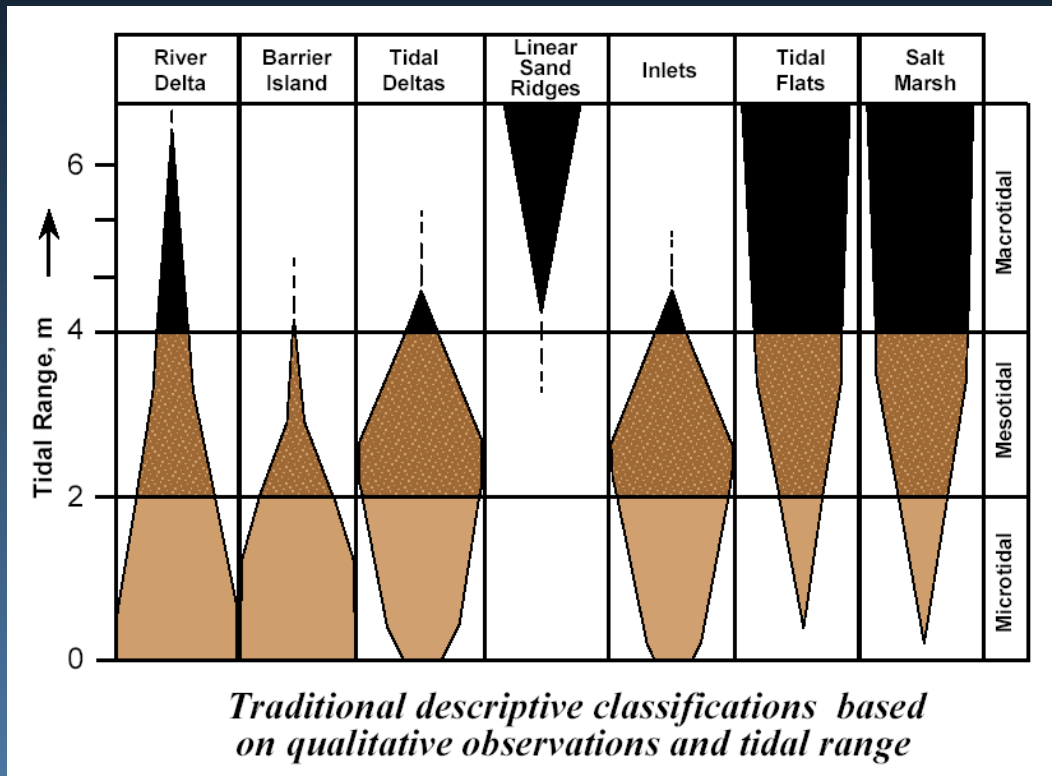
Lo scanno (spit) di Goro



**Coste secondarie**

**Dominio di Marea**

**(Tide-dominated)**



**Coste secondarie**

**Tide-dominated**

**Piane tidali (Tidal Flats)**





Low altitude, oblique aerial view (May 1988) showing large channels on macrotidal (tide range >4m) coastal flats. Wadden Sea, North Coast, Germany



Mont-Saint-Michel at low tide showing the macrotidal flats that surround this Benedictine abbey founded in 708. Mont-Saint-Michel, Gulf of Saint-Malo, Normandy coast, France



Mont Saint Michel at high tide showing the isolation of the island and abbey except for the man-made causeway (August 1992). Mont-Saint-Michel, Gulf of Saint-Malo, Normandy coast, France





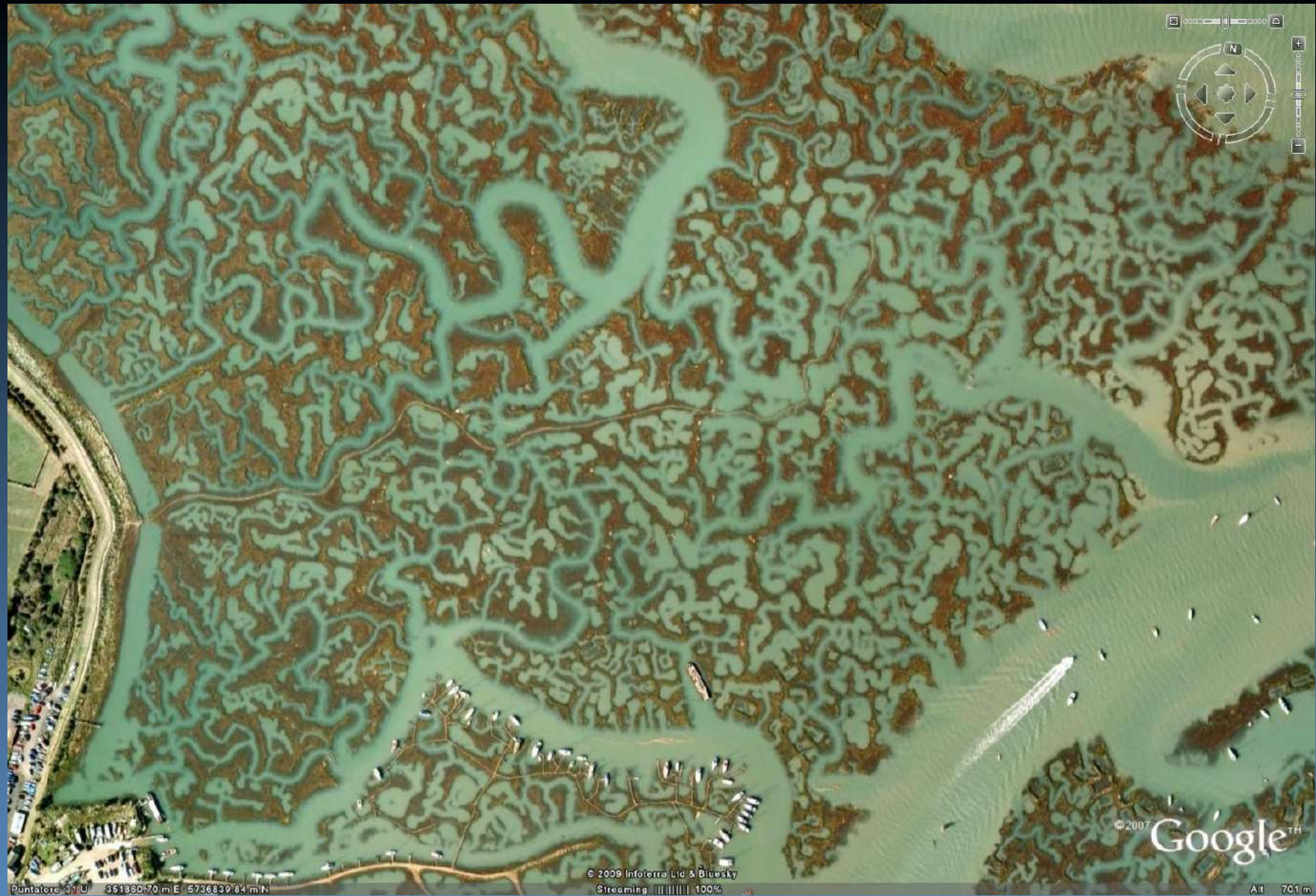


Ground view of Mont-Saint-Michel at low tide showing the broad tidal flats and channels of the Gulf of Saint-Malo that surround this rocky island isolated on a macrotidal coastline (August 1992).  
Mont-Saint-Michel, Gulf of Saint-Malo, Normandy coast, France

## Transizione tra tidal flat e salt marsh







Tollesbury marsh, UK ambiente mesotidale

**Coste secondarie**

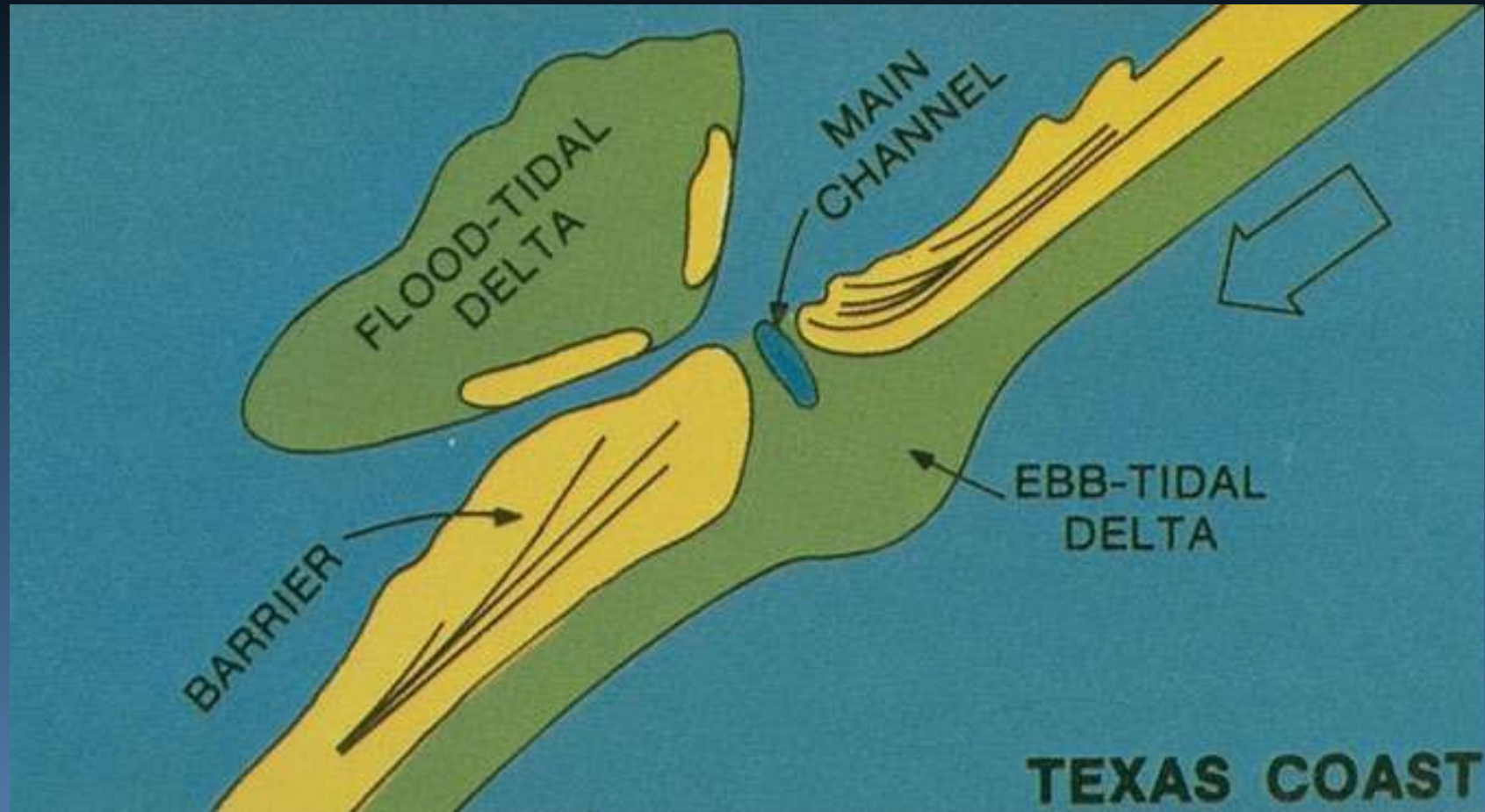
**Tide-dominated**

**Bocche e delta tidali**









**Diagrammatic view of the characteristic features of a wave-dominated, barrier island such ones found on the Texas coast. Note the tidal inlet and tidal deltas.**



Low altitude, oblique, aerial view of a flood-tidal delta associated with a barrier island tidal pass in May 1977. Large lobate sediment deposits and channels are visible beneath the water surface.  
Drum Inlet, North Carolina, U.S.A.



Waves breaking on an ebb-tidal delta formed at an inlet through a barrier island. Note beach ridges in vegetated area south of the inlet, associated with out-building of the barrier islands in the vicinity of the tidal delta. (Florida)





Space Shuttle view (April 1991). The Shatt-al-Arab -- the Tigris River delta. The complex embayments and marshes as well as the input of sediment from land in this tide-dominated delta are well shown in this view. Note the tidal channels perpendicular to the coast



Space Shuttle view (December, 1988). Overview of the gigantic tide-dominated Ganges - Brahmaputra delta that extends for nearly 400 km along the northern coast of the Bay of Bengal, Bangladesh, India. This river complex has the highest sediment yield of any river in the world; the combined flow of the two rivers also make it the world's third largest in terms of water discharge. Despite the massive volume of sediments, strong tidal currents make this a tide-dominated delta.





© ESA 2003



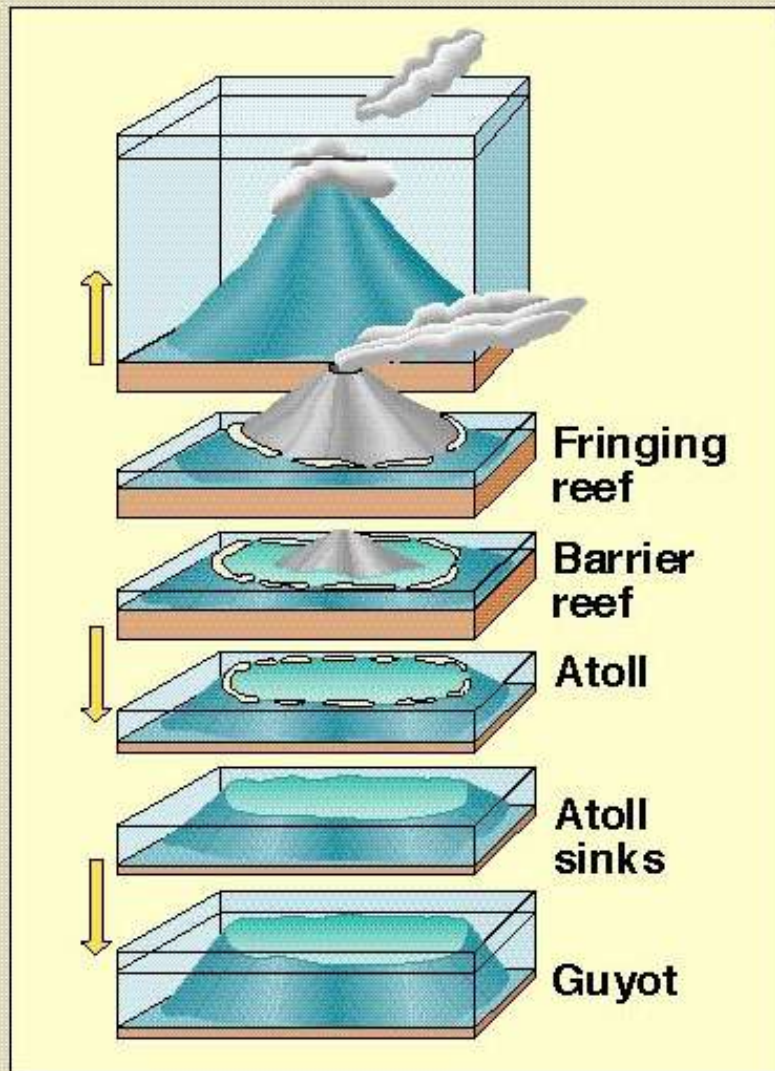


Coste secondarie

Attività biologica

Barriere coralline (Reefs)

## History of an Atoll



The history of an atoll. Volcanic activity at a spreading center builds the island, which acquires a fringing reef. As the island moves away from the spreading center, the volcano becomes inactive, the island slowly subsides, and the coral animals continue to build, forming first a barrier reef and then an atoll. If the subsidence rate increases above about 1 centimeter (1/2 inch) a year, the coral dies and the atoll becomes a guyot (a flat-topped seamount).



Space Shuttle photo (August-September 1983). Fringing reefs (pale-blue) ring a group of volcanic cones (green due to heavy tropical vegetation cover). Note the numerous tidal passes through the reefs. Tahaa and Raiatea Islands, Society Islands, south Pacific Ocean (early stage of atoll development)





Stages of atoll development. Low altitude, oblique, aerial photograph showing volcanic island core (upper right) with fringing lagoon and barrier reef/reef flat/island complex with multiple tidal passes. Intermediate stage of atoll development. (Tahiti, French Polynesia)

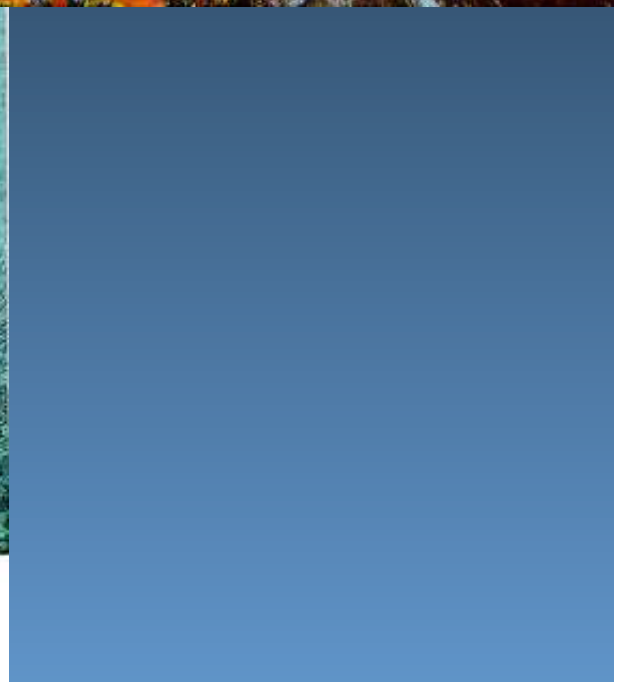
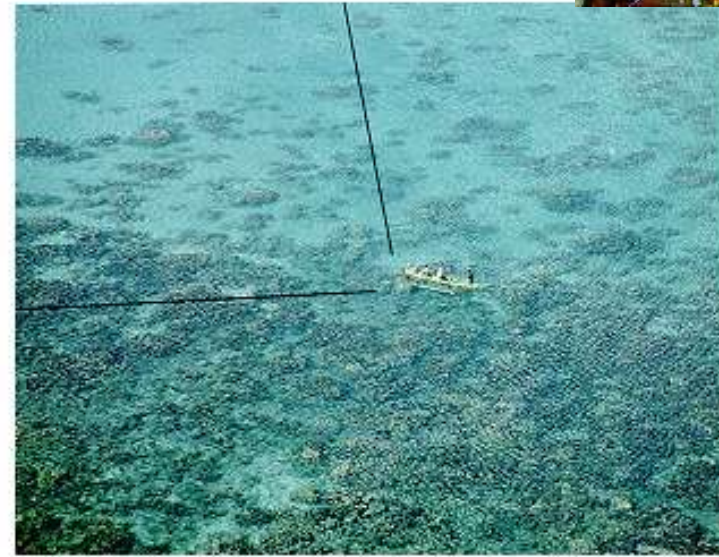


Space Shuttle photo (November 1990). A classic atoll with a reef rim and a central lagoon. Final stage of atoll development (Diego Garcia Island, Chagos Archipelago, British Indian Ocean Territory)



Barrier reef, islands, and tidal passes making up rim of a large Pacific atoll. Penrhyn Island, Cook Islands, south Pacific.





Coste secondarie

Attività biologica

Mangrovieti



